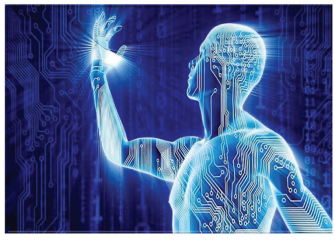
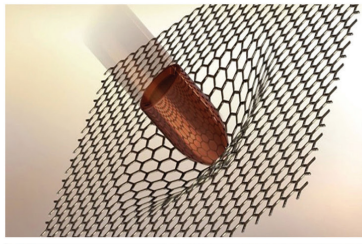
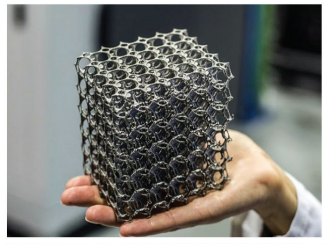
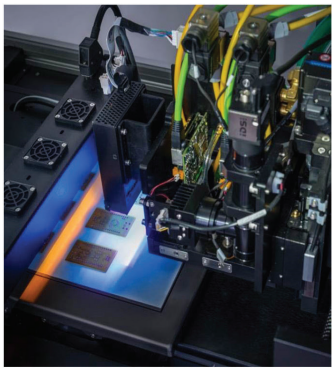
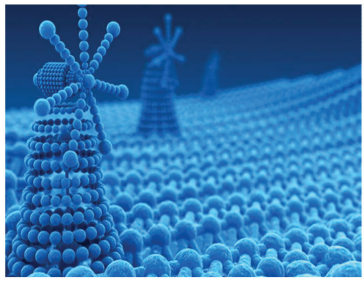
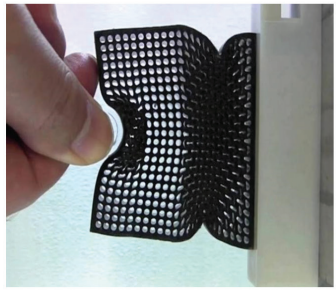
MALZEME TEKNOLOJİSİ *ve* TASARIM BİLİMLERİNE YENİ YAKLAŞIMLAR





EDİTÖRLER

Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN

Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

MALZEME TEKNOLOJİSİ VE TASARIM BİLİMLERİNE YENİ YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER
Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

MALZEME TEKNOLOJİSİ VE TASARIM BİLİMLERİNE YENİ YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER
Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Dr. Öğr. Üye. Senai YALÇINKAYA

Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 45/2021
10 ARALIK 2021

Yayıncı Sertifika No: 52866
E-ISBN: 978-605-7594-98-3
Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları

Bu bilimsel kitabının her türlü yayın hakkı GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI'na aittir. Yayınevinin yazılı izni olmadan, bilimsel/akademik kitabın tümünün veya bir kısmının elektronik, mekanik ya da fotokopi yoluyla basımı, yayını, çoğaltımı ve dağıtımı yapılamaz. ***Kitapta yer alan her bölüm ve makalenin sorumluluğu, görseller, grafikler, direkt alıntılar ve etik kurul ve kurum iznine yönelik sorumluluk ilgili yazarlara aittir. Bu yönde Oluşabilecek Herhangi Hukuki bir olumsuzlukta Yayınevi başta olmak üzere kitabın hazırlanmasına destek sağlayan kurumlar, kitabın düzenlenmesi ve tasarımından sorumlular kurum(lar) ve kitap editörleri, hakemler, düzenleme kurulu, bilim kurulu ve diğer kurullar ile yayınevi hiçbir konuda "maddi ve manevi" bir yükümlülük ve hukuki sorumluluğu kabul etmez ve etmesi istenemez; hukuki yükümlülük altına alınamaz. Her türlü hukuki yükümlülük ve sorumluluk "maddi ve manevi" yönden ilgili bölüm yazar(lar)ına aittir. Bu yöndeki haklarımızı maddi ve manevi yönden GÜVEN PULUS GRUP DANIŞMANLIK "YAYINCILIK"A.Ş. olarak ve kitap bilim/editörler kurulları adına saklı tutarız. Herhangi bir hukuki sorunda/durumda İSTANBUL mahkemeleri yetkilidir.*** Güven Plus Grup Danışmanlık bünyesinde hazırlanan ve yayınlan bu eser ISO: 10002:2014-14001:2004-9001:2008-18001:2007 belgelerine sahiptir. Bu eser TPE "Türk Patent Enstitüsü" tarafından "Güven Plus Grup A.Ş.2016/73232" ve "2015/03940" nolu tescil numarası ile markalı bir eserdir. Bu bilimsel/akademik kitap ulusal ve uluslararası nitelikte olup, İstanbul Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü İstanbul Basma Yazı ve Resimleri Derleme Müdürlüğünün Sayı: 37666426-207.01[207.02.02]-E.62175 Tarih: 21.01.2019 bilgileri ile resmi olarak belgelendirilmiştir. ***"2019 yılı akademik teşvik kriterleri kapsamında olup, 17/01/2020 tarihli ve 31011 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 16/1/2020 tarihli ve 2043 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı Uyarınca ilgili yayınlanan yönetmelik kapsamında değerlendirilmekte"*** olup, akademik teşvik kriterlerini karşılamaktadır. Çok bölümlü ve yazarlı olan bu bilimsel kitabı E-ISBN'li olup Kültür Bakanlığı Milli Kütüphaneler tarafından ve 18 Farklı Dünya Ülkesiyle Anlaşmalı olan Milli Kütüphanenin E Erişim sistemi tarafından da taranmaktadır. Bu kitap maddi bir değer ile alınıp satılamaz. Kitap bölüm yazarlarından, destekleyenlerden, kitap emeği geçenlerden Güven Plus Grup A.Ş. Yayıncılık herhangi bir maddi bir gelir elde etmemiş ve talepte bulunmamıştır. Kitap yer alan bölüm, makalelerden alıntı yapmak ve ilgili bölüm ile makaleye atıf yapılmak koşulu ile kaynak gösterilmek üzere bilimsel ya da ilgili araştırmacılar tarafından kullanılabilir. ***Yayın evimiz ve kitap editörler kurulu kişisel verilerin korunması ve özel hayatın gizliliği kanunlarına uygun hareket eder. Bilimsel kitap bölüm yazarlarının da bu yönde hareket etmesini zorunlu kılar. Kişisel verilerin korunmasına ilişkin olarak işbu akademik/bilimsel kitabına sahip olan bireylerin ilgili kanun, yönetmelik ve uygulamalara göre hareket etmesi bir zorunluluktur. Bunun aksi hareket edenler hakkında oluşan hukuki, maddi ve manevi sorun ile zorunlulukları peşinen kabul etmiş sayılır.***

Metin ve Dil Editörleri
Doç. Dr. Gökşen ARAS (Türkçe – İngilizce)
Dr. Öğr. Üye. L. Santhosh KUMAR (İngilizce)

Kapak ve Grafik Tasarım
Prof. Dr. Pelin AVŞAR KARABAŞ
Öğr. Gör. Ozan KARABAŞ
Ozan DÜZ

Sayfa Düzeni
Burhan MADEN

Baskı-Cilt
GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul Tel: +902128014061- 62 Fax:+902128014063 Mobile:+9053331447861

KİTAP İMTİYAZ SAHİBİ
GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul Tel: +902128014061-62-63 - +905331447861 info@guvenplus.com.tr, www.guvenplus.com.tr

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ 1

İMPLANT MALZEMESİ ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERDE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN KOROZYON DAYANIMINA ETKİSİ 2
Emin ÖZDEMİR, Abdulkadir GÜLLÜ

KARBON NANOTÜP KATKISININ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ 32
Mustafa Hasan IBRAHIM IBRAHIM, Özgür DEMİRCAN

EOG SİNYALİ İLE NREM, REM VE UYANIKLIK EVRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI 50
Mesut MELEK

Ti6Al4V MALZEMENİN DELİNMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI 73
Bahattin YILMAZ, Gültekin UZUN, Abdulkadir GÜLLÜ

BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI İÇİN BİYOÇÖZÜNÜR MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİMİ 102
Tuğçe TEZEL, Volkan KOVAN

KAYNAĞINDAN SON KULLANIMA BOR MİNERALLERİ 128
Çetin ÇAKANYILDIRIM, Metin GÜRÜ

METALURJİ PERSPEKTİFİNDE 7075 AL ALAŞIMINA UYGULANAN RRA ISIL İŞLEMİNDEKİ SON GELİŞMELER 167
Gözde ALTUNTAŞ, Bülent BOSTAN

TALAŞLI İMALATTA BEYAZ TABAKA..... 192
Emin ÖZDEMİR

4D BASKI TEKNOLOJİSİ VE GELECEKTEKİ UYGULAMALAR..... 221
Faruk MERT, Özge OLMUŞ

KOROZYON VE KOROZYONDAN KORUNMA 249
Zeki ÇİZMECİOĞLU, Senai YALÇINKAYA

HİDROLİK SİSTEMLERDE AŞIRI ISINMANIN ANALİZİ 289
Hayriye Sevil ERGÜR

POLİGON MİL-GÖBEK BAĞLANTILARI: GEOMETRİ, HESAP VE TASARIMI..... 318
Volkan KOVAN, Tuğçe TEZEL

BAZI POLİMERLERİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ TAHMİNİ ANALİZİ..... 337
Yusuf ŞAHİN, Senai YALÇINKAYA

GEMİ DİZEL MOTORLARINDA NO_x EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 352
Kubilay BAYRAMOĞLU , Semih YILMAZ

SEVİYELENDİRİLMİŞ SÜREÇ DENETİMİ (LPA): HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ..... 386
Atakan GERGER

MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI, KULLANIM ALANLARI, KOROZYONU ve KOROZYONDAN KORUNMA YOLLARI 419
Canser GÜL, Sevda ALBAYRAK

BULANIK MANTIK VE GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE HATA TÜRLERİ ve ETKİLERİ ANALİZİ: ISI REZİSTANSI İMALATI UYGULAMASI..... 445
Bilgenur ÖZGAN, Tülay KOKUSUZ POLAT

ÖNSÖZ

Mühendislik alanında gerçekleşen teknolojik ilerlemeler hızlı artmaktadır. Ulusal ve Uluslararası nitelikte faaliyetlerle oldukça prestij kazanmış olan Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları tarafından çıkarılan bu kitap, "Malzeme Teknolojisi ve Tasarım Bilimlerine Yeni Yaklaşımlar", adıyla çeşitli konuları ele alan, birçok deneysel ve teorik çalışma, analiz ve değerlendirmeleri kapsayan on sekiz farklı bölümden oluşmaktadır.

Kaynağından son kullanımına kadar bor mineralleri, karbon nanotüp katkisinin karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi, implant malzemesi östenitik paslanmaz çeliklerde yüzey bütünlüğünün korozyon dayanımına etkisi, Al7075 alaşimina uygulanan ısıl işlemindeki son gelişmeler, polimerlerin tribolojik davranişlarinin tahmini analizi vb. daha pek çok önemli konuda araştırmalar ve deneysel çalışmaları bulacaksınız. Kitapta yer alan her bir bölüm değerli akademisyenlerin, araştırmacıların titizlikle ortaya koyduğu özgün çalışmalardan oluşmaktadır.

Mühendislik teknolojilerinin birçok ilgi çekici konularına değinilen bölümlerin yer aldığı kitap, sayısız araştırmacının akademik çalışmalarına ışık tutacaktır. Gerek Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK) kataloglarında gerek kamu kurumu kütüphaneleri gerekse kişisel arşivlerde oldukça değerli bir yer bulacaktır.

Bu eserin gerçekleşmesinde; emeği geçen saygı değer yazarlarımıza, hakemlerimize, teknik ekibe ve kitabımızı edinen siz sevgili okurlarımıza teşekkürlerimizi sunarız.

Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA
Aralık 2021

İMPLANT MALZEMESİ ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERDE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN KOROZYON DAYANIMINA ETKİSİ

Emin ÖZDEMİR[1], Abdulkadir GÜLLÜ[2]

Öz: Östenitik paslanmaz çelik alaşımları medikal implant ve cihaz üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, özellikle AISI 316L paslanmaz çelik başta olmak üzere, mükemmel korozyon dirençlerinden dolayı titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının ucuz alternatifi olarak uzun yıllardır cerrahi implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek oranda saf ve temiz bir malzeme olan AISI 316LVM alaşımı medikal kalite olarak son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Diğer yandan östenitik paslanmaz çelikler yüksek dayanım, yüksek süneklik, düşük termal iletkenlik, gerinme, yüksek gerinme hızlarına ve pekleşmeye duyarlılıklarının yüksek olması sebebiyle özellikle talaşlı imalatta zor işlenen malzemeler olarak kabul edilirler. İşlenebilirlik problemlerinden dolayı, implant malzemesinin yüzeyinde oluşan farklı potansiyele sahip bölgelerin doğurduğu korozyon tipleri sonucu, vücut içine kontrolsüz iyon salınımı nedeniyle hem biyolojik uyumluluk hem de mekanik bütünlük olumsuz yönde etkilenir. Çünkü medikal implantların güvenilirliği büyük ölçüde yüzey kalitesine ve yüzey katmanındaki fiziksel durumuna bağlıdır. İmplant üretimi gibi kritik yapı komponentlerinin işlenmesinde ve özellikle yüksek güvenilirlik seviyesine ulaşmak hedeflendiğinde yüzey bütünlüğü özellikleri ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple metalik implantların biyouyumluluklarının ve fonksiyonel performanslarının geliştirilmesi için imalat aşamasında yüzey işlemleri anahtar rol oynamaktadır. Bu

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İstanbul / Türkiye emin.ozdemir@iuc.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6517-9270

2 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, agullu@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1088-4105

bölümde, östenitik paslanmaz çeliklerin; yüzey-altı tabaka mikroyapı, tane boyutu, pekleşme, mikrosertlik, faz dönüşümü, kristalografik yönelim ve yüzey pürüzlülüğünden oluşan yüzey bütünlüğü özelliklerinin korozyon dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca östenitik çeliklerin korozif ortamlarda karşılaştıkları problemler, nedenleri ile birlikte irdelenerek, korozyon dayanımının geliştirilmesine ilişkin önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz Çelik, İmplant, Yüzey Bütünlüğü, Korozyon, Biyouyumluluk

GİRİŞ

Tıpta yaygın kullanılan metalik implant malzemeleri, çok iyi özelliklerinin kanıtlanmasına karşın, birçok durumda hala gereksinimleri karşılayamamaktadır. Bu malzeme grubu için temel kriterlerden biri, korozyon direncini ölçen biyolojik toleranstır. Metalik biyomalzemelerin düşük korozyon direnci, metalozise (metalik aşınma debrislerinin infiltrasyonu) ve malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasına yol açabilir. Özellikle AISI 316L sınıfı başta olmak üzere, östenitik paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon direncinden ve ucuz olmasından dolayı, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının yerine uzun yıllardır cerrahi implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mükemmel korozyon direncinin yanı sıra, diğerlerine nazaran yüksek mukavemeti ve daha kolay işlenebilirliği ile bilinmesine rağmen birçok uygulama için korozyon direnci hala yetersizdir. Mevcut mekanik özellikler korunarak biyouyumluluk ve korozyon direncinin iyileştirilmesi için bu malzemeler çeşitli yüzey işlemlerine tabi tutulurlar (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009; Pekşen ve Doğan, 2011).

Ortopedik implant malzemesi olarak kullanıldıklarında iyi korozyon direncinin yanısıra vücut içerisinde aşınma direnci ve yüzey mukavemetinin de yüksek olması istenir. İşlenebilirlik problemlerinden dolayı AISI 316L implant malzemesinin yüzeyinde oluşan farklı potansiyele sahip bölgelerde, zamanla yüksek potansiyele sahip bölgeden düşük potansiyelli bölgeye iyon akışı sonucu galvanik korozyon meydana gelir (Pekşen ve Doğan, 2011). Vücut içinde zamanla korozyona uğrayan östenitik paslanmaz çelik implantın; demir, krom ve nikel iyonu salınımı gerçekleştirdiği rapor edilmiştir. Krom ve özellikle nikel iyonları

toksik ve alerjik olup, vücutta kanser yapıcı etkiye sahiptirler (Bertolini vd., 2009). Özellikle implantın yüzeyinde başlayan çukurcuk korozyonu, kontrolsüz iyon salınımı nedeniyle hem biyolojik uyumluluğu hem de yüzeyde oluşan yoğun stres noktaları nedeniyle mekanik bütünlüğü olumsuz yönde etkileyebilir. Aslında, çukurcuk korozyonu, birçok uygulama için uygunlukları ve dayanıklılıkları bilinen paslanmaz çeliklerde en yıkıcı yerel korozyon türlerinden biri olarak sınıflandırılır. Bu nedenle, bir yandan çukurcuk korozyonunun mekanizmasını ve doğasını ve bir yandan da oluşumunu kontrol eden temel faktörleri anlamak için sayısız çaba gösterilmiştir (Shahryari vd., 2009).

Anatomik benzerlik nedeniyle genellikle seri olarak üretilen; vida, diz kapağı ve kalça (femur başı) implantları ile ortopedik medikal cihazlar gibi karmaşık şekilli parçaların imalatı için; döküm, dövme, toz metalürjisi ve toz enjeksiyon kalıplama tekniklerinin akabinde, tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaşlı imalat yöntemlerinin kullanıldığı bildirilmiştir (Klocke, 2001; Yalçın ve Temiz, 2012). Mevcut mekanik özellikleri korunarak biyouyumluluk, aşınma ve korozyon özelliklerini iyileştirilmek ve metal iyonu salınım sürelerini geciktirilebilmek için bu malzemelere kaplama, kumlama, elektropolisaj vb. ek yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009; Hermawan vd., 2011).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, kimyasal yapıyı bozmadan mevcut malzemelerin APD (Aşırı Plastik Deformasyon) yöntemleri ile yüksek mukavemetli hâle getirilebileceğini göstermiştir. Böylece alaşımlandırılmaya gerek kalmadan, tam biyouyumlu olan saf metaller bile eşdeğer mukavemet değerlerine ulaştırılabilmektedirler (Pürçek vd., 2012). APD yöntemleri ile yüzey ve yüzey altı tabakada ultra ince ve hatta nanometre boyutlu taneler üreterek birçok malzemenin yüzey bütünlüğü özelliklerinin geliştirebileceği gösterilmiştir (Klocke vd., 2018; Pu vd., 2011; Tang vd., 2017; Yang vd., 2013). Ürünlerin fonksiyonel performansını iyileştirmek için, örneğin, Yüzeyde Mekanik Yıpratma İşlemi (YMYİ) gibi Aşırı Plastik Deformasyon (APD) işlemleri uygulanır (Özçatalbaş ve Baş, 2006). Bununla birlikte son yapılan çalışmalarda, talaşlı imalat sürecinin de bir APD süreci olarak kategorize edilebileceği gösterilmiş olup, yüzeyde nano (ultra ince) tane yapısı oluşturarak fonksiyonel per-

formansın geliştirilebileceği bildirilmiştir (Özçatalbaş ve Baş, 2006; Qi vd., 2009; Shi ve Han, 2008; Tang vd., 2017; Yang vd., 2011).

Diğer yandan implant üretimi gibi kritik yapı komponentlerinin işlenmesinde ve özellikle yüksek güvenilirlik seviyesine ulaşmak hedeflendiğinde, yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, mikro yapı, mikro sertlik, yorulma vb. özellikleri içeren yüzey bütünlüğü ön plana çıkmaktadır (Outeiro, 2006; Field ve Kahles, 1964). Yüzey bütünlüğünde sağlanacak gelişmeler, gerek sterilizasyon aşamalarına karşı gerekse vücut içi servis performansına karşı, hem genel hem de lokal korozyon direncinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır (Bertolini vd., 2009).

YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ

Yüzey bütünlüğü; imalat işlemleri sonucu oluşturulan yüzeyin ve yüzey altı tabakanın çeşitli yönlerini kapsayan birçok faktörü içerir. Yüzey kalitesini ifade etmek için kullanılan yüzey bütünlüğü (YB) terimi ilk kez 1964 yılında Field ve Kahles tarafından ileri sürülmüştür (Field ve Kahles, 1964). Üretilen komponentlerin fonksiyonlarına ve kullanımlarına bağlı olarak yüzey ve yüzey altı özellikleri, servis ömrü açısından kritik bir özelliktir. Bu özelliklere bağlı olarak artan veya azalan, aşınma, korozyon ve yorulma direnci, fonksiyonel performansı etkilemekte ve sonuç olarak, üretilen komponentlerin çeşitli endüstrilerdeki etkin ömrünü belirlemektedir (Jawahir vd., 2014). Yüzey bütünlüğü genel olarak talaşlı imalat veya diğer yüzey işleme operasyonları ile üretilen yüzeylerin; yüzey kalitesi, yüzey topografyası, mikroyapısı, mikrosertliği, yorulma testi ve diğer mekanik testleri içeren çeşitli özelliklerini ifade etmektedir (Field ve Kahles, 1964). Field vd, işlenmiş yüzeylerin karakteristik özelliklerini üç farklı düzeyde incelemek ve değerlendirmek için Tablo 1'de görünen sistematik bir yöntem geliştirmişlerdir (Field vd., 1972).

Tablo 1. Yüzey Bütünlüğünün (YB) Farklı Seviyeleri ve Özellikleri (Field vd., 1972)

Minimum YB verileri	Standart YB verileri	Genişletilmiş YB verileri
Yüzey bitirme Makroyapı (10x ve küçük) Makro çatlaklar Makro aşınma-dağlama Mikroyapı Mikro çatlaklar Plastik deformasyon Faz dönüşümü Taneler arası korozyon Çukur, yarık, çıkıntı BUE (yığıntı talaş) Erimiş ve birikmiş katman Seçici dağlama Mikrosertlik	Minimum YB verileri Yorulma testleri (tarama) Gerilmeli korozyon testleri Kalıntı gerilme ve çarpılma	Standart YB verileri Yorulma testleri (tasarım verilerini elde etmek için genişletilmiş) İlave mekanik testler Çekme Stres kırılması Sürünme Diğer spesifik testler (Yataklama performansı, kayma sürtünmesinin değerlendirilmesi, yüzeylerin sızdırmazlık özellikleri)

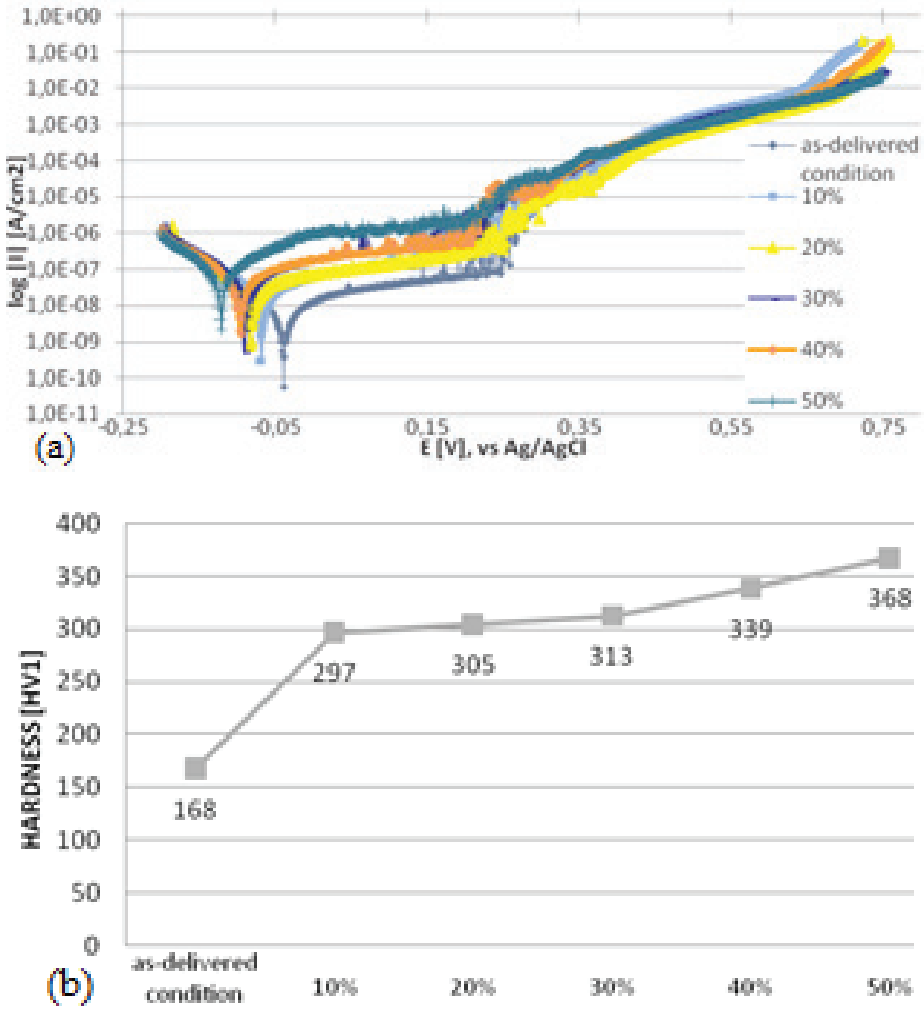
Yüzey bütünlüğü özellikleri arasından yüzey katmanlarındaki başkalaşmalar ve mikroyapının yanı sıra yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik, biyomedikal implantların gerekliliklerinden dolayı biyomalzemeler gibi kritik yapı komponentlerinin performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu yüzden yüzey bütünlüğünün malzemelerin fonksiyonel performansı üzerindeki etkilerini ayrıntılı incelemek ve yüzey bütünlüğünü geliştirmek, birçok araştırmacının uzun zamandır hedefi olmuştur.

YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN KOROZYONA ETKİSİ

Yapılan araştırmalar sonucu vücut içi implant uygulamalarında, biyouyumluluk açısından implant yüzey bütünlüğünün önemine vurgu yapılmaktadır. İşlenmiş bir yüzeyin yapısı, implant kalitesi açısından en önemli kriterlerden biridir (Bronzino vd., 2000; Güven, 2014; Hermawan vd., 2011; Köse, 2016; Vladkova, 2010). İşlenmiş parça yüzeylerinin tri-

bolojik ve biyouyumluluk özellikleri, yüzey dokusundan birinci derecede etkilenmekte olup, malzemelerin üretimi esnasında kullanılan imalat parametrelerinin yüzey hassasiyetini etkilediği bilinmektedir (Griffiths, 2001; Tekaslan vd., 2008). Ayrıca yüzey bütünlüğü, üretilen komponentlerin yorulma ömrünü, aşınma ve korozyon direncini de etkilemektedir (M'Saoubi vd., 2008).

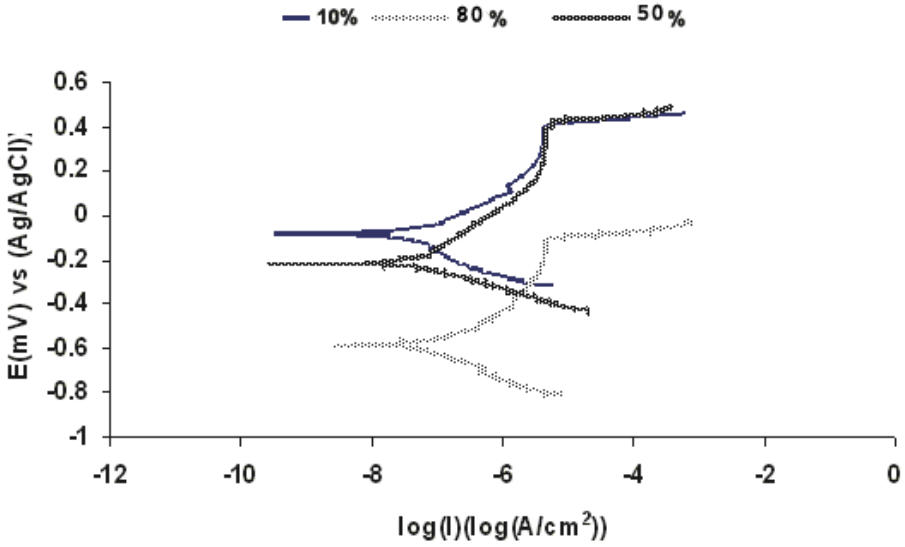
Soğuk deformasyon oranının AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin korozyon direncine etkisinin değerlendirildiği bir araştırmada, deforme olmuş numunelerin korozyon direncinde açık bir düşüş olduğu ortaya konulmuştur. Sonuçlar, östenitik çeliğin korozyon direncinin, deformasyonla birlikte artan sertleşme derecesinde azaldığını göstermektedir (Şekil 1). Deformasyon sertleşmesine maruz kalmış çeliğin daha kısa termodinamik dayanıklılığının korozyon oluşma olasılığını arttıracağı belirtilmiştir. Kısalan termodinamik dayanıklılığın, artan iç enerjiden kaynaklandığı açıklanmıştır. Ayrıca kötüleşen korozyon direncinin bir başka nedenin pasif katman yırtıkları olduğu bildirilmiştir (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009).



Şekil 1. Soğuk Deformasyonun; (a) Korozyona Etkisi (b) Sertliğe Etkisi (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009)

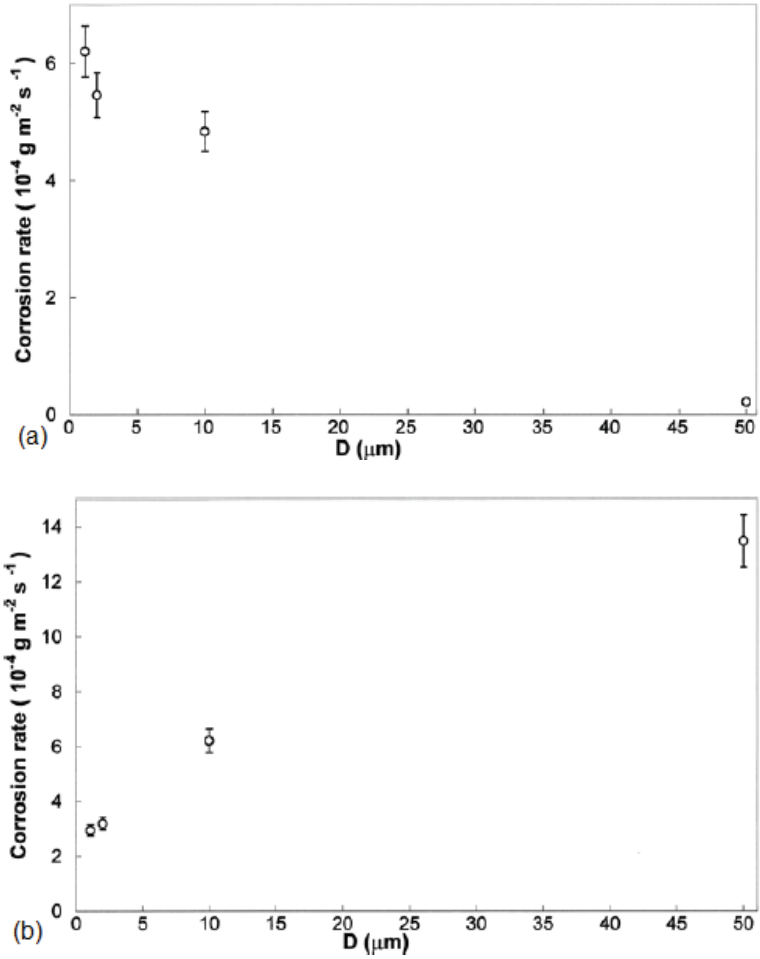
AISI 316L paslanmaz çeliğin soğuk deformasyona maruz bırakıldığı bir başka araştırmada; malzemenin mikroyapısı, mikro sertliği ve korozyon direnci değerlendirilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere korozyon potansiyeli değeri, %10 soğuk deformasyona sahip numune için -110 mV ve %80 soğuk deformasyona sahip numune için –590 mV değerine düşmüştür. Malzemede farklılaşmış deformasyon derecesine sahip

bazı bölgelerin mevcut olduğu durumlarda, bu tür bir potansiyel farkın korozyon oluşumu için yeterli olacağı bildirilmiştir. Korozyon akımı şiddeti %10 soğuk deformasyon için 42 nA/cm²'den 7 kat artarak en yüksek soğuk deformasyona sahip örnek için 320 nA/cm²'ye yükselmiştir. Sonuç olarak, yükselen derecede soğuk deformasyonla birlikte artan sertleşme derecesinde 316L çeliğinin genel korozyon direncinin, azaldığı bildirilmiştir (Bakhtiari ve Berenjani, 2015).



Şekil 2. AISI 316L Numunelerin Tafel Polarizasyon Eğrileri (Bakhtiari ve Berenjani, 2015)

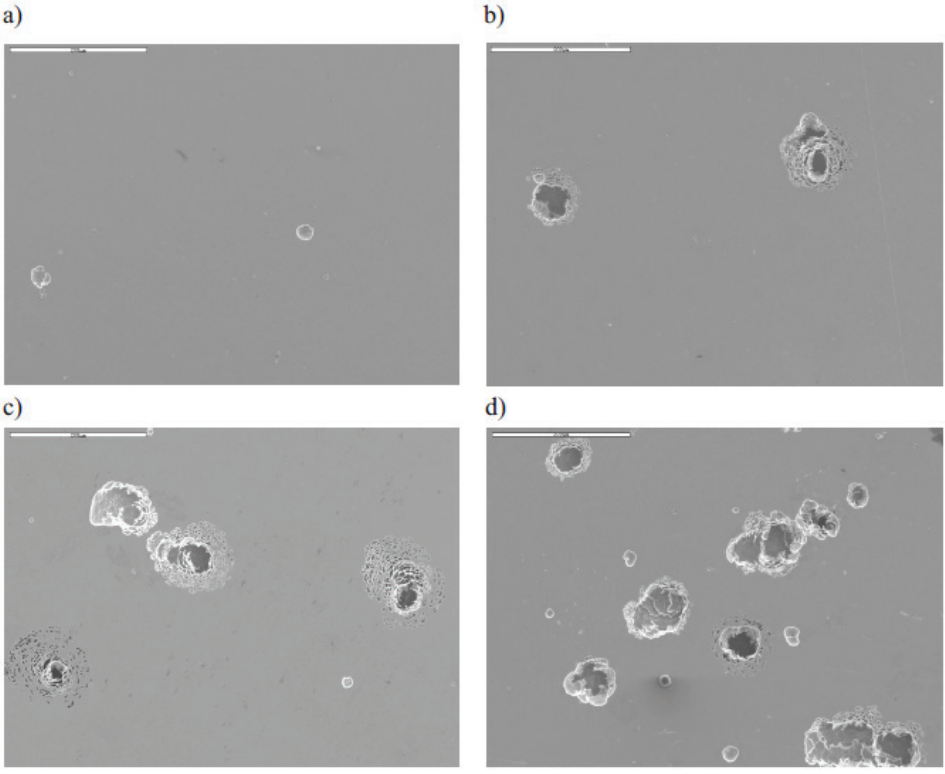
Genelde medikal cihaz yapımında ve vücut dışı implant uygulamalarında kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliğin ultra ince taneli tipinin; genel korozyon (GC), taneler arası korozyon (IGC) ve çukurcuk korozyonu (PC) davranışı incelenerek, standart AISI 304 paslanmaz çeliğine ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Tane Boyutunun Etkisi a) Genel Korozyon Hızına b) Taneler Arası Korozyon Hızına (Schino ve Kenny, 2002)

Şekil 3(a)'daki korozyon testleri sonuçlarına göre, ultra ince taneli AISI 304 çeliğinin genel korozyon direnci, tane incelmesinden zarar görmüş olup, tane boyutu azaldıkça korozyon hızının arttığı bildirilmiştir. Bu durum, tane sınırlarında yoğunlaşan kusurlara ve tane incelmesi ile artan tane sınırı yüzey alanının pasif film dengesizleşmesine sebep olmasına atfedilmiştir (Schino ve Kenny, 2002). Diğer yandan tanecik ebadı azaldıkça taneler arası korozyon hızının da azaldığı bildirilmiştir (Şekil 3. b). Taneler arası korozyon, karbürlerin tane sınırlarında çökel-

mesinden kaynaklandığı için, korozyon hızı, birim tane sınırı alanı başına düşen karbürlerin hacimsel oranından etkilenir. Kaba taneli yapıya göre ince taneli yapıda artan tane sınırı ve tane sınır alanı ile IGC hızının düştüğü belirtilmiştir (Schino ve Kenny, 2002).

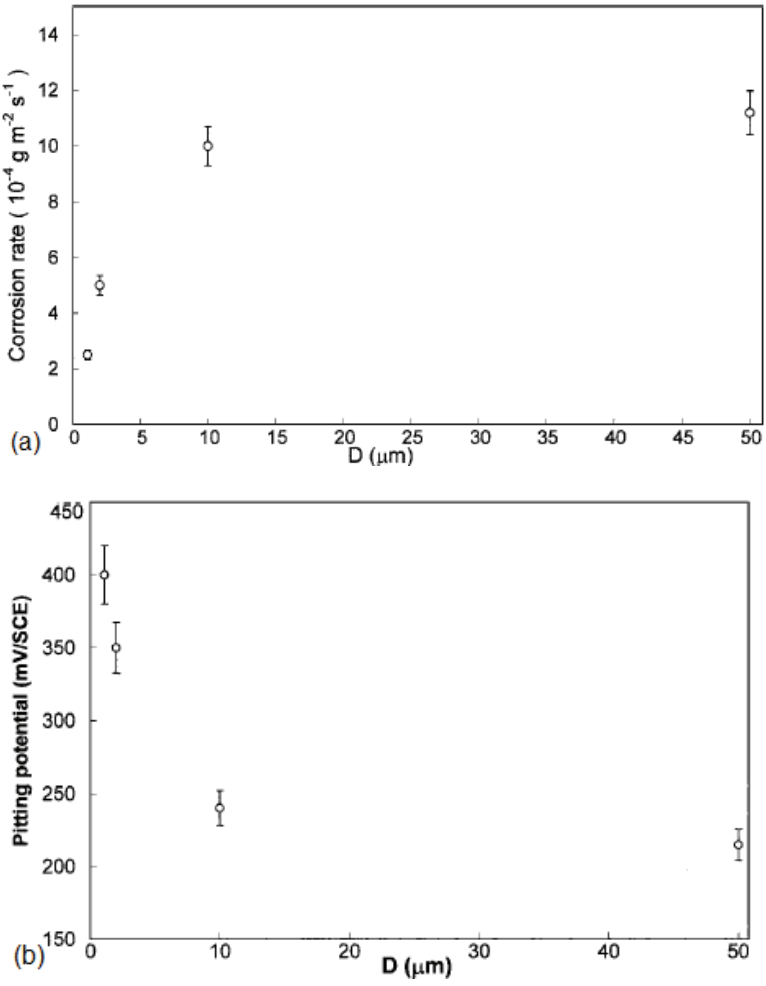


Şekil 4. Korozyon Testleri Sonrası Numune Yüzeylerinin SEM Görüntüsü; a) Deformasyona Uğramamış, b) %20, c) %30, d) %50 Deformasyon Oranları (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009)

Yüzeyin çukurcuk korozyonuna duyarlılığı, çeşitli uygulamalarda paslanmaz çeliklerin seçimiyle ilgili en büyük sorunlardan biridir. Örneğin, biyomedikal implant uygulamalarında yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin seçimi, fizyolojik ortamlarda sundukları çukurcuk direnci tarafından doğrudan belirlenir. Bununla birlikte, AISI 316L ile ilişkili problemlerden biri de, nispeten yüksek miktarda sülfür varlığı olup, çukurcuğa duyarlı MnS inklüzyonlarının (safsızlıklarının) oluşmasına neden olmasıdır. Bu nedenle, 316LVM olarak bilinen, daha saf

ve daha pahalı bir 316L tipi çukurlaşmaya daha az duyarlılık gösterir ve ortopedik uygulamalar için daha yaygın olarak kullanılır. Malzemenin yüzeyinde başlayan çukurcuk korozyonu, malzeme insan vücudunda kullanıldığında kontrolsüz iyon salınımı nedeniyle hem biyolojik uyumluluğunu hem de yüzeyde oluşan yoğun stres noktaları nedeniyle mekanik bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilir. Aslında, çukurcuk korozyonu, birçok uygulama için uygunluklarını ve dayanıklılıklarını etkileyebildikleri paslanmaz çeliklerde en yıkıcı yerel korozyon türlerinden biri olarak sınıflandırılır (Shahryari vd., 2009).

Farklı oranlarda soğuk deformasyona uğramış AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğe uygulanan korozyon testlerinden sonra numunelerin mikroskobik gözlemlerinden, yüzeylerde çukurcuklar oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Çukurcukların büyüklüğü ve derinliğinin yanı sıra yoğunluğun, numunelerin soğuk deformasyon oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Artan soğuk deformasyon oranı ile birlikte, giderek daha fazla sayıda çukur gözlendiği bildirilmiştir (Rutkowska-Gorczyca vd., 2009).

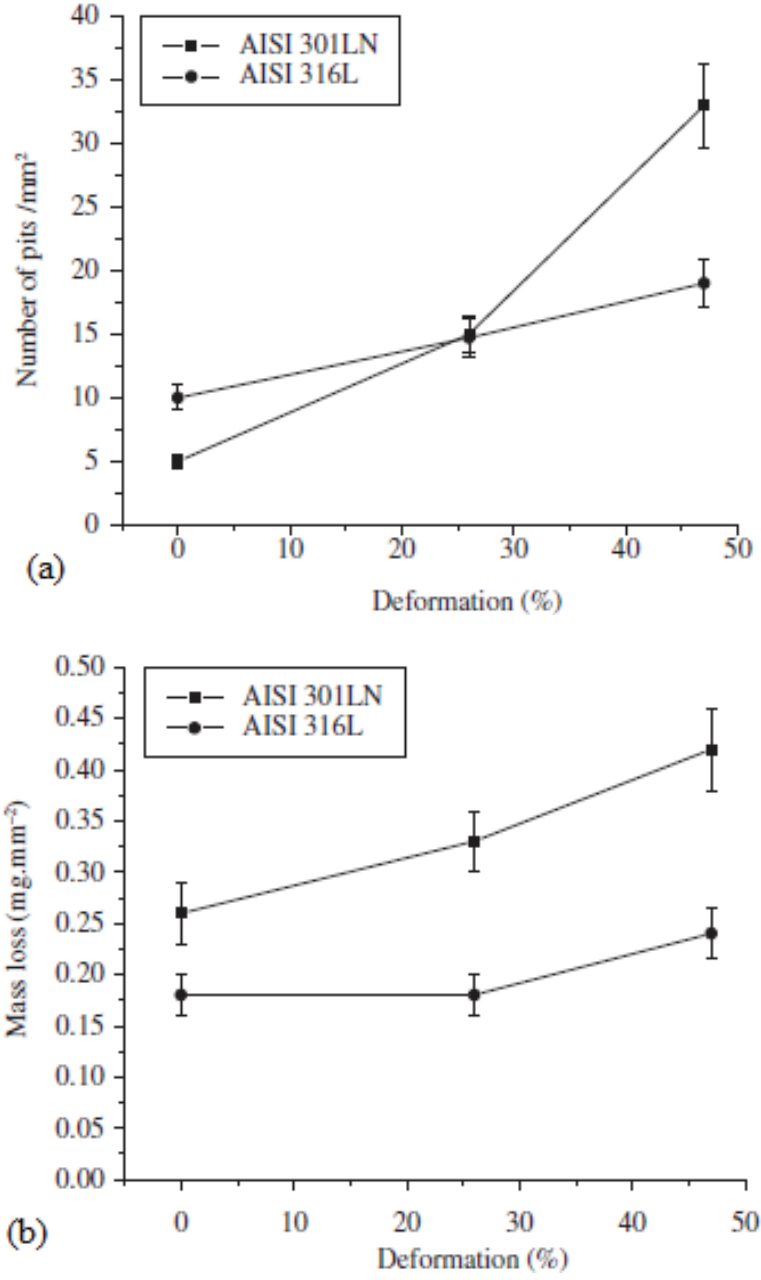


Şekil 5. Tane Boyutunun; a) Çukurcuk Korozyon Hızına b) Çukurcuk Potansiyeline Etkisi (Schino ve Kenny, 2002)

Deformasyonla tanecik inceltme işleminin; genel korozyon direncini düşürmesinin aksine çukurcuk korozyon direncinin artmasına neden olduğu bildirilmiştir (Şekil 5). Kaba taneli çelikte çukurcuk, tek tük geniş ve derin çukurcuklarda sınırlı alanlarda başlar. Buna karşılık, mikroskop ile açığa çıkarılan küçük tek tük bireysel çukurların varlığına rağmen ultra ince taneli çeliğin çukurlaşması çeşitli bölgelerde başladığından korozyon hızının azalmasına neden olur. Bu durum azalan anodik

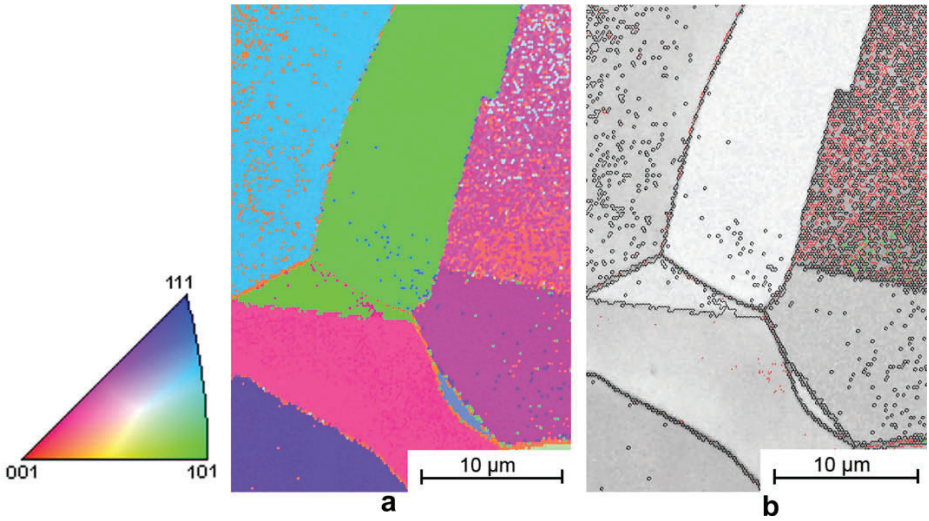
akım yoğunluğu ile nicel olarak açıklanabilir. Aslında, ultra ince taneli çeliğin çukurcuk korozyon bölgelerinin artması, katodik alanın azalmasına ve bunun sonucunda anodik akım yoğunluğunun düşmesine yol açar. Şekil 5 (b)'de ki korozyon verilerinden görüldüğü üzere, çukurcuk potansiyeli, tane boyutu azalarak daha yüksek potansiyellere doğru kayar. Sonuç olarak, ultra ince taneli AISI 304 paslanmaz çeliğin, lokal korozyon duyarlılığına karşı yüksek bir dirence sahip olduğu raporlanmıştır [Schino ve Kenny, 2002].

Yukarıda bahsedilen soğuk deformasyonun çukurcuk korozyon direncine pozitif etkisinin aksine, soğuk deformasyonun östenitik paslanmaz çeliklerde, özellikle sertleşme ve önemli mikroyapısal değişikliklere neden olduğu ve malzemelerin çukurcuk korozyonuna karşı duyarlı hale geldiği bildirilmiştir. Özellikle AISI 301 ve 304 gibi 3xx serisi çeliklerde meydana gelen martensitik dönüşümün, mikroyapıdaki yüksek hata yoğunluğundan dolayı pasif filmin yırtılmasına neden olabileceği ve bu durumun iki farklı fazın varlığından kaynaklanan kalıntı gerilmelere veya galvanik etkiye yol açacağı belirtilmiştir. Mekanik olarak daha stabil çeliklerde korozyon direncinin, deformasyon ve kusurların eklenmesi ile azalabileceği açıklanmıştır. Ayrıca, mikro yapıdaki büzülmenin östenitik çeliklerin korozyona karşı daha savunmasız olmasına sebep olacağı bildirilmiştir (Oliveira Silva vd., 2011).



Şekil 6. Deformasyonun Etkisi; a) Çukurcuk Sayısına b) Kütle Kaybına (Abreua vd., 2007)

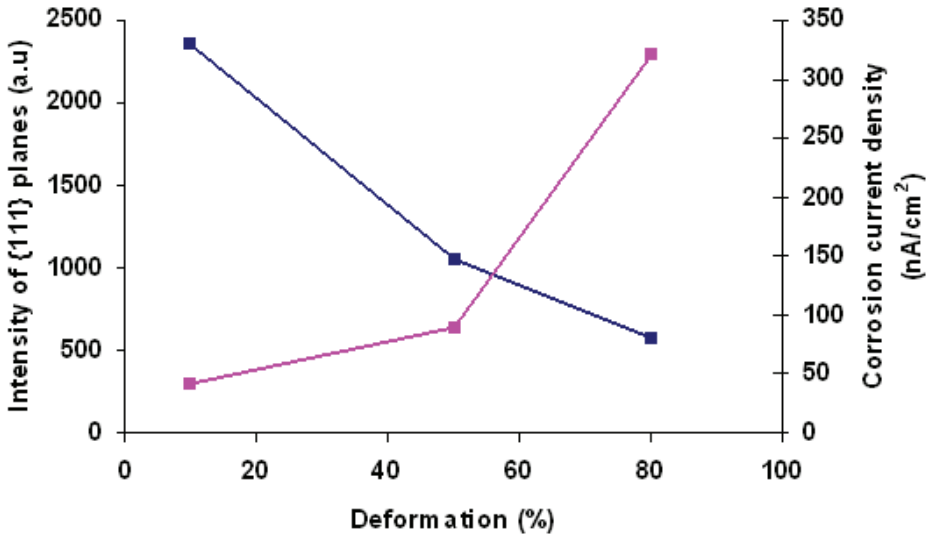
Şekil 6'da görüldüğü üzere deformasyonun AISI 301LN ve AISI 316L paslanmaz çeliklerde çukurcuk korozyonunu ve genel korozyon direncini azalttığı bildirilmiştir. Şekil 6(a), incelenen her iki çelikte de deformasyonla birlikte çukur sayısının arttığı gösterilmektedir. Bu durum her iki malzemede çukurcukların çekirdeklenmesi için tercihli alanların ortaya çıkmasına yol açan deformasyon işlemi sonucu oluşan kusurlarla ilişkilidir. Şekil 6(a), ayrıca deformasyonsuz koşullarda, AISI 301LN'de, AISI 316L'den daha yüksek çukur sayısı oluştuğunu, oysa %26 deformasyon oranında her iki çelikte de çukur sayısının benzer olduğunu göstermektedir. %47 deformasyon oranında, AISI 316L, AISI 301LN'den daha fazla sayıda çukurcuk oluşumu sergiler. Bu nedenle, Şekil 6'da sunulan sonuçlar, %26'dan daha düşük deformasyon için AISI 316L'nin daha fazla çukurcuk korozyonu direncine sahip olduğunu gösterirken, daha yüksek deformasyon için AISI 301LN'nin, AISI 316L'den daha iyi çukurcuk korozyon direnci gösterdiğini sergiler. Kompozisyondaki Mo varlığının, AISI 316L'nin çukurcuk korozyonuna daha iyi direnç göstermesini sağladığı düşünülmektedir. AISI 301LN'de α' martensitin hacimsel oranının daha yüksek olmasının, çukurcuk korozyon direncini azalttığı görülmektedir. Deformasyonun her iki malzemenin genel korozyonuna (uniform kütle kaybına) etkisi Şekil 6(b)'de görülmektedir. Grafik, deformasyondaki artışın, her iki malzemenin kütle kaybında bir artışa yol açtığını gösterirken, deformasyonun genel korozyon direnci için zararlı bir işlem olduğunu belirtmektedir. Tüm deformasyon koşullarında, AISI 301LN'nin AISI 316L'den daha az genel korozyon direncine sahip olduğu ve deformasyonun korozyon direnci üzerindeki etkisinin diğer malzemeye kıyasla 301LN'de daha güçlü olduğu bildirilmiştir (Abreua vd., 2007).



Şekil 7. AISI 316LVM Numunesinin Yüzeyindeki Bir Alanın Tipik Bir OIM Haritası; a) Renklendirilmiş Tanelerin Kristalografik Oryantasyonu, b) Tanelerdeki Mikro Çukurcuk Dağılımı (Shahryari vd., 2009)

Östenitik paslanmaz çeliklerin kristalografik tekstürünün (dokusunun), malzemenin yüzey çukurcuk direncine etki ettiği bilinmektedir. Malzemeye uygulanan mekanik deformasyonunun veya tavlamanın, tanelerin yönünü etkilediği bilinmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon davranışının mevcut anizotropik yapısı göz önüne alındığında, çukurcuk korozyon direnci ile kristalografik düzlemin türü arasında ilişki kurmak kritik bir öneme haizdir. Bu ilişki, farklı tekstüre sahip malzemelerin çukurcuklanma hassasiyetini belirleyen bir model geliştirmeyi mümkün kılacak ve sonuçta tekstür kontrolü ile çukurcuklanma direncinin iyileştirilmesi için yeni bir yönteme yol açacaktır. Farklı çalışma ortamları için malzemenin yüzey çukurcuk direncini geliştirecek tekstürün üretilmesini sağlayan yeni termo-mekanik işlemler geliştirilebilir. AISI 316LVM paslanmaz çelik yüzeyinin çukurcuk korozyonu duyarlılığına kristalografik yönlenmenin etkisinin incelendiği bir araştırma sonucunda, yüzeyin çukurcuk korozyonuna karşı duyarlılığının, yüzeye paralel düzlemlerin kristalografik yönlenmesine güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirtilmiştir. Düzlemsel yönelimlerden, yüksek atom yoğunluğuna sahip {111} ve {100} düzlemlerinin çukurcuk korozyonuna karşı

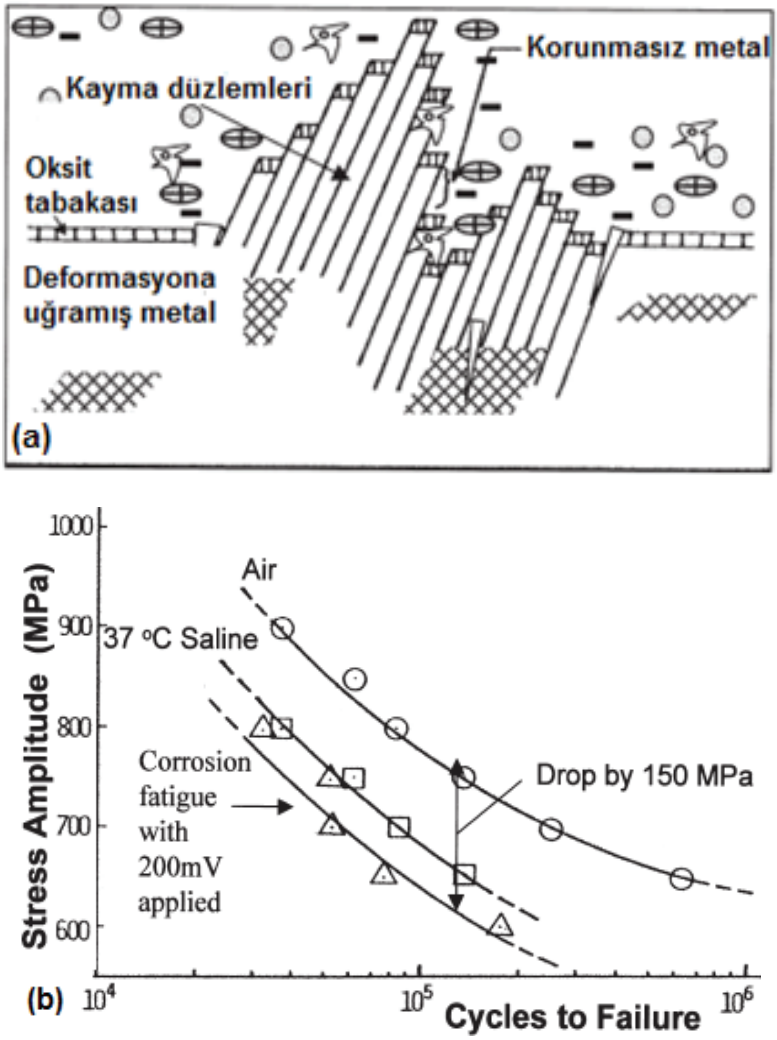
en yüksek dirence sahip olduğu bildirilirken (Şekil 7), genellikle düşük atom yoğunluğuna sahip kristalografik düzlemler için daha düşük bir çukurcuk oluşma direnci beklendiği belirtilmiştir (Shahryari vd., 2009). Yüksek atomik koordinasyonun düşük yüzey enerjisi sağladığı ayrıca bildirilmiştir (Pu, Outeiro vd., 2011). Sonuç olarak, tekstür optimizasyonunun 316LVM'nin çukurcuk korozyonu direncini arttırmada yeni bir araç olabileceği bildirilmiştir (Shahryari vd., 2009).



Şekil 8. AISI 316L Numunelerin; Bağıl Şiddet, Deformasyon Derecesi ve Korozyon Akımı Yoğunluğu Arasındaki İlişki (Bakhtiari ve Berenjani, 2015)

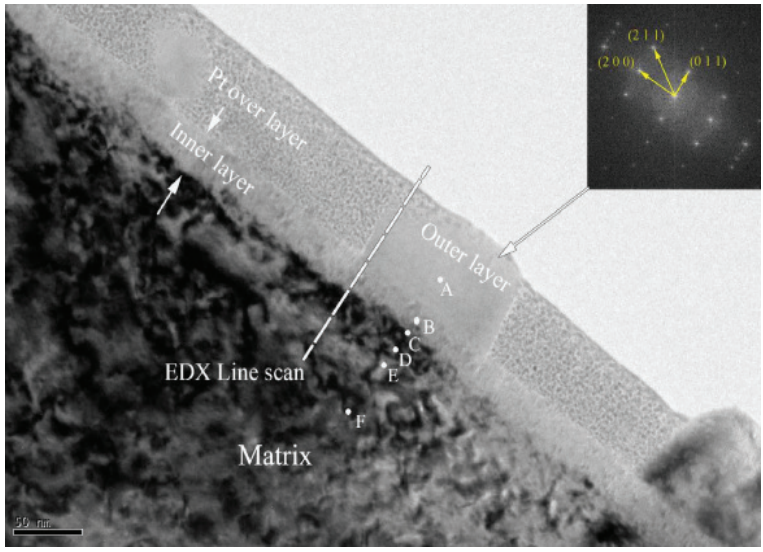
Soğuk deformasyonun birçok alaşımdaki tekstürü etkileyebileceği iyi bilinmektedir. Korozyon özelliklerinin sadece mikro yapıya değil, aynı zamanda geliştirilen tekstüre de bağlı olduğu belirtilmiştir. Soğuk deformasyon uygulanan AISI 316L alaşımının incelendiği bir araştırmada, yüksek atom yoğunluğuna bağlı olarak {111} düzlemlerinin güçlü korozyon direncine sahip olduğu açıklanmıştır. 316L'nin soğuk deformasyon derecesindeki artışın, {111} sıkı paket düzlemlerinin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir. XRD desenindeki {111} sıkı paket düzlemlerinin bağıl şiddeti daha yüksek olan numuneler, {111} bağıl şiddeti düşük olan numunelere göre daha iyi korozyon direncine sahip olduğu

tespit edilmiştir (Şekil 8). Bu durum atom yoğunluğu yüksek kristalografik düzlemlerde, bağların kopması ve akabinde atomların çözünmesi için daha yüksek bir enerji gereksinimine atfedilmiştir (Bakhtiari ve Berenjani, 2015).

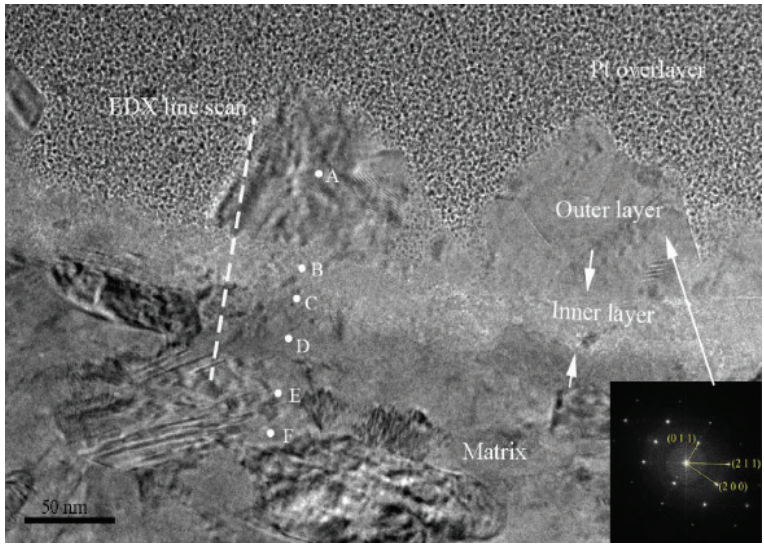


Şekil 9. a) Yorulma Sürecinde Vücut Sıvısı Ortamında Yeni Kayma Düzlemlerinin Oluşumu ve Korunmasız Bölgelerin Elektrokimyasal-Biyolojik Aktivitelere Maruz Kalışının Şematik Gösterimi (Teoh, 2000), b) Soğuk Deformasyona Uğramış 316L Çeliğin Korozyon Yorulması (Taira ve Lautenschlager, 1992)

Periyodik dinamik yükler altında bulunan bir parça zamanla yorulur. Yorulan parçalar normalden daha küçük gerilme değerlerinde hasara uğrarlar. Ayrıca yorulma ve korozyonun kombine etkisi parçanın kısa sürede çatlamasına sebep olur (Yalçın ve Koç, 1997). Birleşik mekanik ve kimyasal prosesler, çatlak başlangıcında hayati bir rol oynar. Hızlı bir şekilde yeniden pasifleşememe, yüzey katmanlarının elektrokimyasal bozulmasına neden olur. Şekil 9(a), yorulma sürecinde koruyucu oksit filmi kırarak içinden geçebilen kayma bantlarının nasıl oluştuğunu şematik olarak göstermektedir. Bu durum, korunmasız bölgeleri anında korozyona maruz bırakır (Teoh, 2000). Soğuk deforme edilmiş 316L paslanmaz çeliğin in-vitro korozyon yorgunluğunun incelendiği bir araştırmada, korozyon akımı izlenerek çatlak başlangıcının net belirtisinin tespit edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, metal yüzeyine uygulanan 200 mV ile oksit tabaka pasivasyonu baskılanarak, yorulma mukavemetinde 150 MPa civarında önemli bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 9 b) (Taira ve Lautenschlager, 1992).



a)

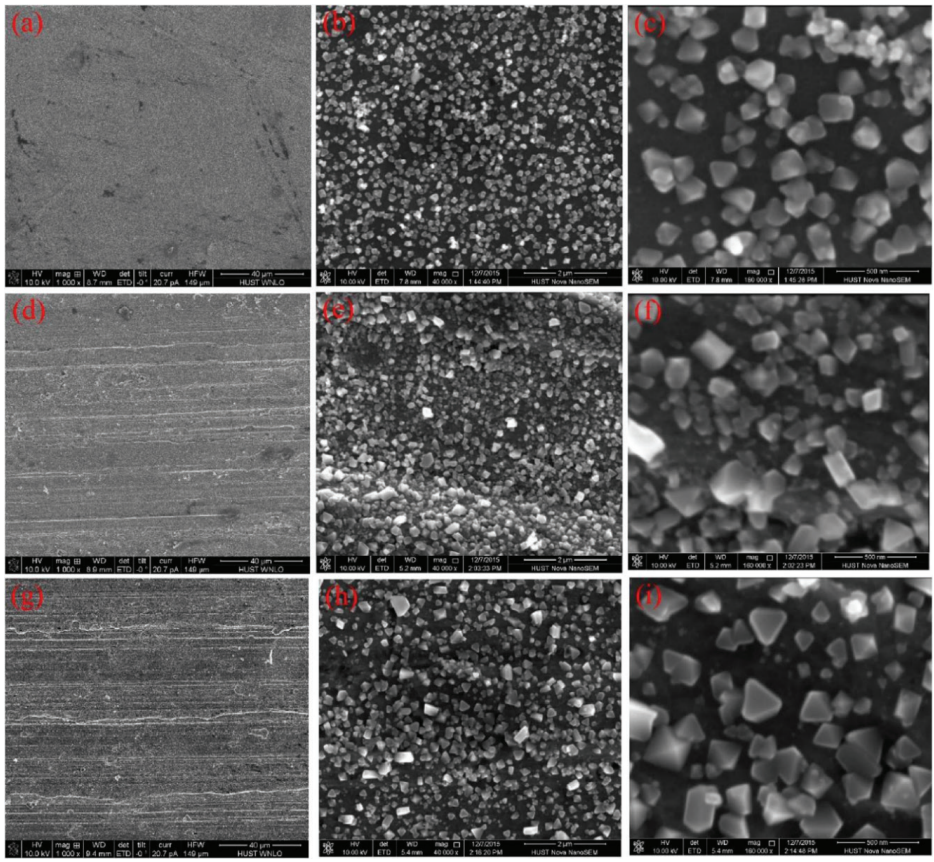


b)

Şekil 10. Basınçlı Su Reaktörü Simülasyonu Uygulanmış 316 Östenitik Paslanmaz Çelik Yüzeyinde Oluşan Oksit Film Morfolojisinin TEM Kesit Görüntüsü; a) Elektro-Polisaj Uygulanmış Yüzey, b) Frezelenmiş Yüzey. Kırınım Deseni Dış Katmandaki Kristalin Manyetit (Fe_3O_4, Ortorombik) Olduğunu Göstermektedir (Bölge Ekseni [0 $\bar{1}\bar{1}$ 1]). EDX Analiz Noktaları; Dış Katman (A), İç Katman (B), Ara Yüz (C) Ve Ara Yüzden Belirli Mesafelerdeki Matris (D, E, F) Bölgelerine Karşılık Gelir (Wang vd., 2017)

Östenitik paslanmaz çeliklerde, işleme sonucu oluşan yüzey özelliklerindeki karmaşık değişiklikler, oksit filmlerin özellikleri ve korozyon davranışı üzerinde etkilidir. İşleme sonucu değişen yüzey özellikleri ile oksit filminin mikroyapısal karakterizasyonu arasında bir ilişki vardır. Ayrıca, alt-yüzeylerin (oksit filmin altındaki matrisin) özellikleri; oksit filmin pul pul dökülmesini ve gerilmeli korozyon çatlaklarının başlamasını, yayılmasını doğrudan etkiler. İşlemeden kaynaklı yüzey özelliklerinin, AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin basınçlı su reaktörü simülasyonundaki korozyon davranışına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, elektro-polisajlı, taşlanmış ve frezelenmiş üç farklı numune ele alınmıştır. Soğuk deformasyon katmanın yüzey morfolojisi ve mikro yapısı; yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve tane büyüklüğü ile karakterize edilmiştir. Ayrıca üç yüzeyin oksit filmleri; SEM, TEM ve XPS ile karakterize edilmiştir (Şekil 10). Sonuçlar, işlenme koşullarının, çift katmanlı bir yapıdan oluşan oksit filmlerin kalınlığını ve elementel dağılımını etkilediğini gösterirken, üç farklı yüzeydeki oksit film morfolojilerinin ve bileşimlerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Dış katman, manyetit oksit (Fe_3O_4) partiküllerinden oluşurken, iç katman krom bakımından zengin nanokristalden oluşmaktadır. Özellikle, krom bakımından zengin katmanın korozyon direncinde önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. İç tabaka kalınlığının homojenliği, yüzey hazırlama yöntemlerinden etkilenmiştir. En iyi homojenliği, elektro-polisajlı yüzeydeki oksit film sergilerken, ardından taşlanmış ve frezelenmiş yüzeyler gelmiştir. İç katmanın ortalama kalınlığı, elektro-polisajlı yüzeyden başlayarak taşlanmış ve frezelenmiş yüzeylerde sırasıyla artarak yükselmiştir. İç oksit filmdeki krom konsantrasyonu elektro-polisajlı yüzeyde en yüksek seviyede iken ardından sırasıyla taşlanmış ve frezelenmiş yüzeyler gelmiştir. Diğer yandan iç katmandaki en yüksek molibden konsantrasyonu frezelenmiş yüzeyde gözlemlenirken en düşük oran elektro-polisaj uygulanmış yüzeyde gözlemlenmiştir. Oksit filmlerin her katmanındaki demir konsantrasyonlarının, farklı yüzeyler arasında hemen hemen benzer olduğu görülmüştür. Tüm yüzeyler için oksit-metal arayüzünde nikel zenginleşmesi gözlemlenmiştir. Oksit-metal ara yüzündeki nikel konsantrasyonu frezelenmiş yüzeyde en yüksek seviyede iken ardından sırasıyla taşlanmış ve elektro-polisaj uygulanmış yüzeyler gelmiştir.

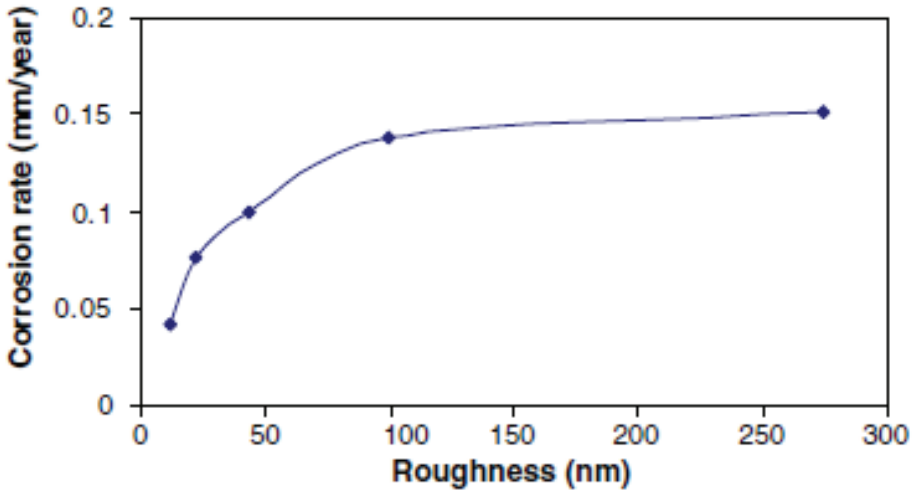
Aşırı soğuk deformasyon, oksit tabaka iç filmde daha fazla krom ve demir tükenmesine????? ve oksit-metal arayüzünde daha fazla nikel zenginleşmesine neden olduğu bildirilmiştir (Wang vd., 2017).



Şekil 11. 120 Saat Basınçlı Su Reaktörü Simülasyonu Uygulanmış AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çelik Numune Yüzeylerinde Oluşan Oksit Film Morfolojilerinin SEM Görüntüleri: (a, b, c) Elektro-Polisaj Uygulanmış Yüzey, (d, e, f) Taşlanmış Yüzey (g, h, i) Frezelenmiş Yüzey (Wang vd., 2017)

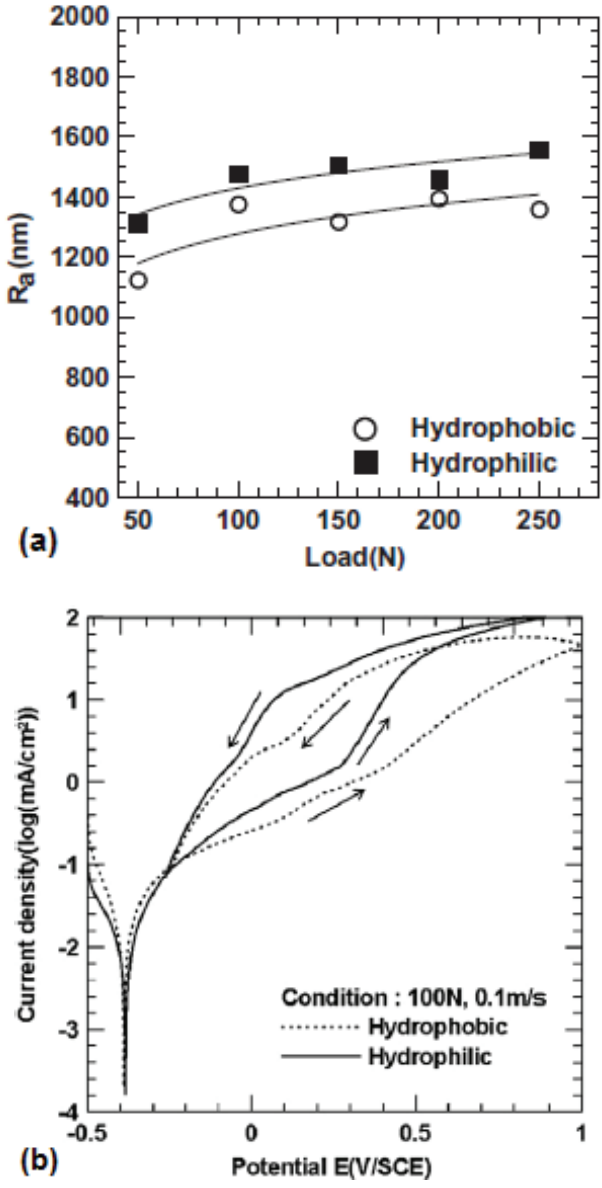
Basınçlı su reaktörü simülasyonunda, 120 saat yüksek sıcaklıktaki suya maruz kaldıktan sonra üç farklı AISI 316 yüzeyden elde edilen tipik yüzey morfolojilerinin SEM görüntüleri Şekil 11'de görülmektedir. Düşük büyütmedeki resimlerde, oksit ürünlerinin yapısı gözlenemezken, taşlanmış ve frezelenmiş yüzeylerde işleme izlerinin belirgin olduğu (Şekil 11 d, g) ve elektro-polisajlı yüzeyin (Şekil 11 a) nispeten pü-

rüzsüz olduğu görülmektedir. Yüksek büyütmelerde, elektro-polisajlı yüzeyin 150 nm ila 165 nm arasında değişen seyrek oksit partikülleri (Şekil 11 b, c) ile kaplı ve partikül boyutlarının oldukça uniform olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca taşlanmış yüzeyin elektro-polisaj yapılmış olandan daha yoğun oksit partikülleri ile kaplı olduğu (Şekil 11 e, f) ve partikül boyutlarının 50 nm ila 280 nm arasında değiştiği bildirilmiştir. Frezelenmiş yüzeyin, taşlanmış yüzey gibi oksit partikülleri ile yoğun bir şekilde kaplı olduğu (Şekil 11 h, i) ve partikül boyutlarının 50 nm ila 400 nm arasında değişmesinden dolayı üç numune arasında en zayıf homojenliğe sahip olduğu raporlanmıştır (Wang vd., 2017).



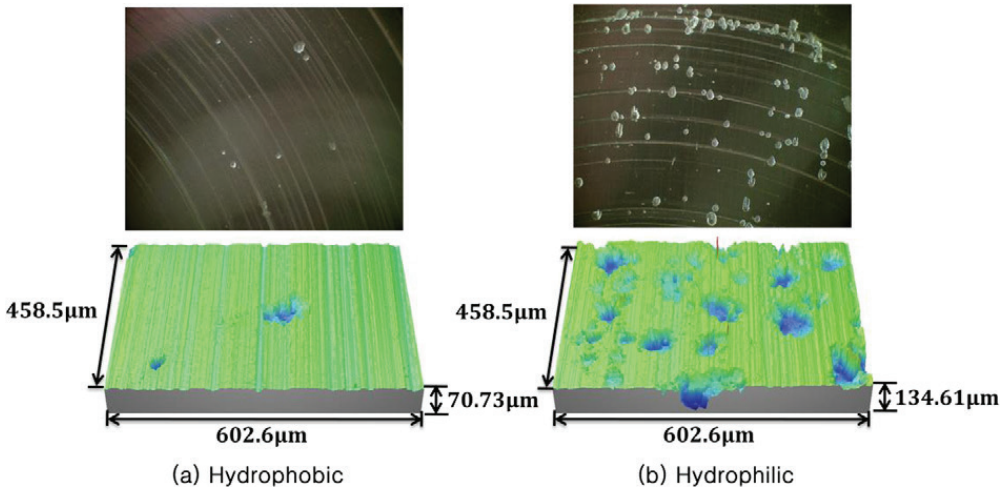
Şekil 12. Korozyon Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Bağlı Değişimi (Li ve Li, 2006)

Korozyonu etkilediği iyi bilinen bir başka faktörün yüzey topografyası olduğu ve artan yüzey pürüzlülüğünün yüzeydeki korozyonunu hızlandırdığı bildirmiştir (Şekil 12). Büyük pürüzlülük değerlerinin düşük çukurcuk potansiyeline (metastabil çukurcukların yüzeyde oluşmaya başladığı potansiyel) karşılık geldiği, pürüzlü yüzeye kıyasla, pürüzsüz bir yüzeydeki çukurcuk sayısının daha az olduğu belirtilmiştir. Pürüzsüz yüzeyde metastabil çukurcuk oluşumunun pürüzlü yüzeye kıyasla daha zor olması, daha küçük korozyon hızına karşılık gelmesine bağlanmıştır (Li ve Li, 2006).



Şekil 13. Hidrofilik ve Hidrofobik Taşlama Sıvıları ile Yapılan Aşınma Testi Sonucunda; a) Yüke Bağlı Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi, b) Farklı Yüzey Pürüzlülüklerine Sahip İki Paslanmaz Çelik Plakanın Potansiyodinamik Eğrileri (Lee vd., 2012)

Uygulanan yük, hız ve akışkan tipi gibi taşlama koşulları değiştirilerek modifiye edilen yüzey topografyasının, 21Cr ferritik paslanmaz çeliğin korozyon dayanımına etkisinin incelendiği bir araştırma sonucunda; korozyon davranışının, yüzeyde azalan girinti/çukur derinliği ile ilişkili olduğu belirtilirken, pürüzlülük ortalaması (Ra), RMS pürüzlülük ortalaması (Rq), çarpıklık ve diğer pürüzlülük parametrelerinin, korozyon davranışı ile zayıf ilişkileri bildirilmiştir (Şekil 13). Ayrıca taşlama sıvısı tipinin, taşlanan yüzeyin topografyası üzerinde güçlü etkisi görülmüştür (Lee vd., 2012).



Şekil 14. Potansiyodinamik Testlerden Sonra Paslanmaz Çelik Yüzeylerin, Optik Mikroskop (Üst) ve Lazer Konfokal Mikroskop (Alt) Görüntüleri (Lee vd., 2012)

Potansiyodinamik testlerden sonra paslanmaz çelik yüzeylerde, kullanılan taşlama sıvısının tipine bağlı olarak farklı sayılarda korozyon çukurları gözlenmiştir (Şekil 14). Hidrofobik sıvı kullanılarak taşlanan korozif yüzeyde, hidrofilik sıvı kullanılanarak taşlanana kıyasla daha az korozyon çukuru oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca mikrograf, korozyon çukurlarının oluklar boyunca tercihli bir şekilde hizalandığını ve aşınma testleri sırasında üretilen yüzey izlerinin (pürüzlerin) çukurcuk korozyonu sırasında korozyonun ilk aşamasında yok olduğunu, bu nedenle taşlanan yüzeydeki derin girintilerin çukurcuk çekirdeklenmesi için uygun alanlar olduğunu düşündürmektedir (Lee vd., 2012).

SONUÇ

Östenitik paslanmaz çeliklerin; yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı, yüzey tabaka tane boyutu, pekleşme, mikrosertlik, faz dönüşümü, yüzey tabakada kristalografik yönlenmeden oluşan yüzey bütünlüğü özeliklerinin korozyon direnci üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Sonuç olarak:

- Artan yüzey pürüzlülüğünün yüzeydeki korozyonunu hızlandırdığı görülmüştür. Aşırı plastik deformasyonla birlikte artan sertleşme ve azalan tane boyutu derecesinde östenitik paslanmaz çeliklerin genel korozyon direncinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Diğer yandan, deformasyonla tanecik inceltme işleminin; genel korozyon direncini düşürmesinin aksine çukurcuk korozyon direncinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca kaba taneli yapıya göre ince taneli yapıda artan tane sınırı ve tane sınır alanı ile taneler arası korozyon direncinin de yükseldiği belirtilmiştir.
- Yüzeylerin çukurcuk korozyonu direncinin, yüzeye paralel düzlemlerin kristalografik yönlenmesine güçlü bir şekilde bağlı olduğu ve yüksek atom yoğunluğuna sahip {111} ve {100} düzlemlerinin çukurcuk korozyonuna karşı en yüksek dirence sahip olduğu bildirilmiştir.
- Östenitik çeliklerde deformasyon sonucu meydana gelen martensitik dönüşümün pasif film yırtılmasına ve korozyon direncinin düşmesine neden olacağı tespit edilmiştir. Deformasyon sonucu oluşan yüzey özelliklerinin, oluşan oksit filmlerin özellikleri ve korozyon davranışları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Özellikle, krom bakımından zengin iç oksit filmin krom konsantrasyonunun artan deformasyonla azaldığı anlaşılmıştır.

KAYNAKÇA

Abreua, H. F. G., Carvalhoa, S. S., Lima Neto, P., Santos, R. P., Freire, V. N., Oliveira Silva, P. M. and Tavares, S. S. M., (2007). Deformation Induced Martensite in An AISI 301LN Stainless Steel: Characterization

and Influence on Pitting Corrosion Resistance. *Materials Research*, 10(4), 359, 366.

Bakhtiari, A. and Berenjani, I. (2015). Texture, Microhardness and Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, 21(1), 1-5.

Bertolini, R.,Bruschi, S. and Ghiotti, A. (2009). Enhancement of Corrosion Resistance to Sterilization Stages of A Biomedical Grade AISI 316L Stainless Steel by Means of Low Temperature Machining. *Materialstoday: Proceedings*, 7(1), 552-559.

Bronzino, J. D., Park, J. B. and Kim, Y. K. (2000). *Metallic Biometarials, The Biomedical Engineering Handbook (Second Edition)*. New York: CRC Press.

Field, M. and Kahles, J. F. (1964). *The Surface Integrity of Machined And Ground High Strength Steels*. DMIC Report, Cornell University, 210, 54-77.

Field, M., Kahles, J. and Cammett, J. (1972). Review of Measuring Methods for Surface Integrity. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 21(2), 219-238.

Güven, Ş. Y. (2014). Biyouyumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 303-311.

Griffiths, B. J. (2001). *Manufacturing Surface Technology in: Surface Integrity and Functional Performance*. London: Penton Press.

Hermawan, H., Ramdan, D. and Djuansjah, J. R. P. (2011). *Biomedical Engineering From Theory to Applications, Metals for Biomedical Applications*. Rijeka: InTech., 411.

Jawahir, I. J., Kaynak, Y. and Lu, T. (2014). The Impact of Novel Material Processing Methods on Component Quality Life and Performance. *Procedia CIRP*, 22, 33-34.

Klocke, F. (2001). *Manufacturing Technology I*. Aachen: WZL-RWTH.

Klocke F., Döbbeler, B, Lung, S., Seelbach, T. and Jawahir, I. S. (2018). Analysis of Surface Integrity in Machining of AISI 304 Stainless Steel Under Various Cooling and Cutting Conditions. *Proceedings of The 21. International ESAFORM Conference on Material Forming, AIP Conference Proceedings 1960*, 070015, 1-6.

Köse, N. (2016). *Ortopedi ve Travmatoloji Temel Bilimler ve Araştırma Kitabı, Bölüm 1: Biyomalzeme ve Biyomekanik, Biyomalzemeler ve İmplantlara Biyolojik Yanıt*. Ankara: TOTEK, 3-16.

Lee, S. M., Wan, G. L. and Kim, Y. H. (2012). Surface Roughness and The Corrosion Resistance of 21Cr Ferritic Stainless Steel. *Corrosion Science*, 63, 404-409.

Li, W. and Li, D. Y. (2006). Influence of Surface Morphology on Corrosion and Electronic Behavior. *Acta Materialia*, 54(2), 445-452.

M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Chandrasekaran, H., Dillon Jr, O. W. and Jawahir I. S. (2008). A Review of Surface Integrity in Machining and Its Impact on Functional Performance And Life of Machined Products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1-2), 203-236.

Oliveira Silva, P. M., Abreua, H. F. G., Albuquerque, V. H. C., Lima Neto, P. and Tavares, S. S. M. (2011). Cold Deformation Effect on The Microstructures and Mechanical Properties of AISI 301LN and 316L Stainless Steels. *Materials & Design*, 32(2), 605, 614.

Outeiro, J. C., Umbrello, D. and M'Saoubi, R. (2006). Experimental and Numerical Modelling of The Residual Stresses Induced in Orthogonal Cutting of AISI 316L Steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(14), 1786-1794.

Özçatalbaş, Y. ve Baş, A. (2006). Effect of Cooling by Air Spraying on Cutting Forces and Tool Life in Turning. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(3), 451-455.

Pekşen, C. ve Doğan, A. (2011). İmplant Dayanımı. *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi*, 10(2),122-128.

Pu, Z., Outeiro, J. C., Batista A. C., Dillon Jr., O. W., Puleo, D. A. and Jawahir, I. S. (2011). Surface Integrity in Dry and Cryogenic Machining of AZ31B Mg Alloy with Varying Cutting Edge Radius Tools. *Procedia Engineering*, 19, 282-287.

Pu, Z., Yang, S., Song, G. L., Dillon O. W, Puleo D. A. and Jawahir I.S. (2011). Ultrafine-Grained Surface Layer on Mg-Al-Zn Alloy Produced by Cryogenic Burnishing for Enhanced Corrosion Resistance. *Scripta Materialia*, 65(6), 520-523.

Pürçek, G., Saray, O., Hacısalihoğlu, İ., Karaman, İ. ve Alsaran, A. (2012). Yüksek Dayanımlı ve Biyouyumlu İmplant Üretiminde Yeni Bir

Yaklaşım: Aşırı Plastik Deformasyon ve Yüzey İşlemleri. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(628), 50-60.

Qi, Z., Jiang, J. and Meletis, E. I. (2009). Wear Mechanism of Nanocrystalline Metals. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(7), 4227-4232.

Rutkowska-Gorczyca, M., Podrez-Redziszewska, M. and Kajtoch, J. (2009). Corrosion Resistance and Microstructure of Steel AISI 316L After Cold Plastic Deformation. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 35(1), 35-43.

Schino, A.D. and Kenny, J.M. (2002). Effects of The Grain Size on The Corrosion Behavior of Refined AISI 304 Austenitic Stainless Steels. *Journal of Materials Science Letters*, 21, 1631-1634.

Shahryari, A., Szpunar, J.A. and Omanovic, S. (2009). The Influence of Crystallographic Orientation Distribution on 316LVM Stainless Steel Pitting Behavior. *Corrosion Science*, 51(3), 677-682.

Shi, Y.N. and Han, Z. (2008). Tribological Behaviors of Nanostructured Surface Layer Processed by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment. *Key Engineering Materials*, 384, 321-334.

Taira, M. and Lautenschlager, E. P. (1992). In Vitro Corrosion Fatigue of 316L Cold Worked Stainless Steel. *Journal of Biomedical Materials Research*, 26(9), 1131-1139.

Tang, J., Luo, H. Y. and Zhang, Y. B. (2017). Enhancing The Surface Integrity and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Through Cryogenic Burnishing. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2785-2793.

Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U. (2008). AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüklerinin Araştırılması. *BAÜ FBE Dergisi*, 10(2), 3-12.

Teoh, S. H. (2000). Fatigue of Biomaterials: A Review. *International Journal of Fatigue*, 22(10), 825-837.

Vladkova, T. G. (2010). Surface Engineered Polymeric Biomaterials with Improved Biocantact Properties. *International Journal of Polymer Science, Polymeric Biomaterials for Tissue Engineering Application*, 2010, 1-22.

Wang, S., Hu, Y., Fang, K., Zhanga, W. and Wang, X. (2017). Effect of Surface Machining on The Corrosion Behaviour of 316 Austenitic Stainless Steel in Simulated PWR Water. *Corrosion Science*, 126, 104-120.

Wang, Z.B., Tao, N.R., Li, S., Wang, W., Liu, G., Lu, J. and Lu, K. (2003). Effect of Surface Nanocrystallization on Friction and Wear Properties in Low Carbon Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 352(1-2), 144-149.

Yalçın, B. ve Temiz, D. (2012, 4-5 Ekim). Implant Malzemesi Olarak Kullanılan AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kuru Tornalanabilirliğinin Araştırılması. *3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, 212-224.

Yalçın, H. ve Koç, T. (1997). *Mühendisler için Korozyon*. Ankara: TMMOB Kimya Mühendileri Odası Yayınları.

Yang, S., Dillon Jr., O. W., Puleo, D. A. and Jawahir, I. S. (2013). Effect of Cryogenic Burnishing on Surface Integrity Modifications of Co-Cr-Mo Biomedical Alloy. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 101B(1), 139-152.

Yang, S., Puleo, D. A., Dillon Jr., O. W. and Jawahir, I. S. (2011). Surface Layer Modifications in Co-Cr-Mo Biomedical Alloy from Croyogenic Burnishing. *Procedia Engineering*, 19, 383-388.

KARBON NANOTÜP KATKISININ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Mustafa Hasan IBRAHIM IBRAHIM[1], Özgür DEMİRCAN[2]

Öz: Havacılık, uzay ve savunma alanında endüstriyel şirketler arasındaki hızlı teknolojik gelişme ve rekabet nedeniyle, hafif ve yüksek mukavemet ile karakterize edilen yüksek performanslı malzemeler elde etmek için 1950 yılından itibaren kompozit malzeme üretimine başlanmıştır. Günümüzde kompozit malzemeler, uygulama alanlarındaki çoğalma ve çeşitlilik nedeniyle hızlı bir gelişme göstermektedir. Çok yönlülüğü ve yaygınlığı nedeniyle kompozit malzeme üretiminde kullanılan birçok araştırma ve yöntem bulunmaktadır. Kompozit malzemenin gelişimine nanoteknolojinin katkıları vardır. Bu çalışma, kompozit malzemelere nanomalzemelerin dâhil edilmesinin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ele alacaktır. Çalışmada çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT.s) ve modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT_COOH) ile temsil edilen nanomalzemelerin, karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozit (CFRP) malzemelere etkileri incelenmiştir. Bu araştırmanın temel amacı, MWCNT.s, MWCNT_COOH'lerin eğilme dayanımı gibi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu araştırmada kompozit malzeme için matris olarak termoset epoksi kullanılarak üç farklı kompozit panel üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde karbon fiber hacim oranı %35'tir. Nanomalzemelerin üretilen kompozit paneller üzerindeki etkisini incelemek için ağırlıkça %0,5 oranında MWCNT.s ve MWCNT_COOH kompo-

1 Ondokuz Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun / Türkiye, mh7626563@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-6807-0086

2 Ondokuz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Samsun / Türkiye, ozgur.demircan@omu.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8235-3966

zitlere eklenmiştir. Kompozit plakaların üretimi için Vakum İnfüzyon (Vİ) yöntemi kullanılmıştır. Üretilen plakalardan alınan numunelerin mekanik özellikleri, takviye liflerinin yönüne göre 0° ve 90° yönlerinde hazırlanarak eğilme test cihazı kullanılarak incelenmiştir. CFRP kompozitlerine MWCNT-COOH ve MWCNT.s eklenmesi bu kompozitlerin eğilme özeliklerini geliştirmiştir. Üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, 0° yönündeki ağırlıkça %0,5 MWCNT-COOH eklenen numunelerin saf numuneye göre eğilme mukavemetinde yaklaşık %21 artış gözlenirken, eğilme modülünde de yaklaşık %36 artış gözlemlenmiştir. Tüp şekline sahip olan MWCNT'ler, bu şekilleri sayesinde kırılma enerjisini emerek çatlaklar boyunca esneyebilmektedir. Böylece çatlak açılmasını ve ilerlemesini engellemektedir. Numunelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemetlerindeki artışlar göz önüne alındığında MWCNT-COOH ve MWCNT.s ile yüklenen CFRP kompozitlerinin, yüksek mekanik performansın gerekli olduğu gelecekteki uygulamalar için oldukça umut verici olması beklenmektedir.

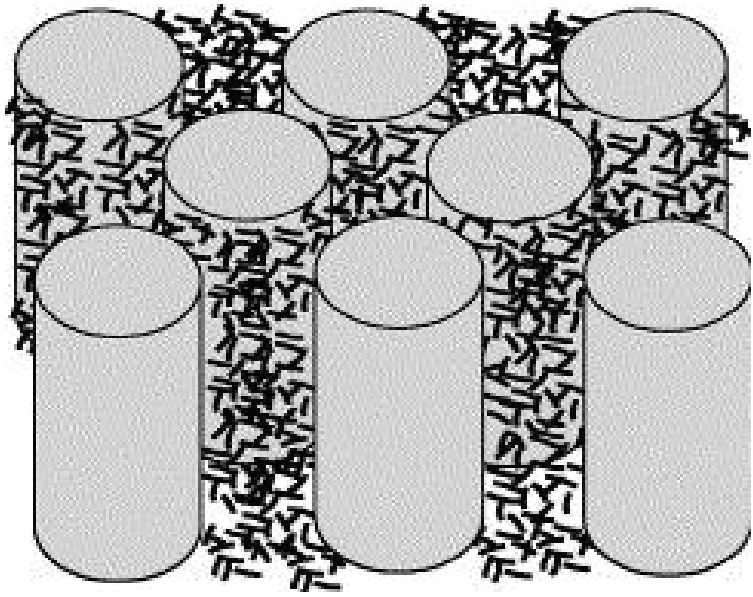
Anahtar Kelimeler: Karbon Nanotüp, Karbon Fiber, Mekanik Özellikler, Vakum İnfüzyon (Vİ)

GİRİŞ

Kompozit malzeme, tek başına kullanılan bileşenlerin özelliklerinden daha iyi özellikler sergileyen iki veya daha fazla malzemenin karışım olarak tanımlanabilmektedir.Genellikle kompozitler, bir matris fazı içerisinde takviye fazının dağıtılmasıyla oluşturulur. Yük taşıyıcı eleman olan takviye fazı, kompozitin mukavemetini ve ısıl kararlılık gibi yapısal özelliklerini ve elektriksel, ısıl iletkenlik gibi diğer fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesinde etkilidir. Matris fazı takviye malzemelerini bir arada tutar, yükü takviyelere aktarır ve takviyeleri kimyasallardan ve mekanik hasara karşı korumaktadır. Takviyeler; lifler, parçacıklar veya viskerler(whiskers) olabilirken matris fazları metaller, polimerler veya seramikler olabilmektedir (Taya ve Arsenault, 2016) (Seshan vd., 1996).

Karbon fiber (CF) takviyeli epoksi reçineli kompozitler, önemli ölçüde hafiflik, mükemmel dayanım özelliklerinden dolayı havacılık ve askeri alanda öne çıkan gelişmiş polimerik kompozitlerdendir. CF, iyi mekanik özelliklerin yanı sıra iyi yorulma direnci ve ısı direnci de göstermektedir. Matris fazı olarak polimer kullanıldığında düşük büzül-

me, iyi yapışma, mükemmel mekanik özellikler ve kimyasal direnç elde edilmektedir (Salahuddin vd., 2021). Bu avantajlarının yanında bazı dezavantajlar sunmaktadır. Örneğin; karbon fiber kullanılan kompozit laminatlar nispeten zayıf katmanlar arası bağ özellikleri sergilerler. Bu, epoksi reçinelerinin yüksek çapraz bağ yoğunluğu nedeniyle düşük kırılma tokluğundan kaynaklanmaktadır. Bu dezavantaja çözüm olarak, karbon nanotüplerin sahip olduğu mükemmel termal, elektriksel, mekanik ve fonksiyonel özellikleri son yıllarda dikkat çeken araştırmalara konusu olmuştur. Örneğin, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), 11-63 GPa'lık yüksek çekme mukavemetleri (Yu vd., 2000) ve 1 TPa'lık Young modülü (Salvetat vd., 1999) nedeniyle polimer takviyesi için ideal adaylardır. Ek olarak, tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT), ideal koşullar altında 2.000–6.000 W/mK'e kadar yüksek termal iletkenlik sergilerler (Hong vd., 2010). Mevcut havacılık teknolojisi, gelişmiş malzemelerin özelliklerini geliştirmeye her zamankinden daha fazla odaklanmaktadır (Boura vd., 2013). Şekil 1 sürekli lif ve nano parçacık takviye edilmiş matris fazından oluşan kompozit bir malzemeyi şematik olarak göstermektedir.



Şekil 1. Sürekli Bir Fiber Takviyeli Kompozitte Matrisin Nano-Parçacık Takviyesi (Vlasveld vd., 2005)

Kompozit malzeme teknolojisinde kullanılan karbon nano malzeme olarak genellikle grafen nano plakalar (GNP) ve karbon nanotüpler (CNT) kullanılır. Bu nano malzemeler, yüksek performanslı malzemeler alanında büyük ilgi görmüştür. Karbon nanotüpler ve grafen nano plakalar, benzersiz mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinden dolayı yeni nesil yüksek performanslı kompozitlerde inovasyon için en önemli adaylardır (Jojibabu vd., 2020) (Reddy ve Ramji, 2020). MWCNT' lerin güçlü bağlanma özellikleri nedeniyle sertlik, mukavemet ve tokluk gibi benzersiz mekanik özellikleri, onları gelişmiş yapısal uygulamalarda kullanılmasına sebep olmaktadır (Zhang vd., 2020). Ayrıca, CNT' lerin eşsiz yapısı, yüksek termal iletkenlik ve ısı kapasitesi sunmaktadır (Karami vd., 2019). Büyük ölçekli kompozitlerin, CNT gibi başka bir malzeme ile katkılandırılması tek bir takviyenin dezavantajını potansiyel olarak dengeleyebilir. Karbon elyaf kompozitlere CNT' lerin eklenmesiyle, özellikle artan hasar direncine ve hasar toleransına yol açabilen tabakalar arası mukavemet ve tokluk gibi kalınlık boyunca özelliklerde yapısal iyileştirmeler beklenmektedir. Bununla birlikte, karbon nanotüplerin eklenmesi, dikkate alınması gereken diğer konuları gündeme getirebilir: karbon nanotüplerin matris fazı içerisinde dağıtılması ve matris ile CNT' ler arasındaki bağlanmanın nasıl gerçekleştirileceği incelenmelidir. Çapları bir nanometre aralığında olan SWCNT' ler ve SWCNT' lerden oluşan MWCNT' ler gibi iki ana CNT türü vardır. MWCNT' ler çok sayıda bir araya gelen grafen katmanından (eş merkezli tüpler) oluşmaktadır. Önceki bilimsel çalışmalar, MWCNT' lerin kimyasallara karşı SWCNT' lerden daha yüksek dayanımı olduğunu kanıtlamıştır (Rosato ve Rosato, 2004). MWCNT' lerin modifikasyonu, CNT ile matris arasındaki dağılımı ve etkileşimi iyileştirmiş, bu nedenle modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT-COOH), üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılmıştır.

Polimer kompozitler için matrisler termoset veya termoplastik olabilmektedir. En yaygın termoset matrisler doymamış polyester reçineler, vinil ester reçineler, epoksi reçineler, bismaleimidler, poliimidler ve fenolik reçinelerdir (ŠERCER, 2004). Bunlar arasında epoksiler en yaygın olarak askeri ve ticari uçak alanlarında kullanılmaktadır (Botelho vd., 2006). Polimer matrisli kompozitlerde, termoset matrisler, servis sırasında

yükü transfer etmenin yanı sıra takviyeleri bağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Kim, 1994). Bu çalışmada matris olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Isıyla sertleşen termoset polimerler, mükemmel kimyasal direnç ve korozyon direncinin yanı sıra iyi mukavemet ve termal özellikler sergilerler (Bilyeu vd., 1999). Bu nedenle otomotiv ve elektronik endüstrisi (baskılı devre kartları ve yarı iletken kapsüller) dâhil olmak üzere birçok farklı uygulamada termoset polimerler kullanılmaktadır (Forsdyke ve Starr, 2002). Ek olarak, havacılık endüstrisindeki yapılar için yapıştırıcılarda ve kompozit matrislerde kullanılmaktadır (Jin vd., 2015).

Bu çalışmanın amacı, büyük ölçekli bir kompozit oluşturmak için CNT' yi geleneksel epoksi/karbon fiber kompozitlere katkılamak ve bunların mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda yapılması planlananlar şunlardır;

- MWCNT-COOH ve MWCNT nano malzemelerinin epoksi reçine sisteminde dağılımının incelemesi,
- MWCNT-COOH ve MWCNT nano malzemelerin epoksi/karbon fiber kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelemesi,
- Yüksek kaliteli ve az kusurlu (karbon fiber kumaşlar/CNT takviyeli epoksi reçine) kompozitleri hazırlamak için bir yöntem geliştirmek,
- Üretilen numuneler üzerinde üç nokta eğme testi verilerinin incelenmesidir.

Bu çalışmanın gerekçesi, havacılık uygulamalarında kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için alternatif yollar bulmaktır. Günümüzde kompozit malzemelerin gelişimi hem havacılıkta hem de diğer alanlarda büyük ilgi görmektedir. Polimer matrisli kompozitler, diğer mühendislik malzemelerine kıyasla daha düşük ağırlık ve genellikle daha düşük maliyetle birlikte yüksek mukavemet sunabildikleri için çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Brigante, 2014). Havacılık ve uzay mühendisliğinde, gelişmiş polimer/elyaf kompozitler artık yapısal uygulamalar için birçok parça üretiminde kullanılmaktadır: Örneğin gövde yapıları, kanatlar, kuyruklar ve kapılar ile uydu yapıları ve füze bileşenleridir (Mangalgiri, 1999) (Kelly, 2012).

MATERYAL ve YÖNTEM

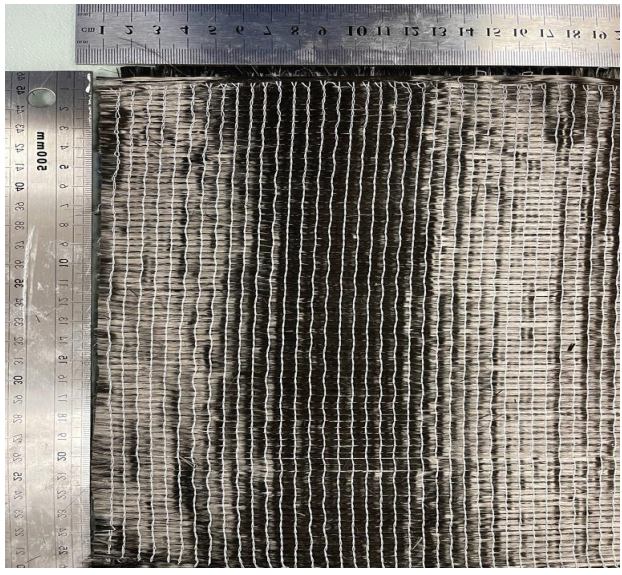
Bu çalışmada, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerden üç plaka üretilmiştir. Bu nanomalzemelerin eklenmesinin karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin (saf) mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için iki plakaya karbon nanotüpler eklenmiştir. Bu çalışma için kullanılan materyal ve yöntemlerin her birini aşağıda açıklayacağız:

Kullanılan Malzemeler

Karbon elyaf kumaş: Bu çalışmada, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit plakaların üretiminde 0°,90° biaxial karbon kumaş kullanılmıştır. Kompozit plakada kullanılan karbon elyaf takviyeli kumaşın teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. 0° ve 90° yönüne doğru karbon fiber demetlerini Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Karbon Elyaf Kumaş Özellikleri

Ürün kodu	Kumaş tipi	Alan ağırlığı (g/m²)	Elyaf tipi
HSCF 12 KD 0°, 90° BX400 1200 KOMP	0°, 90° Biaxial	400	12 K



Şekil 2. 0°,90° Biaxial Karbon Elyaf Kumaş

Karbon elyaf takviyeli/epoksi kompozit plakaların üretiminde termoset Duratek DTE 1200 marka epoksi kullanılmıştır. Epoksi sertleştirici olarak Duratek DTS 1151 epoksi sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi ve sertleştiricinin karışım oranı 79/21'dir. Kullanılan epoksi reçine Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. DTE 1200 Duratek Epoksi Reçine ve DTS 1151 Sertleştirici

Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT.s) ve modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT-COOH)'ler Ege Nanotek Kimya Sanayi, İzmir/Türkiye'den kullanılmıştır. Çalışmamızda kullanılan MWCNTs ve MWCNTs-COOH özellikleri sırasıyla Tablo 2 ve 3'te gösterilmiştir.

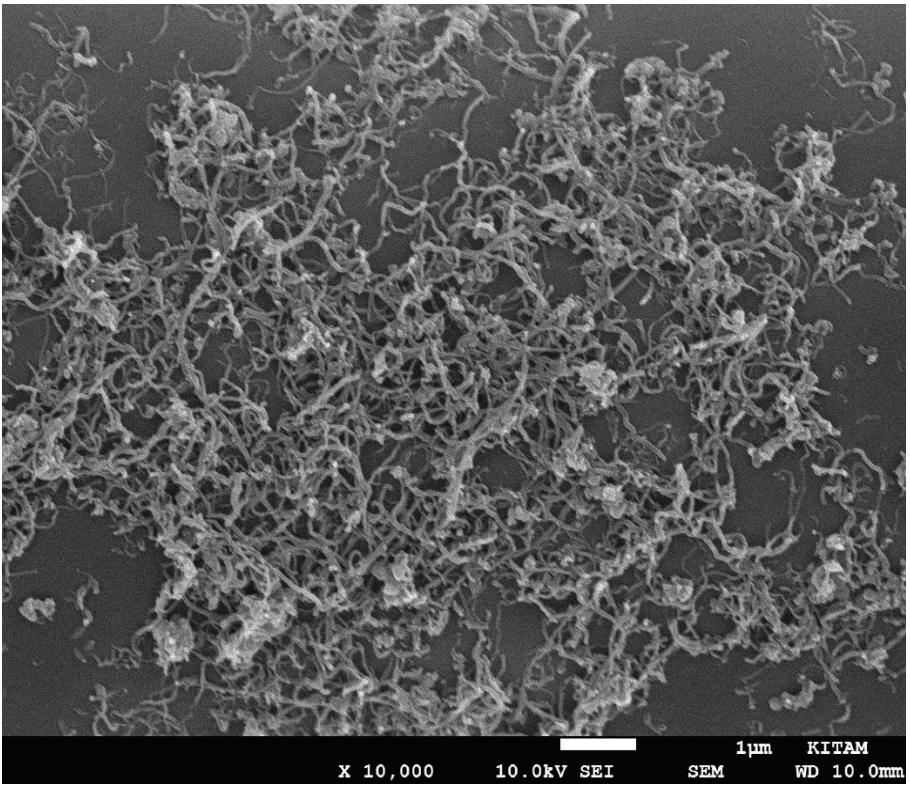
Tablo 2. MWCNT'lerin Özellikleri

Parametre	Değer
Dış çap (nm)	10–20
İç çap (nm)	5–10
Uzunluk (µm)	10–30
Yüzey alanı (m^2/g)	>200
Renk	Siyah
Kül	kitle<%1,5
Elektriksel iletkenlik (S/cm)	>100
Yoğunluk (tap) (g/cm^3)	0.22
Yoğunluk (true) (g/cm^3)	2.1

Tablo 3. MWCNTs-COOH Özellikleri

Parametre	Değer
-COOH içeriği (ağırlıkça %)	2
Dış çap (nm)	10–20
İç çap (nm)	5–10
Uzunluk (µm)	10–30
Yüzey alanı (m^2/g)	>200
Renk	Siyah
kül	kitle <%1.5
Elektriksel iletkenlik (S/cm)	>100
Yoğunluk (tap) (g/cm^3)	0.22
Yoğunluk (true) (g/cm^3)	2.1

Termoset kompozit malzemelerinin kullanılan epoksi matris içerisine ağırlıkça % 0,5 oranlarında katılan CNT tozunun SEM görüntüsü Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kullanılan MWCNT'lerin SEM Görüntüsü

Kullanılan Yöntemler

Hacim oranını hesaplama yöntemi: Kompozitin plakası içinde karbon elyaf hacim oranını hesaplamak için yakma testi yapılmıştır. Yakma testi için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Proterm marka kül fırını kullanılmıştır. Şekil 4'te kül fırını gösterilmiştir. Kompozit plakalardan alınan numunelere yapılan yakma testinde çıkan sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kül Fırınında Kompozit Plakalardan Alınan Numuneler Üzerinde Yanma Testi

Tablo 4. Cam Elyaf ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri

Numuneler	Kat Sayısı	Elyaf Yoğunluğu	Kalınlık (mm)	Elyaf/Hacim Oranı
Saf kompozit	6	1,8	2,5	35,98
MWCNT 'li kompozit	6	1,8	2,5	34,30
MWCNT-COOH 'lı kompozit	6	1,8	2,5	34,22

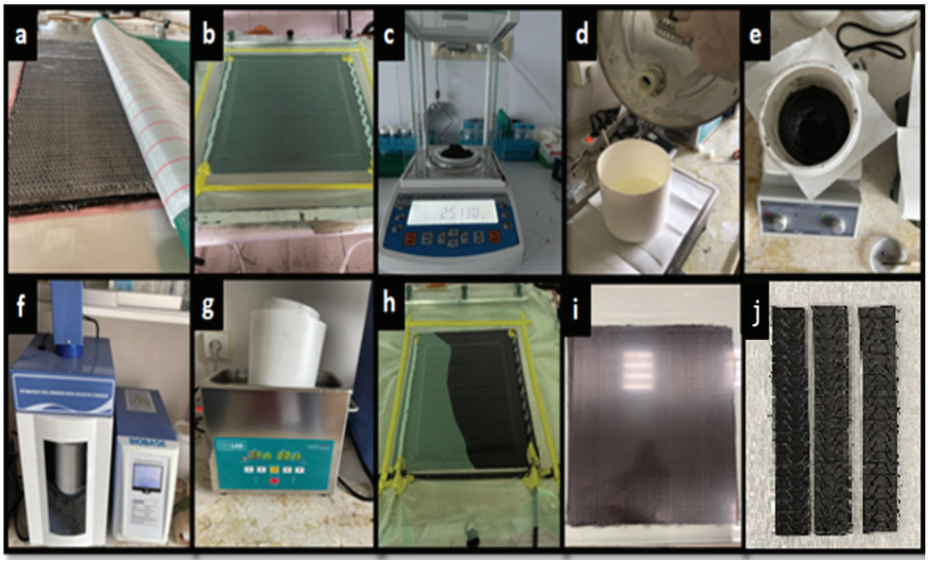
Kompozit plakası üretme ve numune hazırlama yöntemi: Üretilen numunelerin listesi ve bunlara atanan etiketler Tablo 5'te gösterilmiştir. MWCNTs-COOH ve MWCNTs kompozitlerinin numune hazırlama süreci Şekil 5 (a) - (j)'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Kompozit Numunelerin Listesi

Etiketler	Numuneler
a1	Saf CFRP (90°)
a2	CFRP-%0.5 MWCNT.s (90°)
a3	CFRP-%0.5 MWCNT.s -COOH (90°)
b1	Saf CFRP (0°)
b2	CFRP-%0.5 MWCNT.s (0°)
b3	CFRP-%0.5 MWCNT.s -COOH (0°)

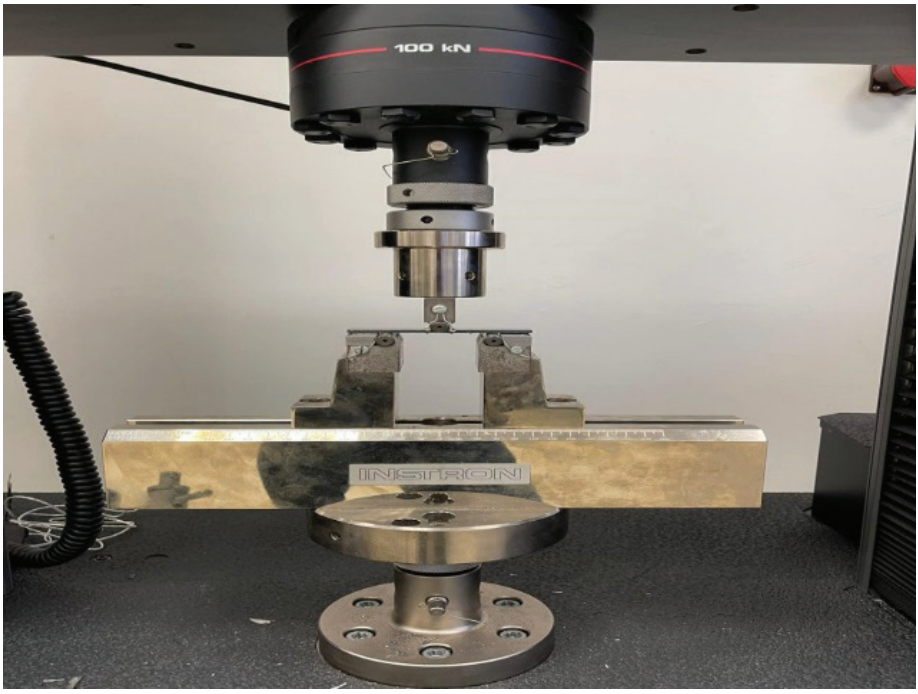
Bu çalışmada ilk önce epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit plakalarının vakum infüzyon yöntemi kullanılarak altı kat kumaş simetrik bir şekilde kalıp üzerine serilerek içerisine reçine gönderilerek üretimleri yapılmıştır. Kompozit plakalar üretilirken 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Aynı yöntem, yine altı kat karbon fiber kumaştan oluşan toplam iki panel nano takviyeli kompozit malzemeler üretmek için de kullanılmıştır. Bu aşamada MWCNT-COOH ve MWCNT.'ler epoksi matrise her biri için ağırlıkça %0,5 oranında ayrı ayrı dâhil edilmiştir. İlk adımda, karbon nanotüplerin tozu, 15 dakika boyunca manyetik bir karıştırıcı MS300HS model kullanılarak epoksi reçine ile karıştırılmıştır. İkinci adımda, magnetik karıştırıcı kullanıldıktan sonra BIOBASE marka UCD-1200 model ultrasonik homojenizasyon cihazı kullanılmıştır. Ultrasonik homojenizatör cihazı ile dispersiyon işlemi %15 güç oranında ve 15 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüplerin tozunun epoksi reçinesi içinde mümkün olan en iyi dağılımını elde etmek için bu adım ikinci kez tekrarlanmıştır. İkinci adıma tekrar başlamadan önce karışım, ultrasonik karıştırıcı ucu tarafından üretilen parçacıkların kinetik enerjisinden kaynaklanan nano takviyeli reçinenin sıcaklığını düşürmek için 15 dakika boyunca soğutulmuş bir ultrasonik banyoya (ISO LAB) yerleştirilmiştir. Son adımda, nano takviyeli reçine, bir vakum infüzyon işlemi ile karbon fiber kumaşa enjekte edilmiştir. Böylece 40*40 cm boyutlarında, 2,5 mm kalınlığında ve %35 fiber hacım oranıyla kompozit plakaları üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalar ASTM D5868-01 standartlarına uygun bir şekilde sulu mekanik

kesici ile kesilerek, takviye fiberlerinin yönüne göre 0° / 90° açıyla hazırlanmıştır.



Şekil 5. Sırasıyla MWCNT-COOH ve MWCNT.s İçin Kompozit Numunelerin Hazırlanma Sürecini Göstermektedir: a) Karbon fiber kumaş ve vakum infüzyon işleminde kullanılan katmanlar, b) Vakum infüzyon proses kalıbı, c) Karbon nanotüplerin tozunu tartan hassas bir terazi, d) Epoksi reçineyi karıştırma kabına döküm, e) Manyetik karıştırıcı, h) Ultrasonik karıştırıcı, g) Ultrasonik banyosu, d) Epoksi reçine/karbon nanotüplerin Kumaşa enjekte edilmesi, d) Kompozit plakası, j) Kopozitin numunesi

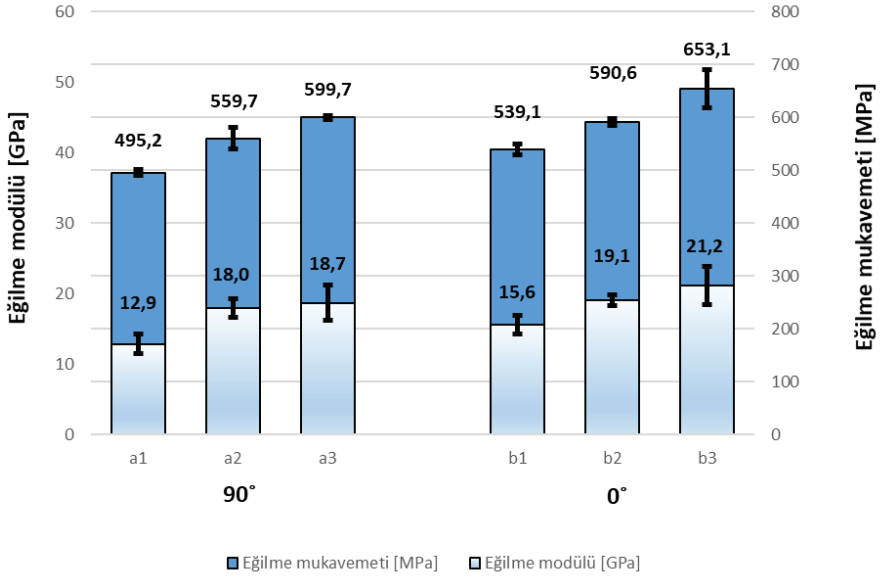
Üç nokta eğilme testi**:** Numuneler üzerinde ASTMD790 standardına göre üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Bu testlerde, her bir kompozit levha tipinden üçer numune test edilmiştir. Numuneler, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda (KITAM) eğilme test cihazı INSTRON 5982 100 KN kullanılarak test edilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında ASTM-D790-03 standartları takip edilmiştir. Hazırlanan numunelerin boyutları 100 mm uzunluğunda, 15 mm genişliğinde ve yaklaşık 2,5 mm kalınlığındadır. Bu testte tüm plaka tipleri için 0° ve 90° yönlerinde iki tip numune test edilmiştir. Üç nokta eğilme test cihazını INSTRON 5982 100 KN Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Üç Nokta Eğilme Cihazı

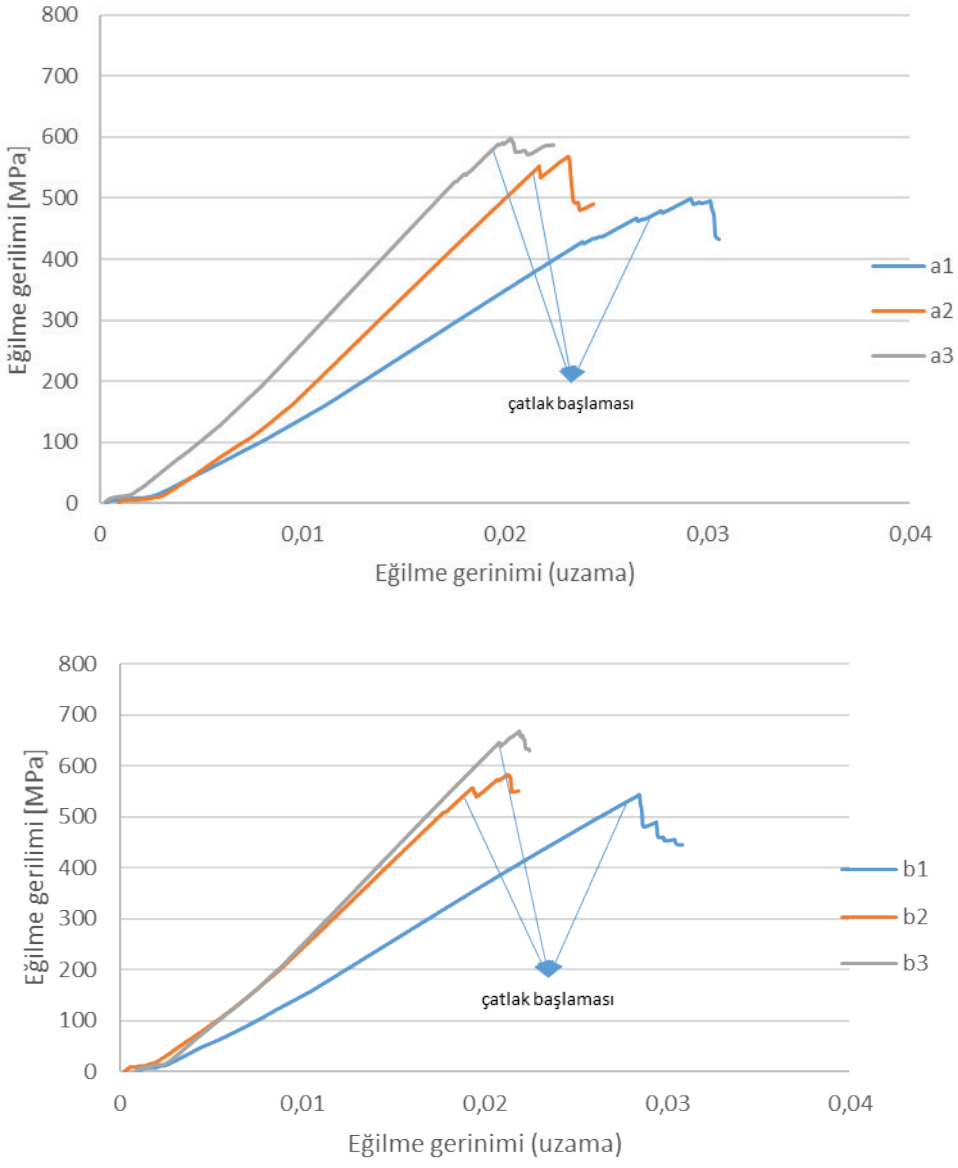
BULGULAR

Grafik 1'de gösterilen sonuçlara göre, b3 en yüksek eğilme mukavemetini (653,1 MPa) ve eğilme modülünü (21.2 GPa) 0° yönünde sergilerken, a1 en düşük eğilme mukavemetini (495.2 MPa) ve eğilme modülünü (12.9 GPa) 90° yönünde sergilenmektedir. Ağırlıkça %0,5 MWCNTs-COOH eklendiğinde, b1 numuneye göre b3'ün eğilme mukavemeti ve eğilme modülü sırasıyla yaklaşık %21 ve %36 artmaktadır. Ağırlıkça %0.5 MWCNT.s eklendiğinde, b1 numuneye göre b2'nin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü sırasıyla yaklaşık %9,5 ve %22 artarmaktadır. Bu olumlu etki, karbon nanotüplerin kırılma sırasında çatlakları köprüleyerek çatlak açılmasını ve yayılmasını önlemesi ile açıklanabilmektedir (Demircan vd., 2021) . Ayrıca lifler ve matris arasında çapraz bağlama etkisine neden olarak kompozit sistemin eğilme özelliklerini iyileştirmektedir.



Grafik 1. Üç Noktalı Eğilme Testinden Numunelerin Tüm Tip ve Yönlerindeki Eğilme Modülü ve Mukavemet Sonuçları

Öte yandan, takviye liflerine paralel bir yönde, yani 0°'lik bir açıyla kesilen numuneler, takviye liflerine dik bir yönde, yani 90°'lik bir açıyla kesilenlere göre daha büyük bir eğilme direnci ve eğilme modülü göstermektedir. Üç noktalı eğilme testlerinden gerilme-gerinim eğrileri Grafik 2'de göstermektedir.



Grafik 2. Üç Noktalı Eğilme Testinden Elde Edilen Gerilme-Gerinim Eğrileri (a) 0° Yönünde, (b) 90° Yönünde

SONUÇ

MWCNTs-COOH ve MWCNT.s eklenmesi, CFRP kompozitlerinin eğilme özelliklerini geliştirdi. Tübüler bir şekle sahip olan MWCNT'ler, kırılma enerjisini emerek çatlaklar boyunca esneyebilmekte ve dolayısıyla çatlak açılmasını ve ilerlemesini engellemektedir. Bu köprüleme olgusunun yanı sıra, MWCNT'ler fiber ve matris arasında kenetlenme etkisine neden olabilir ve karbon fiberlerin kaymasını önleyebilir, bu da kompozit sistemin mekanik performansını iyileştirmektedir. Numunelerin eğilme modülündeki ve eğilme mukavemetindeki artışlar göz önüne alındığında, MWCNTs-COOH ve MWCNT.s ile yüklenen CFRP kompozitlerinin, yüksek mekanik performansın gerekli olduğu gelecekteki uygulamalar için oldukça umut verici olması beklenmektedir.

Teşekkür: Bu çalışma 2019-30-06-30-003 proje numarası ile Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) Bor Araştırma Enstitüsü tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Bilyeu, B., Brostow, W., and Menard, K. P. (1999). Epoxy thermosets and their applications I: chemical structures and applications. *Journal of Materials Education*, *21*(5/6), 281–286.

Boura, O., Diamanti, E. K., Grammatikos, S. A., Gournis, D., and Paipetis, A. S. (2013). Carbon nanotube growth on high modulus carbon fibres: Morphological and interfacial characterization. *Surface and Interface Analysis*, *45*(9), 1372–1381.

Brigante, D. (2014). New composite materials. *Nature*, *442*, 282–286.

Demircan, Ö., Ansaroudi, N. R., and Uzunoğlu, F. B. (2021). *Tensile and flexural properties of MWCNT-COOH and hBN integrated polyamide 66/ short glass fiber composites*.

Forsdyke, K. L., and Starr, T. F. (2002). *Thermoset resins*. iSmithers Rapra Publishing.

Hong, H., Thomas, D., Waynick, A., Yu, W., Smith, P., and Roy, W. (2010). Carbon nanotube grease with enhanced thermal and electrical conductivities. *Journal of Nanoparticle Research*, *12*(2), 529–535.

Jin, F.-L., Li, X., and Park, S.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *29*, 1–11.

Jojibabu, P., Zhang, Y. X., and Prusty, B. G. (2020). A review of research advances in epoxy-based nanocomposites as adhesive materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *96*, 102454.

Karami, H., Papari-Zare, S., Shanbedi, M., Eshghi, H., Dashtbozorg, A., Akbari, A., Mohammadian, E., Heidari, M., Sahin, A. Z., and Teng, C. B. (2019). The thermophysical properties and the stability of nanofluids containing carboxyl-functionalized graphene nano-platelets and multi-walled carbon nanotubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *108*, 104302.

Kelly, A. (2012). *Concise encyclopedia of composite materials*. Elsevier.

Kim, D.-H. (1994). *Composite structures for civil and architectural engineering*. CRC Press.

Mangalgiri, P. D. (1999). Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, *22*(3), 657–664.

Reddy, B. R., and Ramji, K. (2020). Modeling and Evaluation of Effective Elastic Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Carbon Fiber/Epoxy Multiscale Composites. *Materials Today: Proceedings*, *21*, 1099–1103.

Rosato, D. V, and Rosato, D. V. (2004). *Reinforced plastics handbook*. Elsevier.

Salahuddin, B., Faisal, S. N., Baigh, T. A., Alghamdi, M. N., Islam, M. S., Song, B., Zhang, X., Gao, S., and Aziz, S. (2021). Carbonaceous Materials Coated Carbon Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites. *Polymers*, *13*(16), 2771.

Salvetat, J.-P., Briggs, G. A. D., Bonard, J.-M., Bacsa, R. R., Kulik, A. J., Stöckli, T., Burnham, N. A., and Forró, L. (1999). Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes. *Physical Review Letters*, *82*(5), 944.

ŠERCER, M. (2004). FC Campbell: Manufacturing Processes for Advanced Composites. *Polimeri: Časopis Za Plastiku i Gumu*, *25*(1–2), 61.

Seshan, S., Guruprasad, A., Prabha, M., and Sudhakar, A. (1996). Fibre-reinforced metal matrix composites--a review. *Journal of the Indian Institute of Science*, *76*(1), 1.

Taya, M., and Arsenault, R. J. (2016). *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Elsevier.

Vlasveld, D. P. N., Bersee, H. E. N., and Picken, S. J. (2005). Nanocomposite matrix for increased fibre composite strength. *Polymer*, *46*(23), 10269–10278.

Yu, M.-F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., and Ruoff, R. S. (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, *287*(5453), 637–640.

Zhang, M., Ding, L., Zheng, J., Liu, L., Alsulami, H., Kutbi, M. A., and Xu, J. (2020). Surface modification of carbon fibers with hydrophilic Fe3O4 nanoparticles for nickel-based multifunctional composites. *Applied Surface Science*, *509*, 145348.

EOG SİNYALİ İLE NREM, REM VE UYANIKLIK EVRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Mesut MELEK

Öz: Elektroensefalografi (EEG) sinyallerini kullanarak, otomatik uyku evreleme yöntemleri, yakın yıllarda oldukça popular hale gelmiştir. Ancak, EEG sinyallerinin alınması zahmetli ve hasta için eziyet vericidir. Elektrookülogram (EOG) sinyallerinin kaydı EEG' ye göre daha kolaydır ve hasta için uyku sırasında daha fazla konfor sağlar. Bu nedenle, bu çalışmada, EOG sinyali kullanılarak NREM, REM ve uyanıklık evrelerin sınıflandırılması için yeni bir makine öğrenimine dayalı sistem önerdik. Bu üç sınıflı problem için önerilen yöntem, ISRUC-Sleep Subgroup_II ve Subgroup_III veri setleri üzerine test edildi. Subgroup_II veri seti, 8 sağlıklı kişinin Polisomnografi (PSG) cihazıyla kaydedilen sinyallerini içeriyor. PSG sinyalleri, aday başına iki kayıt oturumu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Toplam 10 adayı içeren Subgroup_III veri setinde ise, sağlıklı ve uyku bozukluğu olan adayların sinyalleri tek bir kayıt oturumunda kaydedilmiştir. EOG sinyali LOC-A2 ve ROC-A1 elektrotlarıyla kaydedilerek iki uzman tarafından incelenmiştir. Çalışmanın ilk amacı, her veri seti için, etkili kanal ve uzmanı belirlemektir. Bunun için sinyaller üzerinde ön işleme yapıldıktan ve zaman ve frekans uzayından öznitelikler çıkarıldıktan sonra, makine öğreniminde çok kullanılan destek vektör makine (DVM) sınıflandırıcısı aracılığıyla dört seçenek arasında, uzman ve kanal belirlendi. Daha sonra, belirlenen uzman ve kanal kullanılarak farklı sınıflandırıcılarla NREM, REM ve uyanıklık evreleri sınıflandırıldı. Sonuç olarak, önerilen sistem, Subgroup_II ve Subgroup_III veri setlerinde sırasıyla, %82.49 ve %85.26 doğruluk oranıyla üç evreyi tek bir EOG kanalı kullanarak başarılı şekilde sınıflandırdı.

Anahtar Kelimeler: Uyku Evreleme, EOG, Öznitelik Çıkarma, Sınıflandırma, ISRUC-Sleep

GİRİŞ

Uyku evrelerinin sınıflandırması, uyku kalitesinin değerlendirmesinde ve uyku bozukluğunun tanı ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır. Amerikan uyku tıbbı akademisine (AUTA) göre uyku evreleri NREM (hızlı göz hareketi içermeyen), REM (hızlı göz hareketi içeren) ve uyanıklık evreleri olarak, üç ana evreye ayrılmaktadır. NREM evresi ise NREM1 (N1), NREM2 (N2) ve NREM3 (N3) olarak üç evreye ayrılır (Iber C., 2007). Uyku evreleri genelde 30 saniyelik dönemlere (epok) ayrılarak operatör tarafından incelenir ve sınıflandırılır. Operatörler genellikle uyku evrelerini sınıflandırmak için elektroensefalografi (EEG), elektrookülografi (EOG) ve elektromiyografi (EMG) gibi polisomnografi (PSG) cihazlarıyla kaydedilen bir dizi fizyolojik sinyallerini kullanırlar. Ancak bu süreç yorucu ve zaman alıcıdır. Üstelik hata payı yüksektir. Sekiz saatlik bir sinyal kaydının manuel şekilde puanlanması yaklaşık 2-4 saat sürmektedir (Hassan ve Bhuiyan, 2016). Ayrıca, Danker ve ark. (Danker-Hopfe ve ark., 2009) uyku puanlamalarının operatörler arası güvenilirliğinin yaklaşık 0.8 olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle, otomatik puanlama, maliyet etkinliği ve yüksek hassasiyeti nedeniyle umut verici bir yaklaşım olarak görülmektedir.

Otomatik uyku evrelemesi için çok sayıda makine veya derin öğrenimi tabanlı yöntem önerilmiştir (Faust ve ark., 2019). Bu çalışmaların çoğunda EEG sinyali birincil yöntem olarak kullanılmıştır (Längkvist ve ark., 2012), (Supratak ve ark., 2017), (Chambon ve ark., 2018), (Dong ve ark., 2018). Uyku evrelerini puanlamak için kardiyorespiratuvar veya hareket sinyalleri de kullanılmıştır (Zhang ve ark., 2018), (Fonseca ve ark., 2017), (Domingues ve ark., 2014), (Willemen ve ark., 2014), (Wei ve ark., 2018).

Uyku evreleme yöntemler arasında, EEG tabanlı yöntemler yüksek doğruluk sağlamaktadır (Längkvist, Karlsson ve Loutfi, 2012), (Supratak ve ark., 2017), (Dong ve ark., 2018). Geleneksel makine öğrenimine dayalı puanlama yöntemleri iki ana bileşeni içeriyor: öznitelik çıkarma ve sınıflandırma. İstatistiksel yöntemler (Šušmáková ve Krakovská, 2008), Fourier dönüşümleri (Procházka ve ark., 2018), dalgacık dönüşümü (Rahman, Bhuiyan ve Hassan, 2018) ve Hilbert dönüşümü (Dimitriadis, Salis ve Linden, 2018) gibi yöntemlerle elde edilen öznitelikler, daha

sonra destek vektör makinesi (Alickovic ve Subasi, 2018), rastgele orman (Yan ve ark., 2019), K-en yakın komşu (Güneş, Polat ve Yosunkaya, 2010), Naive Bayes (Procházka ve ark., 2018), yapay sinir ağları (Özşen, 2013) gibi sınıflandırıcılarla sınıflandırılmıştır. Bu çalışmaların doğruluğu 0,8 ile 0,9 arasında değişiyor ve büyük ölçüde kullanılan özniteliklerin geçerliliğine bağlıdır (Yan ve ark., 2021).

Ancak, EEG sinyallerinin alınması karmaşık ve zordur. Ayrıca kullanıcı dostu olmadığı için, hasta için sıkıcı ve eziyet vericidir. Buda, doğal uykunun bozulmasına ve uyku düzenini değiştirilmesine yol açmaktadır. Diğer taraftan, kardiyorespiratuvar ve hareket sinyallerinin alınması daha uygun görünmektedir (Chen ve ark., 2019). Ancak, bu yöntemler hala keşif aşamasındadır ve performansları tıp uzmanları tarafından kabul edilememektedir (Fan ve ark., 2021). Bu nedenle uyku evreleme sistemleri için yüksek doğruluk oranıyla birlikte kullanıcı dostu bir yaklaşım gereklidir.

Uygulanabilirlik ve doğruluk oranı arasındaki dengeyi göz önünde bulundurarak, EOG' nin uyku evreleme sistemleri için uygun potansiyele sahip olduğu görünmektedir. EOG kayıtları, NREM ve REM aşamalarını tanımak için çok önemli bir gösterge olan göz aktivitesini yansıtmaktadır. Ayrıca, EOG sinyalleri EEG sinyallerine benzemektedirler. (Fan ve ark., 2021)' de, EEG C3 kanalı ile EOG E2 kanalı arasında yüksek bir benzerlik gözlemlendi. Son olarak, daha öncede bahsedildiği gibi, elektrot yerleştirme kolaylığı nedeniyle EOG sinyallerinin elde edilmesi EEG' ye nazaran çok daha uygundur. Literatürde EOG tabanlı uyku evreleme sistemleri önerilmiştir (Virkkala ve ark., 2007), (Olesen ve ark., 2016), (Yang ve Xia, 2016), (Xia ve ark., 2015). Bu yöntemlerin iyi bir sınıflandırma doğruluk oranlarının olduğu söylenemez. Spesifik olarak, uyanıklık evresi dışındaki uyku aşamalarını tespit etmede çok düşük performans gösterirler. Çoğu uyku evreleme veri tabanı, uyanıklık sınıfına karşı büyük ölçüde dengesizdir. Böylece, veri tabanında eğitilen herhangi bir sınıflandırıcı yanlı olacaktır. Sonuç olarak, uyanıklık sınıfı dışındaki uyku aşamaları, zayıf algılama doğruluğundan muzdariptir. Son zamanlarda, (Azami ve ark., 2017)'de yazarlar, uyku evresi sınıflandırmasında, tüm sınıflar için önemli bir gelişme sağlayan, takviyeli (RUSBoost) sınıflandırıcı ile Rastgele alt örneklemeyi önerdiler. Ancak

yöntem konudan bağımsız değildir yani aynı konudan örnekler hem eğitim hem de test setinde bulunabilir. Bu nedenle, sınıf dengesizliği sorununu özneden bağımsız değerlendirme ile ele almak için EOG tabanlı bir uyku evresi sınıflandırmasının incelenmesi, araştırma için geniş bir kapsam sağlar.

Bunun için, sunulan çalışmada, ham EOG sinyalleri kullanılarak NREM, REM ve uyanıklık evrelerinin sınıflandırılması için yeni bir makine öğrenimine dayalı sistem önerdik. Tek kanallı EOG sinyallerine dayalı önerilen yöntem, mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında, umut verici sonuçlara yol açmaktadır.

Bu çalışmanın ana bağlamı bu şekildedir. "Materyaller ve Yöntemler" bölümü metodolojiyi detaylandırır. Deneysel süreç bu bölümde açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar "Bulgular" bölümünde sunulur ve "Tartışma" bölümünde deneysel sonuçlar ve model analizi tartışılır. Son bölüm ise, bu çalışmayı özetlemektedir.

MATERYALLER ve YÖNTEMLER

Otomatik uyku evrelemesinde EOG sinyallerinin etkinliğini araştırmak için açık erişimli, ISRUC-Sleep (Khalighi ve ark., 2016) veri tabanı kullanıldı. Bu veri tabanında, sinyaller polisomnografi cihazıyla ve 200 Hz örnekleme frekansıyla yetişkin adaylardan kaydedilmiştir. Kaydedilen sinyaller 30 saniyelik epoklara parçalanarak iki uzman tarafından incelenmiş ve puanlanmıştır.

ISRUC-Sleep veri tabanı, Subgroup_I, Subgroup_II ve Subgroup_III olarak üç farklı araştırma hedeflerini destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır.

Subgroup_I veri seti, aday başına bir kayıt oturumu ile 100 adayın sinyallerini içeriyor.

Subgroup_II veri seti, 8 adaydan toplanmıştır. Ancak, PSG sinyallerinde zaman içinde meydana gelen değişiklikleri araştıran araştırmacılar için, her adaydan iki farklı oturumda sinyal kaydı gerçekleştirilmiştir.

Subgroup_III veri seti, tek bir oturumda 10 sağlıklı ve uyku bozukluğu olan adaylardan kaydedilmiştir.

Subgroup_II veri seti için, her oturumda, her adaydan elde edilen sinyallerin uzmanlara göre puanlaması ve uyku evrelerinin dağılımı

Tablo 1' de verilmiştir. Tablo 2' de ise, 8 adaydan alınan sinyallerin uzmanlara göre puanlamasının sonucunda elde edilen uyku evrelerin dağılımı görünmektedir.

Tablo 1. Subgroup_II Verisetinde Her Adayın Uyku Evrelerinin Dağılımı

	İlk Oturum					İkinci oturum				
	Uzman	NREM	REM	Uyanıklık	Toplam	Uzman	NREM	REM	Uyanıklık	Toplam
Aday 1	1	610	189	134	933	1	334	78	375	787
	2	616	173	144	933	2	372	64	351	787
Aday 2	1	426	49	376	851	1	468	97	304	869
	2	350	39	462	851	2	487	81	301	869
Aday 3	1	669	124	78	871	1	570	161	82	813
	2	625	153	93	871	2	556	173	84	813
Aday 4	1	668	152	112	932	1	646	125	128	899
	2	661	112	159	932	2	632	150	117	899
Aday 5	1	641	105	69	815	1	651	134	94	879
	2	595	147	73	815	2	650	124	105	879
Aday 6	1	748	123	94	965	1	709	138	140	987
	2	743	134	88	965	2	647	179	161	987
Aday 7	1	669	151	122	942	1	854	0	45	899
	2	661	150	131	942	2	573	166	160	899
Aday 8	1	548	234	33	815	1	651	203	69	923
	2	548	234	33	815	2	700	163	60	923

Tablo 2. Subgroup_III Verisetinde Uyku Evrelerinin Dağılımı

	NREM	REM	Uyanıklık	Toplam
Uzman 1	5849	1066	1674	8589
Uzman 2	5835	1194	1560	8589

VERİ İŞLEME

EOG Veri Önişleme

Sinyallerin genliği, sınıflandırma performansını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, genliğin etkisini azaltmak için Denklem (1)' de gösterildiği gibi her epok için z-skor adı verilen normalizasyon yöntemi uygulandı.

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (1)$$

Burada x ve z sırasıyla orijinal epok ve normalleştirilmiş epok göstergesidir. μ ve σ ise sırasıyla bir epoğun ortalama ve standart sapmasını temsil etmektedir. Ayrıca EOG sinyallerinin işlenmesi filtreleme gibi özel yaklaşımlar gerektirir. Normalizasyon aşamasından sonra, her bir epok 0.1-49 Hz bant geçiren Butterworth filtresinden geçirildi. Filtrenin mertebesi deneme yanılma yöntemiyle iki olarak belirlenmiş ve faz kaymasını sıfıra indirmek için Matlab *filtfilt* komutu kullanılmıştır.

Öznitelik Çıkarma

EOG durağan olmayan bir sinyal olduğundan, ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) farklı ritimlere karşılık gelen farklı uyku aşamaları arasında ayrım yapmak için çok uygundur (Rahman, Bhuiyan ve Hassan, 2018). ADD, yaygın olarak kullanılan bir zaman-frekans ayrıştırma aracıdır. Bu yöntem EOG ve EEG sinyallerinden öznitelik çıkarma için sıkça kullanılmıştır (Adeli, Ghosh-Dastidar ve Dadmehr, 2007). DWT, bir ölçekleme işleviyle birlikte ana dalgacık olarak bilinen bir temel işlevlerin ötelemelerinin ve genişlemelerinin doğrusal bir kombinasyonu yoluyla bir sinyali temsil eder. Bu yöntemde, sinyal bir alçak geçiren filtre ve bir yüksek geçiren filtreden geçirilir ve filtrelerin çıktısı, yaklaşık A1 katsayısı ve ayrıntılı D1 katsayısını üretmek için sinyalin örnekleme hızı azaltılır. İkinci seviye yaklaşık katsayı A2 ve ayrıntılı katsayı D2' yi elde etmek için yaklaşık katsayı A1 için işlem tekrarlanır. Uyku evrelerinde, farklı frekans bantlarının farklı ritimlerine karşılık geldiği açıktır. EOG sinyalinden anlamlı öznitelikler elde etmek için, sinyalin zaman-frekans lokalizasyonu ile ayrıştırılması gerekmektedir. Bu bantların çeşitli uyku evreleri ile güçlü bir ilişkisi vardır. Böylece, DWT alt-bantlarından elde edilen istatistiksel özellikler, iyi bir ayrım kabiliyetine sahip olabilir. Bu

çalışmada, EOG sinyalinin 6 seviyeli bir ayrıştırması, ADD ile gerçekleştirildi. Ana dalgacık olarak, Daubechies-8 (db8) kullanıldı ve ayrıntılı katsayılar ve Yaklaşık Katsayılar çıkarıldı. Daha sonra bu katsayılardan yedi istatistiksel öznitelikler elde edildi. Ayrıca, işlenmiş EOG sinyalinin zaman uzayından da yedi farklı istatistiksel öznitelikler, ADD yöntemiyle elde edilen özniteliklere eklendi.

Sınıflandırma Teknikleri ve Performans Değerlendirmesi

Bilinmeyen örnekleri belirlemek için etiketlenmiş eğitim örnekleriyle eğitilen bir algoritmaya sınıflandırıcı denir. DVM uyku evreleme sistemlerinden sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ise bahsedildiği gibi, etkili uzman ve kanalı belirlemek için, radyal tabanlı çekirdek fonksiyonlu DVM (RTF-DVM) kullanıldı. Daha sonra, belirlenen kanaldan elde edilen öznitelikler polynomial çekirdek fonksiyonlu DVM (Poly_ DVM), RTF-DVM, torbalama topluluğu (TT) ve karar ağaçları (KA) sınıflandırıcılarıyla belirlenen uzman puanlamasına göre sınıflandırıldı ve sonuçlar kıyaslandı.

Genel olarak, uyku evreleme sistemlerinin değerlendirmesinde doğruluk oranı (DO), sınıfların hassasiyeti (Has.) ve Cohen's Kappa değeri (Kappa) dikkate alınır (Melek, Manshouri ve Kayikcioglu, 2020), (Hassan ve Subasi, 2017), (Hassan ve Bhuiyan, 2017). Doğruluk oranı, sınıflandırma işlemi içeren çalışmalarda en çok kullanılan metriktir. Bu metrik, Denklem (2)' de (Shi ve ark., 2018) göründüğü gibi, sistemim doğru tanımladığı örnek sayısının doğru ve yanlış tanımladığı tüm örnek sayısına bölünmesiyle elde edilir.

$$DO = \frac{\text{Doğru tanımlanan örnek sayısı}}{\text{Toplam örnek sayısı}} \tag{2}$$

Bir sınıfın hassasiyeti ise, sistemin o sınıfa ait doğru tanımladığı örnek sayısının tüm sınıftaki örnek sayısına bölünerek hesaplanır. Dolaysıyla, bu çalışmada üç sınıf olduğu için, her aşamada üç hassasiyet değeri hesaplandı.

Cohen's Kappa değeri (Cohen, 1960) ilk olarak psikolojik davranışı gözlemleyenler arasındaki anlaşmanın bir ölçüsü olarak tanıtıldı. Co-

hen's Kappa'nın asıl amacı, aynı fenomeni gözlemleyen iki veya daha fazla kişinin anlaşma veya anlaşmazlık derecesini ölçmektir. Cohen's Kappa değeri denklem (3)' de verildiği gibi hesaplanır.

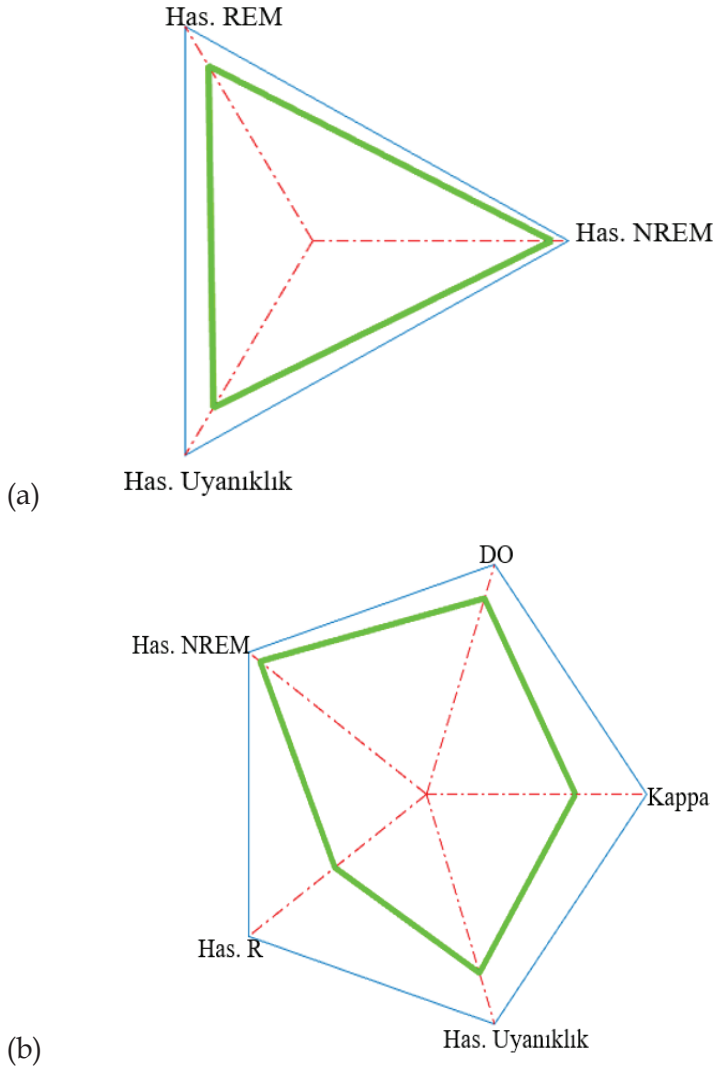
$$\text{Kappa} = \frac{\Pr(a)-\Pr(e)}{1-\Pr(e)} \tag{3}$$

burada Pr(a) değerlendiriciler arasında gözlemlenen nispi uyum veya toplam anlaşma olasılığıdır ve Pr(e), her bir kategoriyi rastgele söyleyen her gözlemcinin olasılıklarını hesaplamak için gözlenen verileri kullanarak, tesadüfi anlaşmanın olasılığıdır. Değerlendiriciler tam bir uyum içindeyse K=1 olur. Değerlendiriciler arasında (tesadüfen beklenenin dışında) bir anlaşma yoksa K≤0. Daha iyi performans gösteren sınıflandırıcılar daha yüksek K değerine sahip olmalıdır.

(Melek, Manshouri ve Kayikcioglu, 2020)' de, uyku evreleme sistemlerin performansını tek bir değerle kolayca değerlendirmek için, iki yeni ölçüt önerilmiştir. Bunlar, Hassasiyet Çokgenin Normalleştirilmiş Alanı (HÇNA) ve Genel Çokgenin Normalleştirilmiş Alanı (GÇNA)' dır. HÇNA çapı 2 birim olan düzgün bir çokgenden oluşmaktadır. Çokgenin her yarıçapı bir uyku evresinin hassasiyetine aittir. Bu durumda her yarıçapın uzunluğu 1 birim olacaktır. [0 1] arasında olan her bir hassasiyet değeri, bir yarıçap üzerinde bir nokta ile işaretlenir; bu şekilde oluşan çokgenin alanı hesaplanır. Bu alan, düzgün çokgenin alanına bölünerek [0 1]'e normalleştirilir. Böylelikle, Uyku evrelerinin hassasiyetleri ile bir hassasiyet çokgeni oluşturulur. Üç sınıflı uyku evrelemesinde bu çokgen düzgün bir üçgen olacaktır. Şekil 1' de üç aşamalı bir hassasiyet çokgeni gösterilmiştir.

Uyku evrelerinin hassasiyet çokgenine, sistemin doğruluk oranı ve Cohen's kappa değeri eklendiği zaman genel poligonu oluşmaktadır. Üç aşamalı uyku evrelemesinde bu çokgen düzgün bir beşgen olacaktır. Böylelikle, ortada oluşan düzensiz beşgenin alanı düzenli beşgenin alanına bölünerek, GÇNA değeri hesaplanır. Bu şekilde, uyku evreleme sistemlerini yalnızca doğruluk oranı veya Cohen's Kappa değeri yerine tüm boyutlarda tek bir değerle karşılaştırama mümkündür. Şekil 1' de

üç aşamalı bir genel çokgeni gösterilmiştir. Sunulan çalışmada ilk kez bu ölçütler EOG tabanlı uyku evreleme sistemleri üzerine kullanıldı.



Şekil 1. Üç Aşamalı Uyku Evreleme Sistemi İçin (a) Hassasiyet ve (b) Genel Poligonları

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, önerilen EOG tabanlı uyku evreleme sisteminin değerlendirilmesi için ISRUC-SLEEP Subgroup_II ve Subgroup_III veri

setleri kullanıldı. İlk adımda, Subgroup_II veri setinde RTF-DVM sınıflandırıcısı aracılığıyla etkili uzman ve kanal belirlendi. İkinci aşamada ise, belirlenen uzman ve kanal kullanılarak, elde edilen öznitelikler dört farklı sınıflandırıcıyla sınıflandırıldı. Her iki aşamada, her aday için ayrı ayrı, sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi ve ölçütlerin ortalaması hesaplandı. İlk oturumda kaydedilen sinyaller, önerilen modelin oluşturulması için kullanıldı ve daha sonra oluşan model, ikinci oturumda kaydedilen sinyaller üzerine test edildi.

Üçüncü aşamada, Subgroup_III veri setinde iki uzman puanlaması ve sağ ve sol gözlerden kaydedilen EOG sinyalleri dikkate alınarak, dört sınıflandırıcıyla sınıflandırıldı ve sonuçlar kıyaslandı.

Her epok için ön işleme yapıldıktan sonra, zaman- frekans uzayında, ADD aracılığıyla beş farklı bant için yedi istatistiksel işlem yapıldı ve 35 öznitelik elde edildi. Bunlar, ortalama, Kök kare ortalama, variyans, çarpıklık, Basıklık, Shannon'ın entropisi ve kare ortalamasıdır. Ayrıca, zaman uzayında, işlenmiş sinyal üzerinde de, bu yedi istatistiksel işlem yapıldı ve böylelikle, her epok için toplam 42 öznitelik elde edildi.

Subgroup_II Veri Setinde Etkili Uzman ve Kanalın Belirlenmesi

Sağ ve sol EOG sinyallerinden elde edilen öznitelikler iki uzman tarafından belirlenen etiketlere göre RTF-DVM sınıflandırıcısıyla sınıflandırıldı. Bu aşamada, RTF-DVM sınıflandırıcının sigma parametresi 1 olarak sabitlendi. Böylelikle her aday için dört farklı sınıflandırma sonucu hesaplandı. Sonuçlar Tablo 3' de verilmiştir.

Aday 6' nın HÇNA ve GÇNA değerleri, kanal LOC_A2 ve uzman 2 değerlendirmesine göre, sırasıyla 0.6107 ve 0.6386' ile, diğer adaylara göre daha yüksek olduğu görünmektedir. Aday 1' de ise, uzman 1 ve ROC_A1 kanalına göre HÇNA ve GÇNA değerleri, sırasıyla 0.0174 ve 0.0841' le en düşük değerler olarak görünmektedirler. Aday 7' nin birinci uzmanın etiketlediği epoklarda sorun olduğu için, bu adayın birinci uzman puanlamasına göre sınıflandırma yapılamadı. Tüm ölçütler için 8 adaydan elde edilen sonuçların ortalaması tablonun sonunda kalın yazı tipi ile gösterilmiştir. Göründüğü gibi, LOC-A2 kanalı ikinci uzman puanlamasına göre en yüksek doğruluk oranı ve Cohen's Kappa değerine

ulaşmıştır. Beklendiği gibi, bu durumda, sistemin hassasiyet ve genel çokgeninden elde edilen HÇNA ve GÇNA değerleri de diğer durumlara göre daha yüksektir. Böylece, çalışmanın ikinci aşaması için LOC-A2 kanalı ve ikinci uzman seçildi.

Subgroup_II Veri Setinde Belirlenen Kanal ve Uzman Puanlamasına Göre Uyku Evrelerinin Sınıflandırılması

Bu aşamada, LOC-A2 kanalından elde edilen öznitelikler Poly-DVM, RTF-DVM, torbalama topluluğu (TT) ve karar ağaçları (KA) sınıflandırıcılarıyla uzman 2 puanlamasına göre sınıflandırıldı. Her sınıflandırıcı parametresinin belirlenmesi için, belli aralıklarda tarama yapıldı ve test veri setinde yüksek doğruluk oranına ulaşılan değer, sınıflandırıcı parametresinin optimum değeri olarak seçildi. Poly-DVM' nin mertebesi 2, RTF-DVM' nın sigması 1, torbalama topluluğunun maksimum bölünme sayısı 8000 ve karar ağaçları sınıflandırıcısının maksimum bölünme sayısı 40 olarak belirlendi. Sınıflandırma sonuçları Tablo 4' de verilmiştir.

Her sınıflandırıcı için, 8 adaydan elde edilen ölçütlerin ortalaması kalın yazı tipi ile Tablo da gösterilmiştir. Göründüğü gibi, Poly-DVM diğer sınıflandırıcılara göre daha yüksek doğruluk oranıyla üç uyku evresini sınıflandırmıştır. Ayrıca, bu sınıflandırıcının NREM hassasiyeti hariç, diğer ölçütleri de, diğer sınıflandırıcıların ölçütlerine göre daha yüksektir. Sistemin NREM, REM ve uyku sınıfları için hassasiyeti, sırasıyla, 0.8483, 0.6096 ve 0.7832 ve sistemi tek değerle özetleyen GÇNA değeri ise bu sınıflandırıcı için 0.5444 hesaplanmıştır.

Tablo 3. RTF-DVM Sınıflandırıcısıyla Dört Farklı Durum İçin Hesaplanan Sınıflandırma Sonuçları

	Uzman	Kanal	Kappa	DO	Has. NREM1	Has. REM	Has. Uyanıklık	HÇNA	GÇNA
Aday 1	1	ROC_A1	0.0926	0.4571	0.0181	0.3077	0.9107	0.0174	0.0841
	2	ROC_A1	0.0675	0.4491	0.0464	0.2031	0.9480	0.0181	0.0634
	1	LOC_A2	0.5401	0.7345	0.6084	0.3974	0.9308	0.3907	0.3916
	2	LOC_A2	0.4779	0.7067	0.5929	0.2969	0.9144	0.3467	0.3282
Aday 2	1	ROC_A1	0.5937	0.7783	0.8739	0.2474	0.8029	0.5537	0.4068
	2	ROC_A1	0.6027	0.7890	0.8645	0.2099	0.8266	0.5596	0.4022
	1	LOC_A2	0.4813	0.6973	0.7308	0.3093	0.7774	0.3990	0.3372
	2	LOC_A2	0.5141	0.7128	0.6715	0.3333	0.9004	0.3968	0.3664
Aday 3	1	ROC_A1	0.6779	0.8531	0.8987	0.7417	0.7468	0.6514	0.6143
	2	ROC_A1	0.5704	0.7752	0.7782	0.7515	0.8049	0.4964	0.5388
	1	LOC_A2	0.6490	0.8442	0.9096	0.6954	0.6709	0.6354	0.5701
	2	LOC_A2	0.7147	0.8633	0.9098	0.7751	0.7439	0.6842	0.6432
Aday 4	1	ROC_A1	0.5585	0.8297	0.9434	0.6121	0.4274	0.5910	0.4648
	2	ROC_A1	0.6140	0.8435	0.9580	0.4930	0.6481	0.6381	0.5031
	1	LOC_A2	0.4862	0.7894	0.8962	0.6207	0.3761	0.5090	0.4128
	2	LOC_A2	0.5770	0.8228	0.9257	0.5634	0.5741	0.5902	0.4825
Aday 5	1	ROC_A1	0.3223	0.7055	0.7757	0.3504	0.6667	0.3415	0.2990
	2	ROC_A1	0.3195	0.6796	0.7236	0.4444	0.6495	0.3134	0.3053
	1	LOC_A2	0.4877	0.7951	0.8816	0.3761	0.7222	0.5062	0.4088
	2	LOC_A2	0.4833	0.7762	0.8339	0.4259	0.7835	0.4751	0.4180
Aday 6	1	ROC_A1	0.6187	0.8120	0.8307	0.6457	0.8625	0.5636	0.5608
	2	ROC_A1	0.6824	0.8323	0.8346	0.7561	0.9032	0.6107	0.6386
	1	LOC_A2	0.6643	0.8404	0.8666	0.7244	0.8188	0.6208	0.6103
	2	LOC_A2	0.7325	0.8659	0.8947	0.6951	0.9226	0.6881	0.6696

Aday 7	1	ROC_A1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	ROC_A1	0.5240	0.7699	0.9055	0.6800	0.3734	0.5250	0.4332
	1	LOC_A2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	LOC_A2	0.6089	0.8032	0.9002	0.5867	0.6646	0.5867	0.5070
Aday 8	1	ROC_A1	0.6148	0.8163	0.8486	0.8276	0.4928	0.5721	0.5215
	2	ROC_A1	0.5601	0.7996	0.8075	0.8528	0.5667	0.5153	0.5166
	1	LOC_A2	0.6168	0.8141	0.8390	0.8177	0.5797	0.5676	0.5406
	2	LOC_A2	0.5707	0.8007	0.8015	0.8589	0.6333	0.5187	0.5385
Ortalama	1	ROC_A1	0.4969	0.7503	0.7413	0.5332	0.7014	0.4325	0.4094
	2	ROC_A1	0.4926	0.7423	0.7398	0.5488	0.7151	0.4264	0.4131
	1	LOC_A2	0.5608	0.7878	0.8189	0.5630	0.6965	0.5154	0.4661
	2	LOC_A2	0.5849	0.7939	0.8163	0.5669	0.7671	0.5300	0.4917

Tablo 4. Subgroup_II Veri Setinde LOC_A2 Kanalı Kullanılarak Uzman 2 Puanlamasına Göre Elde Edilen Sonuçlar

	Sınıflandırıcı	Kappa	Do	Has. NREM	Has. REM	Has. Uyanıklık	HÇNA	GÇNA
Aday 1	KA	0.2100	0.5086	0.2568	0.5313	0.7859	0.0971	0.1913
	Poly-DVM	0.5612	0.7384	0.5656	0.6250	0.9541	0.3831	0.4635
	TT	0.2550	0.4637	0.2268	0.7813	0.6667	0.0937	0.2183
	RTF-DVM	0.4718	0.6724	0.3989	0.6719	0.9786	0.2579	0.3945
Aday 2	KA	0.5341	0.7354	0.7310	0.3333	0.8635	0.4403	0.3846
	Poly-DVM	0.6121	0.7867	0.8070	0.2099	0.9225	0.5368	0.4088
	TT	0.6172	0.7986	0.8583	0.1235	0.8930	0.5694	0.3892
	RTF-DVM	0.6435	0.8176	0.9014	0.0000	0.9114	0.6144	0.3699

Aday 3	KA	0.5430	0.7625	0.7782	0.7870	0.6098	0.4767	0.4862
	Poly-DVM	0.7503	0.8787	0.9060	0.8284	0.8049	0.7117	0.6953
	TT	0.6493	0.8404	0.9267	0.6686	0.6341	0.6421	0.5559
	RTF-DVM	0.6600	0.8519	0.9605	0.6213	0.6220	0.6715	0.5548
Aday 4	KA	0.4922	0.7779	0.8724	0.4930	0.6111	0.4970	0.4187
	Poly-DVM	0.5883	0.8343	0.9564	0.5211	0.5463	0.6171	0.4786
	TT	0.5195	0.8113	0.9515	0.3944	0.5556	0.5626	0.4153
	RTF-DVM	0.5289	0.8239	0.9774	0.3732	0.5370	0.5860	0.4180
Aday 5	KA	0.4036	0.7479	0.8230	0.4167	0.6186	0.4165	0.3536
	Poly-DVM	0.6202	0.8563	0.9286	0.5648	0.7010	0.6341	0.5363
	TT	0.3964	0.7503	0.8276	0.4630	0.5567	0.4155	0.3560
	RTF-DVM	0.4980	0.8316	0.9550	0.4352	0.4536	0.5613	0.4094
Aday 6	KA	0.5577	0.7917	0.8887	0.5671	0.6129	0.5469	0.4677
	Poly-DVM	0.7254	0.8638	0.8977	0.6341	0.9613	0.6844	0.6556
	TT	0.6594	0.8364	0.8992	0.4634	0.9613	0.6322	0.5599
	RTF-DVM	0.5072	0.7866	0.9278	0.4268	0.5613	0.5331	0.4098
Aday 7	KA	0.4629	0.7215	0.8289	0.4533	0.5949	0.4386	0.3706
	Poly-DVM	0.6156	0.8067	0.8984	0.5667	0.7089	0.5915	0.5137
	TT	0.5683	0.7768	0.8538	0.4800	0.7848	0.5300	0.4674
	RTF-DVM	0.5948	0.7986	0.8966	0.5667	0.6709	0.5748	0.4957
Aday 8	KA	0.5008	0.7648	0.7731	0.8344	0.4833	0.4538	0.4529
	Poly-DVM	0.6408	0.8343	0.8269	0.9264	0.6667	0.5848	0.6071
	TT	0.6098	0.8197	0.8179	0.8650	0.7167	0.5563	0.5870
	RTF-DVM	0.6443	0.8365	0.8313	0.9141	0.6833	0.5900	0.6118
Ortalama	KA	0.4630	0.7263	0.7440	0.5520	0.6475	0.4070	0.3889
	Poly-DVM	0.6392	0.8249	0.8483	0.6096	0.7832	0.5898	0.5444
	TT	0.5344	0.7621	0.7952	0.5299	0.7211	0.4794	0.4404
	RTF-DVM	0.5686	0.8024	0.8561	0.5012	0.6773	0.5433	0.4594

Subgroup_III Veri Setinin Sınıflandırılması

Bu aşamada, 10 adaydan ROC_A1 ve LOC_A2 kanalından elde edilen sinyaller, her iki uzman puanlamasına göre, dört farklı sınıflandırıcı aracılığıyla hold-out stratejisine göre sınıflandırıldı. Makine öğreniminde bir modelin eğitilmesinde sıkça kullanılan hold-out yöntemi, veri setini iki bölüme ayırır. Bir bölüm modeli eğitmek için ve diğer bölüm ise modeli doğrulamak için kullanılır. İlk bölüme eğitim seti ve ikinci bölüme ise test seti denir. Hold-out yöntemi model değerlendirme ve seçimi için kullanılır ve böylelikle "hangi model test veri setini diğer tüm modellerden daha iyi tahmin ediyor?" sorusunun cevabını kolaylıkla belli ediyor. Bölünme yüzdesine, eğitim amacıyla mevcut verilerin hacmine göre karar verilir. Genel olarak, uyku evreleme çalışmalarında, veri kümesini bölmek için %50-%50 bölme kullanılır. Yani her evreye ayıt epokların %50' si eğitim ve %50' si ise test için kullanılır. Ancak tüm olasılıkları göz önünde bulundurmak özellikle büyük veri setlerinde oldukça zordur.

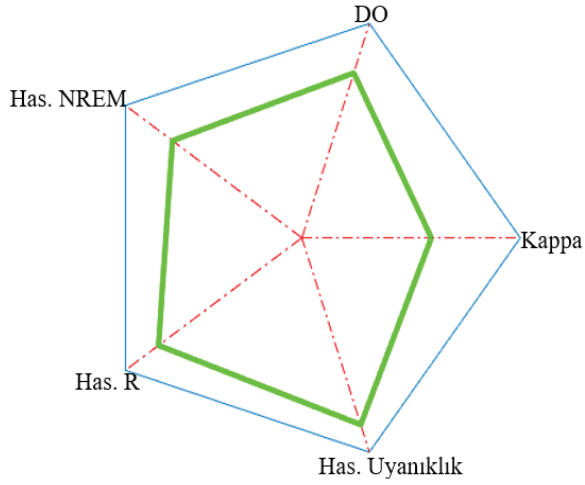
Bunun için bu çalışmada, veri seti 20 kez harmanlanarak, eğitim ve test veri setleri oluşturuldu ve her seferinde sistemin ölçütleri hesaplandı. Uzman 1 puanlandırmasına göre elde edilen sonuçlar Tablo 5' de verilmiştir. Uzman 2 puanlandırmasına göre hesaplanan ölçütler ise Tablo 6' da sunuldu. Bu Çizelgelere bakıldığında, en yüksek doğruluk oranı ve Cohen's Kappa değeri, sırasıyla 0.8526 ve 0.6762, Subgroup_II veri setinde olduğu gibi, uzman 2 ve LOC_A2 kanalı kullanıldığında elde edilmiştir. Ancak, sistemi tek değerlerle özetleyen GÇNA ölçütünün en yüksek değeri, uzman 1 ve ROC_A1 kanalı kullanıldığında elde edilmiştir. Karar ağaçları sınıflandırıcısıyla elde edilen bu değer 0.5766' dır. Uzman 2 ve LOC_A2 kanalından bu ölçüt için elde edilen en yüksek değer ise, yine karar ağaçları sınıflandırıcısıyla ve 0.5679' dir.

Tablo 5. Subgroup_III Veri Setinde Uzman 1 Puanlamasına Göre Hesaplanan Sınıflandırma Sonuçları; Her Ölçütte Hesaplanan En Yüksek Değer Kalın Yazı Tipiyle Gösterilmiştir

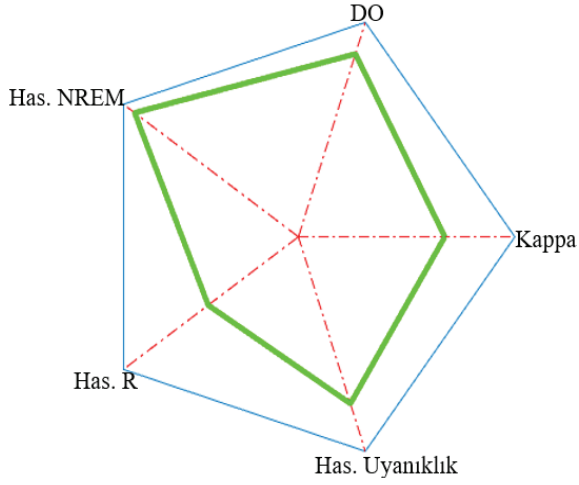
Kanal	Sınıflandırıcı	Kappa	Do	Has. NREM	Has. REM	Has. Uyanıklık	HÇNA	GÇNA
ROC_A1	KA	0.5990	0.7732	0.7336	0.8199	0.8818	0.4899	0.5766
	Poly-DVM	0.6340	0.8391	0.9455	0.4057	0.7435	0.6416	0.4963
	TT	0.6050	0.8248	0.9356	0.3903	0.7429	0.6122	0.4750
	RTF-DVM	0.6382	0.8375	0.9373	0.4561	0.7562	0.6392	0.5148
LOC_A2	KA	0.5636	0.7484	0.6987	0.8068	0.8846	0.4461	0.5441
	Poly-DVM	0.6147	0.8301	0.9364	0.3870	0.7408	0.6210	0.4784
	TT	0.6420	0.8412	0.9413	0.3883	0.7799	0.6453	0.5001
	RTF-DVM	0.6549	0.8460	0.9417	0.4547	0.7608	0.6558	0.5246

Tablo 6. Subgroup_III Veri Setinde Uzman 2 Puanlamasına Göre Hesaplanan Sınıflandırma Sonuçları; Her Ölçütte Hesaplanan En Yüksek Değer Kalın Yazı Tipiyle Gösterilmiştir

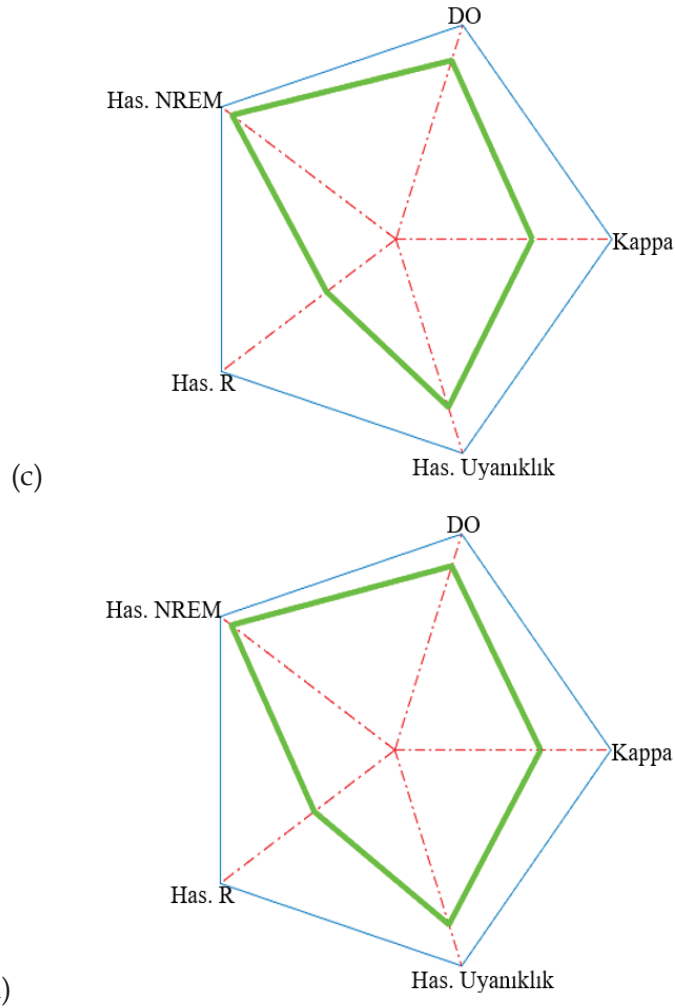
Kanal	Sınıflandırıcı	Kappa	Do	Has. NREM	Has. REM	Has. Uyanıklık	HÇNA	GÇNA
ROC_A1	KA	0.5398	0.7296	0.6734	0.7975	0.8881	0.4162	0.5219
	Poly-DVM	0.6317	0.8356	0.9406	0.4553	0.7341	0.6359	0.5080
	TT	0.6634	0.8456	0.9312	0.4712	0.8119	0.6553	0.5416
	RTF-DVM	0.6644	0.8458	0.9302	0.5278	0.7735	0.6555	0.5523
LOC_A2	KA	0.5928	0.7693	0.7332	0.8119	0.8717	0.4849	0.5679
	Poly-DVM	0.6762	0.8526	0.9356	0.5154	0.7775	0.6689	0.5565
	TT	0.6311	0.8350	0.9381	0.3976	0.7845	0.6341	0.4980
	RTF-DVM	0.6748	0.8523	0.9359	0.4618	0.8086	0.6681	0.5448


DO
Has. NREM
Kappa
Has. R
Has. Uyanıklık

(a)


DO
Has. NREM
Kappa
Has. R
Has. Uyanıklık

(b)



Şekil 2. (a) KA, (b) Poly-DVM, (c) TT ve (d) RTF-DVM Sınıflandırıcıları İçin Elde Edilen Genel Poligonları

Genel olarak sonuçlara bakıldığında, sonuçlar literatürde bulunan bir çok çalışmaya nazaran daha başarılı görünmektedir. Ayrıca EEG aracılığıyla sınıflandıran sistemlerin sonuçlarıyla kıyaslandığında ise, sonuçların üç sınıflı durum için başarılı olduğu görünmektedir. EOG sinyal kaydının kolaylığı elde edilen sonuçlara eklendiğinde, önerilen sistemin EEG tabanlı uyku evreleme sistemlere göre daha avantajlı olduğu açıktır. Üstelik, kullanılan veri setinin özelliği nedeniyle, yani iki

oturumda kaydedilen sinyaller içerdiğinden, sistemin zaman içerisinde değişen sinyallere karşı başarılı olduğu ispatlanmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, NREM, REM ve uyanıklık evrelerinin EOG sinyalleriyle sınıflandırılması araştırılmıştır. Bu çalışmanın özelliklerinden biri, tek EOG kanalı kullanılması ve iki farklı oturumlarda kaydedilen sinyaller üzerine başarılı sonuç vermesidir. Öte yandan, elde edilen öznitelik vektörünün çok büyük olmaması sistemin zaman açısından düşük maliyet olduğunu göstermektedir. Sunulan çalışmanın gelecekteki araştırmalar için ışık tutacağını ümit ediyoruz.

Önerilen yöntemin başka veri setlerde test edilmesi ve beşli, dörtlü ve ikili uyku evreleme sistemleri içinde uygulanması planlanmaktadır. Ayrıca farklı öznitelik çıkarma ve sınıflandırma yöntemlerini kullanarak elde edilen sonuçlar sunulan çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslanabilir. Son zamanlarda, örüntü tanıma uygulamalarında derin öğrenmeye dayalı sistemler güçlü araçlar olarak kullanılmaktadırlar. Gelecekteki çalışmalar için, sınıflandırma adımında evrişimli sinir ağları gibi derin sınıflandırıcıları kullanabiliriz.

Çevrimdışı uygulamalar için önerilen yöntem sayısal sistemler aracılığıyla verimli bir şekilde geliştirilebilir. Ayrıca, önerilen yöntem çevrimiçi olarak da kullanılabilir. Böylelikle, gelecekte yapılacak çalışmalarla, insanların uyku kalitelerini analiz edebilmeleri için kendi evlerinde uyku izleme cihazlarına sahip olmaları ve uyku analizlerini yapabilmeleri mümkün olabilir.

KAYNAKÇA

Adeli, H., Ghosh-Dastidar, S. ve Dadmehr, N. (2007) 'A wavelet-chaos methodology for analysis of EEGs ve EEG subbands to detect seizure ve epilepsy', *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(2), pp. 205–211. doi: 10.1109/TBME.2006.886855.

Alickovic, E. ve Subasi, A. (2018) 'Ensemble SVM method for automatic sleep stage classification', *IEEE Transactions on Instrumentation ve Measurement*, 67(6), pp. 1258–1265. doi: 10.1109/TIM.2018.2799059.

Azami, H. ve ark. (2017) 'Refined Composite Multiscale Dispersion Entropy ve its Application to Biomedical Signals', *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(12), pp. 2872–2879. doi: 10.1109/TBME.2017.2679136.

Chambon, S. ve ark. (2018) 'A Deep Learning Architecture for Temporal Sleep Stage Classification Using Multivariate ve Multimodal Time Series', *IEEE Transactions on Neural Systems ve Rehabilitation Engineering*, 26(4), pp. 758–769. doi: 10.1109/TNSRE.2018.2813138.

Chen, C. ve ark. (2019) 'Novel Flexible Material-Based Unobtrusive ve Wearable Body Sensor Networks for Vital Sign Monitoring', *IEEE Sensors Journal*, 19(19), pp. 8502–8513. doi: 10.1109/JSEN.2018.2887107.

Cohen, J. (1960) 'A Coefficient of Agreement for Nominal Scales', *Educational ve Psychological Measurement*, 20(1), pp. 37–46. doi: 10.1177/001316446002000104.

Danker-Hopfe, H. ve ark. (2009) 'Interrater reliability for sleep scoring according to the Rechtschaffen & Kales ve the new AASM standard', *Journal of Sleep Research*, 18(1), pp. 74–84. doi: 10.1111/J.1365-2869.2008.00700.X.

Dimitriadis, S. I., Salis, C. ve Linden, D. (2018) 'A novel, fast ve efficient single-sensor automatic sleep-stage classification based on complementary cross-frequency coupling estimates', *Clinical Neurophysiology*, 129(4), pp. 815–828. doi: 10.1016/J.CLINPH.2017.12.039.

Domingues, A., Paiva, T. ve Sanches, J. M. (2014) 'Hypnogram ve sleep parameter computation from activity ve cardiovascular data', *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(6), pp. 1711–1719. doi: 10.1109/TBME.2014.2301462.

Dong, H. ve ark. (2018) 'Mixed Neural Network Approach for Temporal Sleep Stage Classification', *IEEE Transactions on Neural Systems ve Rehabilitation Engineering*, 26(2), pp. 324–333. doi: 10.1109/TNSRE.2017.2733220.

Fan, J. ve ark. (2021) 'EOGNET: A Novel Deep Learning Model for Sleep Stage Classification Based on Single-Channel EOG Signal', *Frontiers in Neuroscience*, 15, p. 846. doi: 10.3389/FNINS.2021.573194/BIBTEX.

Faust, O. ve ark. (2019) 'A review of automated sleep stage scoring based on physiological signals for the new millennia', *Computer Methods ve Programs in Biomedicine*, 176, pp. 81–91. doi: 10.1016/J.CMPB.2019.04.032.

Fonseca, P. ve ark. (2017) 'Cardiorespiratory Sleep Stage Detection Using Conditional Random Fields', *IEEE Journal of Biomedical ve Health Informatics*, 21(4), pp. 956–966. doi: 10.1109/JBHI.2016.2550104.

Güneş, S., Polat, K. ve Yosunkaya, Ş. (2010) 'Efficient sleep stage recognition system based on EEG signal using k-means clustering based feature weighting', *Expert Systems with Applications*, 37(12), pp. 7922–7928. doi: 10.1016/J.ESWA.2010.04.043.

Hassan, A. R. ve Bhuiyan, M. I. H. (2016) 'A decision support system for automatic sleep staging from EEG signals using tunable Q-factor wavelet transform ve spectral features', *Journal of Neuroscience Methods*, 271, pp. 107–118. doi: 10.1016/j.jneumeth.2016.07.012.

Hassan, A. R. ve Bhuiyan, M. I. H. (2017) 'Automated identification of sleep states from EEG signals by means of ensemble empirical mode decomposition ve random under sampling boosting', *Computer Methods ve Programs in Biomedicine*, 140, pp. 201–210. doi: 10.1016/j.cmpb.2016.12.015.

Hassan, A. R. ve Subasi, A. (2017) 'A decision support system for automated identification of sleep stages from single-channel EEG signals', *Knowledge-Based Systems*, 128, pp. 115–124. doi: 10.1016/j.knosys.2017.05.005.

IBER ve C. (2007) 'The AASM Manual for the Scoring of Sleep ve Associated Events : Rules', *Terminology ve Technical Specification*, 1(American Academy of Sleep Medicine). Available at: https://ci.nii.ac.jp/naid/10024500923 (Accessed: 6 December 2020).

Khalighi, S. ve ark. (2016) 'ISRUC-Sleep: A comprehensive public dataset for sleep researchers', *Computer Methods ve Programs in Biomedicine*, 124, pp. 180–192. doi: 10.1016/j.cmpb.2015.10.013.

Längkvist, M., Karlsson, L. ve Loutfi, A. (2012) 'Sleep Stage Classification Using Unsupervised Feature Learning', *Advances in Artificial Neural Systems*, 2012, pp. 1–9. doi: 10.1155/2012/107046.

Melek, M., Manshouri, N. ve Kayikcioglu, T. (2020) 'An automatic EEG-based sleep staging system with introducing NAoSP ve NAoGP as new metrics for sleep staging systems', *Cognitive Neurodynamics*, pp. 1–19. doi: 10.1007/s11571-020-09641-2.

Olesen, A. N. ve ark. (2016) 'A Noise-Assisted Data Analysis Method for Automatic EOG-Based Sleep Stage Classification Using Ensemble Learning', *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine ve Biology Society. IEEE Engineering in Medicine ve Biology Society. Annual International Conference*, 2016, pp. 3769–3772. doi: 10.1109/EMBC.2016.7591548.

Özşen, S. (2013) 'Classification of sleep stages using class-dependent sequential feature selection ve artificial neural network', *Neural Computing ve Applications*, 23(5), pp. 1239–1250. doi: 10.1007/S00521-012-1065-4/TABLES/6.

Procházka, A. ve ark. (2018) 'Multi-Class Sleep Stage Analysis ve Adaptive Pattern Recognition', *Applied Sciences 2018, Vol. 8, Page 697*, 8(5), p. 697. doi: 10.3390/APP8050697.

Rahman, M. M., Bhuiyan, M. I. H. ve Hassan, A. R. (2018) 'Sleep stage classification using single-channel EOG', *Computers in Biology ve Medicine*, 102, pp. 211–220. doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2018.08.022.

Shi, M. ve ark. (2018) 'Towards portable SSVEP-based brain-computer interface using Emotiv EPOC ve mobile phone', in *Proceedings - 2018 10th International Conference on Advanced Computational Intelligence, ICACI 2018*. Institute of Electrical ve Electronics Engineers Inc., pp. 249–253. doi: 10.1109/ICACI.2018.8377615.

Supratak, A. ve ark. (2017) 'DeepSleepNet: A model for automatic sleep stage scoring based on raw single-channel EEG', *IEEE Transactions on Neural Systems ve Rehabilitation Engineering*, 25(11), pp. 1998–2008. doi: 10.1109/TNSRE.2017.2721116.

Šušmáková, K. ve Krakovská, A. (2008) 'Discrimination ability of individual measures used in sleep stages classification', *Artificial Intelligence in Medicine*, 44(3), pp. 261–277. doi: 10.1016/J.ARTMED.2008.07.005.

Virkkala, J. ve ark. (2007) 'Automatic sleep stage classification using two-channel electro-oculography', *Journal of neuroscience methods*, 166(1), pp. 109–115. doi: 10.1016/J.JNEUMETH.2007.06.016.

Wei, R. ve ark. (2018) 'The research of sleep staging based on single-lead electrocardiogram ve deep neural network', *Biomedical Engineering Letters*, 8(1), pp. 87–93. doi: 10.1007/S13534-017-0044-1/TABLES/3.

Willemen, T. ve ark. (2014) 'An evaluation of cardiorespiratory ve movement features with respect to sleep-stage classification', *IEEE Journal of Biomedical ve Health Informatics*, 18(2), pp. 661–669. doi: 10.1109/JBHI.2013.2276083.

Xia, B. ve ark. (2015) 'Electrooculogram based sleep stage classification using deep belief network', *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2015-September. doi: 10.1109/IJCNN.2015.7280775.

Yan, R. ve ark. (2019) 'Multi-modality of polysomnography signals' fusion for automatic sleep scoring', *Biomedical Signal Processing ve Control*, 49, pp. 14–23. doi: 10.1016/J.BSPC.2018.10.001.

Yan, R. ve ark. (2021) 'Automatic sleep scoring: A deep learning architecture for multi-modality time series', *Journal of Neuroscience Methods*, 348, p. 108971. doi: 10.1016/J.JNEUMETH.2020.108971.

Yang, F. ve Xia, B. (2016) 'Single Electrooculogram Channel-Based Sleep Stage Classification', pp. 595–600. doi: 10.1007/978-981-10-0207-6_80.

Zhang, X. ve ark. (2018) 'Sleep stage classification based on multi-level feature learning ve recurrent neural networks via wearable device', *Computers in Biology ve Medicine*, 103, pp. 71–81. doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2018.10.010.

Ti6Al4V MALZEMENİN DELİNMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bahattin YILMAZ[1], Gültekin UZUN[2], Abdulkadir GÜLLÜ[3]

Öz: Titanyum alaşımları uzay ve havacılık alanı başta olmak üzere birçok endüstri dalının sıklıkla kullandığı malzemelerdendir. Malzemenin üstün mekanik ve metalürjik özellikleri kullanım alanını artırmaktadır. Titanyum alaşımları başta uzay ve havacılık alanı olmak üzere birçok yüksek teknolojinin kullanıldığı endüstri alanının gözde malzemesidir. Dar toleransların gerektiği sektörlerde kullanılan bu malzeme, temini sırasında da yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu durum hassas ölçü ve dar toleransların en az malzeme kaybı ile elde edilmesini gerekli kılmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri, dar tolerans değerlerinin elde edilebildiği imalat yöntemlerinin başında gelmekte ve bu yüzden de daha çok tercih edilmektedir. Talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan delme operasyonu, delme işlemi sırasında oluşan talaş kaldırma mekaniği sebebiyle bazı zorlukları içermektedir. Bu zorluklara rağmen yüksek hassasiyetlere sahip ürünlerin elde edilebilmesi doğru kesme parametrelerinin belirlenip kullanılması ile mümkündür. Bu çalışmada Ti6Al4V malzemenin delinmesi araştırılmıştır. Değişen kesme parametrelerinin önemli kalite çıktılarından yüzey pürüzlülüğü, dairesellikten sapma ve çaptan sapma değerlerine etkileri incelenmiştir. Artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüğü ve dairesellikten sapma değerlerinin arttığı, çaptan sapma değerlerinin ise azaldığı bu çalışma ile tespit edilmiştir.

1 Gazi Üniversitesi,Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, bahattinyilmaz@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002- 0457-7291

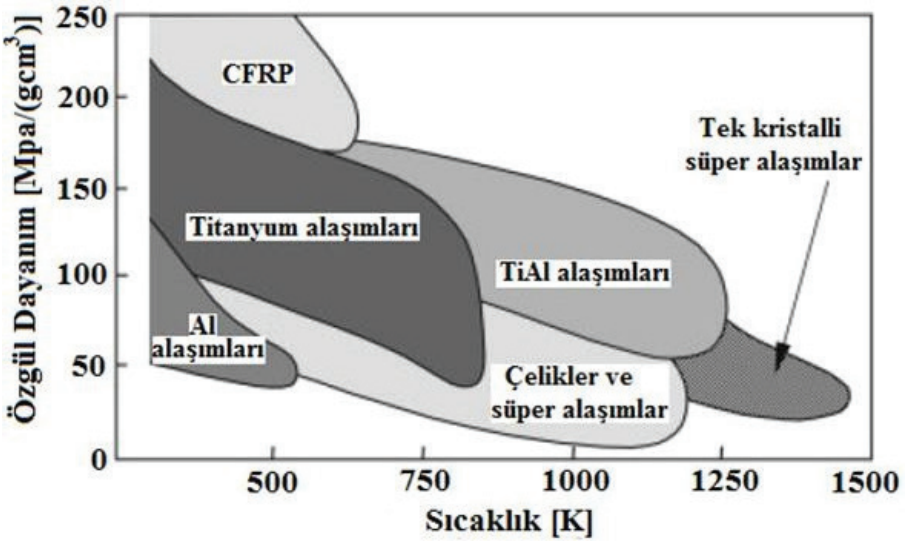
2 Gazi Üniversitesi,Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, uzun.gultekinl@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002- 6820-8209

3 Gazi Üniversitesi,Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, agullu@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1088- 4105

Anahtar Kelimeler: Titanyum Alaşımları, Delme Operasyonu, Delik Kalitesi

GİRİŞ

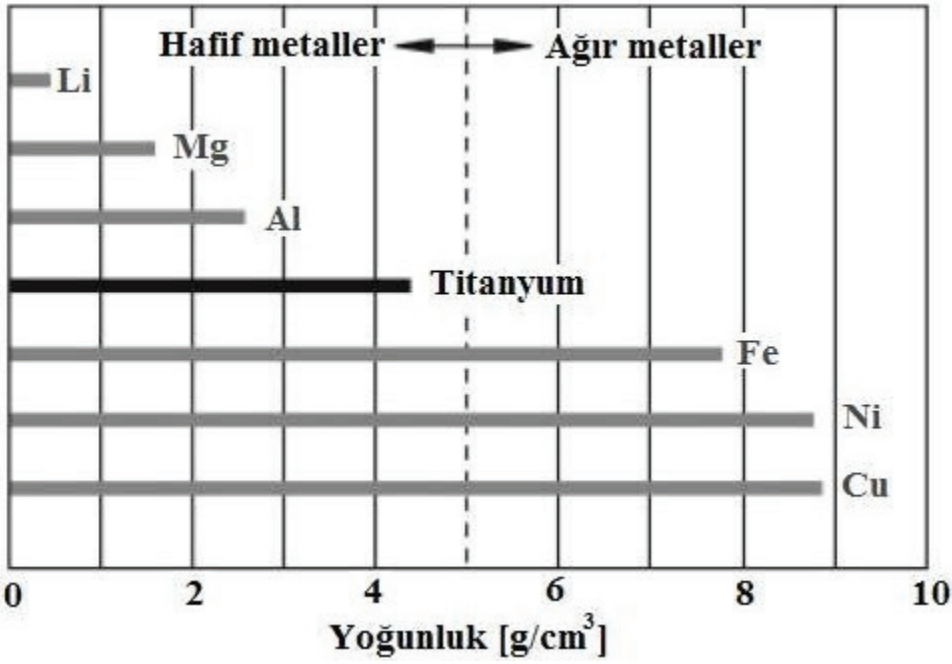
Titanyum alaşımları 20. yüzyıl ortalarından itibaren malzeme dünyasında kendisine geniş bir yer bulmuştur. Titanyum alaşımlarının mükemmel korozyon direnci, üstün mukavemet özellikleri, yüksek termal özellikleri, uzun servis ömrü, yüksek dayanım/ağırlık oranı, kaynak kabiliyeti, düşük elastik modülü ve biyolojik uyumluluğu nedeniyle tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir (Wang vd., 2015). Titanyum alaşımları benzer diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında özellikle yüksek özgül dayanımları ile dikkat çekmektedir. Ayrıca titanyum alaşımları bu yüksek özgül dayanımlarını yüksek sıcaklıklarda da muhafaza edebilmektedir. Tüm bu özellikleri titanyum alaşımlarının bir adım öne çıkmasına neden olmuştur (Çakır, 2019). Şekil 1' de temel imalat malzemelerinin özgül dayanımlarının sıcaklık ile değişimi verilmiştir.



Şekil 1. Malzemelerin Özgül Dayanım – Sıcaklık İlişkisi (Kıvak, 2012)

Üstün özellikleri sayesinde titanyum alaşımları başta uzay ve havacılık olmak üzere biyomedikal, denizcilik, otomotiv, kimya endüstrisi, petrokimya ve spor endüstrisi gibi birçok alanın gözde malzemesi ol-

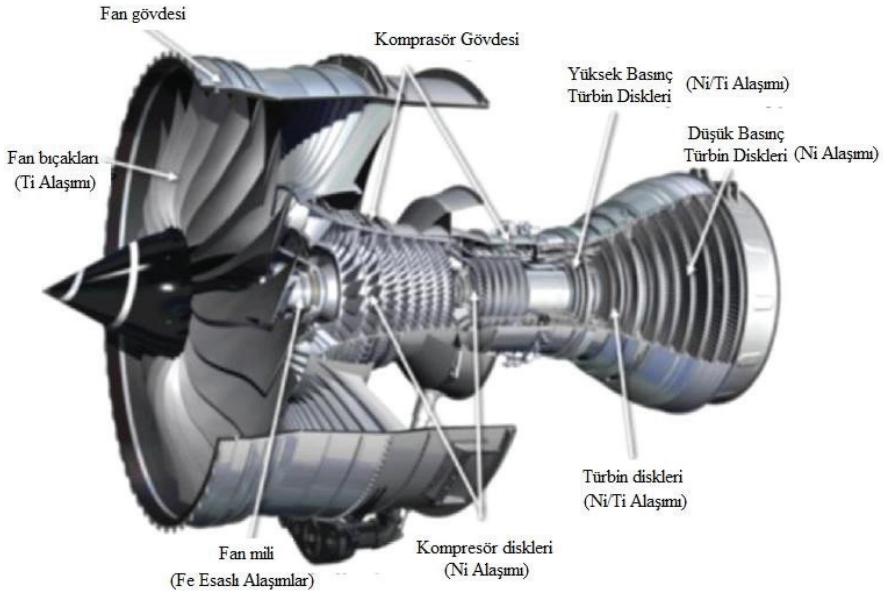
muştur (Ribeiro Filho vd., 2016; Nouari vd., 2013). 20. Yüzyılın ortalarından itibaren havacılık endüstrisi öncelikli olarak birçok sanayi sektöründe titanyum alaşımlarının kullanımı ve geliştirilmesi yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu alaşımların hafif malzemeler olması birçok alanda ağırlık azaltma ve performans artırma çalışmalarında kullanılmalarına neden olmuştur (Çakır, 2019). Titanyum alaşımları çeliklerden %56 daha hafif olmasına rağmen dayanımı çeliklerden yüksektir (Kıvak, 2012). Araçların ağırlıklarının azaltılması birçok sektör için hayati önem taşımaktadır. Otomotiv sektöründe bir aracın ağırlığının bir kilogram azalması için 10 € maliyeti tolere ederken bu havacılık sektöründe 1000 €'ya, yüksek teknolojinin kullanıldığı uzay sektöründe ise 10.000 €'ya kadar yükselmektedir. Bu durum titanyum gibi hafif ve dayanıklı metalleri önemli kılmaktadır (Bıçakçı, 2015).



Şekil 2. Yoğunluk Açısından Malzemelerin Kıyaslanması (Kıvak, 2012)

Titanyum alaşımları saf titanyum, alfa titanyum, alfa-beta titanyum ve beta titanyum alaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Titanyum alaşımlarının en yaygın kullanımı alfa-beta titanyum alaşımı ailesinin bir

parçası olan Ti6Al4V malzemesidir. Havacılık endüstrisinde yapısal parçaların üretiminde, biyomedikal endüstrisinde implant yapımında kullanılan bu alaşım üstün özellikleri nedeni ile sıklıkla tercih edilmektedir. Ti6Al4V alaşımı uzay, havacılık ve medikal alanlarında %80, genel üretim alanında ise %50 gibi geniş bir kullanıma sahiptir. Toplam üretilen titanyum alaşımlarının yaklaşık %45'ini Ti6Al4V alaşımı oluşturmaktadır (Çelik ve Kılıçkap, 2018; Uzun vd., 2017).



Şekil 3. Uçak Motorlarında Kullanılan Alaşımlar (Uçak, 2017)

Dar tolerans değerlerine sahip hassas parçaların kullanıldığı endüstri alanlarının başında uzay ve havacılık endüstrisi gelmektedir (Basile, 1993). Uzay ve havacılık alanında kullanılan malzemelerin yüksek maliyetleri, zorlu çalışma koşulları ve güvenlik faktörü bu alanda yüksek hassasiyetle üretimi gerekli kılmıştır. Havacılık ve uzay sanayinde delme operasyonlarının kullanım oranı %40-60' ları bulmaktadır (Çiftçi ve Gökçe, 2018). Bununla birlikte delme operasyonlarında delik çapının, yüzey kalitesinin, dairesellik değerlerinin tek seferde istenilen aralıkta elde edilmesi çok güçtür. Delme işlemi birçok zorluğu içerisinde barındıran bir talaşlı imalat operasyonudur. Delme sırasında kesme işleminin

kapalı bir bölgede gerçekleşmesi, oluşan yüksek sıcaklık değerleri ve talaşın helis kanallar üzerinden tahliyesi önemli sorunların başında gelmektedir (Bayraktar vd., 2017). Delme işleminde talaşın helisel kanallar aracılığı ile tahliyesi delik yüzeylerinin zaman zaman bozulmasına neden olmaktadır (Yağmur vd., 2013a). Karşılaşılan bu gibi zorluklar delik ölçülerinin toleranslar dışına çıkmasına sebebiyet vermektedir. İstenilen ölçü tamlığı için ikincil operasyonlara gerek duyulmaktadır. Delik büyütme, raybalama ve honlama gibi ikincil işlemeler bu amaçlar ile gerçekleştirilmektedir. Bu durum ise operasyon maliyetlerini, işleme sürelerini olumsuz etkilemektedir (Kıvak ve Şeker, 2015; Yılmaz vd., 2016).

Tüm bu nedenler delme işleminde istenilen toleransların tek bir operasyonda elde edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Delme operasyonlarında istenilen toleranslara tek seferde ulaşılabilmesi doğru kesme parametrelerinin seçilmesi ile gerçekleştirilebilir. Kesme parametreleri ve delik kalitesi arasındaki bu ilişki delme operasyonları üzerinde araştırmalar yapılmasını gerekli kılmaktadır.

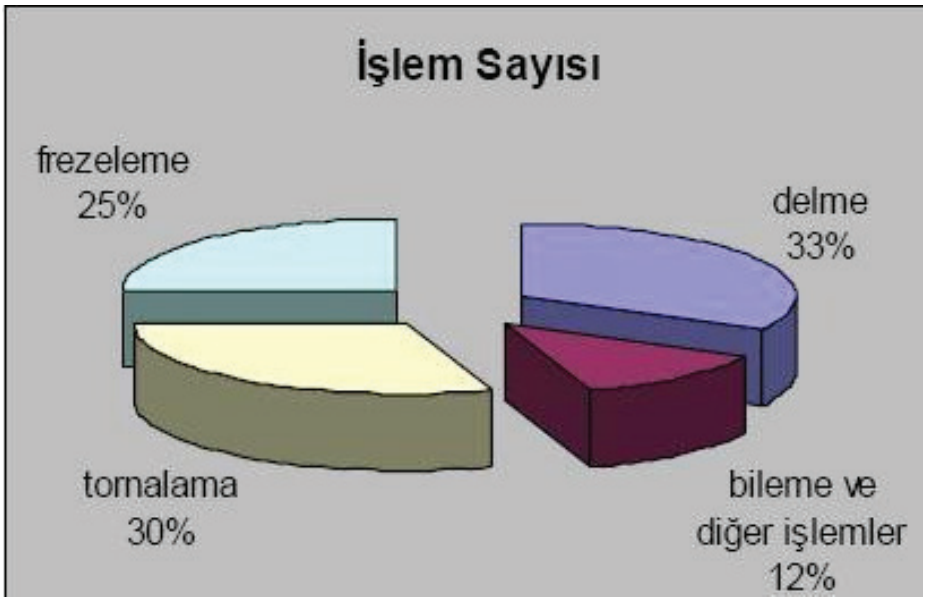
Kıvak ve Şeker yaptıkları deneysel bir çalışmada Ti6Al4V malzemeyi, kriyojenik işlem uygulanmış HSS matkaplar kullanarak işlemişlerdir. Çalışmada farklı kaplama tipleri ve soğutma uygulaması kullanılmıştır. Çalışma çıktısı olarak delik kalitesi, çaptan sapma, dairesellikten sapma ve silindiriklik incelenmiştir. Soğutma işleminin delik kalitesine katkı sunduğu ve takıma uygulanan kriyojenik işlemin delik kalitesine önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Kıvak ve Şeker, 2015). Uzun ve arkadaşları ise yaptıkları deneysel çalışmada, delik kalitesini, çaptan sapma ve dairesellikten sapma bakımından değerlendirmiştir. Farklı kesme parametreleri ve kesme mesafeleri ile deneyler yapılmıştır. Kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir (Uzun vd., 2017). Yağmur ve arkadaşları ise delik kalitesini dairesellikten sapma değerleri açışından incelemiştir. Kaplamalı - kaplamasız matkaplar ve farklı kesme parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Dairesellikten sapma değerleri için kaplamanın iyileştirici etkileri olduğu ve kesme hızının da en etkili parametre olduğu bildirilmiştir (Yağmur vd., 2013b). Delik kalitesinin yüzey pürüzlülüğü dikkate alınarak belirlendiği çalışmada alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Farklı kesme parametreleri ve iki farklı matkap uç açısının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri

araştırılmıştır. Çalışmada 118° uç açısının yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur (Erkan ve Yücel, 2018). Meral ve Günay yaptıkları çalışmada, itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çaptan sapma değerlerinin değişimini incelemiştir. Farklı kesme parametreleri ile yapılan deneylerde artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüklerinin arttığı, çaptan sapma değerlerinin ise azaldığı ifade edilmiştir (Meral ve Günay, 2019). Meral ve arkadaşları ise yaptıkları bir çalışmada dairesellikten sapma, çaptan sapma ve silindiriklik çıktılarını araştırmıştır. Çalışmada matkaplara uygulanan kaplamanın ve farklı kesme hızlarının etkileri incelenmiştir. Çalışma neticesinde kaplamalı matkapların daha iyi performans sergilediği ve kesme hızı, ilerleme oranı ve matkap çapının artmasıyla sapma değerlerinin genel olarak arttığı bildirilmiştir (Meral vd., 2011).

Bu çalışmada, farklı kesme parametrelerinin Ti6Al4V malzemenin delinmesinde delik kalitesine etkileri araştırılmıştır. Dört farklı ilerleme oranı ve iki farklı kesme hızı kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Delik kalitesi değerlendirilirken çaptan sapma, dairesellikten sapma ve yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiştir. Çıktı değerleri grafikler ile ifade edilerek oluşan değişimler yorumlanmıştır. Ti6Al4V malzeme ile gerçekleştirilen delme uygulamaları için uygun çalışma koşulları bu çalışmada bildirilmiştir.

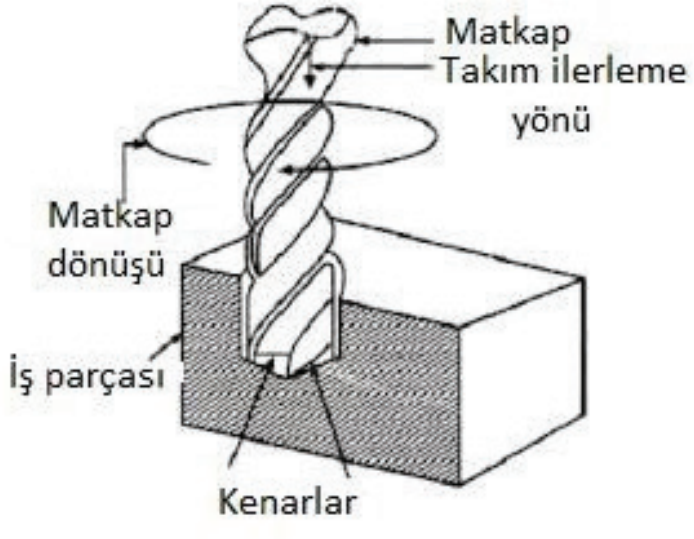
DELME İŞLEMİ

Talaşlı imalat yöntemi birçok farklı üretim stratejisini bünyesinde barındıran bir üretim yöntemidir. Talaşlı imalat başlığı altında en çok kullanılan üretim işlemlerinin başında delme işlemi gelmektedir (Meral, 2010). Delme uygulamalarının raybalama, vida açma, kılavuz çekme ve honlama gibi bazı talaşlı imalat uygulamaları için ön operasyon olması bu yöntemin fazlaca kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca montaj ekipmanları olan pim, cıvata, perçin gibi bağlantı elemanlarının kullanımı da deliklerin varlığı ile mümkün olmaktadır (Yılmaz vd., 2020). Bu durum ise delme işlemlerinin en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biri olmasına zemin hazırlamıştır.



Şekil 4. Talaşlı İmalat Uygulamalarının Dağılımı (Meral, 2010)

İş parçası üzerinde silindirik boşlukların bir takım aracılığı ile talaş kaldırılarak, oluşturulması işlemi delme uygulaması olarak tanımlanmaktadır (Meral, 2010). Delme uygulamaları dairesel hareketlerin (esas kesme hareketleri) ve doğrusal hareketlerin (ilerleme hareketleri) birleşimi ile oluşmaktadır. Delme operasyonu sırasında kullanılan kesici takımlar matkap olarak adlandırılır. Matkaplar en az iki kesici ağıza, konik bir uca ve talaş tahliyesi için helis kanallara sahip kesici takımlardır. Operasyon sırasında matkap dönme hareketi gerçekleştirerek önce iş parçasına batar ve ardından iş parçası boyunca ilerler bu işlemler sırasında talaş kaldırarak matkap çapıyla aynı çapta bir deliği iş parçasına kazandırır. Deliğin boyutsal doğruluğu matkap geometrisi ve boyutları ile doğrudan ilgilidir. Delme işlemi sırasında açığa çıkan talaş matkap helis kanalları aracılığı ile kesme bölgesinden uzaklaştırılır (Groover, 2011).



Şekil 5. Delme Operasyonunun Şematik Gösterimi

Tüm talaşlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi delme uygulamalarında da benzer fiziksel prensipler mevcuttur. Kesme sırasında kuvvetlerin açığa çıkması, talaş ve ısı oluşumu, tüm yöntemlerde olduğu gibi delme uygulamalarında da ortaktır. Ancak delme işleminin kendine has bazı özellikleri bu yöntemi diğer talaşlı imalat yöntemlerinden daha karmaşık ve zor kılmıştır. Delme işleminin iş parçasının içinde, kapalı bir bölgede gerçekleşmesi operasyonun takibini ve dışarıdan müdahaleleri engellemektedir. Talaşın iş parçası içerisinde oluşması ve takım üzerinde bulunan helis kanalları ile kesme bölgesinden uzaklaştırılması takım-talaş ve iş parçası-talaş temasını artırmasına ve ilave sürtünmelerin açığa çıkmasına neden olmaktadır. Talaş tahliyesinin takım üzerinden gerçekleştirilmesi takımın kesme sırasında oluşan ısıdan daha fazla etkilenmesine yol açmaktadır. Ayrıca operasyon yönüne ters istikamette tahliye edilen talaş soğutma sıvısının kesme bölgesine ulaşmasını zorlaştırmaktadır. Yine delme işlemi sırasında karşılaşılan bir diğer sorun kesme hızının takım çapı boyunca sürekli değişmesi ve merkezde sıfır olmasıdır. Delme işlemi sırasında karşılaşılan bu problemler matkap teknolojini, operasyon parametrelerinin optimizasyonunu, iş parçası-ta-

kım ilişkisini ve tezgâh teknolojisini önemli kılmaktadır (Kıvak, 2012; Meral, 2010).

Delme işlemi sırasında ideal çalışma parametrelerinin seçilmesi diğer talaşlı imalat yöntemlerinden daha fazla önem arz etmektedir. Delme işlemlerinde yüksek kesme hızları takım aşınmalarına ve kesme kenarında oluşan plastik deformasyonlara neden olurken düşük kesme hızları ise kesme yüzeyine yapışan talaş oluşumuna, düşük takım performansına ve zorlu talaş tahliyesine sebebiyet vermektedir (Meral, 2010). Kesme hızında olduğu gibi ilerleme hızı da delme uygulamaları sırasında oluşan mekanik ve termal yükler ve talaş tahliyesi açısından son derece önemlidir. Yüksek ilerleme hızlarının kullanılması kısa operasyon sürelerine ve hızlı talaş tahliyesine neden olurken ilerleme kuvvetlerinin artmasına yol açmaktadır. Düşük ilerleme hızları ise talaş tahliyesinin yavaşlamasına böylece takım-talaş temas süresinin artmasına neden olmaktadır.

Yukarıda bahsedildiği gibi delme işleminin çok sık başvurulan bir uygulama olması, operasyonun karmaşık ve zorlu yapısı bu alanda yapılan akademik çalışmaları ayrıca önemli kılmaktadır.

DELİK KALİTESİ

Yüksek teknoloji ürünlerinin imalatı hassas ve dar toleransların elde edilmesi ile mümkündür. Birçok endüstri dalında üstün özelliklerde ürünün imalatı için dar toleransların düşük maliyetlerle elde edilmesi gerekmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri diğer imalat tekniklerine göre dar toleransların daha kolay verilebildiği bir imalat yöntemidir. Özellikle takım ve tezgâh teknolojisindeki gelişmeler bu durumu daha da kolaylaştırmıştır.

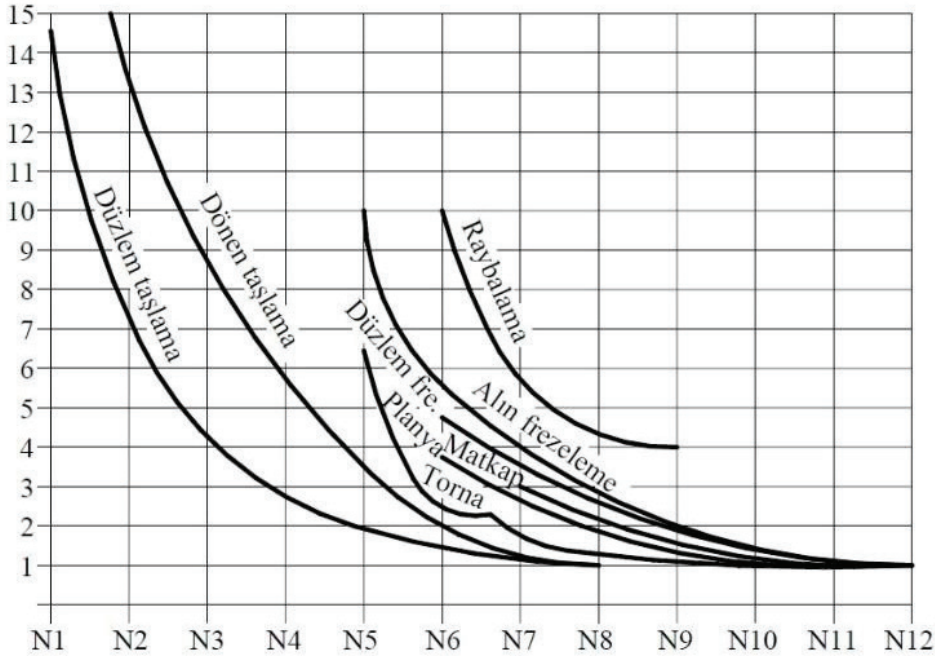
En çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden olan delme işleminde toleransların yüksek hassasiyet ile oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Delme uygulamalarında arzu edilen toleransların elde edilememesi ikincil operasyonları (raybalama, honlama vb.) gerekli kılmaktadır. İkincil işlemler ise takım, personel, enerji ve tezgâh gibi ek maliyetler doğurmaktadır. Bu işlemler operasyon sürelerini uzatarak işlem maliyetlerini artırmaktadır.

Bu nedenle delme işlemlerinde ilk seferde toleransların tutturulması büyük önem arz etmektedir.

Ürünlerden beklenen performanslar ve sahip olması gereken özellikler doğrultusunda farklı tolerans çeşitleri bulunmaktadır. Boyut toleransları, şekil – konum toleransları ve yüzey toleransları talaşlı imalat da aranan tolerans çeşitleridir. Delik kalitesi belirlenirken bu tolerans çeşitleri ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Delik uygulamalarında yüzey toleransları yüzey pürüzlülüğü aracılığı ile belirlenmektedir. Boyut toleranslarında ise çaptan sapma değerleri delik kalitesi için büyük anlam içermektedir. Özellikle montaj işlemleri için önem arz eden şekil – konum toleransları ise dairesellikten sapma, silindiriklikten sapma, diklik ve paralellik vb. toleranslar ile belirlenmektedir.

Deliklerde Yüzey Toleransları

Yüzey kalitesi ürünün başta yağlama özellikleri olmak üzere yorulma dayanımı, çalışma ömrü ve termal özellikleri gibi birçok performans parametresine doğrudan ya da dolaylı yoldan etki etmektedir. Aynı sistem içinde birlikte çalışan parçaların uyumu, montaj güvenliği, sistem ömrü ve sistemin verimi de yüzey kalitesi ile doğrudan etkilidir. Yüksek yüzey kaliteleri ürün performansını artırırken üretim maliyetlerini de artırmaktadır. Bu nedenle yüzey kaliteleri optimum seviyelerde belirlenmelidir. Gereğinden fazla verilen yüzey kaliteleri ürün maliyetlerini artıracaktır. Farklı talaşlı imalat uygulamalarında yüzey kalitesinin üretim maliyetlerine etkisi Şekil 6' de sunulmuştur.

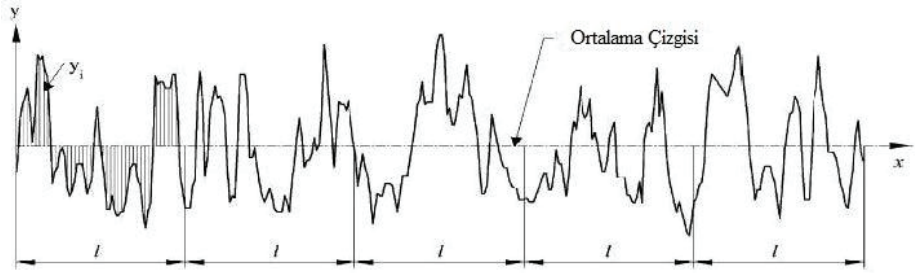


Şekil 6. Yüzey Kalitesi ve Operasyon Maliyeti Arasındaki İlişki

Delme uygulamalarında talaşın helis kanalları üzerinden tahliye edilmesi, tahliye sırasında talaşın takım ve delik yüzeyine temasına neden olmaktadır. Başta bu durum olmak üzere delme işleminin zorlu bir operasyon olması yüksek yüzey kalitelerinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğü en önemli kriterdir. Yüzey pürüzlülüğü iş parçası yüzeyinde oluşan mikro yapıdaki kusurlardır. Bu kusurların boyutları ve büyüklükleri belirlenirken farklı prensipler kullanılmaktadır. Bu prensiplerin en yaygınları Ra, Rq ve Rt olarak ifade edilebilir. Ra; yüzey kusurlarının referans çizgisine göre aritmetik ortalamasını, Rq; yine bu kusurların geometrik ortalamasını, Rt ise max. tümsek ve çukur arasındaki mesafeyi ifade eder.

Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazlarının birçoğunda ve akademik çalışmaların genelinde yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalaması olan Ra değerleri kullanılmaktadır (Çakır, 2015).



Şekil 7. Yüzey Pürüzlülüğü Gösterimi Deliklerde Boyut Toleransları

Bir ürünün beklenen faydayı sağlayabilmesi ve işlevini yerine getirebilmesi için tasarım sürecinde belirlenen boyutlara bağlı kalınması gerekmektedir. Tüm imalat yöntemlerinde olduğu gibi talaşlı imalatta da üretimi etkileyen faktörler boyutsal hassasiyeti belirlemektedir. Tezgâh özellikleri, operatör becerisi, çalışma ortamı, takım – malzeme ilişkisi ve ölçme hassasiyetleri boyutsal doğruluğu belirleyen önemli faktörlerdir. Tüm bu faktörler tam ölçülerde iş parçası üretimini imkânsız kılmaktadır. Bu durum oluşacak hataların belirlenen bir sınır içinde kalması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu aralık tolerans aralığı olarak ifade edilir ve toleranslar teknik resim kuralları çerçevesinde ifade edilir (Kaptı, 2017).

Montaj uygulamalarının büyük bir doğrulukta gerçekleşmesi ve ürünün beklenen performansı verebilmesi delik boyutları ile doğrudan ilgilidir. Özellikle bağlantı elemanlarının kullanılacağı, eş parçaların çalışacağı deliklerin çap boyutları büyük önem taşımaktadır. Toleranslar dışında üretilen çaplar gerekli işlevi yerine getiremeyerek ürünün ıskartaya çıkmasına neden olur. Delik çaplarının belirlenen çapa en yakın ve tolerans değerleri içinde olması beklenir.

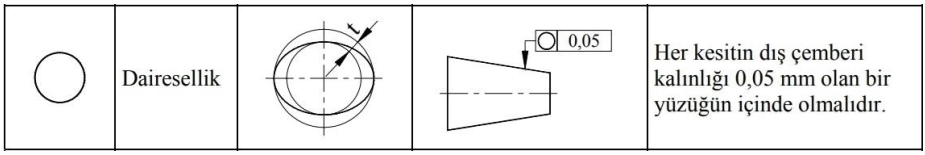
Çaptan sapma; delik çapının tasarımda belirlenen çaptan farkı olarak ifade edilir. İşlemin uygun olmayan kesme parametreleri ile gerçekleşmesi, uygun matkapların seçilmemesi, iş parçası ve takımın sağlıksız bağlanması, titreşim, matkap aşınması ve matkap üzerinde oluşan yükler çaptan sapma değerlerinin artmasına zemin hazırlamaktadır.

Deliklerde Şekil ve Konum Toleransları

Deliğin iş parçası üzerindeki konumu ve şekilsel doğruluğu da yüzey ve boyut toleransları kadar büyük önem taşımaktadır. Yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyete sahip bir deliğin arzu edilen yerden başka bir yere açılması ürün özellikleri açısından hiçbir şey ifade etmediği gibi iş parçasının da kullanılamaması anlamına gelmektedir. Bu durum iş gücü kaybı ve artan maliyetler olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer şekilde deliğin geometrik özellikleri (daireselliği, dikliği, paralelliği vb.) ürün performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüksek teknoloji ürünlerinde şekil ve konum toleransları büyük önem taşımaktadır. DIN ISO 1101 ile şekil ve konum toleransları belirlenmiştir.

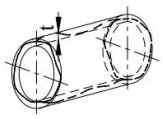
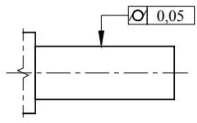
Tasarımda belirlenen şekil ve konum özelliklerinin dışına çıkılması sapma olarak tanımlanır. Bu sapmaların belirlenen tolerans aralığında olması gerekmektedir. Delikler için önem taşıyan birçok şekil ve konum toleransı mevcuttur. Dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma bunlardan önemlileridir.

Dairesellikten sapma; delik boyunca tüm noktalarda delik çevresinin, delik ile eş merkezli iki sınır daire arasında kalmasıdır. Bu sınır daireler dairesellikten sapma toleransı olarak karşımıza çıkmaktadır. Delik çevresinin delik boyunca herhangi bir noktada bu sınır dairelerin dışına çıkması deliğin dairesellikten sapma değeri açısından başarısız olduğu anlamına gelmektedir (Çakır, 2015).



Şekil 8. Dairesellikten Sapma Şematik Gösterimi (Kaptı, 2017)

Silindiriklikten sapma; delik boyunca delik yüzeyinin delik ile eş merkezli iki sınır silindir arasında kalmasıdır. Bu sınır silindirler, silindiriklikten sapma tolerans aralığını belirler. Deliğin operasyon sırasında ilerleme ekseninden kayması durumunda silindiriklikten sapma ortaya çıkar. Bu tolerans grubu özellikle derin delik uygulamalarında büyük önem taşımaktadır (Kaptı, 2017).

⌭	Silindiriklik			Toleranslanan yüzey, et kalınlığı 0,05 mm olan borunun içinde olmalıdır.

Şekil 9. Silindiriklikten Sapma Şematik Gösterimi (Kaptı, 2017) YÖNTEM

Kesici Takım ve Malzeme Özellikleri

Gerçekleştirilen çalışmada deney malzemesi olarak Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Malzemenin genişlik ve derinlik ölçüleri 100 x 80 mm, kalınlık ölçüsü ise 15 mm olarak belirlenmiştir. Çalışma sırasında tüm koşullarda delme işlemi boydan boya olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri ise Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 1. İş Parçası (Ti6Al4V) Kimyasal Bileşimi (%)

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
5,5 – 6,5	3,5 – 4,5	0,08 (max)	0,25 (max)	0,20 (max)	0,05 (max)	0,015 (max)	Kalan Tüm Miktar

Tablo 2. İş Parçası (Ti6Al4V) Mekanik Özellikleri

Özgül Ağırlık	4430 -4470 kg/m^3
Erime Sıcaklığı	1650 ^{o}C
Akma Dayanımı	790 MPa
Kopma Dayanımı	860 MPa

Deneysel çalışma sırasında kullanılan kesici takımın özellikleri büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında 6 mm çapında TiN kaplı karbür matkaplar kullanılmıştır. TiN kaplama düşük sürtünme katsayısı ve BUE oluşumunu engelleyici özelliği ile tercih edilen kaplama türlerinin başında gelmektedir (Yaşar vd., 2018). Takım tutucu olarak BT 40 (MAS 403 BT / ER40) pensli takım tutucu kullanılmıştır. Matkaplar tutucuya 40 mm çalışma boyu kalacak şekilde bağlanmıştır.

Kesme Parametreleri

İstenilen delik kalitesini elde etmek ve uygun çalışma koşullarının belirlenebilmesi için farklı kesme şartları ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında (biri doğrulama amaçlı olmak üzere) üç farklı kesme hızı (20; 42 ve 61 m/min) ve dört farklı ilerleme oranı (0,050; 0,073; 0,100 ve 0,150 mm/rev) kullanılmıştır. Parametrelerin belirlenmesinde literatür çalışmaları ve kesici takım üreticisi tarafından önerilen değerler dikkate alınmıştır. Deneyler tam faktöriyel deney tasarım modeline göre gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Çalışma Parametreleri

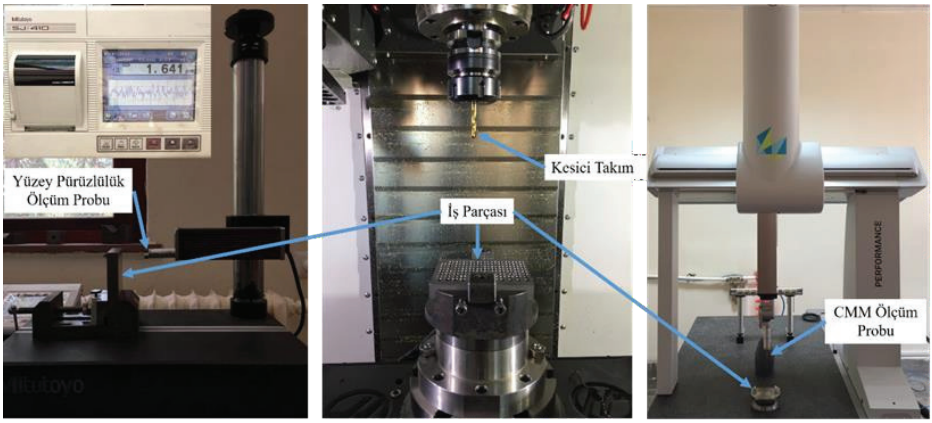
Kesme Hızı (m/min)	20			42			61		
İlerleme Oranı (mm/rev)	0,150	0,050	0,073	0,100	0,150	0,050	0,073	0,100	0,150

Kullanılan Tezgâh ve Cihazlar

Deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Delme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde HASS VF22 marka/model max. 12000 rev/min dönme kapasitesine sahip, 5 eksenli CNC tezgâh kullanılmıştır.

Yüzey pürüzlülük verilerinin ölçülmesinde Mitutoyo SJ-410 marka/model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Ölçüm sırasında cihazın örnekleme uzunluğu (λ) 0,8 mm, değerlendirme uzunluğu ise 4,8 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Her delikten dört ölçüm alınmıştır. Verilerin ortalaması alınarak yüzey pürüzlülükleri belirlenmiş ve grafikler oluşturulmuştur.

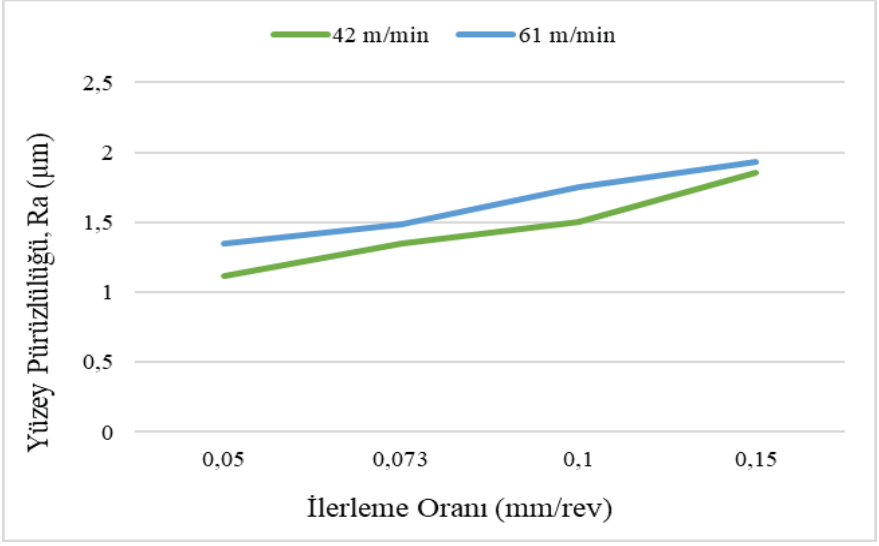
Dairesellikten ve çaptan sapma değerlerinin belirlenmesinde Hexagon marka Global Performance model CMM cihazı kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 10'de gösterilmiştir.



Şekil 10. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemleri BULGULAR ve TARTIŞMA

Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin İncelenmesi

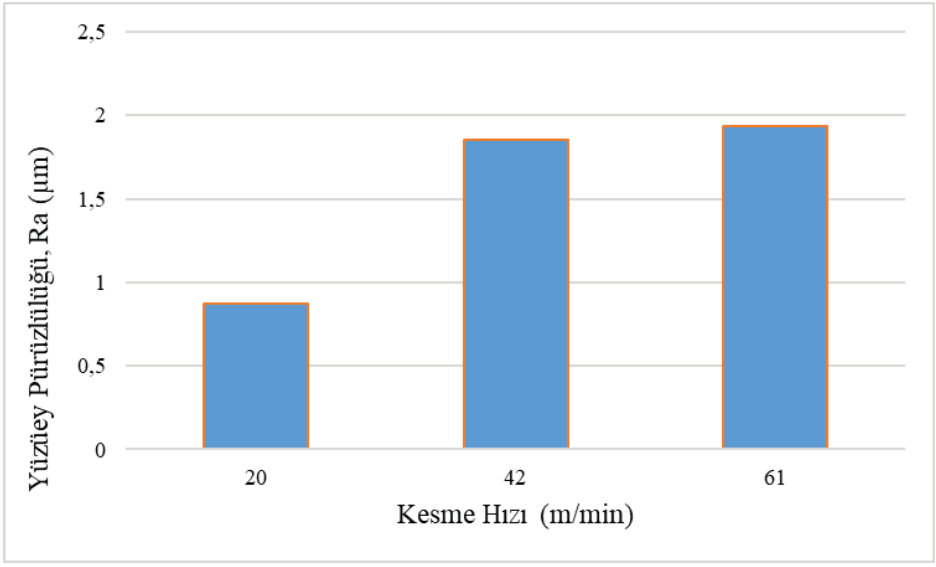
Yüzey pürüzlülüğü; başta sızdırmazlık olmak üzere malzemenin tribolojik ve hidrodinamik özellikleri açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılarak Grafik 1 ve Grafik 2'de sunulan yüzey pürüzlülüğü grafiği oluşturulmuştur.



Grafik 1. Yüzey Pürüzlülüğü - İlerleme Oranı Grafiği

Yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüklerinin her iki kesme hızında da arttığı görülmektedir. En düşük pürüzlülük değeri 42 m/min kesme hızı ve 0,05 mm/rev ilerleme oranı ile yapılan deneyde Ra ortama pürüzlülük değeri 1,12 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek pürüzlülük değeri 0,15 mm/rev ilerleme oranı ve 61 m/min kesme hızı eşliğinde yapılan deneylerde Ra değeri 1,94 µm olarak belirlenmiştir. Artan ilerleme oranına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması beklenen bir durumdur. Artan ilerleme oranları farklı mekanizmaların etkisi ile yüzey pürüzlülüklerini artırmaktadır. İlerleme oranının artması ile birim zamanda kaldırılan talaş kesitinin artması ve kesme işleminin zorlaşması pürüzlülük değerlerinin de artmasına neden olan durumlardan biridir (Yavuz vd., 2017). Ayrıca, artan ilerleme oranı ile talaş tahliyesinin hızlandığı bilinmektedir. Bununla birlikte, sünek malzemelerin işlenmesinde oluşan kesici kenara talaş yapışmaları düzensiz kesmeye neden olarak pürüzlülüğün artmasına katkı sağladığı düşünülmektedir (Meral ve Günay, 2019). Ti6Al4V gibi termal özelliklere sahip sünek malzemelerde sıcaklık etkisi ile de bu yapışma eğilimi artmaktadır. Tüm bu durumların; artan ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüklerinin artmasına zemin hazırladığı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada ayrı bir konu başlığı olarak deneyler sırasında oluşan talaş yapıları incelenmiştir. Talaşlar üzerinde görülen renk değişimleri kesme operasyonu sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarını göstermektedir. Yüksek kesme hızları ve ilerleme oranları ile yapılan deneylerde talaşın kolay tahliye edilemediği ve matkabın helisel kanallarına yapışarak yığıldığı görülmüştür.

İlerleme oranı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisinde olduğu gibi artan kesme hızı ile de yüzey pürüzlülükleri artmıştır. Artan kesme hızları ile birlikte artan kesme bölgesi sıcaklıkları, talaşın takıma yapışma eğilimini artırdığı, artan talaş yapışmasına bağlı olarak da yüzey pürüzlülüklerinin yükseldiği görülmüştür. Kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini daha doğru bir şekilde yorumlayabilmek için en yüksek ilerleme oranı (0,150 mm/rev) eşliğinde 20 m/min kesme hızı kullanılarak bir deney daha yapılmış ve Grafik 2 elde edilmiştir.

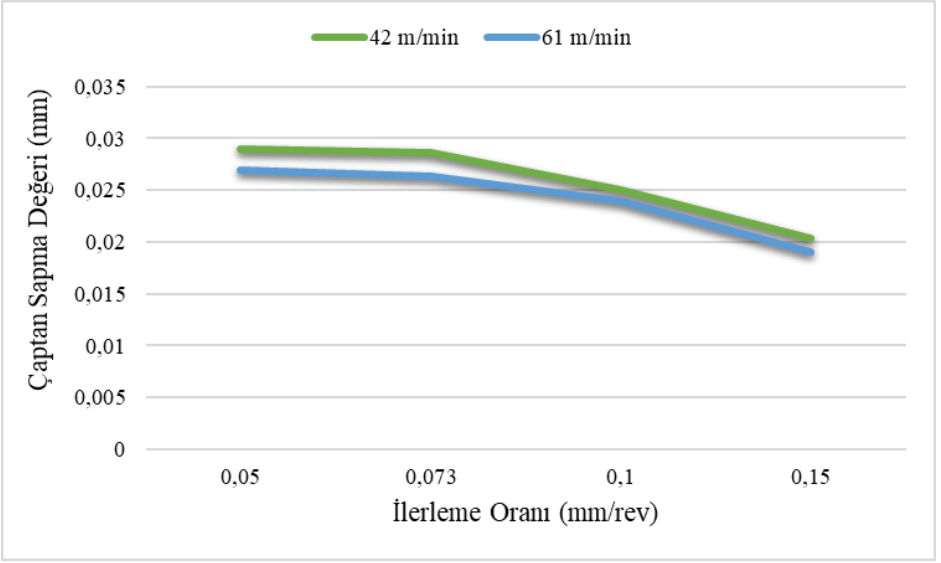


Grafik 2. Yüzey Pürüzlülüğü - Kesme Hızı Grafiği

Grafik 2′ de görüldüğü gibi aynı ilerleme oranında artan kesme hızı ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde de artış gözlenmiştir. Düşük kesme hızlarında talaş yapışması ve takım aşınması etkileri en aza indiği için bu kesme hızında yüzey pürüzlülük değeri belirgin bir şekilde düşük çıkmıştır. Diğer taraftan 42 m/min ve 61 m/min kesme hızlarında yakın pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir.

Çaptan Sapma Değerlerinin İncelenmesi

Delik kalitesi açısından önemli kriterlerden biri de deliğin teknik resimde belirtilen ölçü ve tolerans aralığında elde edilmesidir. Delik çapının toleransların üstünde delinmesi iş parçasının işlevini yerine getirememesine neden olmaktadır. Bu durum çaptan sapma değerlerini önemli hale getirmiştir. Çaptan sapma değerlerinin en aza indirilebilmesi için en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Grafik 3 ve Grafik 4′ de farklı kesme koşulları için belirlenen çaptan sapma değerleri sunulmuştur.

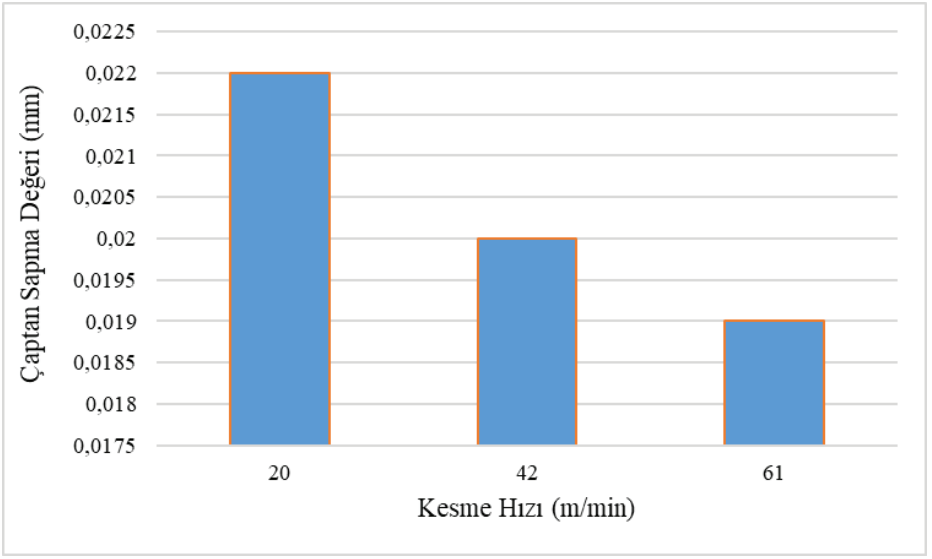


Grafik 3. Çaptan Sapma Değeri - İlerleme Oranı Grafiği

Yapılan tüm deneylerde elde edilen çap değerleri, nominal çap olan 6 mm'nin üstünde ölçülmüştür. Grafik 3 incelendiğinde artan ilerleme hızı ile çaptan sapma değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Artan ilerleme hızı ile çaptan sapma değerlerinde %70 'lere varan bir azalma olduğu görülmüştür. En yüksek çaptan sapma değeri; 0,05 mm/rev ilerleme oranı ve 42 m/min kesme hızı ile yapılan deneylerde 0,029 mm olarak ölçülmüştür. En düşük çaptan sapma değeri ise; 0,15 mm/rev ilerleme oranı ve 61 m/min kesme hızı ile yapılan deneylerde 0,019 mm olarak ölçülmüştür. Artan ilerleme hızı ile talaş tahliyesinin hızlanması, çaptan sapma için sorun oluşturan talaşın kesme bölgesinden süratle uzaklaşmasını sağlamıştır. Artan ilerleme hızı takım-iş parçası arasındaki temas süresinin azalmasına neden olmuştur (Meral ve Günay, 2019). Bu durumun da çaptan sapma değerlerinin iyileşmesine katkısı olduğu düşünülmektedir.

Grafik 3'de 42 m/min ve 61 m/min kesme hızlarının benzer çaptan sapma eğilimleri ile birlikte 61 m/min kesme hızında çaptan sapma değerlerinin bir miktar düşük olduğu görülmüştür. Kesme hızının çaptan sapma değerleri üzerinde etkisini daha detaylı görebilmek için 0,15

mm/rev sabit ilerleme oranı eşliğinde 20 m/min kesme hızı ile ek bir deney yapılmış ve sonuç Grafik 4 'de grafik olarak gösterilmiştir.

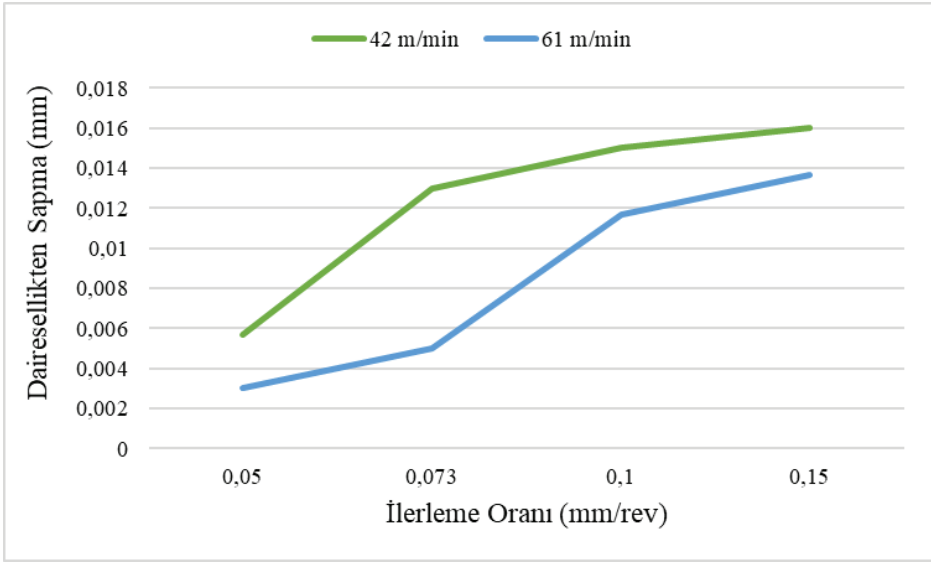


Grafik 4. Çaptan Sapma Değeri - Kesme Hızı Grafiği

Grafik 4 incelendiğinde artan kesme hızı ile çaptan sapma değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür. Kesme hızının 20 m/min den 61 m/min 'e çıkması ile çaptan sapma değerlerinde 0,022 mm'den 0,019 mm'ye yaklaşık %14 lük bir azalma olmuştur. Artan kesme hızı ile birim zamanda gerçekleştirilen talaş tahliyesi hızlanmıştır. Bu duruma ek olarak, artan kesme hızı ve kesme bölgesinde artan sıcaklıklar, malzeme dayanımını bir miktar düşürerek daha rahat bir kesme ortamı oluşturmuştur. Tüm bu etkilerin çaptan sapma değerlerindeki iyileşmeye katkı sağladığı düşünülmektedir.

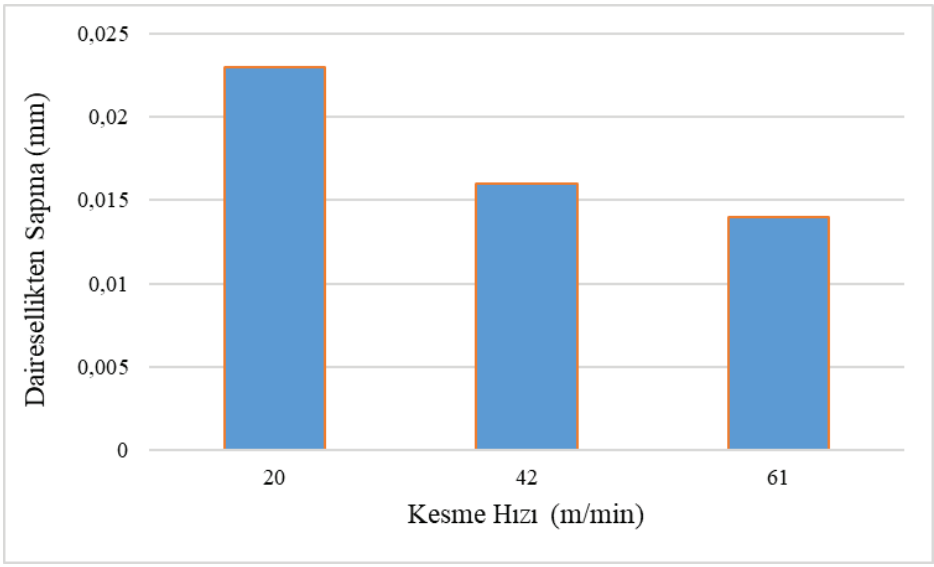
Dairesellikten Sapma Değerlerinin İncelenmesi

Önemli delik kalitesi kriterlerinden bir diğeri de dairesellikten sapmadır. Delme işlemlerinde oluşan deliğin tam dairesel elde edilmesi arzulanır ve sapma değerlerinin en az seviyelerde olması istenir. Kesme parametrelerinin dairesellikten sapma değerlerine etkisinin anlaşılabilmesi için elde edilen veriler ile Grafik 5 ve Grafik 6 oluşturulmuştur.



Grafik 5. Dairesellikten Sapma - İlerleme Oranı Grafiği

Grafik 5'de artan ilerleme oranı ile dairesellikten sapma değerlerinin arttığı belirlenmiştir. En düşük dairesellikten sapma değerleri; 0,05 mm/rev ilerleme oranında 42 m/min kesme hızı için 0,0057 mm ve 61 m/min kesme hızı için 0,003 mm olarak ölçülmüştür. Dairesellikten sapma en yüksek değerlerine; 0,15 mm/rev ilerleme oranı eşliğinde 42 m/min kesme hızı için 0,016 mm ve 61 m/min kesme hızı için 0,014 mm ile ulaşılmıştır. Artan ilerleme oranı ile 61 m/min kesme hızlarında dairesellikten sapma yaklaşık beş kat artmıştır. Artan ilerleme oranı ile delme operasyonu sırasında itme kuvvetleri artmış ve bu durum tezgâh ana mili rijitliğinin bozulmasına ve dairesellikten sapmanın (ovalite) artmasına neden olmuştur (Kıvak ve Şeker, 2015). Tüm ilerleme oranlarında 42 m/min kesme hızı ile daha yüksek dairesellikten sapma değerleri ölçülmüştür. Kesme hızının dairesellikten sapma değerleri üzerinde etkisinin belirgin bir şekilde gösterilebilmesi için 0,15 mm/rev ilerleme oranı ve 20 m/min kesme hızı ile deney yapılmıştır. Kesme hızı – Dairesellikten sapma ilişkisi Grafik 6'da sunulmuştur.



Grafik 6. Dairesellikten Sapma - Kesme Hızı Grafiği

Grafik 6 incelendiğinde sabit ilerleme oranında (0,15 mm/rev) artan kesme hızı ile birlikte dairesellikten sapma değerleri azalmıştır. 20 m/min kesme hızında 0,023 mm olan dairesellikten sapma değeri, kesme hızının 61 m/min'e artması ile 0,014 mm ye kadar düşmüştür. Bu sonuçların oluşmasında; çaptan sapma değerlerinin değişimde olduğu gibi dairesellikten sapma değerlerinde de yüksek talaş tahliyesi hızı, kısa operasyon süreleri ve kesme bölgesinde artan sıcaklıkların etkili olduğu düşünülmektedir.

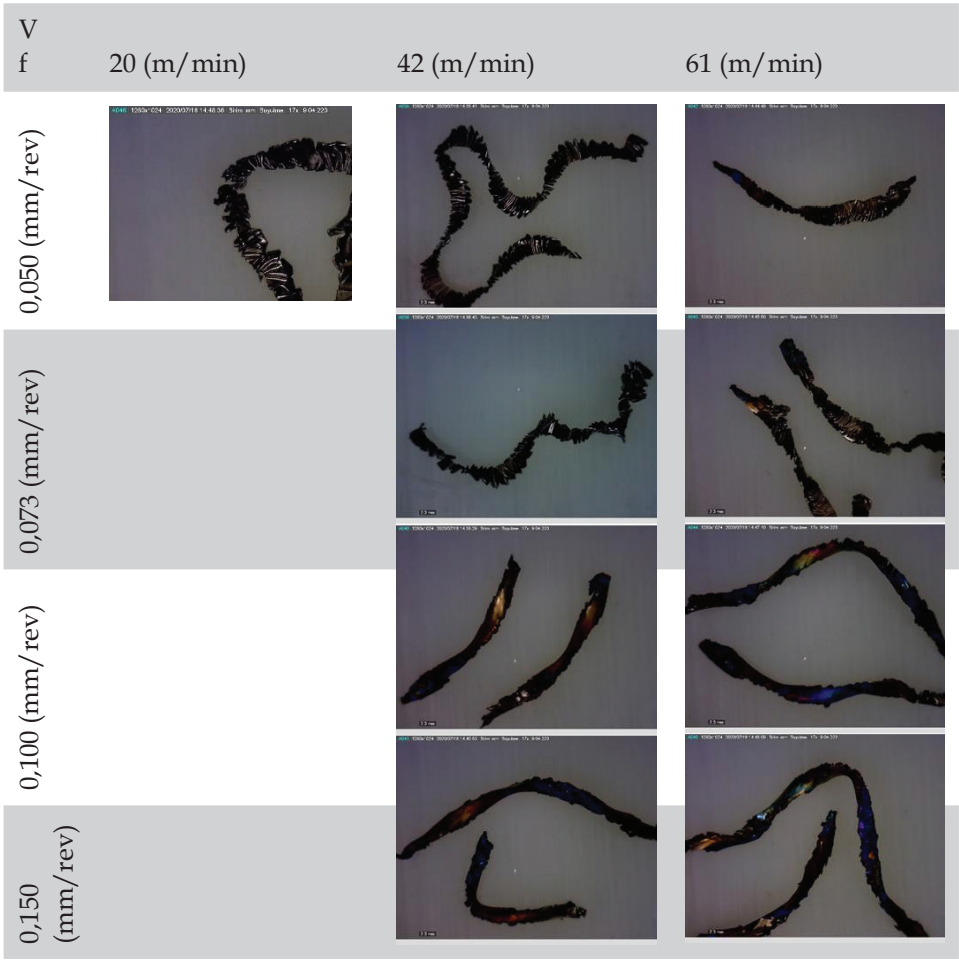
Talaş ve Takım Görsellerinin İncelenmesi

Talaşlı imalat uygulamalarında açığa çıkan talaşın şekli, boyutu ve rengi operasyon hakkında önemli bilgileri barındırır. Talaş görselleri kesme sırasında oluşan ısı, takım aşınması, takım ve iş parçası özellikleri, kesme parametrelerinin uygunluğu gibi birçok konu hakkında fikir verir. Bununla birlikte talaş, operasyonun sürekliliğini etkileyen faktörlerden biridir. Delme işleminde talaş takımın helis kanalları üzerinden tahliye edilmektedir. Bu durum iş parçası – talaş ve takım – talaş arasındaki teması diğer tüm talaşlı imalat yöntemlerinden daha hassas hale

getirmiştir. Talaşın tahliyesi sırasında iş parçası yüzeyini çizmesi, takım ve iş parçası arasına sıkışarak takımı kırması gibi olumsuz durumlar delme işleminde talaş kontrolünü gerekli kılmıştır. Talaş ile kesme bölgesinde oluşan ısının büyük bölümü tahliye edilmektedir. Bu durum delme işleminde takıma ve iş parçasına aktarılan ısının da artmasına neden olmakta ve operasyon verimliliğini etkilemektedir.

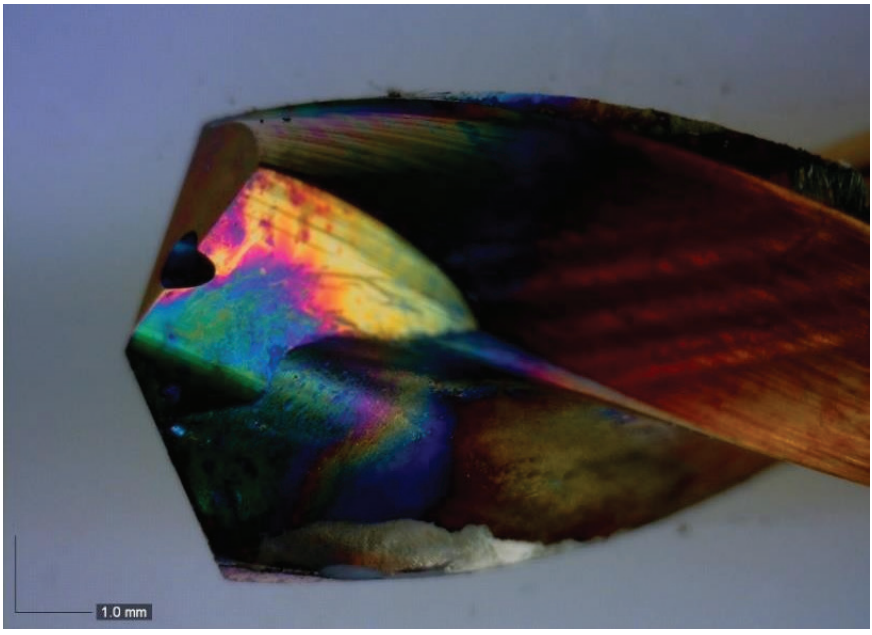
Tüm bunlar delme uygulamalarında talaş kontrolünü gerekli ve önemli kılmaktadır. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen talaş görselleri Tablo 4′ de verilmiştir.

Tablo 4. Deneyler Sonucu Oluşan Talaş Görselleri



Tablo 4 incelendiğinde değişen kesme parametreleri ile farklı özelliklere sahip talaş yapılarının oluştuğu görülmüştür. Artan kesme hızı ve ilerleme oranı ile talaşın takım helis kanallarına yığılma eğiliminin arttığı görülmüştür. İlerleme oranı 0.050 (mm/rev), kesme hızı ise 20 m/min ve 42 m/min olarak alındığı çalışmalarda talaşın rahat bir şekilde tahliye edildiği görülmektedir. Bu deneylerde talaş renginin mat ve talaşın arka yüzeyinin testere dişleri gibi olduğu görülmüştür. Bu durum beklenen şekilde talaşın aktığını göstermektedir. Aynı ilerleme oranında kesme hızı 61 m/min seçildiğinde talaş çıkışının meneviş rengini aldığı

görülmüştür. Bu durum kesme sırasında yüksek ısılara ulaşıldığını ve artan kesme hızı ile sıcaklık değerlerinin arttığını göstermektedir. İlerleme oranının 0.730 mm/rev değerine çıkarıldığı durumda da benzer bir sonuç görülmüştür. Ancak 0.730 mm/rev ilerleme oranı ve 61 m/min kesme hızında sıcaklığa bağlı renk değişimi daha belirgin bir hal almıştır. Artan ilerleme oranı ile deformasyon ve sürtünmelere bağlı olarak sıcaklıkların yükseldiği görülmüştür. İlerlemenin 0.100 ve 0.150 mm/rev değerine çıkması ile her iki kesme hızında da talaş tahliyesi güçleşmiştir. Bu parametreler altında yığıntı talaş oluşumu görülmüştür. Talaş bu değerlerde yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları etkisi ile takımın helis kanalına yığılmıştır. Bu yığılmanın başladığı ilk kaynaklanma anında arkadan gelen talaşların da ilerlemesi ile talaş kütleleri üst üste birikmiş ve talaşın testere dişinden ziyade tek bir blok gibi çıkmasına ve helis kanalını doldurmasına neden olmuştur. Helis kanalına yığılan bu talaş takım üzerinden uzaklaştırılırken takımdan parça koparak takımı hasara uğratmıştır. Bu durum takımın bir sonraki operasyon için kullanımını imkânsız kılmış ve takım ömrünü tamamlamıştır.



Şekil 11. Yapılan Deneye Ait Matkap Görseli

Şekil 11' de 61 m/min ve 0.150 mm/rev parametreleri ile gerçekleştirilen deneyde kullanılan takımın görseli sunulmuştur. Kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar nedeni ile takımda renk değişiminin olduğu görülmektedir. Helis kanalında talaş yığılmasına bağlı olarak kaplamanın kalktığı ve takımın yine yığılma bölgesinde hasara uğradığı görülmektedir. Takımın bu bölgesi sürekli talaş akışı ile mekanik ve termal yüklerin oluştuğu bir bölgedir. Operasyon sırasında yüksek sıcaklıklara çıkan takım, operasyon sonunda hızlı bir soğumaya maruz kalmaktadır. Tüm bu etkilerin takım üzerinde termal çatlaklara neden olduğu, ayrıca yığılan talaşın bu bölgeden uzaklaştırılması sırasında bu çatlakların tetiklediği çentik etkisiyle takımda hasar oluştuğu gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Ti6Al4V malzemenin delinmesinde delik kalitesine (yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma değerleri ve dairesellikten sapma değerleri) farklı kesme parametreleri etkilerinin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir.

- Yüzey pürüzlülüğü değerleri artan ilerleme oranları ile %43,3 ila %65,4 arasındaki oranlarda artmıştır. Sabit ilerleme oranı kullanılarak yapılan deneylerde artan kesme hızının yüzey pürüzlülüğü değerlerini %122,2 artırdığı görülmüştür.
- Çaptan sapma değerleri incelendiğinde artan ilerleme oranlarının çaptan sapma değerlerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Artan kesme hızı ile çaptan sapma değerleri azalma eğilimi göstermiştir.
- Artan ilerleme oranı ile dairesellikten sapma değerlerinde ise yükselme görülmüştür. Dairesellikten sapma değerlerinin artan kesme hızı ile azaldığı tespit edilmiştir.
- Artan kesme hızı ve ilerleme oranları talaş yapısını değiştirmiş ve artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak talaşlar üzerinde renk değişimi gözlemlenmiştir.
- Artan kesme hızı ve ilerleme oranları ile talaş yığılması gerçekleşmiştir. Hem takım hem de talaş üzerinde önemli renk değişimleri

oluşmuş ve bu renk değişimleri yüksek kesme sıcaklıklarına çıkıldığını göstermiştir.

KAYNAKÇA

Basile, S. A. (1993). Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding. *Precis Eng*, 15, 258–265.

Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y. ve Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *SAÜ Fen Bilim Enstitüsü Derg*, 21, 124–124.

Bıçakçı, N. (2015). *Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinebilirliğinin Araştırılması*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi. Karabük. 25-30.

Çakır, A. (2015). *AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Soğutma Yöntemlerinin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı Doktora Tezi. Ankara.70-78.

Çakır, F. H. (2019). *Ti6Al4V Alaşımının Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması*. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi. Eskişehir. 45 – 54.

Çelik, Y. H. ve Kılıçkap, E. (2018). Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol*, 6, 163– 175.

Çiftçi, İ. ve Gökçe, H. (2018). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi. *J Polytech*, 0900, 0–12.

Erkan, Ö. ve Yücel, E. (2018). AA 7075 malzeme üzerine delinen delik yüzeylerinin pürüzlülük optimizasyonu ve istatistiki analizi. *IInternational Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018). Ankara*, 788–795.

Groover, M. P. (2011). *Principles of modern manufacturing*. 4th ed, J. Wiley & Sons, United States of America.

Kaptı. A. O. (2017). *Bilgisayar Destekli Teknik Resim Ders Notu ve Uygulamaları*. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.

Kıvak, T. ve Şeker, U. (2015). Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy. *Mater Tehnol*, 49, 949–956.

Kıvak, T. (2012). *Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı Doktora Tezi. Ankara. 18-22.

Meral, G., Sarıkaya, M. ve Dilipak, H. (2011). Delik Delme Uygulamalarında Delik Kalitesinin Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu. *Mühendis ve Makine*, 52, 42–49.

Meral, G. (2010). *AISI 1050 Malzemenin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri ve Delik Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans. Ankara. 50 – 75.

Meral, T. ve Günay, M. (2019). Kaplamalı ve Kaplamasız Karbür Matkap ile Ferritik Paslanmaz Çeliğin Delinebilirlik Analizi. *Gazi J Eng Sci*, 5, 159–166.

Nouari, M. and Makich, H. (2013). Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555. *Int J Refract Met Hard Mater*, 41, 259–269.

Ribeiro Filho, S. L. M., Lauro, C. H., Bueno, A. H. S. and Brandão, L. C. (2016). Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method. *Meas J Int Meas Confed*, 88, 223–237.

Uçak, N. (2017). *The Effects of Cuttıng Condıtıons on Cuttıng Temperature and Hole Qualıty ın Drıllıng of Inconel 718 Usıng Solıd Carbıde Drılls.* Yıldırım Beyazıt Unıversıty Graduate School Of Natural And Applıed Scıences M.Sc. Thesis. Ankara. 5 - 8.

Uzun, G., Yaşar, S. A. ve Korkut, İ. (2017). Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerine ve Delik Kalitesine Etkisinin İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Derg / Karaelmas Sci Eng J*, 7, 469–475.

Wang, S., Ma, Z., Liao, Z., Song, J., Yang, K. and Liu, W. (2015). Study on improved tribological properties by alloying copper to CP-Ti and Ti-6Al-4V alloy. *Mater Sci Eng C*, 57, 123– 132.

Yağmur, S., Acır, A., Seker, U. ve Günay, M. (2013a). An Experımental Investıgatıon of Effect of Cuttıng Parameters on Cuttıng Zone Temperature in Drllıng. *Gazi Üniv Müh Mim Fak Der*, 28, 1–6.

Yağmur, S., Acır, A. ve Seker, U. (2013b). AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin ve Kaplama Uygulamasının Daireselliktен Sapma (Ovalite) Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Politek Derg*, 16, 105–109.

Yaşar, S. A., Uzun, G. ve Korkut, İ. (2018). 17-4 Ph Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Farklı Kaplama Yöntemlerinin Takım Performansı Üzerindeki Etkileri. *In: 9th Internatıonal Congress on Machining Antalya*, 199–205.

Yavuz, M., Gokce, H. ve Şeker, U. (2017). Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilim Derg*, 3(1), 11 – 19.

Yılmaz, B., Bayraktar, Ö., Eyüp, M., Uzun, G. ve Güllü, A. (2016). Vermiküler Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Delme Operasyonunda Kaplamanın ve Uç Açısının Geometrik Tolerans Değerlerine Etkisinin Araştırılması. *In: 16th International Materials Symposium IMSP'2016. Denizli,* 1841–1847.

Yılmaz, B., Uzun, G. ve Güllü, A. (2020). Ti6Al4V Malzemeye Uygulanan Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin İtme Kuvveti, Kesme Momenti Ve Kesme Sıcaklığına Etkileri. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(3), 1-8.

İNTERNET KAYNAKLARI

Şekil 5. Delme operasyonunun şematik gösterimi https://www.hamitarslan.com/delik-delme (E.T. 23.08.2021)

Şekil 6. Yüzey Kalitesi ve Operasyon Maliyeti Arasındaki İlişki http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/02_toleranslar.pdf (E.T. 23.08.2021)

BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI İÇİN BİYOÇÖZÜNÜR MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİMİ

Tuğçe TEZEL[1], Volkan KOVAN[2]

Öz: Magnezyum ve alaşımları düşük özgül ağırlık ve yüksek mukavemet/yoğunluk oranı ile bilinen malzemelerdir. Saf magnezyumun özelliklerini iyileştirmek için çeşitli alaşımları üzerine birçok çalışma yapılmış ve alaşımları geliştirilmiştir. Bu noktada özellikle Al, Zn, Mn, Ca ve nadir toprak elementlerinin, magnezyumun mekanik özelliklerin gelişimi ve mikro yapısal değişikliklerdeki katkısı büyüktür. Tüm bu özellikleri sebebiyle ilgi çeken magnezyum ve alaşımları; otomotiv, havacılık, elektronik, biyomedikal ve ticari çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda yüksek talep görmesinin sebebi hafifliğinin yanı sıra biyoçözünür bir malzeme oluşudur. Magnezyum esaslı alaşımlar, kardiyovasküler ve ortopedi gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda insan vücudu içine yerleştirildiğinde korozyon nedeniyle biyolojik olarak çözünmede doğal bir yeteneğe sahiptir. Bu durum, iyileşme sürecine yardımcı olmak için geçici ya da ihtiyaç halinde kalıcı bir destek yapı oluşturma anlamına gelmektedir. Bu malzemelerin çözünme özelliği, magnezyumun yüksek oksidatif korozyon özelliği ile ilişkilidir. Ayrıca, magnezyum ve alaşımları gibi biyoçözünür malzemelerden üretilen implantlar, geçici implant uygulamalarında ikinci bir cerrahi müdahale ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu noktada kişiye özel implant tasarımı ve imalatı ihtiyacı, önemli hususlardandır. Magnezyum ve alaşımları, döküm, ekstrüzyon, tel çekme

1 Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Antalya / Türkiye, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0139-442X

2 Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Antalya / Türkiye, kovan@akdeniz.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0599-525X

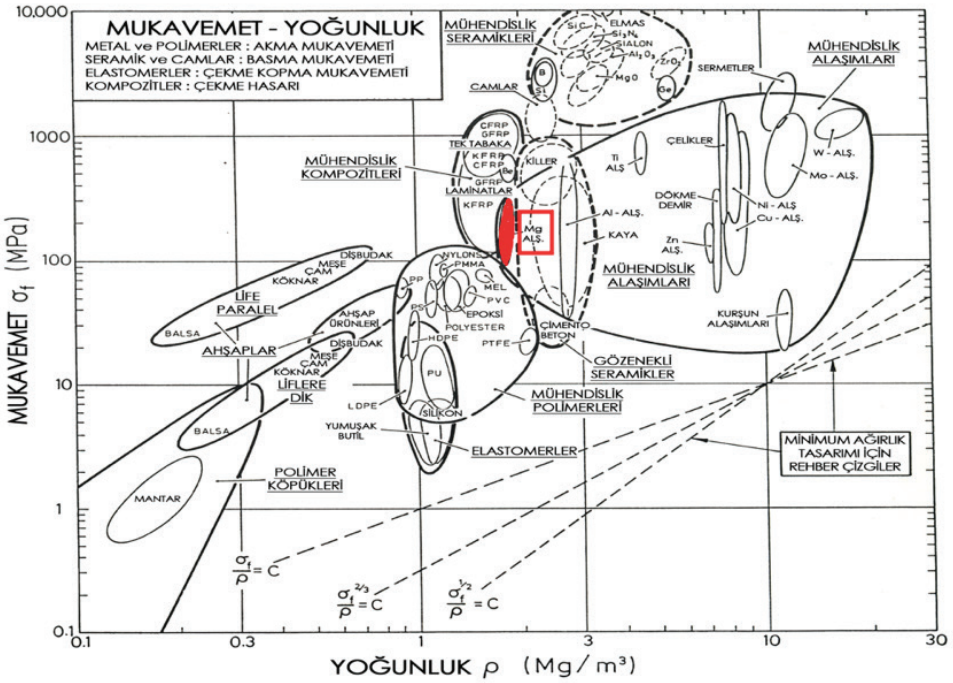
gibi çeşitli sınırlı geometrik değişikliğe izin veren geleneksel yöntemlerle üretilebilmektedir. Ancak gelişen teknolojiye bağlı olarak ortaya çıkan yeni üretim teknikleri dijitale araçlara bağlı olarak sınırsız geometride kişiye özel tasarım imkanı sunmaktadır. Bu üretim tekniklerinden bir tanesi olan eklemeli imalat (3B yazıcı ile imalat), bilgisayar destekli tasarım (CAD) veya 3B nesne tarayıcıları kullanan, malzemeyi katman katman üst üste ekleme yaparak sağlayan bir üretim tekniğidir. Eklemeli imalatın son yıllarda geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak kullanımı, tasarım konusunda sağladığı serbestlik ve hastaya özel implant tasarımı ve imalatı faydası noktasında kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada magnezyum ve alaşımlarının çeşitli biyomedikal uygulamaları ve eklemeli imalat yöntemleriyle birlikte özellikle bağlayıcı püskürtme (binder jetting) ile metal eklemeli imalat yöntemine dikkat çekilmiştir. Diğer metal eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan sistemlerin, magnezyum ve alaşımlarının üretilebilmesindeki sınırı, magnezyumun aktif metal olmasından kaynaklanır. Magnezyumun korozyona duyarlılığı, bir oksit tabakasının varlığına rağmen oluşur ve oksit yüzeyi altındaki metali daha fazla saldırıya maruz bırakabilir. Bu nedenlerden ötürü, özellikle oda sıcaklığında üretim imkânı sağlayan bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yöntemi, gelecek yıllarda atmosferik ortamda korozyona maruz kalan biyoçözünür bir malzeme olan magnezyum ve alaşımlarının özellikle biyomedikal uygulamalarında ön plana çıkacaktır.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum, Biyoçözünürlük, İmplant, 3B yazdırma, Eklemeli İmalat, Binder Jetting

MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI

Atom numarası 12 olan magnezyum, doğada en fazla miktarda bulunan dokuzuncu, insan vücudunda kütlece en fazla miktarda bulunan on birinci elementtir. Çoğu mühendislik malzemelerinde olduğu gibi magnezyum da saf haliyle kullanılmasının yanı sıra çoğunlukla alaşım olarak kullanılmaktadır. En hafif mühendislik malzemelerinden biri olan magnezyum alaşımları, yüksek özgül mukavemet, yüksek termal iletkenlik, iyi işlenebilirlik, iyi titreşim ve şok sönümleme kapasitesi, kontrollü ortam altında iyi kaynaklanabilirlik gibi özellikleriyle tasarım ve imalatçıların ilgisini çekmektedir. Tüm bu özellikler, otomotiv, havacılık, biyomedikal, tıp, diş hekimliği, iletişim, elektronik, spor malzemeleri ve diğer birçok endüstride kullanılmasını sağlar (Kainer, 2004).

Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini çeşitli diğer malzemelerle/alaşımlarla değerlendirmek ve karşılaştırmak için birçok diyagram bulunmaktadır. Şekil 1'de, mukavemet/yoğunluk arasındaki ilişkiye göre malzeme türleri içerisinde magnezyum alaşımlarının yeri kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Şekilde geniş bir malzeme yelpazesi içerisinde magnezyum alaşımlarının yerinin, diğer mühendislik alaşımlarına nazaran yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk sergilediği görülebilir.



Şekil 1. Mukevemet-Yoğunluk Malzeme Seçim Diyagramı (Ashby, 2011)

BİYOMEDİKAL UYGULAMALARINDA MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARININ ÖNEMİ

Biyomedikal uygulamalarında geleneksel olarak paslanmaz çelik (Fe–Ni–Cr), kobalt esaslı alaşımlar (Co–Cr) ve titanyum esaslı alaşımlar (Ti–Al–V) kullanılır. Ni, Cr ve V elementleri de dahil olmak üzere potansiyel toksik elementlerin elastisite modülü ve metal iyonu salınım değerlerinin uyumsuzluğundan dolayı çeşitli uyum sorunlarıyla karşılaşılabilir. Bu sebeple, vücudun toksik implant içeriklerine uzun süre maruz

kalmasını önlemek için ikincil cerrahi operasyona ihtiyaç duyulur (Persaud-Sharma ve McGoron, 2012; Sezer vd., 2018). Saf magnezyuma eklenen her alaşım elementi, mekanik, kimyasal, fiziksel olarak hedeflenen özellikler üzerinde karakteristik etkilerini gösterir. Biyomedikal uygulamalarda magnezyum alaşımlarının yeri değerlendirildiğinde, istenilen seviyede mekanik özellik ve kontrol edilebilir biyoçözünürlüğe sahiptir. Bu sebeple toksik olmayan veya düşük toksisiteye ve aynı zamanda kontrol edilebilir biyoçözünürlüğe sahip yeni magnezyum alaşımları geliştirmek için araştırmalar yapılmaktadır. Mg-Zn serisi, Mg-Ca serisi, Mg-Si serisi ve Mg-Sr serisi gibi çeşitli biyomedikal magnezyum esaslı alaşım sistemleri araştırılmış ve geliştirilmiştir. Magnezyumun vücut sıvılarında çözünebilir olması, magnezyumun iyileşme süreci sırasında çözünebileceği ve çözünme kontrol edilirse iyileşmenin tamamlanmasından sonra hiçbir kalıntı bırakmayacağı anlamına gelir. Böylece implantın çıkarılması için ikincil cerrahi operasyon ihtiyacı ortadan kaldırılabilir (Sezer vd., 2018). Burada en önemli konu, vücuda uygulandığında biyoçözünme hızının nasıl kontrol edileceğidir. Çünkü kontrolsüz biyoçözünme, yerleştirilen implantların mekanik bütünlüğünün kaybolmasına, vücutta metal kontaminasyonuna ve doku tarafından istenmeyen hidrojen oluşumuna neden olabilir (Witte, 2010). Gerekli biyouyumluluğunun yanı sıra magnezyumun doğal mekanik özellikleri insan kemiğininkilere çok benzerdir ve tatmin edici biyomekanik uyumluluk sağlar (Oshida, 2007). Magnezyumun insan kemiğiyle etkileşimini gerilme koruması (stress protection) ile açıklamak mümkündür. Gerilme koruması, kırıkları onarmak için veya eklem replasman cerrahisinde metal implantlar kullanıldığında, kemik implantından yükün kaldırılmasının bir sonucu olarak kemik yoğunluğundaki azalmayı ifade eder. Wolff yasasına göre, sağlıklı bir insan veya hayvandaki kemik, altına aldığı yüklere tepki olarak yeniden şekillenecektir. Bu nedenle, bir kemiğe binen yük azalırsa, kemik kütlesini korumak için gerekli olan sürekli yeniden şekillenme için herhangi bir uyaran olmadığından kemik daha az yoğun ve zayıf hale gelecektir. Bu tür kemik yeniden şekillenmesi, döngüsel kemik gerilmelerindeki küçük değişikliklere karşı çok hassastır (Millis, 2014).

Açıklanan tüm bu sebeplerden ötürü magnezyum alaşımları, tıpta doku mühendisliği, ortopedik ve kardiyovasküler uygulamalar (Prakasam vd., 2017; Li ve Zheng, 2013; Witte vd. 2006) ve diş hekimliğinde kemik plakası, vida veya geçici implantlar (Ananth vd., 2015; Wetterlöv Charyeva, 2017) için kullanılabilmektedir.

MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARINDA BİYOÇÖZÜNÜRLÜK

Kalıcı ve geçici olmak üzere temel olarak iki tip tıbbi implant vardır. Tıpta özellikle ortopedide geçici implantlar baskın olmasına rağmen diş hekimliğinde her iki tip de sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, protezlerde yapay diş kökü görevi gören diş implantları normal çiğneme fonksiyonunun ve buna ek olarak estetiğin geri kazanılması için yerleştirilen pozisyonda kalmalıdır, geçici tip implantlar ise ortodontik çeşitli işlevler için kullanılır. Kırık kemik veya eklemi onarmak için kullanılan ortopedik implantların biyouyumlu ve yeterli mekanik özelliklere sahip alaşımlarının çoğu ostenitik paslanmaz çelikler, CoCrMo alaşımları, Ti ve Ti6Al4V veya Ti6Al7Nb alaşımlarıdır. Bunlara yarı kalıcı (geçici) implantlar adı verilir. Genellikle travmatik bir yaralanma sonrası hasta tamamen iyileştikten sonra, komşu dokuların iltihaplanması veya çeşitli sorunlara sebep olmaması için implantın vücuttan revizyon ameliyat ile çıkarılması gereklidir. Bu revizyon ameliyat yerine son yıllarda insan vücudu tarafından yeniden emilen, toksik olmayan malzemelerden oluşan ve biyolojik olarak çözünebilen implant alaşımlarının geliştirilmesi üzerine yoğun bir şekilde çalışılmaktadır (Gonzales vd.,2013). Bu nedenle, iyi mekanik performansa sahip, maliyeti düşük biyoçözünür metalik alaşımların geliştirilmesi oldukça arzu edilir. Demir ve magnezyum bazlı alaşımlar, nispeten hızlı biyolojik çözünme ve yeterince güçlü mekanik performans sergiledikleri için tercih edilir. Özellikle magnezyum alaşımları, sertliklerinin insan kemiğine daha yakın olması sebebiyle öne çıkar (Oshida vd.,2010). Bu durum yarı kalıcı implantların yanı sıra kalıcı implantların kullanımında da kendine yer bulmasını sağlar. Yarı kalıcı metalik implantların bir diğer dezavantajı ise, çıkarılması aşamasında özellikle gelişme dönemindeki hastalarda hızlı büyümeye uyum sağlanamaması ve çeşitli enfeksiyonların oluşmasına sebebiyet vermesidir (Rahim vd., 2018). Magnezyum alaşımlarından üretilen metal implant-

lar biyoçözünür olduğundan kemikle bütünleşerek iyileşme sürecinde destek sağlayabilir ve daha sonra cerrahi implant çıkarma işlemi gerektirmeden uzun vadeli yan etkileri ortadan kaldırır (Middleton ve Tipton, 2000; Sheikh vd., 2015). Magnezyum bazlı biyoçözünebilir alaşımların, insan vücudunda uygun bir çözünme hızında metabolizma ile birlikte çözünmesi beklenir (Chen vd., 2014; Schinhammer vd., 2010; Witte vd.,2005; Zartner vd., 2005). Aslında, iyileşme süreci sırasında, geçici implantların mekanik özellikleri yavaş yavaş azalırken, çevreleyen doku özelliklerini yeniden kazanır (Banerjee vd., 2019). Magnezyumun bu özelliğini daha iyi açıklayabilmek için diğer malzemelerle biyoçözünürlüğü kıyaslanabilir. Örneğin in-vivo ortamdaki malzemelerin biyoçözünme hızı; saf tavlanmış demir için 0,16 mm/yıl, dökümle üretilmiş saf çinko için 0,2 mm/yıl ve saf dökümle üretilmiş magnezyum için 407 mm/yıl'dır (Pogorielov vd., 2017). İskele desteği olarak üretilen magnezyum ve alaşımları metalik malzeme oldukları için başlangıçta doku iyileşmesi ve hücre büyümesi için gerekli mekanik desteği sağlarken, daha sonraki aşamada çevre dokular tarafından doğal çözünme ve yeniden emilim sağlayarak ameliyat ihtiyacı gibi sonraki dönem ihtiyaçlarını ortadan kaldırır. Bu sebeple magnezyum alaşımlarının çözünme hızlarını kontrol etmek için birçok araştırma yapılmıştır (Li vd., 2016) Çözünme hızının kontrolü için özellikle alaşımlama ve yüzey modifikasyonu tercih edilmektedir. Biyomalzemelerin kontrolsüz çözünürlüğü, mekanik bütünlüklerinin kaybolmasına, vücutta metal kontaminasyonuna ve doku için fazla miktarda hidrojen oluşumuna neden olabilir. Bu sebeple biyoçözünür magnezyum malzemelerinin uygulama alanları, biyolojik ortamdaki çözünürlük mekanizmasını anlamak ve çözünürlük hızını yönetmek ile oldukça ilişkilidir. Bu sebeple öncelikle bu iki özellik ele alınmalıdır.

Magnezyum esaslı alaşımların çözünme davranışı, sulu aşındırıcı ortam ve sıcaklık, kimyasal bileşim, mikro/makro yapı, yüzey yapısı, alaşım elementleri, safsızlıklar, ısıl işlem ve ikincil faz gelişimi, üretim yöntemi gibi çeşitli faktörlerden ve bunun sonucunda değişen mikroyapılardan etkilenir (Evis vd.,2018; Hu vd., 2014). Biyoçözünür implantlar, belirli bir süre sonra insan vücudu tarafından yeniden emildiğinden, bazı alaşım elementlerinin (Mg esaslı malzemeler alaşımlanmışsa) potansiyel

bir sitotoksisite sergileyebilmesi için biyouyumlu alaşım elementlerinden oluşmaları gerekir. Alaşımlamada insan dokularıyla temas etmeye uygun olmayan elementler yerine toksik olmayan elementlerin kullanılması uygundur. Alaşım elementi konsantrasyonları magnezyum fazının korozyon davranışı, katı çözeltideki element konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ayarlanabilir. Bu elementlerin matris fazı içerisindeki dağılımına bağlı olarak, mikrogalvanik hücrelerin oluşumu hafifletilebilir veya tercih edilebilir. Magnezyum alaşımlamada; Zn, Cu, Sn, Al, Ca, Ni, Bi, Sb sünekliği ve dayanımı artırma etkisi gösterirken Mn, Ca, Zn, Sn, Sr, ve Ag çözünme oranını etkiler (Radha ve Sreekanth, 2017).

Magnezyum esaslı alaşımlarla ilgili en önemli sorun, yüksek çözünebilirlik oranlarıdır. Bu da biyoçözünülebilirliğin, kemiği iyileştirmek için gereken süreden daha hızlı olmasını sağlar. Bu nedenle, çözünme hızını kontrol etmek ve kemik iyileşene kadar mekanik bütünlüğü sağlamak gerekir. Magnezyum ve alaşımlarının bir başka dezavantajı, korozyona yoğun hidrojen gelişiminin eşlik etmesidir. Bu hidrojen, implantların kenarlarındaki ceplerde birikebilir veya deri altında gaz kabarcıklarının oluşumuna sebep olabilir (Evis vd.,2018). Çözünme hızını kontrol etmek için apatit kaplama ve/veya yüzey oksidasyon işlemi olmak üzere çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri uygulanabilir.

BİYOMEDİKAL UYGULAMALARINDA MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARININ KULLANIMI

Magnezyum alaşımlarının ortopedik implant olarak kullanıldığı literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Marukawa vd. (2016) yaygın olarak kullanılan biyolojik olarak parçalanabilen anodize WE43 (Mg4Y-3RE0.4Zr) alaşımı, işlenmemiş WE43 alaşımı ve poli-L-laktik asitten (PLLA) oluşan implantlara verilen biyolojik tepkileri in-vivo ortamda değerlendirmiştir. Magnezyum alaşımlı implantlar, av köpeklerinin kaval kemiğini içeren bir kemik kırılma modeli kullanılarak incelenmiştir. Mohamed vd. (2019), saf magnezyum ve Mg0.8Ca alaşımının biyoçözünmesini araştırmışlardır. Çözünmenin, insan kemiğindeki biyolojik apatite benzeyen iğne şeklinde sonuçlandığı, biyoçözünürlük hızının Mg0.8Ca için 1.08 ± 0.38 mm/yıl ve saf Mg için 0.35 ± 0.17 mm/yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple magnezyum esaslı alaşımlar, kemik

iyileşmesini ve rekonstrüksiyonunu arttırma potansiyelleri ve ikinci bir ameliyatla çıkarma işlemi olmaksızın in-vivo emilebilir özellikleri nedeniyle, ortopedik implant malzemeleri olarak kabul edilir. Fan vd. (2013) magnezyum alaşımlarının mikro yapı ve biyoçözünmesini inceleyerek sitotoksisitesini değerlendirmiştir. Mg1.5Y1.2Zn0.44Zr alaşımları döküm ve hadde ile üretilerek ısıl işlem koşularının etkisi araştırılmıştır. Matrisin a-Mg fazlarından ve Mg12ZnY ikincil fazlarından oluştuğu, çözünmenin uzamasıyla alaşımın yüzeyinde koruyucu bir filmin çökeldiği ve bu çökeltinin iyi biyouyumluluk içeriğine sahip olup biyomedikal uygulamalar için kullanım potansiyeline dikkat çekilmiştir. Zhang vd. (2016), vücut sıvısında üriner sistem için biyolojik olarak çözünebilen implantlar olarak saf Mg ve Mg6Zn alaşımını araştırmıştır. In-vivo çözünme ve doku uyumluluğu, Wistar sıçanlarının mesanelerinde implantasyon yoluyla incelenmiştir. Her iki alaşımın mesane kalıcı implantasyonunda iyi doku uyumluluğu sergilediği ve 2 haftalık implantasyon sırasında mesane, karaciğer ve böbrek dokularında saf Mg ve Mg6Zn grupları arasında hiçbir fark bulunmadığını ortaya konmuştur. Li vd. (2014), Mg1ZnxSr (x = 0,2, 0,5, 0,8 ve ağırlıkça %1) alaşımlarını geri ekstrüzyonla üretmiştir. Geri ekstrüzyondan sonra artan Sr konsantrasyonu ile tane boyutunun küçüldüğü ve sertliğin arttığı, ekstrüde edilmiş Mg1Zn0.8Sr alaşımının çoğunlukla ince çökeltilerden (MgZn ve Mg17Sr2) oluştuğu bulunmuştur. Bununla birlikte Sr içeriği ağırlıkça %0,8'in üzerinde olduğunda, biyoçözünme hızı önemli ölçüde artmıştır. Makkar vd. (2018), çözünebilir implant uygulamaları için kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere ikili Mg-xCa alaşımının (x= 0,5 veya 5,0 ağırlık yüzdesi) in-vitro çözünmesini ve in-vivo performansını incelemiştir. In-vitro çözünme testleri sonucunda Mg-xCa alaşımlarının ara yüzey, biyouyumluluk ve biyoçözünürlük açısından in-vivo performansı, tavşanın femoral kondiline 2 ve 4 hafta süreyle implante edilerek incelenmiştir. Çalışma sonucunda Mg-5.0Ca alaşımı için daha fazla hidrojen gazı oluşumu, artan pH ve daha yüksek çözünme gösteren Ca içeriği ile çözünme hızının doğrusal olarak değiştiği belirtilmiştir. In-vivo çalışmalar, Mg-5.0Ca alaşımına kıyasla 4 haftalık implantasyondan sonra Mg-0.5Ca için gelişmiş kemik oluşumu ile iyi biyouyumluluk göstermiştir. Mg-0.5Ca alaşımına kıyasla Mg-5.0Ca'da uzun süreli

iltihaplanma ve hızlı çözünme ile daha yüksek başlangıç korozyon hızı fark edilmiştir. Bu bulgulara dayanarak, Mg-0.5Ca alaşımının kontrollü in-vivo çözünmesi, azaltılmış enflamasyonu ve yüksek kemik oluşturma kabiliyeti sayesinde klinik uygulamalar için geçici implant malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Wang vd. (2018), in-vitro sitotoksisite testi ile Sr'nin Mg65.2xZn30Ca4Mn0.8Srx (x = 0, 0.3, 0.5 ve 0.8) amorf matris bileşiminin mikroyapısı ve biyokorozyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda daha az Sr içeren alaşımların, biyokorozyon direncinin önemli ölçüde geliştiği ve ana korozyon ürünlerinin kemik büyümesi için faydalı olduğu anlaşılmıştır.

Protezlerde, kemiklerde sabitleme elemanları olarak kullanılan vidalar kırık kemiklerin iyileşmesi, stabilizasyonu ve/veya sağlamlaştırılması dahil olmak üzere biyofonksiyonelliğin hedeflenen geri kazanımını sağlar. Omurga eğriliği gibi deformitelerin düzeltilmesi; bir organın ve/veya insan vücudunun diğer bölümlerinin işlevinde bir gelişme; ve eklemler, kalp kapakçıkları gibi anatominin hasarlı ve/veya hastalıklı bir bölümünün değiştirilmesinde, magnezyum ve alaşımlarından üretilen implantların kullanıldığı çalışmalara literatürde yer verilmiştir. Zhang vd. (2018), bir tavşan modelinde dayanıklılığı ve etkinliği değerlendirmek için kortikal kemiği taklit eden MgZnCa alaşımından yapılmış yeni bir tip iskele geliştirerek kaplama etkisini incelemişlerdir. Mekanik testler sonucunda her gruptaki kemik onarımının zaman içinde önemli ölçüde iyileştiği, farklı yapı iskelelerinin çözünme davranışını değerlendirmişlerdir. Waizy vd. (2014) kemik dokusu üzerindeki akut, subakut ve kronik lokal etkilerin yanı sıra Mg-Y-Re-Zr alaşımı içeren vidaya karşı sistemik reaksiyonları, 15 yetişkin tavşanın sol femurunun kemik iliği boşluğuna implante ederek incelemiştir. Çalışma sonucunda magnezyum esaslı alaşım vidaların iyi biyouyumluluğa sahip olduğu anlaşılmıştır. Cha vd. (2013) beyaz tavşanının femur kondiline Mg–5Ca–1Zn alaşımlı kemik vidası implante ederek incelemiştir. Yu vd. (2018), uzun vadeli in-vivo çözünmelerini ve çözünmenin etkilerini araştırmak için 52 haftaya kadar tavşan kaval kemiğine haddelenmiş yüksek saflıkta magnezyum (ağırlıkça %99,99) vidalar implante ederek incelemiştir. Çalışma sonucunda, saf magnezyum vidalarının yavaş çözünme hızına, arzu edilen kemik onarım kapasitesine ve uzun vadeli lokal/sistemik

biyogüvenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Windhagen vd. (2013), Mg-Y-RE-Zr alaşım vidalarını sabitleme amaçlı olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada magnezyum esaslı alaşımdan üretilen vidaların titanyum vidalara eşdeğer olduğu sonucuna varılmıştır.

Amano vd. (2019), biyoçözünür yeni bir Mg2.5Nd1Y alaşımlı zımba geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda magnezyum alaşımlı zımbanın titanyum alaşımlı zımbalara umut verici bir alternatif sunduğu belirtilmiştir. Wu vd. (2016) tarafından biyoçözünür iki farklı iç açıya sahip U şeklinde zımbalar tasarlanarak yüksek saflıkta magnezyumdan üretilmiştir. In-vivo implantasyon sonucunda, operasyondan 9 hafta sonra inflamatuar reaksiyon olmaksızın zımbaların iyi biyouyumluluk gösterdiği anlaşılmıştır. Choy vd. (2021), zımbalama ve elle dikme tekniklerinin sonuçlarını karşılaştırmıştır. Araştırma sonrası saf magnezyum zımbaların önemli biyokimyasal parametreleri etkilemediği ve dokularında inflamasyona neden olmadığı elde edilmiştir. Magnezyum zımbaların (0,81 ± 0,13 mg) artık ağırlığı, ameliyattan 1 ay sonra orijinal ağırlığın (9 ± 0,09 mg) %89,7'si, in-vivo korozyon hızı ise ∼0,007 ± 0,001 mm/ay olarak belirlenmiştir. Böylelikle yüksek saflıktaki magnezyum zımbaların biyouyumluluk ve biyoçözünme sonuçları, umut verici olarak değerlendirilmiştir.

Karın ameliyatında damarları bağlamak için kullanılan ameliyat klipsleri genellikle titanyumdan yapılır. Vücutta kalıcıdırlar ve bilgisayardan alınan görüntülemelerde doğru tanıyı bozan metalik artefaktlar oluştururlar. Ikeo vd. (2016), tıkanıklık sırasında plastik gerinim dağılımına eşdeğer olan, biyoçözünür saf magnezyum bir klips geliştirmiştir. Implante edilen MgZnCa klips hacmindeki azalma ile, biyouyumluluk ve biyoçözünürlük için uygun olduğu doğrulanmıştır. Yoshida vd. (2017), iyi biyouyumluluğa ve işlevsel bir klips olarak yeterli kenetleme kapasitesine sahip, biyoçözünebilir MgZnCa alaşımından klips geliştirmiştir. Mg alaşımlı klipsin titanyum klipse göre çok daha az artefakt oluşturduğu ve ameliyattan 6 ay sonra neredeyse emildiği belirtilmiştir. Bai vd. (2019), sıcak ekstrüzyon ve kesme işlemini birleştirerek MgZnCa alaşımlı biyoçözünür bir klips üretmiştir. Ekstrüde edilmiş MgZnCa alaşımının in-vivo testleri, Mg3Zn0.2Ca alaşımlı klipsinin, biyoçözünür uygun bir alaşım olarak öne çıkarmıştır.

Mukavemet ve süneklik, mekanik gereksinimler açısından sabitleme elemanı teller için önemli iki temel mekanik özelliktir. Bai vd. (2014), döküm, sıcak ekstrüzyon ve soğuk çekme ile üç çeşit magnezyum alaşımlı ince tel hazırlamıştır. Mg4Gd0.4Zn ve Mg4Nd0.4Zn ince tellerin iyi korozyon davranışına sahip olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada Mg2Ag alaşımından çivilerin implantasyonu, farelerin sağlam ve kırık femuruna yapılmıştır (Jähn, 2016). Mg2Ag implantlarının herhangi bir sistemik olumsuz etkiye neden olmamasının yanı sıra, uzun kemik kırıklarının sabitlemesinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Magnezyum alaşımlarından yapılan ortopedik implantların, kemik plakalarının birleşme yüzeyi arasında daha hızlı biyoçözünür olduğu yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu durum implantın bulunduğu ortamda çatlak korozyonu oluşumuna sebebiyet verebilir. Cipriano vd. (2017), kemik onarımı için biyoçözünür pim olarak Mg4Zn1Sr ve saf magnezyum tellerin biyoçözünürlüğünü incelemişlerdir. Mg4Zn1Sr pimleri, in vitro ve in vivo olarak saf magnezyumdan daha hızlı bir biyoçözünürlük göstermiştir. Bununla birlikte magnezyum alaşımı pimler, önemli bir kemik büyümesi göstermiştir. Zhang vd. (2017), yüksek mukavemetli Mg3Zn1Y alaşımlarına uygun Cu ilavesi ile iyi mekanik özelliklere ve çabuk biyoçözünür davranışa sahip yeni bir sıcak ekstrüde Mg3Zn1Y4Cu alaşımı üretmiştir. Geliştirilen alaşım 38 kat daha yüksek korozyon oranı ile dikkat çekmiştir. Niu vd. (2016) tavşanda MgNdZnZr vidalarının uzun süreli biyoçözünürlüğünü araştırmıştır. 18 ayda, mikrobilgisayarlı tomografi (mikro-CT) analizine göre vida hacminin %90 oranında azaldığı ve ortalama korozyon hızının 0,122 ± 0,042 mm/yıl olduğu sonucuna varılmıştır. Liu vd. (2015) kemik onarım malzemesi olarak MgCa alaşımının biyoçözünme davranışını incelemiştir. Alaşımının α-Mg ve Mg2Ca fazlarından oluştuğu, nihai korozyon ürünü olarak az miktarda siyah çökeltiler oluştuğu ve bu çökeltilerin hücrelerde toksisiteye neden olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Witte vd. (2006) bir magnezyum alaşımından (AZ91) yapılmış açık gözenekli çözünebilir bir yapı iskelesinin implantasyonunun subkondral kemik plakasının geçici değişiminde işlev görüp görmeyeceğini araştırmıştır. Alaşımın, yapı iskelesinin üzerinde yeterli kıkırdak onarımına izin vermek için in-vivo olarak çok hızlı çözündüğü anlaşılmıştır. Bu-

nunla birlikte, çevreleyen kıkırdak dokusunun hızlı çözünme sürecinden olumsuz etkilenmediği ve çözünen implantın kenarında yeni kemik oluşumu olduğu gözlemlenmiştir. Bu da magnezyum esaslı alaşım yapı iskelelerinin in-vivo çözündüğünü, ancak başlangıçtaki yüksek korozyon hızının azaltılması gerektiğini gösterir. Chaya vd. (2015), magnezyum malzemelerinin etkinliğini daha fazla değerlendirmek için benzer bir tavşan ulna kırığı modelinde magnezyum implantlarını değerlendiren daha kapsamlı bir çalışma yürütmüştür.

Biyoçözünür çeşitli magzneyum esaslı alaşımlar vasküler stent olarak geliştirilmiş ve klinik olarak kullanılmıştır. Magnezyum ve alaşımlarının vasküler stent olarak kullanıldığı çeşitli çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Liu vd. (2016) stent malzemeleri olarak insan safrasındaki saf magnezyum ve WE43 magnezyum alaşımının korozyon performansını araştırmıştır. Saf magnezyuma nazaran WE43 alaşımın üstün bir korozyon direnci gösterdiği belirtilerek WE43 alaşımının stent malzemesi olarak iyi bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur. Erbel vd. (2007) biyoçözünür magnezyum stentlerin koroner implantasyonları hakkındaki çalışmalarında magnezyum stentlerin diğer metal stentlerin sonucuna benzer bir anjiyografik sonuç elde edebildiğini ve 4 ay sonra güvenli bir şekilde çözünebileceğini ortaya koymuştur. Peng vd. (2014), düşük biyoçözünürlük oranı ve yüksek dayanım sunan MgY esaslı mikroteli ergiyik formdan tel çekme ile üreterek biyoçözünmesini araştırmışlardır. Tian vd. (2019), üreteral stent uygulaması için Mg4ZnxSr alaşımlarını içeren dört magnezyum alaşımını incelemiştir. Ge vd. (2013), biyoçözünür magnezyum stentlerin uygulanabilirliğini pres ve ekstrüzyon ile üretilen Mg2Zn1Mn alaşımı üzerinden incelemiştir. Wang vd. (2011), stent uygulamaları için ekstrüde edilmiş üç Mg2Zn0.46YxNd alaşımının (x = 0,0, 0,5, 1,0) mikroyapılarının mekanik ve korozyon özelliklerini inceleyerek MgZnYNd alaşımının stent malzemesi olarak uygulanabileceğini belirtmiştir. Maeng vd. (2009), WE43 magnezyum alaşımı stentlerin implantasyonundan sonra vasküler yeniden şekillenmeyi domuz koroner arterinde implant olarak değerlendirmiştir. MgZn alaşım sistemleri de biyoçözülebilir stent malzemeleri olarak araştırılmıştır.

Çeşitli alaşım sistemleri de magnezyum stent malzemesi olarak araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. Zhang vd. (2018),

Mg2.5Nd0.21Zn0.44Zr alaşımı stent prototip, tavşana implante edildikten sonra takip edilmiştir. Çalışma sonucunda alaşımın, bu tip uygulamalar için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Fei vd. (2017), sinir onarım implantı olarak Mg2NdZn, Mg2ZnNd ve Mg10Li alaşımlarının biyoçözünürlük ve biyouyumluluğunu in-vitro olarak incelenmiştir. Özellikle sinir onarım uygulamaları için uygulanabilirliği ortaya konmuştur. Bornapour vd. (2016), Mg0.3Sr0.3Ca alaşımının kardiyovasküler uygulamalar için in-vitro ve in-vivo biyouyumluluğunu değerlendirerek biyoçözünürlüğünü incelemişlerdir. Zhou vd. (2013), kardiyovasküler stent uygulamaları için Mg-Li bazlı alaşım sistemlerini araştırarak kardiyovasküler stent uygulamaları için potansiyelini ortaya koymuşlardır. Mao vd. (2017), AZ31 alaşımına kıyasla vasküler stent uygulaması için Mg alaşımı Mg2.5Nd0.21Zn0.44Zr'nin (ağırlıkça %) uygulanabilirliğini bir hayvan modelinde stent implantasyonu yoluyla in-vivo çözünme değerlendirerek uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Araştırmacıların, farklı tekniklerle üretilen çeşitli magnezyum alaşımlarının özelliklerini in-vivo ve in-vitro olarak değerlendirerek implant, stent, tel, zımba gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda kullanmış olduğu detaylı olarak açıklanan literatürden anlaşılmaktadır. Gelişen yeni üretim teknikleri ve sunmuş olduğu avantajlarla bu alaşımlar yeniden değerlendirildiğinde, biyomedikal uygulamalar için yeni bir bakış açısı sağlanacaktır.

EKLEMELİ İMALATLA MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ

Eklemeli imalat, malzemelerden katmanlar halinde bir bileşen oluşturmak için dijital 3B tasarımın kullanıldığı üretim şeklidir. Magnezyum alaşımlarının eklemeli imalatla üretimi, geleneksel üretimle elde edilemeyen tasarımların üretimine olanak sağlaması ve kişiye özel tasarım ve imalatın yapılabilmesi sebebiyle biyoçözünür implantların geliştirilmesi potansiyeliyle ilgi çekicidir. Eklemeli imalat, hastaların anatomilerine uygun geometrilerle kişiselleştirilmiş implantların üretimine imkân sağlar. Bununla birlikte çeşitli bileşenleri eklemeli imalatla üreterek, geleneksel işleme süreçleri kullanılarak yapılması zor veya imkânsız olan oldukça karmaşık geometriler geliştirmek için kullanılabilir. Eklemeli

imalat kullanılarak, karmaşık geometri üretme yeteneği, hücre gelişimini, çoğalmasını ve kemik yenilenmesini destekler.

Magnezyum ve alaşımlarının literatürde çeşitli yöntemlerle üretildiği birçok çalışmada ortaya konmuştur. Eklemeli imalatla üretimin getirdiği avantajlardan çeşitli alaşımların faydalandığı gibi magnezyum alaşımlarının da bu teknoloji için geliştirilmesi gerekmektedir. Magnezyum, son derece reaktif özellikleri nedeniyle eklemeli imalatla üretimi zor bir metaldir. Magnezyumun saf haliyle kontrolsüz bir şekilde oksitlenmesinin önüne geçebilmek için, magnezyum oksijene maruz kalmayı önleyecek şekilde depolanmak üzere tasarlanmalıdır. Bu durum gelişmekte olan üretim tekniklerinde kullanımını zorlaştırmaktadır. Magnezyumun biyoçözünür bir malzeme olması ve biyomedikale yönelik elverişli durumunun eklemeli imalatla çok çeşitli geometrilerle üretilebilme imkânı ile birleşebilmesine rağmen, bu alaşımların eklemeli imalat süreci hakkında sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Literatürdeki sınırlı sayıda yer alan eklemeli imalatla üretilen magnezyum alaşımı çalışmalarında kullanılan yöntemler, Seçici Lazer Ergitme (SLM, Selective Laser Melting) (Chung vd., 2011; Savalani ve Pizarro, 2016; Ng vd., 2011; Pawlak vd. 2017; Wei vd. 2015; Niu vd., 2018; Giseke vd. 2013), Doğrudan Enerji Biriktirme (DED, Directed Energy Deposition) tekniklerinden biri olan tel arkla eklemeli imalat (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing,) (Guo vd. 2016; Guo vd. 2019), sürtünme karıştırma ile eklemeli imalat (FSAM, Friction Stir Additive Manufacturing,) (Palavinel vd.,2015), macun formda ekstrüzyon biriktirme (Paste extrusion deposition) (Farag ve Yun, 2014) ve bağlayıcı(sız) püskürtme (Binder jetting, Binder-less jetting) teknolojileridir.

Seçici lazer ergitme (SLM), polimer, seramik, metal, kompozit gibi çeşitli malzemeleri işleme kabiliyeti nedeniyle biyoaktif implantlar oluşturma potansiyeline sahiptir. SLM, bir lazer ışınından üretilen ısı ile ardışık toz katmanlarını ergitme tekniğidir. Lazer ışınının tozun yüzeyi ile etkileşimi sıcaklığı yükselterek parçacıkların birbirine kaynaşmasını ve katı bir tabaka oluşturmasını sağlar. Ardışık toz katmanları lazer tarafından biriktirilerek önceki katmana bağlanır. Bu işlem döngüsü parça imalatı tamamlanana kadar devam eder. Biyomedikal implant uygulamaları için magnezyum ve alaşımlarından oluşan bileşenler üretmek için

SLM tekniği kullanılarak üretim sağlanabilir (Chung vd., 2011). Ancak SLM ile üretim esnasında, magnezyumun düşük emisivitesi nedeniyle lazer enerjisinin çoğu yansıtılır. Bu da üretimin düşük verimle sonuçlanmasının yanı sıra lazer cihazının bozulmasına neden olabilir. Ayrıca, SLM için magnezyum alaşımlarının ince tozları yanıcı ve patlayıcı olduğundan tehlikelidir. Tel arkla eklemeli imalatta (WAAM), parça imalatı için, metal tel sabit bir hızda beslenir ve önceki katmanlar üzerine ark ile ergitilir. WAAM çok daha yüksek birikme hızına, daha yüksek malzeme kullanım verimliliğine ve daha düşük maliyete sahiptir, bu da büyük ölçekli bileşenler üretme potansiyelini ortaya çıkarır (Guo vd. 2019). Sürtünme karıştırma ile eklemeli imalat (FSAM), geleneksel kaynak yöntemlerinden sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) tekniğinin bir modifikasyonudur. Bu nedenle, sürecin temelleri benzerdir ancak farklılıklar da mevcuttur (Palavinel vd.,2015).

Eklemeli imalatla magnezyum alaşımlarının bu tekniklerle üretiminde yaşanan zorluklar araştırmacıları farklı üretim tekniklerini araştırmaya yönlendirmiştir. Özellikle eklemeli imalatın sinterleme esaslı tekniklerinde, doğal kemiği taklit eden kompozit yapı iskelesi üretmenin çeşitli sıkıntıları söz konusudur. Yüksek sıcaklıkta sinterleme, organik bileşenlerin doğal kemikte inorganik faz içinde homojen bir şekilde dağılmasına ve biyouyumluluk ile mekanik özelliklerde önemli rol oynamasına neden olur. Buna rağmen, sinterlemeden sonra genellikle organik bileşenler seramik iskele yüzeyinde kaplanır. Bu nedenle kemik yapısını taklit eden bir yapı iskelesi oluşturmak için sinterleme işlemi ortadan kaldırılmalıdır. Fotopolimerizasyona dayalı stereolitografi bu amaç için tercih edilebilir, ancak bu eklemeli imalat tekniğinde de malzeme olarak fotoreçine kullanılması gerektiğinden, kemik dokusu rejenerasyonunda seramik yapı iskeleleri imal etmek için uygulanması zordur. Bu ihtiyaçlara yönelik olarak geliştirilen macun formda ekstrüzyon biriktirme (Paste extrusion deposition) tekniğinde, farklı jelatin içeriklerine sahip MgP macunları ergiyik biriktirme tekniğine (FDM, Fused Deposition Modelling) benzer şekilde eklemeli imalatla üretilmiştir (Farag ve Yun, 2014).

Eklemeli imalat yöntemlerinden bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting), bir toz yatağı üzerine yayılmış tozları birleştirmek için sıvı bağla-

yıcı maddenin kullanıldığı, oda sıcaklığında üretebilme imkanı sağlayan bir eklemeli imalat işlemidir. Bir başka deyişle parça üretimi, tabla üzerine bir toz tabakasının yayılması ve ardından parçacıkları sertleştiren ve birbirine bağlayan bir bağlayıcı maddenin bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Parça içerisine organik, biyolojik olarak aktif veya hidratlı molekülleri dahil etmek mümkündür. Biyoçözünür magnezyum yapı iskeleleri, bağlayıcı püskürtme kullanılarak başarıyla üretilmiştir ve bu yapı iskelelerinin gerilme dayanımı insan kemiğine benzerdir. Ayrıca diğer eklemeli imalat yöntemlerinin zorluklarının üstesinden büyük ölçüde gelinmiştir. Literatürdeki magnezyum ve alaşımlarının eklemeli imalatla üretimi üzerine yapılan sınırlı sayıdaki çalışmaların oldukça küçük bir bölümü (Meininger vd., 2016; Meininger vd., 2019; Su vd.2021; Salehi vd. 2019a; Salehi vd. 2019b; Salehi vd. 2021) biyomedikal uygulamalarına yöneliktir.

Su vd. (2021) çalışmalarında, binder-jetting işlemi ile üretilen magnezyum alaşımı numunelerin yoğunluğunu iyileştirmek için iki aşamalı sinterleme işlemi kullanmışlardır. Sinterleme işlemi sonrası numunelerin bağıl yoğunluğu, mekanik özellikleri ve korozyon direncinin kısa sürede önemli ölçüde iyileştiği ortaya konmuştur. 680°C'de 30 dakika ve 610°C'de 6 saat sinterlendikten sonra numunedeki en yüksek bağıl yoğunluğa ulaşılmıştır. Sonuç olarak tek adımlı sinterleme işlemi ile karşılaştırıldığında, iki aşamalı sinterleme işleminin daha yüksek sinterleme verimliliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Salehi vd. (2021) Mg-5.06Zn0.15Zr tozundan yapılmış bağlayıcısız 3D baskılı parçalar, çeşitli izotermal tutma süreleri için sinterleme işlemine tabi tutarak fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. 15 saat boyunca sinterlenen magnezyum numunesinin, insan kortikal kemik tiplerinde bulunanlarla karşılaştırılabilir yoğunluk, elastisite modül ve mekanik dayanımı sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Salehi vd. (2019) Mg5.06Zn0.15Zr alaşımını eklemeli imalatla üretmek için bağlayıcısız püskürtme (binderless jetting) yöntemini kullanmışlardır. Alaşımın kimyasal bileşimden ödün vermeden mukavemet ve boyutsal doğruluk değerlerini artırmaya yönelik üretim parametrelerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen bu üretim tekniğinin magnezyum alaşımı imalatında kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Salehi vd. (2019) bir başka çalışmaların-

da ise, ortam sıcaklığında Mg5.9Zn0.13Zr tozundan eklemeli imalatla üretilen parçaların 535°C ile 610°C arasında değişen farklı sıcaklıklarda 5 saat sinterlenmesi sonrası yoğunluk ölçümü, mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu şekilde üretilmiş magnezyum bileşenlerinin insan kemiğinde bulunanlarla eşleşen gözenek özellikleri sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

SONUÇ

Kemiğe destek olarak kullanılan iskelelerin önemli bir özelliği, kemik dokusu tamir edilene veya yenilenene ve normal biyomekanik fonksiyon restore edilene kadar sıkıntılı bölgedeki geçici mekanik bütünlüğü sağlamaktır. Fizyolojik ortamda çözünebilir metal iskeleler, özel çözünme davranışı ile insan kemiğininkine yakın mekanik özellikler göstermektedir. Bu nedenle, biyoçözünür biyometaller, ortopedide alternatif implante edilebilir metaller olarak yıllardır araştırılmaktadır. Magnezyum ve alaşımları, yoğunlukları ve mekanik özellikleri, insan kemik dokularına benzer olmaları sebebiyle umut verici potansiyel adaylar olarak dikkat çekmektedir. Biyoçözünebilir magnezyum alaşımlarında yer alan magnezyum iyonları hücre fonksiyonları için gereklidir.

3B baskı (eklemeli imalat), tıbbi görüntülerden geliştirilen dijital dosyalardan karmaşık ortopedik implantlar oluşturmak için kullanılabilir. Hastaya özel çözümler için kullanılma potansiyeli yüksek olan bir üretim tekniğidir. 3B baskı ile özelleştirilmiş implantlar, geleneksel olarak üretilen implantlara kıyasla çok daha geniş bir yelpazedeki geometrilerin üretimine imkân sağlar. 3B baskılı ortopedik implantların ve çeşitli biyomedikal uygulamalarının tasarımı ve analizi, üretim esnasındaki gözenekli yapıların çeşitliliği ve üretim parametrelerinin 3B baskı ile üretilen parçanın özelliklerini doğrudan etkilemesi sürecin zorlayıcı etkenleridir. Biyomedikal uygulamalar için uygun olarak değerlendirilen magnezyum ve alaşımlarının eklemeli imalat ile üretiminde, magnezyumun korozyona elverişli yapısı sebebiyle üretim zorlukları vardır. Bu noktada eklemeli imalat tekniklerinden bağlayıcı püskürtmeli tip üretimin, bu zorlukların en aza indirilmesine katkısı büyüktür. Özellikle üretimin oda sıcaklığında yapılıyor olması, magnezyum alaşımının toz formundan nihai parça formunu alana kadarki süreçte meydana gelebi-

lecek olası aksaklıkları minimize etmektedir. Bu sebeple gelecek yıllarda bağlayıcılı/bağlayıcız püskürtmeli metal eklemeli imalatın magnezyum alaşımları için geliştirilerek biyomedikal alanda kendi yer edinebilme imkânı dikkat çekicidir.

KAYNAKÇA

Amano, H., Hanada, K., Hinoki, A., Tainaka, T., Shirota, C., Sumida, W., Yokota, K., Murase, N., Oshima, K., Chiba, K., Tanaka, Y., and Uchida, H. (2019). Biodegradable surgical staple composed of magnesium alloy. *Scientific Reports*, 9.

Ananth, H., Kundapur, V., Mohammed, H.S., Anand, M., Amarnath, G.S., and Mankar, S. (2015). A review on biomaterials in dental implantology. *International Journal of Biomedical Science*, 11, 113–120.

Ashby, M.F. (2011). Materials Selection in Mechanical Engineering. Elsevier Science & Technology

Bai, H., He, X., Ding, P., Liu, D., and Chen, M. (2019). Fabrication, microstructure, and properties of a biodegradable Mg-Zn-Ca clip. *Journal of Biomedical Materials Research: B, Applied Biomaterials*, 107, 1741–1749.

Bai, J., Yin, L., Lu, Y., Gan, Y., Xue, F., Chu, C., Yan, J., Yan, K., Wan, X., and Tang, Z. (2014). Preparation, microstructure and degradation performance of biomedical magnesium alloy fine wires. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24, 523–530.

Banerjee, P.C., Al-Saadi, S., Choudhary, L., Harandi, S.E., and Singh, R. (2019). Magnesium implants: prospects and challenges. *Materials*, 12, 136.

Bornapour, M., Mahjoubi, H., Vali, H., Shum-Tim, D., and Pekguleryuz, M. (2016). Surface characterization, in vitro and in vivo biocompatibility of Mg-0.3Sr-0.3Ca for temporary cardiovascular implant. *Materials Science and Engineering: C*, 20, 67, 72–84.

Cha, P-R., Han, H-S., Yang, G-F., Kim, Y-C., Hong, K-H., Lee, S-C., Jung, J-Y., Ahn, J-P., Kim, Y.Y., Cho, S-Y., Byun, J.Y., Lee, -K-S., Yang, S-J., and Seok, H-K. (2013). Biodegradability engineering of biodegra-

dable Mg alloys: Tailoring the electrochemical properties and microstructure of constituent phases. *Scientific Reports*, 3, 2367.

Chaya, A., Yoshizawa, S., Verdelis, K., Myers, N., Costello, B.J., Chou, D-T., Pal, S., Maiti, S., Kumta, P.N., and Sfeir, C. (2015). In vivo study of magnesium plate and screw degradation and bone fracture healing. *Acta Biomaterialia*, 18, 262–269.

Chen, Y., Xu, Z., Smith, C., and Sankar, J. (2014). Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants. *Acta Biomaterialia*, 10, 4561–4573.

Choy, P.Y.G., Bissett, I.P., Docherty, J.G., Parry, B.R., and Merrie, A.E.H. (2021). Stapled versus handsewn methods for ileocolic anastomoses. *Cochrane Database System Review*, 2011, 9.

Chung C, Savalani M., and Chung Man, H. (2011). Fabrication of magnesium using selective laser melting technique. *Rapid Prototyping Journal*, 17, 479–490.

Cipriano, A.F., Lin, J., Lin, A., Sallee, A., Le, B. Cortez Alcaraz, M.C., Guan, R-G., Botimer, G., Inceodlu, S., and Liu, H. (2017). Degradation of Bioresorbable Mg-4Zn-1Sr Intramedullary Pins and Associated Biological Responses in vitro and in vivo. *ACS Applied Material Interfaces*, 9, 44332–55.

Erbel, R., Di Mario, C., Bartunek, J. ,Bonnier, J, de Bruyne, B., Eberli, F.R., Erne P., Haude M., Heublein, B., Horrigan, M., Ilsley, C., Böse, D., Koolen, J., Lüscher, T.F., Weissman, N., and Waksman, R.(2007). Temporary scaffolding of coronary arteries witgh bioabsorbable magnesium stents: a prospective, non-randomised multicentre trial. *Lancet*, 369, 1869–1875.

Evis, Z., Kayhan, S.M., Tahmasebifar, A., and Koç, M. (2018). Review of magnesium-based biomaterials and their applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6, 23–43.

Fan, J., Qiu, X., Niu, X., Tuan, Z., and Meng, J. (2013). Microstructure, mechanical properties, in vitro degradation and cytotoxicity evaluations of Mg–1.5Y–1.2Zn–0.44Zr alloys for biodegradable metallic implants. *Materials Science and Engineering: C*, 33, 2345–2352.

Farag, M.M., and Yun, H. (2014). Effect of gelatin addition on fabrication of magnesium phos- phate-based scaffolds prepared by additive manufacturing system. *Materials Letters,* 132 (2014) 111–115.

Fei, J., Wen X., and Lin X., Saijilafu, Wang W.,Ren, O.,Chen X.,Tan,L.,-Yang,K.,Yamg, H.,Yang,L. (2017). Biocompatibility and neurotoxicity of magnesium alloys potentially used for neural repairs. *Materials Science and Engineering: C*, 78, 1155–63.

Ge, Q., Dellasega, D., Demir, A.G., and Vedani, M. The processing of ultrafine-grained Mg tubes for biodegradable stents. *Acta Biomaterialia*, 2013, 9, 8604–10.

Gieseke, M., Noelke, C., Kaierle, S., Wesling, V., and Haferkamp, H. (2013). Selective laser melting of magnesium and magnesium alloys, Magnesium Technology, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, pp. 65–68.

González, S., Pellicer, E., Suriñach Baró, M.D., and Sort, J. (2013). Biodegradation and mechanical integrity of magnesium alloys suitable for implants. Biodegradation – Engineering and Technology.

Guo, J., Pan, H., Ren, L., Quan, G. (2019). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy. *Materials Letters*, 247, 4–6.

Guo, J., Zhou, Y., Liu,C., Wu, Q., Chen, X., and Lu, J. (2016). Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency. *Materials*, 9,10, 823.

Hu, H., Nie, X., and Ma, Y. (2014). Corrosion and Surface Treatment of Magnesium Alloys, Magnesium Alloys – Properties in Solid and Liquid States.

Ikeo, N., Nakamura, R., Naka, K., Hashimoto, T., Yoshida, T., Urade, T., Fukushima, K., Yabuuchi, H., Fukumoto, T., Ku, Y., and Mukai, T. (2016). Fabrication of a magnesium alloy with excellent ductility for biodegradable clips. *Acta Biomaterialia*, 29, 468–76.

Jähn, K., Saito, H., Taipaleenmäki, H., Gasser, A., Hort, N., Feyerabend, F., Schlüter, H., Rueger, J.M., Lehmann, W., Willumeit-Römer,

R., and Hesse, E. (2016). Intramedullary Mg2Ag nails augment callus formation during fracture healing in mice. *Acta Biomaterialia*, 36, 350–60.

Kainer K. U. (2013). Magnesium Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Wiley.

Li H, Peng, Q., Li, X., Li, K., Han, Z., and Fang, D. (2014). Microstructures, mechanical and cytocompatibility of degradable Mg–Zn based orthopedic biomaterials. *Materials & Design,* 58, 43–51.

Li, N., and Zheng, Y. (2013). Novel Magnesium alloys developed for biomedical application: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 29, 489–502.

Li, X., Liu, X., Wu, S., Yeung, K.W.K, Zheng, Y., and Chu, P.K. (2016) Design of magnesium alloys with controllable degradation for biomedical implants: From bulk to surface. *Acta Biomaterialia*, 45, 2–30.

Liu, Y., Zheng, S., Li, N., Guo, H., and Peng, J. (2016). Study on the in vitro degradation behavior of pure Mg and WE43 in human bile for 60 days for future usage in biliary. *Materials Letters*, 179, 100–3.

Liu, Y-C., Liu, D-B., Zhao, Y., and Chen, M-F. (2015). Corrosion degradation behavior of Mg–Ca alloy with high Ca content in SBF. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* 25, 3339–3347.

Maeng, M., Jensen, L.O., Falk, E., Andersen, H.R., and Thuesen, L. (2009). Negative vascular remodeling after implantation of bioabsorbable magnesium alloy stents in porcine coronary arteries: a randomized comparison with bare-metal and sirolimus-eluting stents. *Heart*, 95, 241–246.

Makkar, P., Sarkar, S.K., Padalhin, A.R., Moon, B.G., Lee, Y.S., and Lee, B.T. (2018). In vitro and in vivo assessment of biomedical Mg-Ca alloys for bone implant applications, *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 16, 126–36.

Mao L, Zhou H, Chen L, Niu J, and Song C. (2017). Enhanced biocompatibility and long-term durability in vivo of Mg-Nd-Zn-Zr alloy for vascular stent application. *Journal of Alloys and Compounds*, 720, 245–53.

Marukawa, E., Tamai, M., Takahashi, Y., Hatakeyama, I., Sato, M., Higuchi, Y., Kakidachi, H., Taniguchi, H., Honda, J., Omura, K., and

Harada, H. (2016). Comparison of magnesium alloys and poly-l-lactide screws as degradable implants in a canine fracture model. *Journal of Biomedical Materials Research*: B, 104, 1282–9.

Meininger, S.S., Mandal, S., Kumar, A., Groll, J., Basu, B., Gbureck, U. (2016). Strength reliability and in vitro degradation of three-dimensional powder printed strontium-substituted magnesium phosphate scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 31, 401–411.

Meininger, S.S., Moseke, C., Spatz, K., März, E., Blum, C., Ewald, A., and Vorndran, E. (2019). Effect of strontium substitution on the material properties and osteogenic potential of 3D powder printed magnesium phosphate scaffolds. *Materials Science and Engineering:C*, 98, 1145–1158.

Middleton, J.C., and Tipton, A.J. (2000). Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterials*, 21, 2335–2346.

Millis, D.L. (2014). 7 – Responses of Musculoskeletal Tissues to Disuse and Remobilization. *Canine Rehabilitation and Physical Therapy*, 92–153.

Mohamed, A., El-Aziz, A.M., and Breitinger, H-G. (2019). Study of the degradation behavior and the biocompatibility of Mg–0.8Ca alloy for orthopedic implant applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7, 249–257.

Ng, C.C., Savalani, M.M., Lau, M.L., Man, H.C. (2011) Microstructure and mechanical properties of selective laser melted magnesium. *Applied Surface Science*, 257, 7447–7454.

Niu X, H. Shen, J. Fu. (2018). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Mg-9 wt%Al powder mixture, Materials Letters, 221, 4–7.

Niu, J., Xiong, M., Guan, X., Zhang, J., and Yuan, G. (2016). The in vivo degradation and bone-implant interface of Mg-Nd-Zn-Zr alloy screws: 18 months post-operation results. *Corrosion Science*, 2016, 113, 183–187.

Oshida, Y. (2007). Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials. Elsevier, London, UK.

Oshida, Y., Tuna, E.B., Aktören, O., and Gençay, K. (2010). Dental Implant Systems. International Journal of Molecular Sciences, 11, 1580–1678.

Palanivel S, Nelaturu, P., Glass, B., Mishra, R.S. (2015). Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. *Materials & Design*, 65, 934–952.

Pawlak, A, Rosienkiewicz, M., and Chlebus, E. (2017). Design of experiments approach in AZ31 powder selective laser melting process optimization. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 9–18.

Peng, Q., Fu, H., Pang, J., Zhang, J., and Xiao, W. (2014). Preparation, mechanical and degradation properties of Mg–Y-based microwire. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 29, 375–384.

Persaud-Sharma, D., and McGoron, A. (2012). Biodegradable magnesium alloys: a review of material development and applications. *Journal of Biomimetics, Biomaterials, and Tissue Engineering,* 12, 25–39.

Pogorielov, M., Husak, E., Solodivnik, A., and Zhdanov, S. (2017). Magnesium-based biodegradable alloys: Degradation, application, and alloying elements. *Interv Medicine Applied Sciemce,* 9, 27–38.

Prakasam, M., Locs, J., Salma-Ancane, K., Loca, D., Largeteau, A., and Berzina-Cimdina, L. (2017). Biodegradable materials and metallic implants – a review. *Journal of Functional Biomaterials,* 26, 8(4), 44.

Radha, R., and Sreekanth, D. (2017). Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications – a review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5, 286–312.

Rahim, M.I., Ullah, S., and Mueller, P.P. (2018). Advances and challenges of biodegradable implant materials with a focus on magnesium-alloys and bacterial infections. *Metals,* 8, 532.

Salehi, M., Maleksaeedi, S., Nai, M. L. S., & Gupta, M. (2019). Towards additive manufacturing of magnesium alloys through integration of binderless 3D printing and rapid microwave sintering. *Additive Manufacturing*, 29.

Salehi, M., Maleksaeedi, S., Sapari, M. A. bin, Nai, M. L. S., Meenashisundaram, G. K., & Gupta, M. (2019). Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing. *Materials and Design*, 169.

Salehi, M., Seet, H. L., Gupta, M., Farnoush, H., Maleksaeedi, S., & Nai, M. L. S. (2021). Rapid densification of additive manufactured magnesium alloys via microwave sintering. *Additive Manufacturing*, 37.

Savalani M.M., and Pizarro, J.M. (2016). Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium. *Rapid Prototyping Journal*, 22,115–122.

Schinhammer, M., Hänzi, A.C., Löffler, J.F., and Uggowitzer, P.J. (2010). Design strategy for biodegradable Fe based alloys for medical applications. *Acta Biomaterialia*, 6, 1705–1713.

Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S.M., Tahmasebifar, A., and Koç, M. (2018). Review of magnesium-based biomaterials and their applications. Journal of Magnesium and Alloys, 6, 23–43.

Sheikh, Z., Najeeb, S., Khurshid, Z., Verma, V., Rashid, H., and Glogauer, M. (2015) Biodegradable materials for bone repair and tissue engineering applications. *Materials*, 8, 5744–94.

Su, C., Wang, J., Li, H., You, Z., and Li, J. (2021). Binder-jetting additive manufacturing of Mg alloy densified by two-step sintering process. *Journal of Manufacturing Processes*, 72, 71–79.

Tian Q, Zhang C, Deo M, Rivera-Castaneda L, and Liu H. (2019). Responses of human urothelial cells to magnesium-zinc-strontium alloys and associated insoluble degradation products for urological stent applications. *Materials Science and Engineering: C*, 96, 248–62.

Waizy, H., Diekmann, J., Weizbauer, A., Reifenrath, J., Bartsch, I., Neubert, V., Schavan, R., and Windhagen, H. (2014). In vivo study of a biodegradable orthopedic screw (MgYREZr–alloy) in a rabbit model for up to 12 months. *Journal of Biomaterials Applications*, 28, 667–675.

Wang, B., Guan, S., Wang, J., Wang, L., and Zhu, S. (2011). Effects of Nd on microstructures and properties of extruded Mg–2Zn–0.46Y–

xNd alloys for stent application. *Materials Science and Engineering: B*, 176, 1673–1678.

Wang, J., Ma, Y., Guo, S., Jiang, W., and Liu, Q. (2018). Effect of Sr on the microstructure and biodegradable behavior of Mg-Zn-Ca-Mn alloys for implant application. *Materials & Design*, 153, 308–16.

Wei K, Z. Wang, and X. Zeng. (2015) Influence of element vaporization on formability, com- position, microstructure, and mechanical performance of the selective laser melted Mg–Zn–Zr components. *Materials Letters*, 156,187–190.

Wetterlöv Charyeva, O. (2017). Magnesium screws and plates for bone augmentation: a new concept in dental surgery. JSM Dental Surgery, 2,1, 1011-1014.

Windhagen, H., Radtke, K., Weizbauer, A., Diekmann, J., Noll, Y., Kreimeyer, U., Schavan, R., Stukenborg-Colsman, C., and Waizy, H. (2013). Biodegradable magnesium–based screw clinically equivalent to titanium screw in hallux valgus surgery: short–term results of the first prospective, randomized, controlled clinical pilot study. *Biomedical Engineering*, 12, 1, 62.

Witte, F. (2010). The history of biodegradable magnesium implants – a review. *Acta Biomaterialia*, 6, 1680–92.

Witte, F., Fischer, J., Nellesen, J., Crostack, H-A.Reifenrath, Kaese, V., Pisch, A., and Beckmann, F., and Windhagen H. (2006). In vitro and in vivo corrosion measurements of magnesium alloys. *Biomaterials*, 27, 1013–1018.

Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C.J., and Windhagen, H. (2005). In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response. *Biomaterials*, 26, 3557–63.

Witte, F., Reifenrath, J., Müller, P.P., Crostack, H-A., Nellesen, J., Bach, F.W., Bormann, D., and Rudert, M. (2006). Cartilage repair on magnesium scaffolds used as a subchondral bone replacement. *Materials Science and Engineering Technology*, 37, 504–508.

Wu, H., Zhao, C., Ni, J., Zhang, S., Liu, J., Yan, J., Chen, Y., and Zhang, X. (2016). Research of a novel biodegradable surgical staple made of high purity magnesium. *Bioactive Materials*, 1, 122–126.

Yoshida, T., Fukumoto, T., Urade, T., Kido, M., Toyama, H., Asari, S., Ajuki, T., Ikeo, N., Mukai, T., and Ku, Y. (2017). Development of a new biodegradable operative clip made of a magnesium alloy: Evaluation of its safety and tolerability for canine cholecystectomy. *Surgery*, 161, 1553–1560.

Yu, Y., Lu, H., and Sun, J. (2018). Long-term in vivo evolution of high-purity Mg screw degradation – Local and systemic effects of Mg degradation products. *Acta Biomaterialia*, 71, 215–224.

Zartner, P., Cesnjevar, R., Singer, H., and Weyand, M. (2005). First successful implantation of a biodegradable metal stent into the left pulmonary artery of a preterm baby. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 66, 590–594.

Zhang, J., Li, H., Wang, W., Huang, H., and Li, Y. (2018). The degradation and transport mechanism of a Mg-Nd-Zn-Zr stent in rabbit common carotid artery: A 20-month study. *Acta Biomaterialia.* 69, 372–84.

Zhang, N., Zhao, D., Liu, N., Wu, Y., Yang, J., Wang, Y., Xie, H., Ji, Y., Zhou, C., Zhuang, J., Wang, Y., and Yan, J. (2018). Assessment of the degradation rates and effectiveness of different coated Mg-Zn-Ca alloy scaffolds for in vivo repair of critical-size bone defects. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, 29; 138.

Zhang, S., Zheng, Y., Zhang, L., Bi. Y., and Li, Y. (2016). In vitro and in vivo corrosion and histocompatibility of pure Mg and a Mg-6Zn alloy as urinary implants in rat model. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 414–22.

Zhang, Y., Wang, X., Kuang, Y., Liu, B., and Fang, D. (2017). Enhanced mechanical properties and degradation rate of Mg-3Zn-1Y based alloy by Cu addition for degradable fracturing ball applications. *Materials Letters*, 195, 194–7.

Zhou, W.R., Zheng, Y.F., Leeflang, M.A., and Zhou, J. (2013). Mechanical property, biocorrosion and in vitro biocompatibility evaluations of Mg–Li–(Al)–(RE) alloys for future cardiovascular stent application. *Acta Biomaterialia,* 9, 8488–98.

KAYNAĞINDAN SON KULLANIMA BOR MİNERALLERİ

Çetin ÇAKANYILDIRIM[1], Metin GÜRÜ[2]

Öz: Endüstrinin pek çok alanında bor ve bor kullanılarak sentezlenen uç bileşenlerden faydalanılmaktadır. Ürünlere sahip olması gereken bazı özellikler eser miktarda bor ve türevlerinin varlığı ile kazandırılmakta ve ürün niteliğindeki bu gelişme ürünün piyasada tercih edilmesini sağlamaktadır. Bor türevleri cam, pil, tarım, endüstriyel sıvı, ahşap, seramik, çimento, temizlik, yapıştırıcı, kozmetik, sağlık, metal ve enerji sektörlerin ürünlerinde önemli iyileşmelere olanak sağlamaktadır. Bor mineralleri (kolemanit, üleksit, kernit, boraks, pandermit vb.) homojen bir şekilde dünya yüzeyine dağılmamıştır. Bor mineralleri genellikle yer kabuğunun üst kısmında bulunduğu için açık maden sahaları kullanılarak çıkartılır. Bu tür maden sahaları tüneller içerenlere nazaran daha rahat çalışma imkânı sunmaktadır. Kısıtlı alanlarda bol miktarda bulunan bor mineralleri saflaştırma süreçlerinin ardından talep edilen ürünlere dönüştürülmektedir. Bor minerallerinin saflaştırılması sürecinde genellikle yoğunluk farkına dayanan suda yüzdürme (flotasyon) ve malzemenin farklı sertliklerde olmasından yararlanan öğütme teknikleri kullanılmaktadır. Dünya bor rezervlerini büyük kısmı Türkiye'de (rezervlerin %73'ü) bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri bor mineralleri bakımından zengin yataklara sahip olan ve talepleri karşılayan ikinci ülkedir. Birçok ürünün ortaya koyulmasında bor minerallerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumun üretici ülkelere avantajlar sunacağı beklense dahi bor piyasasının kendine özgü sorunları olası avantajlı durumu ortada kaldırmaktadır. Özellikle eser

1 Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çorum / Türkiye, cetincakanyildirim@hitit.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-7040-1369

2 Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara / Türkiye, mguru@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-7335-7583

miktarda bor katkısının kaliteli üretim için yeterli olması üreticilerin ellerini fiyat belirlemesinde zayıflatmaktadır. Bor mineralleri deterjan, cam, ziraat ve seramik sektörlerinde bol miktarda kullanılmaktadır. Diğer sektörlerde de bor minerallerinin kullanım alanlarının genişletilmesi ve miktarının artırılması yaşanan sorunlara kolaylık sağlayacaktır. Bor içeren kimyasalların enerji depolama alanında sergiledikleri üstün başarı ve piyasalarda sıklıkla yaşanan enerji krizleri, fosil yakıtlarının çevresel olumsuzlukları ve bu konuda toplum bilincinin artmış olması bor kimyasalları için umut veren bir projeksiyon oluşturmaktadır. Termal yöntemlerin yerini yenilenebilir enerji üretim süreçleri hızla almaktadır. Bu alanda bor minerallerine büyük iş düşecektir. Güneş enerjisi panelleri, piller ve katı fazda hidrojen depolayan sistemler için bor kullanımı mutlaka gerekmektedir. Yaklaşmakta olan temiz enerji üretim ve depolama çağında, bor minerallerinin kullanımın imkânlarının derinlemesine araştırılması, fırsat ve olanakların bilimsel araştırmalar neticesinde ortaya koyulması, bu alanda deneyimli personelin yetişmesi, teknolojik yeterlilik ve sürekliliğinin sağlanması vakit kaybetmeden hayata geçirilmesi gereken konulardır. Ancak bu konularda sağlanacak başarılar ile bor minerallerinin değerlendirilmesi sağlanacak ve gelecekte enerji üretim ve arzı konusunda söz sahibi olma imkânı bulunabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Bor, Maden Zenginleştirme, Boraks, Bor Kullanım Alanları

GİRİŞ

Evrenin yaratılışının temel taşları olan elementler periyodik tabloda sıralanmaktadır. Elementlerin bazılarının kimyasal bileşiklerde aldıkları görevler tam anlamı ile kilit taşı niteliğindedir. Örneğin organik bileşiklerde karbon ve inorganik bileşiklerde ise silisyum elementlerinin olası kıldığı çok farklı bileşik ihtimalleri vardır. Benzer şekilde demir ve alüminyum (Çakanyıldırım ve Gürü, 2021) metalürji alanında yine sıklıkla kullanılan ve pek çok türde ürüne olanak veren bileşenlerdir. Bor elementi periyodik tabloda metal ve ametaller arasında yer almaktadır. Bu özelliği sayesinde bor bulunduğu yapılarda değişik görevler üstlenebilmektedir. Bu görevleri başarabilmesi ve farklı fiziksel-kimyasal özellikler sergileyebilmesi bor atomunun elektron noksanlığı ve p orbitalindeki boşluktan kaynaklanmaktadır. Bor atomu yaptığı dört

kovalent bağ ile oktetini tamamlayabilmekte ve negatif yüklenmektedir. Negatif yüklü bor merkezli anyon kimyasal kararlılığa sahip pek çok bileşenin oluşmasını mümkün kılmaktadır. Bor mineralleri de pek çok üretim aşamasında önemli rol üstlenmektedir. Karbon, silisyum, demir ve alüminyumdan farklı olarak ürünün büyük kısmının oluşturmaktan ziyade az bir miktarının kullanılması ürün niteliklerinde benzersiz iyileşmelere neden olmaktadır.

Bor mineralinin adının Farsça burah adından geldiği düşünülmektedir. Bor mineralleri, kolaylık olması bakımından çoğunlukla boraks şeklinde anılır. 1000 yıldan daha önceki dönemlerde koyun, deve ve yak kervanlarının İran ve Tibet'teki çöl tuz yataklarından Hindistan ve Arap ülkelerine boraks getirmesiyle bor ticaretinin başladığı düşünülmektedir (Marketwatch, 2021). Bu ülkelerde bor mineralleri esas olarak cam yapımında kullanıldı. Bor cevherlerinin başlıcaları, üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$), boraks ($Na_2B_4O_5(OH)_4.8H_2O$), kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) ve kernit ($Na_2B_4O_6(OH)_2.3H_2O$) mineralidir. Bu mineraller, bor içeren suların kurak bölgelerdeki göllere akması ve buharlaşma sonucunda borat, klorür ve sülfat katmanlarını ardında bırakması ile oluşur. Bu minerallere bu sebeple evaporit mineralleri de denir (Marketwatch, 2021; Helvacı, 2017). Amerika Birleşik Devletleri (özellikle Kaliforniya), Türkiye, Şili ve Arjantin'de çok büyük evaporit bor mineral yatakları bulunur.

Bor mineralleri pek çok üretim süreci için vaz geçilmez bir katkı malzemesidir. Birçok ürün yapısına eklenen bor ile doğal olarak sahip olmadığı niteliklere kavuşmaktadır. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen cam (borcam) veya çok sert malzemeler (kübik bornitrür) bor kullanılarak ulaşılan gelişmiş özelliklerden bazılarıdır. Bor minerallerinin ürünlere kazandırdığı nitelikleri daha öteye taşıma ve kullanım sahalarını yaygınlaştırma amaçlı çalışmalar son yıllarda Türkiye'de hız kazanmaktadır. Yapılan çalışmaların temel amacı her ne kadar ürün kalitesini geliştirmek olsa da asıl amaçların başında bor minerallerini uç bor ürünlerine dönüştürmek ve bu sayede mineralin mali getirisinin artırılması hedeflenmektedir. Zira dünya genelindeki bor minerallerinin %73'ünü barındıran Türkiye ekonomisi elindeki bu varlıktan yeteri kadar istifade edememektedir (Helvacı, 2017).

Türkiye'deki bor minerallerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar Eti Maden İşletmeleri ve Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) önderliğinde sürdürülmektedir. Eti Maden bor cevherini bir zamanlar topraktan çıktığı hali ile ihraç ederken, saflaştırma süreçlerinin geliştirilmesi ile susuz boraks, borik asit veya bor oksit gibi bor yüzdesi yüksek ara ürünlere ulaşılmış ve bor madenlerinin ekonomik değeri artırılmıştır. Benzer şekilde BOREN araştırma gruplarına proje kaynağı sağlayarak konu ile alakalı bilimsel bilginin ve uç bor ürünleri sentezlenme yöntemlerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Bütün bu gayrete rağmen elementel bor, bor karbür ve nitrür, süper iletken üretim yöntemleri gibi konularda çalışmaların sürdürülmesi gerekmektedir. Son yıllarda işlenmemiş halde az getiri ile ticareti yapılan bor mineralleri bor oksit içeriği bakımından zenginleştirilmiş ve ekonomik değeri artırılmıştır. Araştırmalar sonucunda edinilecek bilgi ve tecrübe kazanmış personel birlikteliği ile ekonomik değeri yüksek teknolojik bor ürünlerine geçiş yapılacağına olan inanç gittikçe güçlenmektedir.

Bu çalışmada bor madenlerinden cevherin çıkarılması, zenginleştirilmesi gibi konuların yanı sıra bu ürünlerin kullanım alanları ve bu alanlarda ürüne kazandırılan nitelikler derlenmiştir. Bor minerallerinin kullanım alanlarının genişliği ve pek çok sektöründe potansiyel bor kullanıcısı haline gelme gerçekliği tartışılmıştır. Bu hali ile bu çalışma bor mineralleri ile alakalı araştırmacılara, sektör çalışanlarına ve konuya merak duyan her okursevere yön verecek niteliktedir.

Bor Mineralleri Madenciliği

Bor minerallerinin bulunduğu toprağın fiziksel, kimyasal özellikleri ve bor minerallerinin zenginliği maden sahalarının işletme koşullarını belirlemektedir. Ayrıca aranan minerallerin yüzeye olan mesafeleri de açık alan veya yeraltı madencilik türlerinin seçilmesinde etkilidir. Her maden sahası, onu benzersiz kılan doğal ve insan yapımı özelliklere sahiptir. Maden işletmecileri, madenlerini ulaşmaya çalıştıkları doğal oluşumlar ve ellerinde var olan ekipmanla verimli bir şekilde çıkartmak için tasarlarlar. Açık ocak madenleri ile yeraltı madenleri arasında madencilik bakış açılarından temel farklılıklara yol açan bariz bir ayrım vardır. Açık ocak madenleri, ağır makinelerin ve işçilerin işlerini açıkta

ve genellikle daha fazla manevra kabiliyeti ile yapmalarını sağlar. Açık ocak madenlerinin hava kaybına ve mağaralara karşı koruma sağlaması gerekmez. Madencilerin çalıştığı malzemenin yapısal bütünlüğü nedeniyle mağaralar, kaya kaymaları ve diğer tehlikeler o kadar büyük olmasa da hala mevcuttur. Bu sebeple açık saha madenciliğinde de katı güvenlik yönergeleri vardır (Marketwatch, 2021; Helvacı, 2017).

Yeraltında çalışmak genellikle sıcak, gürültülü, nemli ve karanlık bir iştir, ancak açık ocakta çalışmak işçileri hava koşullarına maruz bırakabilir ve bu da sorunlara neden olabilir. Maden sahalarını yerleşim yerlerinden ve çalışanların da ailelerinden uzakta bulunması, sert çalışma koşulları bazı psikolojik sorunlara, alkol ve uyuşturucu kullanımlarına sebebiyet verebilmektedir.

Madencilik endüstrisinde herhangi bir kapasitede çalışmak, ağır malzeme, ağır donanım ve sıkı çalışma ortamında güvende kalmak için olağanüstü yoğunlaşma ve yetenek gerektiren zor bir iştir. İşin güvenli ve verimli olmasını sağlamak, maden işletmecisinin ve paydaşların işinin bir parçasıdır, iyi ve güvenlik parametreleri dâhilinde performans göstermek, açık ocak ve yeraltı madenlerinde işçilerin ve işverenin sorumluluğundadır.

Düşük üretim maliyeti, nispeten basit (alışılagelmiş) makinelerin kullanılması ve daha az atığa sebebiyet vermesi bakımından açık alan madenciliği çoğunlukla tercih edilmektedir. Açık alan madenciliğinin önde gelen sorunu ise sadece açılmış olan görülebilir alanlardan üretim yapılabilmesi ve üretim sonrasında doğada kalan büyük maden izidir. Avantajlı taraflarının baskın olmasından dolayı bor minerallerinin çıkartılması için de açık alan madenciliği yoğun şekilde uygulanmaktadır.

Açık ocak madenciliği yerdeki açık bir ocaktan mineralleri çıkaran bir yüzey madenciliği tekniğidir. Açık işletmeler vasıtası ile yapılan madencilik dünya çapında en yaygın kullanılan yöntemdir ve yüksek yatırım gerektiren ekstraksiyon yöntemleri veya tüneller gerektirmez (Marketwatch, 2021; Angloamerican, 2021). Bu yüzey madenciliği tekniği, mineral veya cevher yatakları yeryüzüne nispeten yakın bulunduğunda kullanılır. Açık ocaklar yapı malzemesi olarak kullanılan kesme taş üretiminde kullanılmaları halinde 'taş ocakları' olarak adlandırılır.

Açık ocak madenlerinden yaygın olarak çıkarılan mineraller Tablo 1'de listelenmiştir. Açık ocak madenciliğinin sunduğu avantajlar aşağıda özetlenmiştir:

- *Seri üretim için kullanım kolaylığı,*
- *Küçük kapatma masrafı,*
- *Farklı cevher bölgeleri için seçici olarak madencilik yapabilme,*
- *Nispeten az iş gücü gerektirmesi,*
- *Karmaşık yeraltı madenciliği operasyonlarında oluşabilecek güvenlik tehlikelerinin olmaması,*
- *Yeraltı suyunun kolay drenajı,*
- *Makine boyut kısıtlaması yoktur. Ağır ve hacimli makineler bile kullanılabilir,*
- *Daha düşük sermaye ve işletme maliyetleri söz konusudur.*

Tablo 1. Açık Alan İşletmeciliği ile Çıkartılan Bazı Madenler [Angloamerikan, 2021]

Bor	Altın	Kil	Zift
Bakır	Molibden	Kireçtaşı	Kokina
Demir	Kömür	Kumtaşı	Çakıl-Kaya
Elmas	Granit	Alçıtaşı	Merme
Gümüş	Uranyum	Fosfat	

Açık Ocak Maden İşletmeleri

Kazmak için kullanılan makinelerin boyutuna bağlı olarak açık ocak madenleri, boyutları dört ila altmış metre arasında olan banklarda kazılır. Çoğu açık maden ocağının duvarları açılı olarak şekillendirilir ve maden sahasında toprak kayması riskini önlemek için adımlar içerir (Angloamerican, 2021). Duvarın eğimli kısmına 'ayna', basamağın düz kısmına ise 'yatak' denir.

Bazı durumlarda, topraktan sızan ve toprağı akışkan hale getirebilen suyu tahliye etmek için duvarlara yatay su delikleri açılır. Açılan bu deliklerin uygun sayıda olmaması (az sayıda olması) suyun tahliyesine engel olabilir veya (çok sayıda olması) duvarları tahrip edebilir.

Maden sahasından malzeme taşımak için kamyonların rahatça tırmanabilecekleri spiral-rampa şeklinde yollar oluşturulur. Maden derinliği arttıkça oluşturulan yollarında uzaması gerekir. Fiziki maden altyapısı oluşturulduktan sonra üretim faaliyetleri sondaj, patlatma, hafriyat, kırık cevherin yüklenmesi ve taşınmasını içerir. Bazı madenlerde ön bir ayırma sistemi kurularak gereksiz kayaçların taşınmasından kaçınılabilir. Atık kayalar çukurun kenarına yakın bir yerde yığılır ve hem yatay hem de dikey olarak yayılır. Bu işlem 'atık dökümü' olarak bilinir (Angloamerican, 2021). Kayaların sitenin diğer bölümlerine düşmesini önlemek için atık dökümü işleminin de kademeli yapılmasında fayda vardır.

Ayırma süreçlerinde cevherin yıkanması ve su ile bazı safsızlıkların uzaklaştırılması gerçekleştirilir. İşlenmiş cevher bünyesinde bol miktarda su bulunduracağı için, su buharlaşana kadar bir çökeltme havuzuna pompalanır. Bu atık havuzları, özütlenmemiş sülfür minerallerinin varlığından dolayı genellikle zehirlidir (Angloamerican, 2021).

Madencilik Operasyonları Ardından Maden Sahası

Madencilik bittikten sonra, çevresel zararı en aza indirmek için maden alanı rehabilitasyona tabi tutulmalıdır. Madencilik sürecindeki bu adım, arazinin gelecekteki kullanımı, doğaya olan etkinin azaltılması ve sürdürülebilirliğin sağlaması için kritik öneme sahiptir.

İlk olarak, atık yığınları, onları düzleştirmek ve stabilize etmek için şekillendirilir. Cevher sülfür içeriyorsa, yağmur ve oksijenin sülfitleri sülfürik aside oksitlemesini önlemek için, asit maden drenajı olarak da bilinen bir kil tabakası ile atıklar kaplanır. Daha sonra alan toprakla kaplanır, bitki örtüsü dikilir ve hayvanların yeni ekilen bitki örtüsünü yemesini önlemek için alan çitle çevrilir. Bu katman sonunda aşınacaktır ve atıklar çevre ile temas edecektir. Yapılan bu düzenleme ile ağır metallerin birden çevreye sızmasına engel olunur. Bu sayede çevredeki ortamın atıkları emmesi için doğaya zaman kazandırılmış olur. Atık alanında sızan sular yer altı suları çok derinde olmadıkça temiz su ile karışabilir. Dolayısı ile yer altı sularının bulunmadığı alanların atık depolaması amacı ile kullanımı mantıklı olacaktır.



Fotoğraf 1. Açık Saha Madenciliğinde Ayna ve Yatakların Konumlandırılması

Türkiye'deki Bor Mineral Alanları ve Oluşumları

Diğer ülkeler gibi Türkiye'nin de yeraltı zenginlikleri ile jeolojik özellikleri yakından ilintilidir. Türkiye'nin oluşumunda Avrasya ve Arabistan hareketli levhalarının davranışları etkilidir. Anadolu hareket eden bu levhalar ve geçmişte bölgede bulunan Tetis denizine bağlı olarak gelişmiştir. Alp-Himalaya dağ kuşağında orojenez olayları şiddetle ve milyonlarca yıldır devam etmektedir. Paleozoik dönemlerden günümüze kadar Anadolu platosu tektonik hareketler ile şekillendirilmiş ve dağlık ve yüksek ovaların bulunduğu bir çoğrafya halini almıştır (Helvacı, 2017).

Türkiye'deki yeryüzü şekillerinin bir kısmı ilk paleozoik dönemde meydana gelmiştir. İlk paleozoik dönemde Anadolu topraklarının bulunduğu bölge Tetis Deniz'i adı ile anılan ve tortulların toplandığı bir coğrafyaydı. Tortullar üst üste binerek sıkışmış ve şuan Anadolu adıyla bildiğimiz bölge oluşmaya başlamıştır. Paleozoik dönemdeki olumlu iklim şartlarında bol miktarda yetişen bitkiler toprak altında kalarak bugün kullanmakta olduğumuz fosil yakıtların oluşmasını sağlamıştır.

İkinci jeolojik dönem olan mezozoik zamanda Anadolu'da oluşan coğrafik yapılar erozyon ve aşınmaya maruz kalmıştır. Aşınma sonucunda yumuşak bölgeler ufalanıp alçak kısımlara akarken kısmı yükseltiler görülmeye başlanmıştır. Bu yükseltilerin ikinci bir etken olan yer kabuğu hareketleri ile ötelenmesi ile Anadolu'nun kuzey ve güneyini çevreleyen dağlar meydana gelmiştir.

Senozoik dönem olarak isimlendirilen üçüncü jeolojik devirde oluşan yer kabuğu değişiklikleri ile Türkiye'nin dönemimizde de gördüğümüz belli başlı yer şekilleri belirgin hale gelmiştir. Tektonik Afrika ve Avrasya levhalarının hareketleri ile Anadolu'da kırılma, bükülme ve dolayısı ile yükselme meydana gelmiştir. Bu yükselmeler sonucunda Anadolu yarımadası kendisinin çevreleyen denizlerden ayrılmıştır. Tetis Denizi'ni kuzey ve güneyinden çeviren Avrasya ve Arabistan levhalarının zıt yönlü hareketi ile Alp-Himalaya Orojenezi oluşmaya başlamıştır. Bu zıt yönlü hareketlerin neticesinde Toroslar ve kuzey Anadolu'yu kaplayan sıra dağlar oluşmuştur. Türkiye'nin hidrokarbon yatakları bazı madenler ve bor rezervleri bu dönemde oluşmaya başlamıştır (Helvacı, 2017).

Dördüncü ve son jeolojik zaman olan Kuvaterner döneminde Çanakkale ve İstanbul boğazları ortaya çıkmıştır. Anadolu'nun bir bütün halinde yükselmesi ile Karadeniz ve Ege Denizi oluşmuştur. Kuvaterner dönemde Anadolu günümüzdeki görünümüne kavuşmuştur.

Bor minerallerinin bulundukları jeolojik ortamlara göre yaklaşık 250 farklı türü bulunmaktadır. Jeolojik ortamları dikkate alındığında bor mineralleri üç ana grup halinde sıralanabilir:

- *Magnezyum oksitler; deniz tortulları,*
- *Kalsiyum ve sodyum boratlar; karasal tortulları,*
- *Skarn mineralleri; silikat ve demir oksit içerir,*

Yerkabuğunda oluşan yeraltı veya üstü, sıcak veya soğuk su hareketleri ile bor rezervlerinin temelini oluşturan playa-gölleri meydana gelmiştir. İklim şartları neticesinde kuruyan bu göllerin tabanlarında bor mineralleri kristallenmeye fırsat bulmuştur. Kurak ve yağışlı dönemlerin ardışık olarak birbirini takip etmesi sonucu bor rezervlerinin miktarından artış (kalınlaşma) olmuştur (Helvacı, 2017).

Türkiyedeki Bor Yatakları ve Özellikleri

Türkiye'deki tinkal (boraks), üleksit ve kolemanit yataklarının sırasıyla % 25, 29 ve 30 B_2O_3 içermektedir. Bu oranlar Türkiye' oldukça kaliteli (yüksek tenörlü) bor rezervlerinin bulunduğunu işaret etmektedir. Ayrıca Türkiye'de bulunan ispatlanmış bor yatakları dünya talebini uzun süre karşılayabilecek kapasitededir. Türkiye'deki bor mineralleri baskın şekilde Na, Ca ve Na-Ca içeren boratlar şeklinde bulunmaktadır. Boratların sınıflandırılmasında NaO/CaO oranına dikkat edilir. Bu oran %5 civarında ise Ca-borat, %5-95 arasında ise Na-Ca-borat ve %95'in üzerinde olduğu takdirde ise Na-borat minerallerlerinin yoğun olduğu anlaşılmalıdır (Helvacı, 2017; Eti Maden 2020).

Türkiye'deki bor madenlerinden bol miktarda bulunan Ca ve Na boratlarının yanı sıra mütevazı düzeyde Mg Ca-As ve Sr boratlar da çıkarılmaktadır. Borat minerallerinin yanında bor madenlerinden kil mineralleri (hektorit, montmorillonit, klorit, illit vb.) ve kalsit, kuvars, orpiment, sölestin, jips, anhidrit, dolomit, realgar, çört gibi farklı minerallerde çıkarılmaktadır (Eti Maden 2020). Türkiye'de bulunan başlıca bor mineralleri ve çıkarıldıkları yerler aşağıda listelenmektedir:

- *Bursa Kestelek'de probertit ve kolemanit yatakları,*
- *Balıkesir Bigadiç'te üleksit ve kolemanit yatakları,*
- *Kütahya Emet'te kolemanit yatağı,*
- *Eskişehir Kırka'da boraks yatağı,*
- *Balıkesir Sultançayır'da pandermit yatağı.*

Türkiye'deki mevcut bor rezervleri, dünya rezervlerinin % 73'ünü oluşturmaktadır (Helvacı, 2017, Eti Maden 2020). Bu rezervlerin çok büyük bir alana yayılmış olması kesin miktarın tespitini zorlaştırmaktadır. Tüm alanların detaylı taranması ile yaklaşık dünya rezervlerinin % 88-90'ının Türkiye'de bulunduğunun ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Türkiyenin dışında; Amerika, Rusya, Peru, Çin, Arjantin, İran, Bolivya, Kazakistan'da da bor rezervleri bulunmaktadır. Önemli bor üretici firmalar aşağıda verilmektedir:

- *Türkiye'de Eti Maden,*
- *ABD'de Rio Tinto Boraks veya US Boraks ve NACC,*
- *Rusya'da JSÇ Bor,*

- *Arjantin'de Boraks Argentina ve Sucersal Argentina,*
- *Çin'de Devlet Organizasyonları*
- *Peru'da İnka Bor,*
- *Şili'de Qui Boraks ve AQM Salar.*

Bor Mineralinin Zenginleştirilmesi

Topraktan alınan bor mineralleri görünüşü itibarı ile kil ve kayaç yapılarından farklıdır. Dolayısı ile bor minerallerinin daha yoğunlaştırılmış halde topraktan alınması için zengin damarlar üzerinde kazıların yapılması beklenir. Olası safsızlıklar mümkün ise maden sahasında ayrılmalıdır. Böylece gereksiz bir kütlenin taşınmasından ve işlenmesinden kaçınılmış olunur. Minerallerin safsızlıklarından ilk ayrılma süreci görerek veya optik makineler ile yapılabilir. Belli bir boyuta indirilmiş cevher işçiler marifeti ile saflaştırılabilir. Yöntem yoğun işçilik gerektireceği için optik ayırma yöntemlerinin kullanılması maliyetleri olumlu yönde etkileyecektir. Gelişen teknoloji ile beraber yakın gelecekte cevherin zenginleştirilmesinde sadece optik ayırıcıların kullanılması beklenmektedir.

Bor minerallerinin daha konsantre hale getirilmesi için uygulanması gereken bir diğer aşama mineralin öğütülmesidir. Yöntem borat cevherlerinin ana kirleticisi olan cevherin yüzeyini kaplayan kil kirleticisinin yüzeyden çıkarılmasında oldukça etkilidir. Öğütülen parçalar ikinci aşamada yıkanarak safsızlıkların uzaklaştırılmasına çalışılır. Yıkama işlemi ile safsızlıklar uzaklaştırılabilse dahi bor minerallerinin su içinde çözünmesi kayıplara sebep olabilir. Çözücü özelliği göstermeyen ve suya oranla daha ağır sıvıların kullanılması veya yıkama suyunun filtrelenerek tekrar kullanımı ile başka bir deyişle bor mineraline doygun hale gelmiş su ile yıkamanın yapılması bu sorunu hafifletecektir. Saflaştırılmak istenen mineral ile kil-kayaç karışımının yoğunluk farkı safsızlıkların ayrılasına yardımcı olacaktır. Ayrıca yıkanan malzemelerin hidrofobik veya hidrofilik olma özelliklerine göre su tarafından ıslatılabilirlikleri farklı olacaktır. Az ıslanan parçalara yapışan hava kabarcıkları ve tercihen sisteme verilen bol miktardaki hava hidrofobik parçacıkların yoğunluğunun azalmasına ve yüzeye hareketlenmesine olanak sağlayacaktır. Bu uygulama flotasyon adı altında uygulanmakta-

dır. Yıkama sistemine beslenen hava vasıtası ile parçacıkların karışması ve birbirlerine sürtünmesi de sağlayarak yıkama verimine katkıda bulunulmaktadır. Minerallerin istenen zenginliğe ulaşması için ek yöntemlerin uygulanması gereklidir.

Flotasyon yöntemi ile saflaştırılacak kolemanit, kalsiyum karbonat içeriyor ise yöntem yetersiz kalabilir. Parçacık boyutunun düşürülmesi ile daha fazla parçacık yüzey alanı ve dolayısı ile daha geniş hava tutma imkânı sağlanacağı için hidrofobik kısımların yüzdürülmesi daha kolay gerçekleştirilebilir. Cevher içerisindeki kil ve kirecin öncül yöntemler ile uzaklaştırılması hem flotasyon süresini hem de kullanılan yardımcı madde miktarını azaltacak ve maliyeti düşürecektir.

Bor Minerallerinin İşlenmesi

Bor minerallerinin ilk kullanımının günümüzden yaklaşık 4.000 yıl önce kuyumculuk alanında akışkanlık sağlayıcı olarak kullanıldığı düşünülmektedir. Bor ticari ürün olarak Türkiye, ABD, Çin, Rusya, Arjantin, Şili, Bolivya, İran, Hindistan, Kazakistan, Peru'da bulunmaktadır. Dünyadaki bor ticareti 1800'lü yıllarda büyük ölçekli madenciliğin başlaması ile dikkat çekmeye başlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri ve Türkiye bol ve yüksek kaliteli tinkal ve kolemanit yataklarına sahip olduğundan, dünyadaki başlıca üretici ülkelerdir (Eti Maden 2020, Metallurgist, 2021).

Bor doğada element (saf) olarak bulunmaz, ancak boratlar veya bor oksit adı verilen oksijenli bileşikler halinde bulunurlar. Ticari olarak kullanılan sadece on kadar borat vardır ve bunlar tortul yataklarda bulunur. Muhtemelen en iyi bilinen bor minerali beyaz kristalli bir yapıda olan borakstır (sodyum tetraborat dekahidrat, $Na_2B_4O_7.10H_2O$) (Metallurgist, 2021). Bor içeren tinkal, kernit, üleksit, datolit ve kolemanit minerallerinin yapısındaki borun saflaştırılması için kimyasal veya fiziksel iyileştirmelerin uygulanmasını gerekmektedir.

Tinkal kolayca sıcak suda kolayca çözülür ve kil benzeri malzemelerden ayrılması sağlanabilir. Sıcak boraks çözeltisine sodyum hidroksit eklenerek, çözelti 53,6°C sıcaklığın altında muamele edilir ise sodyum metaborat tetrahidratın triklinik kristalleri oluşur. Çözelti sodyum bikar-

bonat varlığında 24°C sıcaklığa soğutulduğunda rombohedral kristalleri ortaya çıkarlar. Tinkal kullanılarak borik asit, susuz tinkal ve amonyum klorür kullanılarak amonyum borat üretimine ait kimyasal denklemler aşağıda verilmektedir (Metallurgist, 2021).

$$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O + H_2SO_4 \text{ à } 4H_3BO_3 + Na_2SO_4 + 5H_2O \quad (1)$$

$$5Na_2B_4O_7 + 10NH_4Cl \text{ à } 10NaCl + 4NH_4B_5O_8 + 6NH_3 + 3H_2O \quad (2)$$

Bor minerallerinin saflaştırılması işlemi bileşik içindeki bor oksit miktarının artırılması şeklinde de tanımlanabilir. Borik asit ($B_2O_3.3H_2O$) veya bor oksit (susuz borik asit, B_2O_3) geleneksel yöntemler ile erişilebilecek en yoğun bor oksit bileşikleridir (Eti Maden 2020). Diğer bor ürünler arasında sayılabilecek sodyum metaborat üretimi ve bikarbonat-boraks ikilisine ait süreçlerin kimyasal ifadeleri aşağıda verilmektedir:

$$Na_2B_4O_7 + Na_2CO_3 \text{ à } 2Na_2B_2O_4 + CO_2 \quad (3)$$

$$2NaHCO_3 + 2NaB_2O_3 + O_2 \text{ à} Na_2B_4O_7 + 2Na_2CO_3 + H_2O \quad (4)$$

Sodyum metaboratın su içindeki çözünürlüğü oldukça fazladır (28 g/100 mL, 25 °C). Metaboratın çökelmesini sağlamak için yoğun şekilde buharlaştırma yapılması gereklidir.

Mümkün olduğu kadar az yabancı element (özellikle oksit ve hidroksit) içeren bileşenlerden yola çıkarak elementel bor üretilmesi mümkündür. Söz konusu tepkimeler yüksek enerjili değirmenlerin kısıtlı hacminde katı fazda gerçekleşmektedir. Süreçler uzun süre gerektirmeleri ve düşük kapasiteleri sebebi ile ekonomik bulunmamasına karşın dönüşüm oranları tatmin edici düzeydedir. Elementel bor üretimine temel oluşturabilecek iki tepkime aşağıda sunulmuştur.

$$B_2O_3 + 3Mg \text{ à } 2B + 3MgO \quad (5)$$

$$2B_2O_3 + 3C \text{ à } 4B + 3CO_2 \quad (6)$$

Bor Piyasası

Küresel bor pazarının müşterileri temel olarak; cam, seramik, modern ilaçlar, tarım, deterjan gibi geleneksel endüstriler tarafından oluşturulmaktadır. Bu endüstriler yıllık 2 milyon tonundan fazla B_2O_3'e eşdeğer miktarda bor mineralleri tüketirler. Küresel bor pazarının önümüzdeki beş yıl için her yıl %3 büyümesi ve 2023 yılına kadar 2,65 milyon ton (Mt) B_2O_3 eşdeğerine ulaşması beklenilmektedir. Rafine bor ürünlerine olan talepteki bu artış 344.000 Mt borax pentahidrat ve 201.000 Mt borik aside eşdeğerdir. Boraks pentahidrat ve dekahidrat ticaretindeki artış bazı yıllarda %30'a erişebilmektedir. Talep artışı üretim süreçleri üzerinde baskı oluştursa da satış fiyatı konusunda üreticileri avantajlı bir konuma taşımaktadır (Eti Maden 2020, Orocobre 2021).

Bor piyasa hacmi 2020 yılında 2237,5 milyon dolar iken, önümüzdeki beş yıl içinde gelir açısından yıllık %4,5'lik bir artış kaydedecek ve küresel pazar büyüklüğü 2026 yılına kadar 3055,4 Milyon dolara ulaşacaktır. Yukarıda adı geçen temel tüketici endüstrilerin bor talebini artırması ve tüketimini yönlendirmesi beklenmektedir (Eti Maden 2020, Marketwatch, 2021).

ABD'deki Rio Tinto Borates (~%30) ve Türkiye'deki Eti Maden (>%50), toplam küresel pazar payının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Asya, toplam arzın %50'den fazlasını talep etmektedir. Bu sebeple Asya en büyük bölgesel borat tüketicisi konumunu korumaktadır (Eti Maden 2020).

Bor mineralleri üretim için vaz geçilmez olsalar da pek çok üreticinin bulunması ve üründeki bor içeriğinin çok az olması bor fiyatlarının belirlenmesinde üreticileri kısıtlamaktadır. Bor fiyatları belirlenirken piyasanın anlık durumuna göre pazarlıkla fiyatlar belirlenmektedir.

COVID-19 pandemisinin ani patlak vermesi, çeşitli ülkelerde sıkı karantina düzenlemelerinin uygulanmasına yol açarak borun ithalat ve ihracat faaliyetlerinde aksamalara neden olmuştur.

COVID-19 küresel ekonomiyi üç ana şekilde etkileyebilir:

- *Tedarik zinciri ve piyasa aksaklığına sebep olarak,*
- *Üretim ve talebe direk tesir ederek,*
- *Finansal piyasalar ve firmalar üzerinde ekonomik etkileri ile.*

Piyasanın COVID-19 krizi sonrası üreticiler için kazançlı beklentiler oluşturacağını beklenmektedir. Hızla artan talep nedeniyle 2021'den kısa bir süre sonra boratlarda arz açığı oluşabileceği de öngörülmektedir (Statista, 2021).

Bor Minerallerinin Kullanım Alanları

Bor toprakta element halinde bulunmamaktadır. Bor mineralleri genellikle Ca ve(veya) Na gibi katyonlar ve oksijen ile bileşik yapmış halde bulunur. Bor mineralleri doğal ortamda oldukları için yapılarında bir miktar da su taşırlar. Farklı katyonlar ile değişik sayılarda oksijen ve su bağlayabilen bor kimyasalları haliyle çok farklı kimyasal formülasyonlara sahiptir. İki yüzün üzerinde bor bileşiğinin doğalda bulunduğu bilinmektedir. Bor mineralleri doğal hallerindeki çeşitlilik mineralin işlenmesiyle daha da artmaktadır. Rafine ve özel bor kimyasalları gibi gruplar halinde adlandırılan farklı bor bileşikleri Tablo 2'de verilmektedir (Eti Maden 2020, Roskill, 2021).

Tablo 2. Farklı Bor Kimyasalları ve Sınıflandırılması

Tabii Boratlar	Rafine Boratlar
Tinkal,	Boraks dekahidrat,
Kolemanit,	Susuz boraks,
Üleksit	Borik asit
Özel Bor Kimyasalları	Sodyum perborat
Elementel Bor	Boraks pentahidrat,
Bor karbür	Kullanım alanlarına göre
Bor halojenürler	Sodyum borhidrür
İnorganik boratlar	Çinko borat
Floroboratlar	Bortriklorür
Borik asit esterleri	Bortriflorür
Bor hidrürler	Trimetilborat
Organobor bileşikleri	Özel sodyum boratlar
Bor-Azot bileşikleri	Floroborikasit

Bor bileşiklerinin çeşitliliği geniş bir alanda kullanım imkânı bulmasını sağlamaktadır. Bor bileşikleri pek çok sektörde az miktarda kullanılırken; cam, deterjan, seramik ve tarım alanında bol miktarda tüketilir. Aşağıdaki kısımlarda bor minerallerinin kullanım alanları ve ürünlere kattıkları olumlu özellikler verilmektedir (Helvacı, 2017; Eti Maden 2020).

Cam Sanayinde Bor Kullanımı

Cam (cam fiberler, borcam, fiber optik) sektörü tek başına üretilen bor minerallerinin %40 kadarını tüketir. Bu tüketim oranı ile cam sektörü bor pazarının en büyük tüketicisidir. Cam fiber (elyaf) birkaç mikron kalınlığında ve kalınlığının yüzlerce katı uzunluğundaki ince yapılardır. Fiber çok uzun ve kusursuz ise fiber optik özelliklerden söz edilir. İzolasyon ve tekstil tipi olmak üzere cam elyafları iki ana gruba ayrılırlar. Ayrıca cam fiber gibi farklı elyafların üretiminde de bor kullanılmaktadır (Helvacı, 2017). İzolasyon türü cam fiber çoğunlukla yalıtım malzemesi olarak görev yapar ve cam yünü olarak da isimlendirilir. Tekstil türü cam fiber takviye malzemesi olarak kullanılır ve çimento, plastik, kauçuk gibi matris malzemelerinin mukavametini artırmak için kullanılır. Tekstil türü cam fiberlerin yapısı sürekli elyaf şeklindedir.

İki tür cam fiberde bor minerallerinin kullanılması ile daha kolay akabilirler ve erime sıcaklıkları daha düşer. Akışkanlık ve düşük sıcaklıkta eriyebilme fiber üretiminde kolaylık sağlar. Ayrıca bor minerallerinin cam üretimine eklenmesi yüzey gerilimi ve viskozite değerlerini de üretimi rahatlatacak şekilde geliştirir. Üretilen cam fiberler mukavim, biyolojik olarak çözünebilen yapıda olmakla beraber su ve diğer kimyasallara karşı dayanıklı da olurlar.

İzalasyon Türü Cam Fiber

İzolasyon türü cam fiber, ses ve ısı yalıtımı maksadı ile kullanılır. Cam yünü olarak da isimlendirilen bu fiber %5-12 aralığında bor oksit içerir ve inşaatların her bölgesinde yalıtım amacı ile kullanılabilir. Ayrıca ulaşım araçlarında kabin içine gelen sesin azaltılması görevini de görür. Cam yünü dış etkenlere karşı dayanıklıdır. Aşırı sıcaktan, nemden

etkilenmez. Kullanım süresi çürüme, küflenme ve korozyon ve haşerelerden etkilenmez.

Elyaflar %5-12 arasında B_2O_3 (%1,5-3,6 B) içerebilirler. Bor katkısını sağlamak için genellikle boraks pentahidrat veya kolemanit kullanılır. Son on yıl içerisinde, daha yüksek maliyetinden dolayı, Çin gibi bir kaç ülkede borik asidin kullanımı kademeli olarak azalmaktadır. 2007 yılında Eti Maden, bir sodyum borat türevi olan kalsine konsantre tinkal ürününü bu pazarın kullanımına sunmuştur. Eti Maden, IGFG sektörüne tedarik sağlamak üzere ürettiği kalsine tinkal ürününün mevcut 5000 ton/yıl olan kapasitesini 2017 yılında 105000 ton/yıl üretim kapasitesine çıkartmıştır. Bu ürün, %48 B_2O_3 içeren boraks pentahidrat ürünü ile kıyaslandığında %52 B_2O_3 içermektedir ve üretim ile nakliyat maliyetlerinin düşürmeyi hedeflemektedir. Boraks pentahidrat kimyasal olarak sınıflandırılırken kalsine konsantre tinkal *Reach* sınıflandırmasında bir mineral olarak tanımlanmasıdır. Bu ayrıcalık ürün için önemli bir avantajdır (Eti Maden, 2020).

Tekstil Türü Cam Fiber

Tekstil türü cam fiber, yüksek fiziksel ve kimyasal dayanıma sahiptir. Bu fiberler hafif ve düşük maliyetli olmaları bakımından da avantajlıdırlar. Üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde kompoze malzemelerin üretiminde takviye fazı olarak kullanılırlar. Tekstil türü cam fiberler hava taşıtlarının ve rüzgâr türbinlerinin kanatları, spor malzemeleri, küçük deniz taşıtlarının ve polimerik depolama tanklarının imalatında kullanılır. Dolayısı ile inşaattan elektroniğe, gıdadan havacılık sektörüne kadar geniş bir alanda görev yaparlar. Tekstil tipi cam elyafı kimyasal yapısı Tablo 3'de özetlenmektedir.

Tablo 3. Tekstil Türü Cam Fiberin Kimyasal Bileşimi

Bileşik	Kimyasal formül	Oran
Silika	SiO_2	30,42
Kaolin	$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$	29,67
Kireç taşı	$CaCO_3$	24,60
Kalsiyum florür	CaF_2	1,88
Sodyum karbonat	Na_2CO_3	0,21
Sodyum sülfat	Na_2SO_4	0,10
Kolemanit ve/veya borik asit	$2CaO.3B_2O_3.5H_2O/H_3BO_3$	13,12

Cam üretiminde kolemanit veya borik asit kullanımı olasıdır. Borik asidin kolemanite nazaran avantajı yüksek ve sabit tutulabilen B_2O_3 seviyesidir. Ayrıca borik asit içinde safsızlığa neden olabilecek mineraller (Mg, Si, Al, Fe, St, S ve As gibi) bulunmaz ve erime noktası düşüktür. Borik asit kullanımı çok az veya hiç alkali içermeyen cam sınıfları için uygundur. Kolemanitin en büyük avantajı ise borik aside kıyasla fiyatının çok daha düşük olmasıdır. Kolemanit ayrıca, borik aside (%43,7) göre daha az kızdırma kaybına sahiptir (%21), bu da nemi uzaklaştırmak için tüketilecek enerjinin daha az olacağı anlamına gelir. Ergime sürecinde B_2O_3 kaybı kolemanit için % 4-5 iken, borik asitte % 12-18 oranındadır. Ergime sırasında, her iki bileşiğin arasındaki bor oksit içeriği farkı %7,5'dur. Eğer üretici için bor geri kazanımı önemli bir faktör ise, borik asit kolemanite göre daha uygun bir seçenektir.

Bor içeriklerindeki farklılıklardan dolayı cam fiberler değişik isimler altında anılmaktadır. Bu cam fiberler ve özellikleri söyledir:

A-Camı: Yüksek oranda alkali (%16) içerir. Bu sebepten dolayı alkali cam şeklinde de adlandırılır. A-camının içine %6 kadar bor oksit eklenir. A-camı malzemelerde takviye edici özelliğe sahiptir. Bu özelliği nedeni ile çimento içinde kullanılır. Alkali camın yoğunluğu çimentodan düşük olduğu için çimento ile karıştırılması ağırlık bakımından avantaj sağlar, çimentonun dayanım/ağırlık oranı geliştirilmiş olur.

C-Camı: Camlar florik asit dışındaki asitlere karşı oldukça dayanıklıdır. Asitlere karşı olan dayanıklılık %5-6 bor oksit içeren C-camı ile

daha üst seviyeye gelir. C-camının mekanik dayanımı da malzemelerin içinde nakliye edilmesine olanak verecek düzeydedir. Aside maruz kalacak metallerin kaplanmasında ve asitlerin nakliyesinde tercih edilir.

D-Camı: D-camının elektrik iletim kabiliyeti çok kısıtlıdır. Bu özelliğinden faydalanmak için D-camı yalıtım gereken uygulamalarda kullanılır. Camın bor oksit içeriği %21-24 civarındadır. Elektrik devrelerinde, iletiminde ve telekomünikasyon sektöründe aranılan bir malzemedir.

E-Camı: E-camının sıcaklığa, elektriğe ve darbelere dayanımı oldukça iyidir. Cam fiberlerin 90'ı E-camıdır. Camın borik asit içeriği %10 civarındadır. İyi bir yalıtım malzemesi olduğundan iplik, keçe, kumaş ve dokumalar şeklinde üretilerek arz edilir. Mineral asitlere karşı dayanıksız olması en önde gelen zayıflığıdır. Bu noksanlığı sebebi ile pek çok alanda kullanım şansı bulamasa da havacılık, elektrik-elektronik malzemeleri gibi mineral asitlerden arındırılmış ortamlarda sıklıkla kullanılır.

R ve S camları ise Bor içermez ve çok üstün mekanik ve sıcaklık performanslarından dolayı bazı pazarlarda E tipi cam yerine tercih edilirler. Her iki tipin de maliyeti, yüksek ergime sıcaklıkları ve enerji tüketimlerinden dolayı, E tipi camdan daha fazladır.

Fiber Optikler

Fiber optik kablolar çok ince ve sürekli fiberler seklinde üretilir. Üretim için cam veya plastik de kullanılabilir. Cam fiber optikler veriyi daha az kayıpla iletebildikleri için tercih edilirler. Fiber optik kablolar veri iletiminde fotonları kullandıkları için süreç elektromagnetik ortamlardan etkilenmez. Tek ve çok modlu fiber optik optikler şeklinde iki ana kısma ayrılırlar. Tek modlu fiber optikler uzak mesafelere bilgi aktarımı için uygundur. Çok modlu kablolar ise kısa mesafeler için kullanılır.

Fiber kabloların çekirdek ve kabuk kısımlarının kırılma özellikleri farklıdır. İç kısım borosilikat camdan imal edilmiştir ve kırılma indisi yüksektir. Dış (kabuk) kısmı kırılma indisi düşük cam kullanılmaktadır. Bu sayede fotonlar çekirdek-kabuk ara yüzeyinde kayıpsız yansımalar yaparak son noktaya ulaşır.

Kilometrelerce uzunluğunda fiber optik kablo üretiliyor olsa da kütlesel olarak diğer üretimlere göre miktarı düşüktür. Kütlesel üretim bir-

kaç on bin ton kadardır. Bu sebeple kullanılan bor miktarı da oldukça azdır. Ancak istenilen yüksek saflıklar nedeniyle yüksek fiber optiklerin fiyatları yüksektir.

Borosilikat Camlar

Borosilikat cam, çok düşük bir termal genleşme katsayısına izin veren bor trioksit içeren bir cam türüdür. Bu, normal cam gibi aşırı sıcaklık değişimlerinde çatlama yapmayacağı anlamına gelir. Üst düzey dayanıklılığı, onu restoranlar ve laboratuvarlar için tercih edilir hale getirir.

Borosilikat cam, camın davranışını tamamen değiştiren ve onu termal şoka dayanıklı kılan yaklaşık %15 bor oksitten kaynaklanır. Bor oksit, camın sıcaklıktaki aşırı değişikliklere maruz kaldığında termal genleşmesine mani olur. Bu sayede borosilikat cam, çatlamadan doğrudan dondurucudan fırın rafına yerleştirilebilir. Alternatif olarak cama borik asit, boraks ve kolemanit karışımı ilave edilerek bor cam elde edilebilir. Borosilikat camların sağladığı bazı özellikler aşağıda verilmektedir:

- *500°C sıcaklığa kadar dayanımı,*
- *Termal şok direnci,*
- *Darbelere ve korozyona dayanıklılık,*
- *Suya ve kimyasallara karşı dayanıklılık,*

Borosilikat camların yoğun şekilde kullanıldığı sektörler aşağıda verilmektedir:

- *Sıvı kristal ekran (LCD) üretiminde,*
- *Cam mutfak eşyası üretiminde,*
- *Aydınlatma maksadı ile kullanılan, ampul globları, araç farları, sıcaklığa dayanım gerektiren ampullerin üretiminde,*
- *Termal şoklara sıklıkla maruz kalan laboratuvar camlarının üretiminde,*
- *Üstün optik özellikler gerektiren (teleskop camları, lensler, prizmalar) camların üretiminde,*
- *Güneş enerjisi panellerinin üretiminde.*

Boratlar alkalilerin kullanımının sınırlandırıldığı durumlarda akışkanlığı artırıcı olarak ve süreç sıcaklığını düşürmek için kullanılır. Sıvı kristal ekranlarda yüksek performans sağlamak için borosilikat cam kullanılır. Ürün ağır metaller (baryum, antimon, arsenik veya halojenürler)

içermediği için çevre dostu olarak kabul edilir. Cam ayrıca yüksek yüzey kalitesi, mükemmel termal özellikler, düşük yoğunluk ve kimyasallara karşı yüksek direnç özelliklerine sahip olur.

Bor ürünlerinin mümkün olduğu kadar saf halde olması, kullanıldığı malzemenin saflığının korunmasına yardımcı olmaktadır. Cam üretiminde rafine (arıtılmış) bor ürünlerinin kullanılmasının sağladığı diğer avantajlar aşağıda sıralanmaktadır:

- *Tozlaşmayı azaltır,*
- *Yüksek bor oksit oranları (tenörü) taşıma maliyetini düşürür,*
- *Eritme sürecinde ortalama bor kaybını azaltır,*
- *Rafine üründeki kusur daha az olduğunda daha yüksek verim elde edilir,*
- *Dehidrasyon için enerji harcanmak zorunda kalınmaz,*
- *Harman kapasitesini arttırır.*

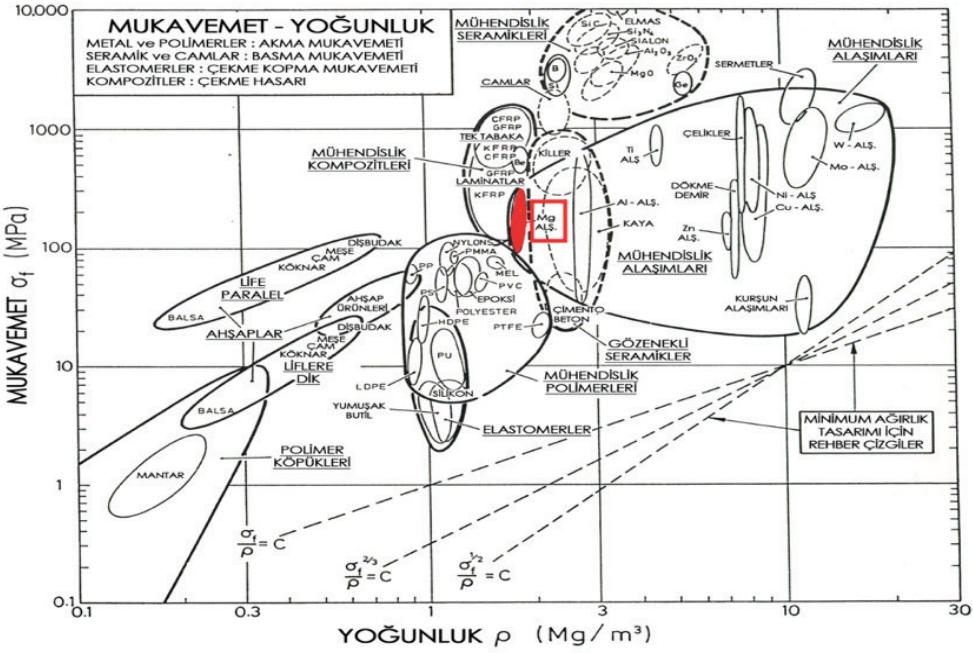
Seramikte Sanayinde Bor Kullanımı

Bor minerallerinin seramiklerde kullanımı, cam sektöründen sonra, en eski ve tüketimin ikinci en büyük kısmını oluşturmaktadır. 2013 yılı verilerine göre küresel tüketimin %14'ü (280.000 ton B_2O_3) seramik sektörüne aittir. Bor kimyasallarının seramik endüstrisinde kullanımı daha çok, seramik sırına veya porselen emayeye ilave edilmesi şeklinde gerçekleşir, ayrıca, çok daha az miktarda da olsa, seramik karoların ana yapı karışımlarına da eklenmektedir (Helvacı, 2017; Eti Maden 2020).

Seramik sırları (fritler) renklendirici metal oksitler ve süreç yardımcı katkılarından oluşan, her bir spesifik uygulama için uygun formülasyona sahip, 0,1-0,3 mm inceliğinde camsı kaplamalardır. Bor da dâhil olmak üzere pek çok sır içeriği suda çözülebilir ve eğer bir kil ana yapısının ıslak yüzeyine uygulanırsa, yüzeyden içeriye doğru absorbe olabilir. Bu sorunu aşmak için, sır içeriğindeki maddeler silika ile birlikte yüksek sıcaklıkta ergitilir, öğütülür ve fırınlamadan önce yüzeye uygulanacak olan, suda çözünmeyen frit üretilir. Pişirme (olgunlaştırma) sıcaklıkları, sırların sınıflandırmasında kullanılabilir. Sır, eriyip, sırlanacak maddenin bütün yüzeyine rahatça ve pürüzsüzce aktığı, yüzeyde baloncuk veya iğne deliği gibi kusurlar olmadığı zaman, olgunlaşma sıcaklığına ulaştığı kabul edilir.

Bor oksit yaklaşık %20 oranında emayelere karıştırıldığında süreç sıcaklığına ve akışkanlığa olumlu katkıları olur (Şekil 1). Alternatif olarak %17-32 arasında boraks penta veya dekahidrat da tercih edilebilir. Bor ile kaplanan emaye, onun paslanmasını önlemekte ve görünüşünü iyileştirmektedir. Mutfak ekipmanlarının çoğu emaye içerir. Seramik yüzeyini sırlandırarak aşınma ve çizilmeye karşı mukavemet kazandıran bor, seramiğe % 3-24 kolemanit karıştırılması yoluyla eklenmektedir. Seramik üretiminde kullanılan başlıca bor ürünleri şunlardır:

- *Kolemanit: Düşük sıcaklıklarda ve homojen erime sağladığı için tercih edilir.*
- *Susuz boraks: Kristalleşme suyunun uzaklaştırılması ihtiyacını ortadan kaldırdığı için tercih edilir.*
- *Boraks pentahidrat: Ucuz olmasından dolayı tercih edilir.*
- *Borik Asit, Bor Oksit: Sodyum ve kalsiyum boratların, ıslak karo üretiminde çamur reolojisi sorunu yaratmasından ve üretimde zorluklara neden olmasından dolayı tercih edilir.*



Şekil 1. Seramiklere Borik Asit Eklenmesinin Olumlu Tesirleri

Tarımda Bor Kullanımı

Bor gübrelere boraks pentahidrat, boraks dekahidrat ve disodyum oktabotar tetrahidrat formunda katılmaktadır (Eti Maden 2020). Diğer kullanılan ürünler ise sodyum pentaborat ve borik asittir. Bor su içinde çok yüksek çözünürlüğe sahiptir ve bu nedenle yağmur vasıtası ile topraktan çok kolay uzaklaştırılabilir. Bu nedenle topraklarda bor noksanlığına sıklıkla rastlanır. Toprakta bor eksikliği bitkilerin gelişimlerini olumsuz etkilemektedir. Bor noksanlığı genelde organik madde miktarı az topraklar ile nemli bölgelerdeki asidik ve kumlu topraklarda sıklıkla görülür.

Topraktaki kalsiyum, potasyum ve azot konsantrasyonları bitkide borun kullanılabilirliğini ve fonksiyonlarını etkilemektedir. Bunlardan kalsiyum-bor oranı en önemlisidir. Kalsiyumu yüksek topraklar düşüklerden daha fazla bora ihtiyaç duyar fakat bu durum fazla bor uygulanmasından dolayı bitkilerde bor toksisitesine sebep olabilir. Borlu gübre uygulanmadan toprakta mutlaka bor analizi yapılmalı ve ihtiyaç kadar bor katkısında bulunulmalıdır. Yetersizlik halinde ürünün cinsine göre hektara 1–4 kg borlu gübre uygulanabilir.

Besin maddeleri bitkiler ve hayvanlar için önemli olup 2 kısma ayrılırlar: Magnezyum (Mg), potasyum (K), kalsiyum (Ca), azot (N), kükürt (S) ve fosfor (P) elementlerini içeren makrobesleyiciler ve çinko (Zn), bakır (Cu), demir (Fe), bor (B) ve molibden (Mo) gibi elementlerden oluşan mikrobesleyiciler. Bor bitkilerde şeker/nişasta dengesinin sürdürülmesinde ve bitkide şeker ve karbonhidratların taşınmasında için önemli bir elementtir. Bor ayrıca polenleşme ve tohum üretiminin yanında hücre bölünmesi, azot metabolizması ve protein oluşumunda hayati öneme sahiptir. Özetle bor bitkilerin tohum, meyve oluşumunda ve kök gelişiminde etkin rol oynar. Kullanıldığı alanların tarımsal verimde artış sağlar.

Deterjan Sanayinde Bor Kullanımı

Çamaşır deterjanları, evsel/endüstriyel temizleyiciler ve kişisel bakım ürünleri borat için cam, seramik ve gübreden sonraki dördüncü büyük pazarıdır. Bu nihai kullanımda boratın; lekenin uzaklaştırılması

ve beyazlatmanın arttırılması, enzimlerin stabilizasyonu, su yumuşatması, yüzey aktif maddelerinin performanslarının geliştirilmesi ve anti-bakteriyel özelliklerinden faydalanılır. Boratın deterjanlarda kullanımı perkarbonatın perborat yerine kullanılmasından dolayı sert şekilde düşmüştür. 2013 yılında bu marketin, dünya genelindeki kullanımı tahminen %2-3 arasında (40-60 bin ton B_2O_3) değişkenlik göstermiştir (Eti Maden 2020).

Tipik bir toz çamaşır deterjanı %14-18, sıkıştırılmış toz deterjan ise %10-13 sodyum perborat içerir. Piyasadaki değeri gittikçe artan sıvı deterjanlar ise sodyum perkarbonat veya perborat gibi per-tuzları içermezler. Çamaşır deterjanlarında kullanılan en yaygın bor bileşiği, tetrahidrat ve monohidrat formlarındaki sodyum perborattır. Tetrahidrat, 200°C'de boraks pentahidrat çözeltisine hidrojen peroksit eklenerek üretilir. Monohidrat, sodyum perborat tetrahidratın akışkan yatakta ısıtılmış havayla suyunun giderilmesinden üretilir.

Sıcak iklimlerde ve Asya gibi yıkama işlemi soğuk sularda (10-30°C) yapılan piyasalarda monohidrat, tetrahidrat yerine tercih edilmektedir. Boraks monohidrat yüksek oranda çözünürlük ve soğuk yıkama sıcaklıklarında çözelti içinde hızlı bir hidrojen peroksit salınımı sağlar. Bu da bütün yıkama devri boyunca ağartma işinin yapılmasını sağlar. Monohidrat, yüksek oksijen içeriği ve düşük nem içeriğinden dolayı tablet formülasyonlarında da kullanılır.

İnşaat ve Çimento Sanayinde Bor Kullanımı

Bor bileşikleri çimentoya eklenmeleri durumunda hidratasyon süresini artırmaktadırlar. Bu sayede hidratasyon ısısı portland çimentosunu yarısına kadar düşmektedir (Davraz, 2015). Borun çimentoya bir diğer katkısı ise yüksek sıcaklıklarda artan viskoziteyi kontrol etmesidir. Çimentonun yapısına %3-4 kadar bor oksit eklenmektedir. Çimentoya eklenen bor yapı içindeki Ca_2Si (Dikalsiyum silikat) bileşiğinin Ca_3Si (Trikalsiyum silikat) bileşiğine dönüşmesine mani olur. Bu değişiklikten dolayı uygulanan betonun ilk birkaç günde dayanımı düşük olsa da bir ay kadar sonra portland çinemtosuna nazaran %20 daha fazla dayanım sağlanır. Bor oksit eklenmesi ile üretilen çimentonun kullanımının ilk

birkaç günlük erken dayanımı düşüktür. Yaklaşık bir ay sonrasındaki dayanım ise portland çimentosuna nazaran %20 daha yüksektir. Boroksit kullanımı çimentoya aşağıdaki özellikleri kazandırmaktadır:

- *Mükemmel koruyuculuk (Zararlı haşare ve organizmalara karşı)*
- *Yanmaya karşı direnç,*
- *Uzun ömür,*
- *Üretim aşamasında atık maddelerin kullanılma fırsatı,*
- *Yerli kaynaklardan temin,*
- *İlk aydan sonra dayanımın artması,*
- *Nötron yakalama özelliği neticesinde radyasyondan koruma.*

Çimento yapısına bor katılması ile oluşan beton gaz ve sıvı difüzyonuna karşı dirençli ve diğer dış etkilere karşı daha dayanıklı olurlar. Bor katkısı ile üretilen betonların suyu ve klor gibi gazları absorplama miktarları portland çimentosuna ile dökülen betona nazaran %30 daha azdır. Dolayısı ile boroksit içeren çimentoların nemli ve tuzlu ortamlarda güvenle kullanım imkânı da vardır. Ayrıca geç dayanımı yüksek olduğundan aşırı yüke maruz kalan tünellerde, barajlarda, yüksek binalarda ve yollarda, uzun hidrotasyon süresin sonucu olan düşük hidratasyon ısısı sayesinde kendine özgü tasarımı olan köprüler ve tüp geçitlerde bor içeren betonlar kullanılır. Ayrıca nötron tutma yetisinden dolayı nükleer santrallerinin yapılmasında ve radyoaktif atıkların uzun süreli ve güvenli olarak saklanmasında, röntgen odalarının ve askeri depoların yapımında boroksit içeren çimento sıklıkla kullanılmaktadır.

Alev Geciktiricilerde Bor Kullanımı

Molekül yapısında bağıl su bulunan borik asit ve diğer boratlar yanabilen malzemelere eklenerek geç alev almaları sağlanır. Alev alma sıcaklığına erişmeden bağıl su molekülden ayrılır ve alevin ilerlemesini engeller (Gürü vd., 2021a). Polimerik malzemelerin yanmasına mani olmak için de bor bileşiklerinin kullanımı artmaktadır. Malzemelerin alev almalarını geciktirmek maksadı ile yapılarında bağıl su bulundurabilen çinko borat, baryum metaborat ve amonyum florborat gibi kimyasallardan sıklıkla faydalanılmaktadır. Antimon trioksit ile birlikte boraks, çinko borat ve amonyum florborat gibi yangın bastırıcılar kullanıldığında

alev ve duman salınımı hızla bastırılmaktadır (Gürü vd., 2021b). Ancak maliyet diğer yangın önleyicilere nazaran daha yüksektir.

Diğer bir alev bastırıcı olan amonyum pentaborat tetrahidrat ($NH_4B_5O_8.4H_2O$) yanan ortamda kömür oluşumunu artırabilir ve yüksek pH sistemlerine sahip kabarma özelliği olan boya uygulamalarında daha iyi stabilite sağlar. Yapısında bağıl su bulundursan çinko borat, 300 °C sıcaklığa kadar hidrasyon suyunu korur. Bu nedenle yüksek sıcaklıktaki yangınların engellenmesinde kullanılabilir (Gürü vd., 2021a).

Yangın önleyici kimyasalların önemi tüketici tarafından anlaşılmakta ve kullanım miktarları düzenli olarak artmaktadır. 2019 yılı küresel tüketimi 2,5 milyon ton ve 10,5 milyon dolar olan alev bastırıcılarının hastaneler, kreşler, yaşlı bakım evleri gibi ortamlarda kullanılmasının zorunlu hale getirilmesi ile talebin hızla yükselme olasılığı vardır.

Bor içeren alev geciktiricilerin avantajlı olması emsallerinin bazı istenmeyen özelliklerinin olmasından dolayıdır. Bor içermeyen alev geciktiricilerin neden oldukları bazı sorunlar aşağıda özetlenmiştir:

- *Halojenli bileşikler; alerjik sonuçları olabilecek veya zehirli gaz salınımına neden olur,*
- *Antimon trioksit; pahalı, toksiktir,*
- *Alüminyum hidroksit; yüksek kullanım oranında mekanik ve fiziksel özelliklerde kayba neden olur,*

Borlu bileşikler kullanılarak üretilen alev geciktiriciler ise; ucuz, insan sağlığına etkilerinin emsallerine göre düşük ve mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiye sahip olması sebebi ile avantajlıdırlar.

Nükleer Alanda Bor Kullanımı

Bor bileşiklerinin nötron absorplama yeteneği oldukça iyidir. Nükleer reaktörlerde bor nötronları absorbe etmek için radyasyon kalkanı olarak kullanılmaktadır. Borlu çelikler, titan-bor ve bor karbür alaşımları nükleer süreçlerde kullanılmaktadır. Bu malzemeler radyasyonun emilmesini başararak istenmeyen kısımlara sızmasını engeller. ^{10}B izotopu, nükleer reaktörlerde radyasyon kalkanı ve nötron dedektöründe olarak iyi bir nötron soğurucu ve kontrol çubuğu (% 2 bor içeren çelik ve alüminyum alaşımları) olarak kullanılır. Ayrıca yapısında bor bulu-

nan beton radyasyon kalkanı olarak kullanılabilir. Beton veya çelikteki kullanılan bor atomu sayısı kadar nötron absorbe edilmektedir. Bor içeren parçalar reaktörde, kontrol çubuklarında, nötron tutan aletlerde, nükleer kazalarda güvenlik amacı ile ve nükleer atıkları saklamak için kullanılabilir.

Gadalinyum ve samaryum bor bileşiklerine alternatif olarak kullanılabilir. Nükleer reaktörlerin kontrol, alarm ve soğutma sistemlerinde borlu malzemelerin koruyucu özelliğinden faydalanılır. Nükleer atıkların dış ortam ile olan ilişkisinin kesilmesi için kolemanit kullanılabilir. ^{11}B'in proton fisyonlanması yöntemi ile radyoaktivite olmaksızın enerji üretilmesi konusunda da başarılı çalışmalar sürdürülmektedir.

Metalürji Sanayinde Bor Kullanımı

Boratların metalürji uygulamaları; çelik, demir dışı, amorf metaller, kaynak cürufları, alaşımlar, nadir toprak magnetleri ve kaplama bileşiklerin üretimini içermektedir. Bor genellikle aşağıdaki amaçlara ulaşabilmek için metalürji sektöründe kullanılmaktadır:

- *Ergitme sıcaklığını düşürülerek enerji tüketiminin azaltılması,*
- *Cüruf yapıcı olarak kullanıldığında akışkanlığın artırılması,*
- *Çeliğin sertliğinin artırılması,*
- *Fırında refrakter malzeme korozyonunun azaltılması.*

Bor metal içerisinde çözülen veya metal ile bileşik halde bulunan oksijen ve nitrojenin ortamdan uzaklaştırılmasında yani saf metal üretiminde de kullanılmaktadır. Bor katkısı, ergitme işlemi sırasında metal oksitlerin çözülerek cürufa geçmesine yardımcı olmak amacı ile demir ve demir dışı üretimlerde cüruf yapıcı olarak da kullanılmaktadır. Metalürji sanayinde kullanılan bor bileşikleri aşağıda listelenmektedir:

- *Amonyum pentaborat*
- *Potasyum pentaborat ve tetraborat*
- *Susuz boraks*
- *Boraks pentahidrat ve dekahidrat*
- *Borik asit ve bor oksit*

Çelik Sanayinde Bor Kullanımı

Erimiş yüzeylerinin oksitlenmesini önlemek için bor kaplayıcı cüruf olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bor çeliğe nüfuz ederek alaşım meydana getirmektedir. Kromun aksine orijinal yüzeye bir katman eklemez ama karbon ve diğer safsızlıkları alarak saf demir karbür tabakası bırakır. Bu uygulamada kullanılan boratlar; penta, deka ve susuz borakstır. Çeliğin bor ile alaşımlanması sertliği oldukça yükseltmektedir. Çelik imalatında 50 ppm bor katkısı çeliği daha sert hale getirmektedir.

Bor bileşiklerinin bir diğer kullanım alanı cürufa yoğunluk kazandırılmasıdır. Yoğunluğu düşük, tozlaşan cürufu iki kat yoğunluğa sahip kompakt cürufa çevirmek için üretim esnasında potaya bor ilavesi yapılmaktadır. Bor ilavesi cürufu daha rahat depolanabilir kılmakta ve çevreye verilebilecek olası zararlara mani olmaktadır. Kompakt cüruf inşaatlarda dolgu malzemesi olarak ve çelik üretiminde safsızlıkları almak için kireç yerine kullanılabilmektedir. Bor ilavesi ile sürecin işletme maliyeti de azalmaktadır.

Ayrıca borlu çelikler imalat yöntemlerinde kolaylıklara neden olarak enerjinin az kullanılmasını sağlamaktadır. Bor kullanılarak üretilen yeni çelikler, mekanik etkilere karşı dayanımları sebebi ile tarım, inşaat makinaları, grayder bıçakları, vinçler, yaylar, vites dişlileri gibi parçaların imalatında tercih edilirler.

Elmastan sonra en sert malzeme kübik bor nitrürdür (c-BN). Ancak elmasın tersine çok iyi bir ısıl dayanıklılığı olup 1370°C sıcaklıkta bile fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyabilmektedir. Elmas ise 815 °C sıcaklıkta kristal özelliklerini kaybederek karbona dönüşmektedir. Hem BN hem de elmas çok iyi bir ısıl iletkenliğe sahip olduklarından kesici aletlerin yapımında kullanılmaktadırlar.

Bor bileşiklerinin kullanıldığı diğer metalürjik alanlar ise kaplamaların yapılması ve refrakter üretimi süreçleridir. Kaplama yapılırken bor bileşiklerinin üstlendiği görevler aşağıda sıralanmıştır:

- *Elektrolit eldesinde, bor bileşikleri,*
- *Nikel kaplamada, borik asit,*

- *Kurşun, kalay, nikel ve bakır gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak, fluoboratlar ve fluoborik asitler,*
- *Elektro kaplama banyolarında, borik asit veya floroborat kullanılmaktadır.*

Ayrıca zımpara ve aşındırıcılar, kesiciler ve kompoze malzemelerin yapısında da bor bileşenleri bulunmaktadır.

Borik asit, susuz boraks ve disodyum tetraborat içeren refrakterler, çelik, cam, çimento ve alüminyum sektöründe kullanılmaktadır. Bor kimyasalları, seramik bağ oluşana kadar preformun şekil ve biçimlerini korumak amacıyla, refrakter karışıma yeterli mukavemet vermek için ikincil bağlayıcı olarak kullanılmaktadır.

Rio Tinto harç ve ateş tuğlaları üretiminde %68,5-69,4 B_2O_3 ve %30,5-30,9 Na_2O içeren susuz boraks ($Na_2B_4O_7$) kullanılır. Susuz boraks uçucuların yapıyı terk ettiği noktada, seramik bağ kurulmadan önce bir ara sıcaklıkta camsı bağın oluşmasını sağlar. Refrakter üretiminde bor bileşiklerinin kullanımına bir diğer örnek ateş tuğlalarının imalatında borik asitin görev almasıdır. Borik asit, yüksek sıcaklık, korozyon ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kimyasal bağ yapan ateş tuğlalarına ve harçlara eklenebilir. Harçlar düşük gözenekli homojen bir yapıya sahiptir ve düşük ve orta sıcaklık aralığı boyunca yüksek sıcaklık dayanımı sağlarlar. Fırınlanmamış refrakter içeren harçlar, ateş fırın ya da başka yapılar içine sıkıştırma, döküm ya da püskürtme yöntemi uygulanarak monte edilirler.

Hidrojen Depolamada Bor Kullanımı

Fosil kaynakların kısıtlı rezervleri ve sebep oldukları çevresel sorunlar enerji ihtiyacının karşılanması konusunda bilim insanlarını yeni arayışlara yönlendirmiştir. Temiz enerji üretim yöntemleri olarak rüzgâr, güneş, jeotermal, hidro, biyo kütle gibi alternatif kaynaklar benimsenmiş olsa da bu kaynaklar maalesef fosil temelliler gibi enerji yoğun değildirler ve her ihtiyaç duyulduğunda hazır olmayabilirler (Özsaçmacı, 2016). Tüketiciye enerjinin güvenilir, ekonomik ve kesintisiz olarak arz edilebilmesi için depolama sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece talebin düştüğü anlardaki enerji fazlası yoğun saatlere saklana-

bilecektir. Enerjinin saklanması konusunda ise teknolojimiz henüz yeteri kadar gelişmiş değildir.

Enerjinin saklanması konusunda hidrojen temiz bir yöntem sunması bakımından kolay görmektedir. Hidrojenin depolanması konusunda hafif molekül yapısından dolayı bazı teknik sorunlar yaşanmakta ve yeteri kadar yoğun şekilde hidrojen saklanamamaktadır. Hidrojenin kimyasal yapılar içinde saklanması bu noktada önemli avantajlar sağlamaktadır. Hidrojeni kimyasal olarak saklamada kullanılabilecek kimyasalların başında metal boridrürler (MBH_4; M=Li, Na, K, Ca) ve bazı amonyum bileşikleri (NH_3BH_3, N_2H_4, $N_2H_4BH_3$) gelmektedir (Bilen vd., 2017; Çakanyıldırım ve Gürü, 2008a; Çakanyıldırım vd., 2012). Bu bileşiklerin sentezlenmesinde bor minerallerinin pek çoğu kullanılabilmektedir. Hidrojenin depolanabildiği kimyasalların yapısında genellikle bor atomu bulunmaktadır. Bor hem çok sayıda hidrojeni kendisine bağlayabilmekte hem de düşük moleküler ağırlığı sayesinde kütlesel hidrojen yüzdesini düşürmemektedir.

Borhidrür halinde saklanan hidrojenin açığa çıkarılması için termal veya katalitik parçalanma yöntemleri kullanılmaktadır (Çakanyıldırım ve Gürü, 2008b). Katalitik olarak bor hidrür bileşiklerinin parçalanmasında tepkime ortamında çözücü olarak görev yapan su veya primer alkollerin (metanol, etanol, izopropil alkol, propilen glikol vb.) de parçalanması ve yapılarındaki hidrojenin değerlendirilmesi gerçekleşmektedir (Şahiner ve Sengen, 2017; Xu vd., 2018). Bu avantajın yanı sıra tepkime yan ürününün geri kazanılmasında çok sayıda alternatif yöntemin bulunması, kullanılan kimyasalların; zehirsiz, kararlı, yanmayan karakterde olması yönteme olan ilgiyi artırmaktadır.

Pillerde Bor Kullanımı

Lityum tuzları elektrolitlerde birincil ve ikincil polimer lityum pilleri için kullanılır. Bunlar, lityum heksa florofosfat, bis(oksalat) borat, florür, klorür, bromür, iyodür ve perkloratı içermektedir. Bu sektörde lityum tuzlarının en önemli uygulaması katot malzemesi üretimidir. Katot malzemesi üretimi yıllık on binlerce ton düzeyindedir.

Elektrolitlerde kullanılmak üzere yüksek performans lityum, lityum iyon ve lityum polimer piller için patentli/tescilli iletken katkı maddesi lityum bis(oksalat) borat üretilmektedir. Bu bileşik C_4BO_8Li formülüne sahip olup, bileşiğin molekül ağırlığı 193,79 g/mol ve yoğunluğu 0,8-1,2 g/cm^3 (20^{o}C) aralığındadır.

Japon firmaları, lityum pil elektrolit üretiminde kullanılmak üzere lityum tetra-floroborat ($LiBF_4$) ve tetra-etil amonyum tetra-floroborat ($TEABF_4$) bileşiklerinden faydalanmaktadır (Karaal, 2013; Moralı ve Erol, 2020). Amerika George Washington Üniversitesi, havanın oksijeni ve özel çoklu elektron depolama elektrotları kullanan "dökme (eriyik) hava pili" geliştirmiştir. Bu pil şimdiye kadar geliştirilenlerden en yüksek elektrik enerjisi depolama kapasitesine sahip pildir. Pilin üretimi demir, karbon ve vanadyum borür ile yapılmaktadır. Bu pil, lityum iyon pillerinden 20-50 kat fazla depolama kapasitesine sahiptir. Hava pil elektrotlardan biri olarak işlev görürken, nikel veya demir elektrotlar diğer elektrot işlevi görebilir. Bu elektrolitin üretimi için demir, karbon ve vanadyum borür reaktifleri karıştırıldıktan sonra eriyene kadar ısıtılır. Erime 700-800^{o}C sıcaklıkta gerçekleşir. Bu piller statik enerji depolama konusunda uygun koşullar ve kapasite sağladıkları için otomobillerde kullanılmaya adaydırlar.

Katalizörlerde Bor Kullanımı

Boratlar katalizörlerde çoğunlukla petrol sektöründe çok çeşitli uygulama alanına sahiptir. Boranlar ve hidrürler gibi bu bileşiklerin çoğu çok az miktarda üretilir ancak bu bileşiklere odaklanmış çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bor hidrürler, boranlar olarak bilinen, oda sıcaklığında gazdır. Genel formülleri B_nH_{n+4} veya B_nH_{n+6} dır. En iyi bilinen diboran (B_2H_6). Petrokimya endüstrisinde borik asidin tek geniş kullanımı büyük ihtimalle parafinik hidrokarbonların hava ile oksidasyon sonucunda ilgili alkoller ve ketonlara dönüşümüdür. Başlıca uygulama Naylon 66 üretimidir. Borik asit hidrokarbonların oksidasyonu sürecince katalizör görevi görür. Hidroksil grupların daha fazla oksidasyonu ile esterler oluşur. Bu esterler ketonlar ve karboksilik asitlere dönüşümünü engelleyerek alkol üretim verimini arttırır. Bu, Naylon 66 üretiminde ara ürün üretir. Kullanılan borik asit miktarı katalitikten ziyade stokiyomet-

rik ve önemli oranda sikloheksanol boratların hidrolizi ile geri kazanılabilir.

Bor triflorür (BF_3) oda koşullarında gaz fazında bir Lewis asit katalizörü olarak çok sayıda uygulamada kullanılır. Elektron vermeye meyilli kimyasallar ile kolaylıkla tepkime verir. Bor triflorür boraks veya bor oksit üzerinde hidrojen florür etkileşimi ile veya boraks veya bor oksit üzerinde derişik sülfürik asit varlığında kalsiyum florür etkileşimi ile hazırlanır. Bor triflorür güçlü Lewis asitlerinden biri olarak bilinir ve organik sentez reaksiyonlarında asidik katalizör olarak kullanılır. Elektron alıcı olarak bor triflorür oksijen, azot ve sülfür içeren kimyasallarla bileşiklere katılma veya bağlanma yapmak üzere kolayca reaksiyona girer.

Zırh Üretiminde Bor Kullanımı

Isıya ve sürtünmeye karşı direncinin çok yüksek olması nedeni ile top, tüfek, tabanca, tank namlu imalatında ve zırhlı personel taşıyıcı araçların dış yüzeyindeki güçlendirici plakalarda bor bileşikleri kullanılmaktadır. Bor karbür ve cam fiber ile oluşturulan kompoze ile 30 kalibre kurşunun hareketi engellenebilmiştir. Kompoze malzeme AH-10 Kobra helikopterlerinin koltuklarında kullanılmaktadır.

Bor karbür seramikler, mikron altı bor tozlarından inert gaz atmosferinde 2.000 °C sıcaklığın üzerinde sıcak presleme ise ya da tam cepheli sıcak presle üretilir. Bu ürünler düşük yoğunluğa, yüksek mekanik dayanıma ve elastik modüle sahip çok sert malzemelerdir. Bunlar bor karbürün yüksek sıcaklıklarda çabuk okside olmasından dolayı oksijenli ortamlarda 1.000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilmektedirler.

Otomobil Sanayinde Bor Kullanımı

Otomobillerde bulunan ve kaza anında 40 milisaniyede açılan hava yastıklarının ani şişmesini bor bileşikleri sağlamaktadır. Kaza anında, elektronik sensörün tahriki ile potasyum nitrat-bor tozu hızla gaz üretimi sağlanır. Ayrıca otomobil motorlarının soğutma sıvısında korozyona mani olmak için boraks kullanılabilir. Boraks aynı şekilde antifriz ve hidrolik sıvısına katkı maddesi olarak karıştırılabilir.

Sağlık Sanayinde Bor Kullanımı

Canlıların bünyesinde pek çok element ve mineral düzenleyici role sahiptir. Benzer şekilde bor minerali de kemik ve eklemlerin görevlerini yerine getirebilmeleri için büyük önem taşımaktadır. Bor minerallerinin varlığında D vitamini ve kalsiyum vücut tarafından daha kolaylıkla emilir ve kemik yapısında depolanır. Bu özelliği sayesinde kemik erimesinin önlenmesinde bor kritik bir rol oynamaktadır. Bor mineralinin bünyeye sağladığı faydalar aşağıda evrilmektedir:

- *Kemik yoğunluğunun azalması ve erimesi durumunda,*
- *Alerjik hastalıkların, kemik ve eklemlerde enfeksiyonun tedavisinde,*
- *Bakteriyel ve mantar enfeksiyonlarının tedavi edilmesinde,*
- *Hafıza kaybı, algılamanın azalması ve el-göz koordinasyonunun zayıflamasında,*
- *Magnezyum eksikliği medeni ile böbrek taşı oluşmasının engellenmesinde.*

Ayrıca bor minerallerinin mikropları öldürme ve yeteneği de vardır. Dolayısı ile kullanıldığı alanlarda hijyen konusunda da katkı sağlamaktadır. Bor mineralleri radrasyon içi seçici oldukları için kanser hastalarının ısın tedavisinde de kullanılmaktadır. Borun nötron tutma özelliği sayesinde sağlıklı hücreler ışın tedavisinden korunabilir ve kanserli hücrelere daha yoğun şekilde tedavi uygulanabilir. Beyin kanserlerinin tedavisinde sağlıklı hücrelerin korunması önem taşıdığı için bor elementi bu hastalıkla mücadelede sağlık personeline yeni imkânlar sunmaktadır. Bor prostat, karaciğer ve göğüs tümörlerine karşı da etkilidir. Ayrıca diyabet nedeni ile oluşan yaraların iyileştirilmesi, kandaki antioksidan enzim aktivitelerinin arttırılması gibi amaçlarla da kullanılmaktadır.

Ağaç Sanayinde Bor Kullanımı

Boratlar, katı ahşap uygulamalarında, mühendislik ahşap karmalarında ve ağaç direk, playvud (tahta levha sistemi), birleşim parçaları, çatı kirişi gibi iç bina ürünlerinde ahşap koruyucu olarak kullanılmaktadır. Ahşap malzemelerin korunması için disodyum oktaborat ($Na_2B_8O_{13}$) (EtiDot-67) kullanılabilir. Tahta malzemeler % 30 sodyum oktaborat içe-

ren çözelti içine daldırıldıktan sonra yavaşça kurutulur ise tahtanın özellikleri korunarak uzun süre iş görebilir. Bor mineralleri ahşap malzemelerin bakteri, çürüme ve aleve karşı korunmasında olduğu gibi boya ve vernik kurutucularında da kullanılmaktadır. Uygulamada 1 m^3 ahşabın emprenyesi için yaklaşık olarak 8-14 kg aralığında emprenye kimyasalı gerekmektedir. Bor kimyasallarının ahşa malzemelere kazandırdığı özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- *Ahşabın yanma dayanımını arttırır.*
- *Mantar ve böceklere karşı etkilidir.*
- *Çevreye olumsuz etkisi çok düşüktür.*
- *Metallere karşı korozif etkisi düşüktür.*
- *Ahşabın mekaniğine olumsuz etkisi düşüktür.*

Tekstil Sanayinde Bor Kullanımı

Bor mineralleri tekstil sektöründe genellikle alevlenmeyi geciktirmek ve yalıtım özelliklerini geliştirmek amacı ile kullanılır. Sıcaklığa dirençli kumaşlarda, yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik yapılarda, izolasyon maksadı ile kullanılan malzemelerinde, tekstil ve deri renklendiricilerinde ve suni ipek parlatma ajanlarında bor kullanılmaktadır.

Bor bileşikleri, alev geciktiricidir. Bor bileşikleri suda kolaylıkla ve çok miktarda çözündüklerinden, dokuma bor tuzlu çözelti içerisine daldırılıp çıkartılmakta ve ardından kurutma ile yanmaz hale getirilmektedir. Dokumaya bu yolla eklenen ağırlık % 10 civarındadır.

İlaç ve Kozmetik Sanayinde Bor Kullanımı

Borik asit, bazı ilaçlara ve kozmetiklere katılarak acı dindirici, ağrı kesici ve orta şiddetli antiseptik özelliğinden dolayı haricen kullanılmaktadır. Borik asit ihtiva eden kozmetik ve ilaçlar içerisinde kozmetik pudra, saç durulayıcı, ağız temizleyiciler ve koruyucu yağlar bulunmaktadır. Kozmetik pudra % 10 civarında borik asit ihtiva ederken, bebek pudralarında % 5 civarında borik asit mevcuttur. Traş pudrasında da borik asit bulunmaktadır. Dezenfektanlarda, antiseptiklerde, diş ma-

cunlarında, lens solüsyonlarında, kolonyalarda, parfümlerde ve şampuanlarda bor bileşikleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Süper İletkenlerde Bor Kullanımı

Süper iletken, elektriği direnç göstermeden taşıyabilen bir malzemedir. Bu durum aynı zamanda bir atomdan diğerine elektronların enerji (ısı) kaybetmeden geçmesi manasına da gelmektedir. Bir malzemenin süperiletken özellik gösterebilmesi için maalesef sıcaklığının malzemenin kendine has kritik değere kadar düşürülmesi gereklidir. Kritik sıcaklıkta malzemeden hiçbir ısı, ses veya başka bir enerji formunun salınmayacağı bilinmektedir. Bu sayede özellikle küçük elektronik cihazların aşırı ısınması engellenebilir ve daha güçlü işlemcilerin kullanımı mümkün olabilir. Ne yazık ki, çoğu malzemenin süper iletken olabilmesi için aşırı düşük enerji durumunda (çok soğuk) olması gerekir. Daha yüksek sıcaklıklarda süper iletken hale gelen bileşiklerin geliştirilmesi için araştırmalar devam etmektedir. Günümüzde kullanılan süperiletkenler aşırı soğutulma ihtiyaçlarından dolayı verimsiz ve ekonomik olmayan haldedir. İş görebilmeleri için aşırı miktarda enerjinin soğutmaya yönelik olarak kullanılması gereklidir. Özellikle borun süper iletken yapımındaki öneminin fark edilmesi ile bor içeren süper iletken sistemlerin kısa sürede pazara sürülebileceği tahmin edilmektedir.

Süper iletkenler oda sıcaklıklarında sadece metalik iletkenlik gösterirken, ancak malzeme soğutulup kritik sıcaklık olan eksi 230 derecenin altına düştükten sonra süper iletkene dönüşürler. Düşük sıcaklıklara inebilmek için sıvı helyum ve hidrojen kullanılmaktadır. Bugün için en yaygın kullanım alanı olan süper iletken NbTi (niyob titanyum) sadece sıvı helyum varlığında kritik sıcaklığa düşerek görev yapabilmektedir.

Magnezyum diborür (MgB_2), bor bileşikleri kullanılarak kolaylıkla üretilebilen ucuz ve işlenebilir bir malzemedir. Magnezyum diborür yüksek kritik sıcaklığa sahip ($T_c \approx 40$ K) bir süper iletkendir. Ayrıca benzerlerine nazaran 10-20 °C sıcaklık toleransında çalışabilmektedir yani soğutma işlemine ara vermek mümkündür. MgB_2 üretimde kullanılan borun neredeyse tümü öğütülmüş kolemanit formundadır. Safsızlıkla-

rın önemli olduğu bazı özel ürünlerin üretiminde ise daha pahalı olan ve sodyum içermeyen borik asit kullanılır (Kaya vd., 2011).

Bor yukarıda söz edile alanlara ek olarak silikon-yapıştırıcı, polimer, yalıtım, endüstriyel ve yağlama sıvılarında, gaz ve petrol çıkartma süreçlerinde de kullanılmaktadır. Kısacası bor ve bileşikleri hayatımızın her noktasında görev almakta ve yaşantımıza konfor katmaktadır.

SONUÇ

Klasik ürün ve üretim yöntemlerinin yerini daha gelişmiş olanı almaktadır. Ürünlerin kalitesinin sürekli artması tüketicini her zaman kendisi için daha uygun olana yönelmesinin kaçınılmaz sonucudur. Dolayısı da üreticinin bu değişimi kaçırmaması gerekmektedir. Pek çok alandaki ürünün tüketicinin beğenini sağlaması için içermesi gereken bileşenler vardır. İşte bor mineralleri bu türde bileşenlerdendir. Yokluklarında ürünün beklenen standartları karşılaması asla mümkün olmayacaktır. Bor mineralleri cam, deterjan, seramik sanayi ve tarım alanı başta olmak üzere pek çok sektörde kullanılmaktadır. Üretim ve kalitenin sağlanması için bu ölçüde vaz geçilmez bir ham maddenin dünya üzerindeki rezervlerinin büyük çoğunluğunun Türkiye'de olması ülkemiz için büyük bir şanstır. Bu şansın gereği gibi değerlendirilebilmesi için bor minerallerinin katma değeri yüksek, teknolojik uç ürünlere dönüştürülmesi gereklidir. Şuan ki piyasa koşullarında bor fiyatlarının belirlemesinde dahi Türkiye yeterli ölçüde etkin olamamaktadır. Bor fiyatlarının belirlenmesinde pazarlık usulünün kullanılması, müşterinin her zaman farklı tedarikçi alternatiflerinin bulunması üreticilerin fiyat belirlemesindeki hareket alanını kısıtlamaktadır. Bor minerallerinin topraktan alındıktan sonra kısıtlı işlemler yaparak (B_2O_3 bakımından zenginleştirerek) arz edilmesinden ziyade uç-teknolojik ürünlerin piyasaya sürülmesi ekonomik faydayı artıracaktır.

Bor minerallerinin piller, süper iletkenler, hidrojen depolama, savunma sanayi ve sağlık alanındaki uygulamaları gelecek dönemlerde önem kazanacaktır. Elektronik, enerji ve sağlık sektörleri her zaman yoğun talep görmekte ve milli hasılaların büyük kısmı bu alanlara sarf

edilmektedir. Dolayısı ile bor bileşiklerinin bu alanlardaki özelliklerinin geliştirilmesi öncelikli hedef olmalıdır.

Türkiye'de bor üzerindeki çalışmalar saha çalışmaları ve Ar-Ge şeklinde iki kısma ayrılabilir. Saha çalışmaları Eti Maden İşletmeleri tarafından icra edilirken Ar-Ge ve bilimsel alt yapının geliştirilmesinde ağırlıklı olarak Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü'nün etkin olduğu görülmektedir. Bu kurumların hareket serbestliğinin, mali gücünün sağlanması ve özel sektör ile rekabet edebilecek alt yapı ve personelin tedarik edilmesi gereklidir. Sözü edilen koşulların ve zamanla ortaya çıkacak gerekliliklerin akıllıca yönetilmesi ile geniş kaynaklara sahip olduğumuz bor cevherinin çok daha faydalı bir hale getirilebileceği açıktır. Bu hedefe ulaşmak için gerekli olan tek şart bilim ve insana yatırımdan geçmektedir.

KAYNAKÇA

Bilen, M., Gürü, M. and Çakanyıldırım, Ç. (2017). Conversion of KCl into KBH_4 by Mechano-Chemical Reaction and its Catalytic Decomposition. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4126-4132.

Çakanyıldırım, Ç. and Gürü, M. (2008a). Processing of $LiBH_4$ from its elements by ball milling method, *Renewable Energy*, 33(11), 2388-2392.

Çakanyıldırım, Ç. and Gürü, M. (2008b). Hydrogen cycle with sodium borohydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(17), 4634-4639.

Çakanyıldırım, Ç., and Gürü, M., (2021). Developments in Aluminum Production Technologies, Environmental Impact and Application Areas. *Journal of Polytechnic*, 24(2), 585-592.

Çakanyıldırım, Ç., Demirci, Ü., Şener, T., Qiang, X. and Philippe, M. (2012). Nickel based bimetallic nanocatalysts in high extent dehydrogenation of hydrazine borane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 9722-9729.

Davraz, M. (2015) The Effect of Boron Compound to Cement Hydration and Controllability of this Effect. ***Acta Physica Polonica A***, 128, B26-B33.

Eti Maden İşletmeleri Strateji Geliştirme Dairesi Bşk., (2020) Bor Raporu.

Gürü, M., Güngör, G., Yılmaz, A, D. and Çakanyıldırım, Ç. (2021a). Kalsiyum floroborat sentezi, kinetik ve alev geciktirici özelliklerinin belirlenmesi. *Journal of Boron*, 6(3), 326-331.

Gürü, M., Güngör, G., Yılmaz, A, D. and Çakanyıldırım, Ç. (2021b). The Investigation of Synthesis Parameters, Kinetic and Flame Retardant Properties of Magnesium Fluoroborate, *Chemical Paper*.

Helvacı, C., (2017). Borate deposits: An overview and future forecast with regard to mineral deposits. ***Journal of Boron*, 2(2), 59-70.**

Karaal, Ş. (2013). Lityum iyon pillerde elektrolit olarak $LiBF_4$ kullanımının incelenmesi, YL Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaya, S., Gürü, M. and Ar, İ. (2011). Synthesis of Magnesium Borohydride from Its Elements and Usage in the Hydrogen Cycle. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 33(23), 2157-2170.

Moralı, U. and Erol, S. (2020). Electrochemical impedance analysis of 18650 lithium-ion and 6HR61 nickel-metal hydride rechargeable batteries, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 35(1), 297-309.

Özsaçmacı, G. (2016). Çoklu ve Bimetalik Katalizörler İle Borhidrür Bileşiklerinin Parçalanması, YL Tezi, Hitit Ün. Fen Bil. Ens.

Şahiner, N. and Sengel, S.B. (2017). Environmentally benign halloysite clay nanotubes as alternative catalyst to metal nanoparticles in H_2 production from methanolysis of sodium borohydride. *Fuel Processing Technology*. 158 (2017) 1–8.

Xu D., Lai X., Guo W., Zhang, X., Wang, C. and Dai, P. (2018). Efficient catalytic properties of SO_4^{2-}/M_xO_y (M = Cu, Co, Fe) catalysts for hydrogen generation by methanolysis of sodium borohydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13) 6594-6602.

İNTERNET KAYNAKLARI

https://roskill.com/market-report/boron/ Erişim tarihi 23.11.2021.

https://www.911metallurgist.com/physical-chemical-treatment-boron-ores/ Erişim tarihi 12.11.2021.

https://www.angloamerican.com/futuresmart/stories/our-industry/mining-explained/mining-terms-explained-a-to-z/open-pit-mining-definition Erişim tarihi 2.11.2021.

https://www.marketwatch.com/press-release/boron-market-size-in-2021-45-cagr-with-top-countries-data-competition-strategies-share-industry-analysis-by-top-manufactures-growth-insights-and-forecasts-to-2026-updated-95-pages-report-2021-08-17 Erişim tarihi 5.11.2021.

https://www.orocobre.com/the-markets/boron-market/ Erişim tarihi 21.11.2021.

https://www.statista.com/statistics/449813/global-prediction-of-medium-term-boric-acid-prices/ Erişim tarihi 23.11.2021.

METALURJİ PERSPEKTİFİNDE 7075 AL ALAŞIMINA UYGULANAN RRA ISIL İŞLEMİNDEKİ SON GELİŞMELER

Gözde ALTUNTAŞ[1], Bülent BOSTAN[2]

Öz: Al ve alaşımları yer kabuğunda geniş bir yere sahiptir. Al – Zn – Mg– Cu alaşımı, yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olmasının yanında ısıl işlem uygulanabilmesi nedeniyle bu değerleri maksimuma çıkararak adeta çeliğe meydan okumaktadır. Yüksek sertlik ve mukavemetinin yanında hafifliği ile savunma uzay ve havacılık endüstrisinin en önemli alaşımlarından biridir. Bugüne kadar, 7xxx serisi Alaşım alaşımlarının mekanik kapasite ve korozyon direncinin iyi bir kombinasyonunu sağlamak için, gelişmiş mikro yapıları uyarlamak için çok çeşitli yaşlandırma prosedürleri geliştirilmiştir Bu yöntemler arasında izotermal yaşlanma, çok aşamalı yaşlanma, izotermal olmayan yaşlanma, yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlanma (RRA) ve stres yaşlanma (yani sürünme yaşlanma) en önemlileridir. Bileşimsel, döküm ve termo-mekanik işleme etkilerinin yanı sıra, özelliklerin dengesi de malzemelerin ısıl işlemden geçirilme şeklinden önemli ölçüde etkilenir. Bu çalışmada ticari olarak satın alınan T651 ısıl işlemi uygulanmış Al – Zn – Mg– Cu alaşımının farklı retrogresyon ve yeniden yaşlanma (RRA) ısıl işlemleri sırasında meydana gelen değişimler sistematik olarak değerlendirildi. Ayrıca, bu alandaki son gelişmeler ve gelecekteki beklentiler de ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Al 7075, RRA Isıl İşlemi, Ön Deformasyon

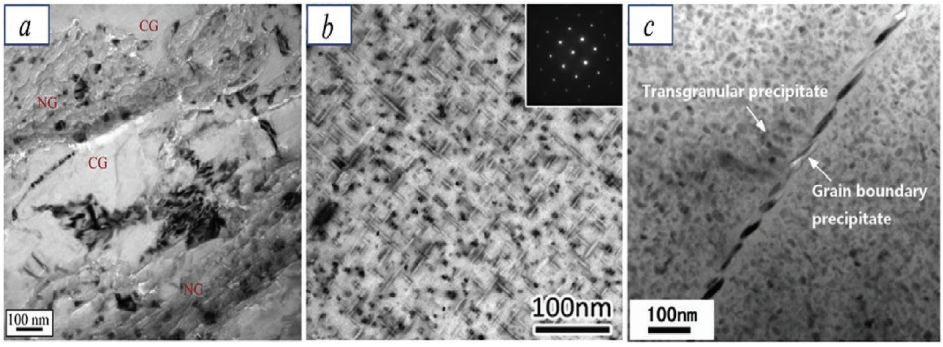
1 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, gozdealtuntas@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4504-0850

2 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara / Türkiye, bostan@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6114-875X

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları en bol mühendislik alanları arasındadır geniş bir geleneksel ve sofistike uygulamalar yelpazesine sahip malzemelerdir. Bu pratik üstünlük, istenen fizikomekanik özelliklerin kombinasyonu için Al bazlı alaşımların içsel kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Bu üstün özellikler, bu sınıf metal alaşımları, otomotiv parçaları (pistonlar, direksiyon kutuları, motor blokları ve tekerlekler) ve askeri teçhizat gibi yapısal ve endüstriyel bileşenlerin üretimi için uygun hale getirir. (Azarniya ve Hosseini,2015) Bu ilginç özelliklerin yanı sıra, mükemmel performans, tatmin edici tasarım perspektifi, ucuz imalat maliyetleri ve tam olarak bilinen imalat teknikleri, üreticilerin diğer benzer metalik sistemlere kıyasla Al alaşımlarını tercih etmesinin nedenlerinden sadece birkaçıdır (Brown ,1999).

Şekil 1 gösteriyor ki ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem görmeyen Al alaşımların mikro yapısından tipik örnekleri gösterir. Özetlemek gerekirse, ısıl işlem görmeyen Alaşımların mekanik özellikleri, bir çift yer değiştirme kuvvetlendirmesi ve katı çözelti mukavemetlendirmesi ile kontrol edilir, ancak ısıl işlem görebilen Al alaşımlarında baskın güçlendirme mekanizması çökelme sertleşmesidir. (ve bazı durumlarda tane inceltme) (Lei vd., 2017).



Şekil 1. Bazı Isıl İşlem Uygulanabilen ve Isıl İşlem Görmeyen Al Tabanlı Sistemlerin Tem Görüntüleri

(a) Soğuk işlemeden sonra saf alüminyum (Starke ve Staley1996), (b) AA6201 (Esawi ve Aboulkhair ,2015) ve (c) AA7050 (Qi vd.,2016).

Saf Al, dislokasyon dolanmalarının siyah bölgeler olarak dağıldığı iki modlu tane boyutu dağılımına sahip ince bir mikro yapı sergiler. AA6201'in mikro yapısı, Al matris içinde açıkça görülebilen iğne şeklindeki çökeltilerden oluşur. Ayrıca, ısıl işlem görebilen AA7050'nin mikro yapısı, nano ölçekli transgranüler ve tane sınırı çökeltileri ile karakterize edilir.

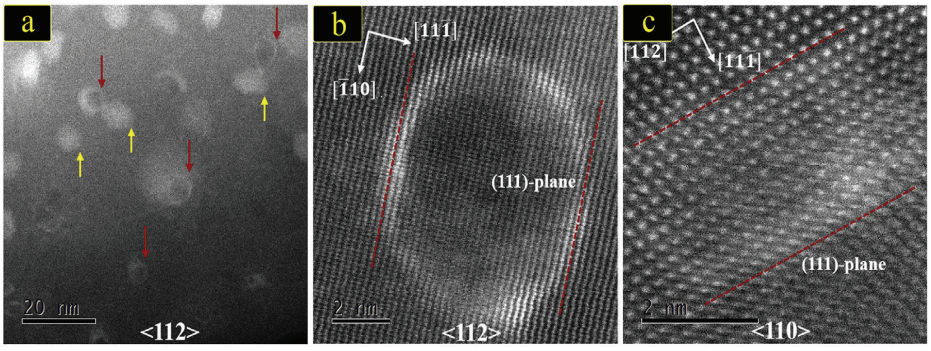
Alüminyum alaşımları (7000 serisi), çok yüksek mukavemetleri nedeniyle havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Warner,2006) En yüksek mukavemete sahip metalürjik durumda (genellikle T6 veya T651 temper olarak adlandırılır) kullanımlarının bir sınırlaması, bu malzemelerin yapısal korozyona (gerilme-korozyon çatlaması, pul pul dökülme korozyonu) karşı düşük direncidir. (Adenis ve Guilhaudis 1967; Marlaud ,2006). Bu korozyon duyarlılığının kabul edilebilir seviyelere yükseltilmesi,% 30 akma dayanımı kaybı pahasına malzemenin fazla yaşlandırılmasını gerektirir (T76 veya T7651). Mekanik mukavemet ve korozyon direnci arasındaki uzlaşmayı iyileştirmek için, bu alaşımların geleneksel iki aşamalı ısıl işleminin, retrogresyon ve re-ageing (RRA) adı verilen üç aşamalı bir ısıl işlemle değiştirilmesi önerilmiştir. İsrailli bir uçak firmasında çalışan Cına ve Gan tarafından 1974 yılında patent alınarak geliştirilmiştir (Cina ve Gan ,1974 ; Cina ve Ranish , 1974). T76 ısıl işlem kadar iyi bir gerilme-korozyon direnci sunarken, bir T6 ısıl işlemiyle karşılaştırılabilir bir mukavemet sunduğu gösterilmiştir. [Wallace vd.,1981 ; Li vd.,2009].

AA7075 alaşımı gibi çok bileşenli bir sistemde fazların yapısal tanımlaması, son derece karmaşıktır, çünkü sentez koşullarındaki çok küçük değişiklikler alaşımların atomik dağılımını etkiler. Ana alaşım elementleri arasındaki ilişki Zn: Mg: Cu, birçok araştırmacının aynı alaşımdaki farklı faz türlerini, metaller arası kompozitleri ve dispersoitleri tespit etmesine ve dolayısıyla belirli koşullar altında mevcut fazları tanımlamak için farklı deneysel teknikler gerektirmesine neden olmuştur. AA7075 alaşımının RRA işlemi sırasında prensipte iyileştirmelerden sorumlu olan bir dizi faz çökeltilir. Literatürde aşağıdaki çökelme dizisi önerilmiştir. (Ryum, 1975; Li, 2000)

Katı çözelti – GP bölgesi 1– GP bölgesi 2- yarı kararlı η' -kararlı η - T faz- S faz

Guinier-Preston (GP) bölgeleri, Mg ve Zn gibi alüminyumda daha yüksek difüzyon katsayısına sahip alaşım elementleri açısından zengin olan küçük boyutlu yarı küresel çökeltiler olan düşük sıcaklıklarda (160 °C) görülür. (Buha ve Lumley,2008). Çökeltilerin atomik düzenine ve geometrisine bağlı olarak, GP bölgeleri GP 1 ve GP 2 bölgeleri olarak sınıflandırılır. Bu çökeltiler nano ölçekli bir çapa sahiptir ve matris ile tamamen uyumludur. Küresel GP 1 bölgeleri, söndürme sıcaklığından bağımsız olarak çözücü kümeler aracılığıyla doğal yaşlanma sırasında oluşurken, plaka benzeri GP 2 bölgeleri, boşluk açısından zengin kümelerden (VRC) ortaya çıkar ve su verme ve yaşlandırma koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. GP-2 zonları ise 450 °C nin üzerindeki çözeltiye alma sıcaklıklarından su verme sonrası ve 60 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma sonrası oluşmaktadır.

Şekil 2 yaşlanmış Al-Zn-Mg-Cu alaşımındaki yaşlanma çökeltilerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, yaşlanma ısıl işleminin ilk aşamasında, tamamen uyumlu küresel çökeltiler ortaya çıkar, ancak bunlar hızla büyür ve nano boyutta trombositlere dönüşürler. İlginç bir gerçek, GP bölgelerinin, yarı kararlı η' fazının homojen çekirdeklenmesi için tercihli bölgeler olarak hareket edebilmesidir. (Li vd., 1999).



Şekil 2. 150 ° C'de 1 Saat Yaşlandırıldıktan Sonra Bir Al-Zn-Mg-Cu Alaşımında Oluşan Çökeltilerin Yüksek Çözünürlüklü Görüntüsü (Hou, ve Bai, 2017)

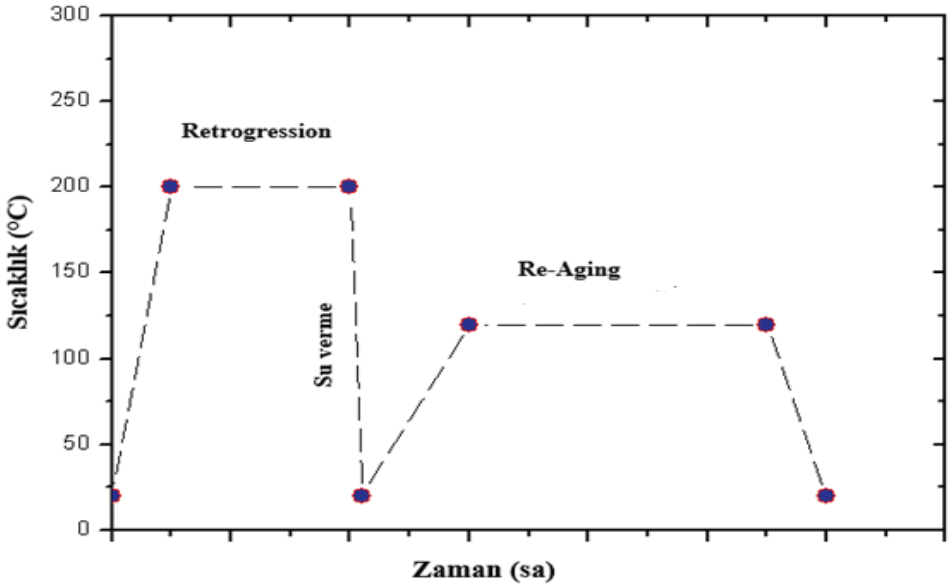
a) Nano boyutlu çekirdekli çökeltiler b) ve c) atom ölçeğinde, tutarlı Al / çökelti arayüzlerinin varlığını kanıtlar.

Altıgen diskler ve trombositler şeklindeki çökeltiler, öncülleri GP zonları olan MgZn (Luiggi ve Valera,2017 ; Naeem ve Mohammed ;2013) veya Mg_2Zn_{11} (Emani vd.,2009) polimorfik çökeltilerden oluşan η' fazında baskındır. Bu çökeltiler 250 ° C'nin altındaki sıcaklıklarda oluşur ve tanenin iç kısmında dağılma eğilimi gösterir. GP zonları ve η' fazı, yaşlanmanın erken evrelerinde bir arada bulunur (Emani vd.,2009). Sınırlı sayıda araştırma çalışması atomistik açıdan η' fazının oluşumunu ele almış olsa da, yarı kararlı η' çökeltilerinin yapısında yüksek bir atomik kusur içeriği olduğu bulunmuştur. Hem deneysel hem de stimülasyon sonuçları, kristalografik yön [111] Al (Li vd.,1999) boyunca η' fazı etrafında sıkıştırıcı gerinim alanları olduğunu göstermektedir. (Komura ve Tokunaga ,1980) η fazı, 350° C'ye kadar sıcaklıklarda elde edilen tane sınırlarında dağılma eğilimi gösteren, yine trombosit şeklinde (Emani vd.,2009) şekillendirilmiş $MgZn_2$ çökeltilerinden oluşur. Al ve η fazı arasındaki kristalografik yönelim ilişkilerine bağlı olarak, η 1- η 11 olarak bilinen 11 tip η fazı vardır. Bu türler arasında, η1, η2 ve η4 en sık gözlenenler fazlardır. (Li vd.,1999 ; Gregson,1995)

Cu içeren fazlar (çoğunlukla AA7075 alaşımındaki Cu ve Mg içeriği için S fazları), alüminyum matris içindeki daha az alaşım elementlerini bileşimlerine entegre eden karmaşık fazlardır. Bu fazlar 350 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda rapor edilirken, diğer çoklu fazlar alaşımın erime noktasının altındaki sıcaklıklarda oluşur (Brown,1999). Burada bahsedilen sıcaklık aralıkları hem alaşımın bileşimine hem de kullanılan ısıl işlem tipine bağlıdır ve bu konu ile ilgili literatürde gösterilen farkı açıklamaktadır.

7075 T6-T651 Al Alaşımına Uygulanan RRA Isıl İşlemi

RRA,ısıl işlemi mekanik özelliklerden ödün vermeden korozyon direncini iyileştirmek amacıyla Al-Zn-Mg-Cu alaşımları için standart bir çok aşamalı yaşlandırma prosedürüdür.7075 Al T6-T651 malzemeye belli bir sıcaklığa kadar retrogresyon (yeniden çözeltiye alıp) su verme sonrası re-ageing (yeniden yaşlandırma) sürecini içermektedir. Şekil 3 de RRA ısıl işlem çevrimini göstermektedir.



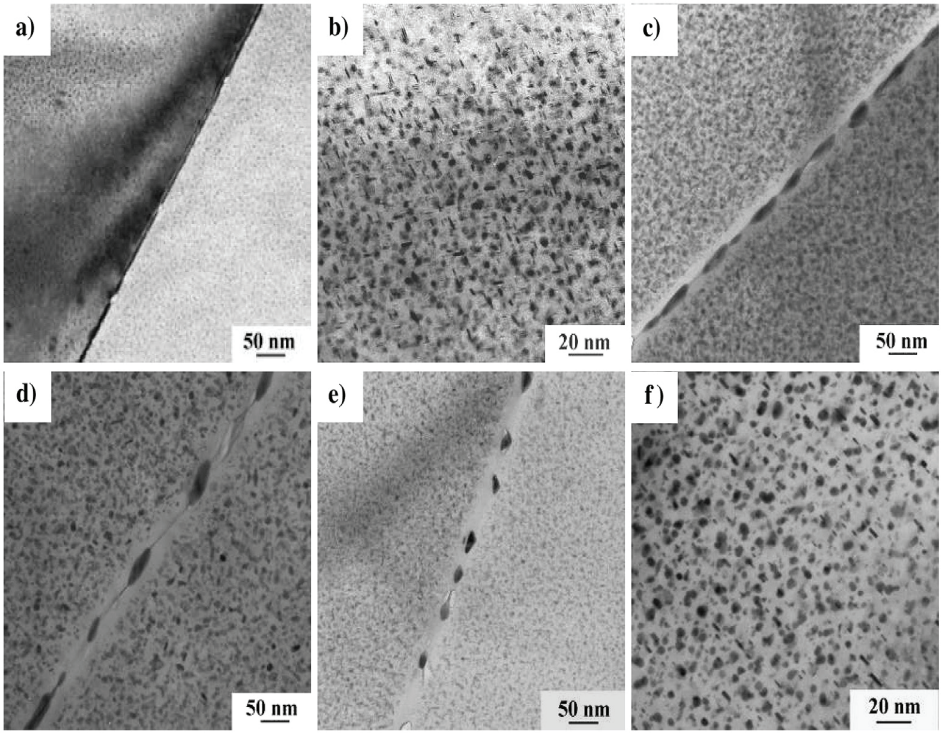
Şekil 3. RRA Isıl İşlem Çevrimi

Bugüne kadar, RRA ve 7xxx serisi Al alaşımlarının korozyon direnci ve mekanik tepkisi üzerindeki potansiyel etkileri üzerinde çok sayıda araştırma çalışması yapılmıştır, ancak sistematik olarak az parametreler çalışılmıştır. Bu nedenle, literatürde yeni bir sonuca varılmadan tamamen benzer çok sayıda sonuç vardır. Uygulanan sıcaklığa ve zamana bağlı olarak, RRA aşamalarının her biri, çökeltilerin oluşumundan veya çözünmesinden sorumludur, böylece nihai mikro yapı, ilgili faz dönüşümlerinden oldukça etkilenir.

Deneysel çalışmalar, retrogresyon sırasında GP bölgelerinin çözünmesinin matris içindeki Zn ve Mg atomlarının konsantrasyonunu ve süper doyma derecesini artırdığını ve böylece yeniden yaşlanma sırasında η' fazının yüksek hızlı çekirdeklenmesini ve büyümesini desteklediğini doğrulamıştır. Öyle görünüyor ki, geniş boyut dağılımına sahip çökeltilerin varlığı ve yaşlanma öncesi ve retrogresyon aşamalarına göre η' fazının sayı yoğunluğundaki artış esas olarak RRA ile işlem görmüş Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının mekanik olarak güçlendirilmesinden sorumludur. (Chun vd., 2006).

Küçük açılı x-ışını saçılma (SAXS) analizi ve atom-prob tomografi çalışmaları, RRA'dan sonra çökeltilerin Cu ve matrisin Zn'de daha zengin olduğunu göstermektedir (Marlaud vd., 2010). Yukarıda bahsedilen tartışmaya dayanarak, retrogresyon sıcaklığı ne kadar yüksekse, mikroyapının yeniden yaşlandırma sonrasında o kadar stabil olacağı beklenmektedir. (Ranganatha vd.,2013). Ayrıca, RRA, taneciklerde ve tane sınır bölgelerinde bulunan çökeltilerin geometrik özellikleri arasındaki farkı uyarlayabilir. Başka bir deyişle, tane sınırı çökeltilerini kabalaştırabilir, sürekli ağlarını kırabilir ve dağılımlarını daha düzgün ve ayrık hale getirebilir (Xiao vd., 2011).

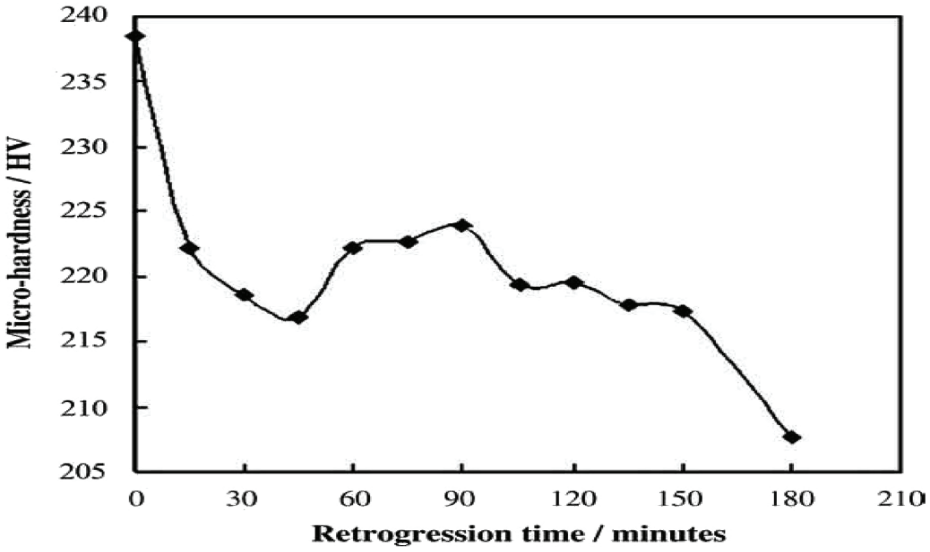
T6-, T76, T73 ve RRA ile işlem görmüş Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının mikroyapı gelişimi arasında basit bir karşılaştırma bilgi verici olabilir. Tanelerin iç ve tane sınır bölgelerindeki RRA ile işlem görmüş Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının mikroyapısının sırasıyla T6 ile işlem görmüş alaşımlar ve T76-T73 ile işlem görmüş olanlarla aynı olduğu gösterilmiştir. Şekil 4. bu alaşımların mikroyapı görüntülerini karşılaştırır. Görüldüğü gibi, T6 ile işlem görmüş alaşım, taneciklerin içine dağılmış ince 3-6 nm çökeltilerin düzgün bir dağılımını ve tane sınırlarında PFZ (çökeltişiz bölge) içermeyen daha kaba ve daha az aralıklı olanları içerir. T76 ve T73 ile işlem görmüş alaşımlar için durum budur, ancak intragranüler çökeltiler oldukça kaba ve tane sınırı dispersoitleri daha kaba ve daha aralıklı hale gelir. Ayrıca, T73 ile işlem görmüş alaşımdaki çökeltiler, daha geniş PFZ ile T76 ile işlem görmüş olanlardan daha kabadır. Kesin faz analizleri, GP bölgelerinin, η' ve η fazlarının RRA ile işlem görmüş alaşımlarda ana çökeltiler olduğunu göstermektedir (Li vd., 2009).



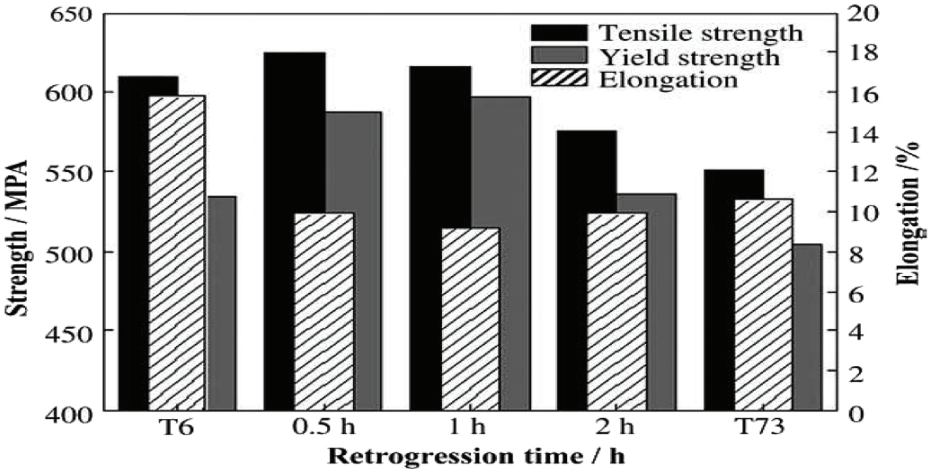
Şekil 4. Farklı Termal Döngülerle İşlenmiş Al 7075 Alaşımının Tem Görüntüleri.

(a, b) T6 temper), (c) T76 temper, (d) T73 ve (e-h) RRA.

Yaşlanma sırasında RRA ile işlem görmüş alaşımların sertliğini etkileyen bazı önemli faktörler vardır; bunların arasında, retrogression süresi, sıcaklık ve ısıtma oranı, yaşlanma öncesi koşullar ve alaşım elementleri birincil öneme sahiptir. Şekil 5 retrogression süresinin sertliğe etkisini göstermektedir.



Şekil 5.RRA İşlemi Yapılmış 7075 Al Alaşımının Mikro Sertlik Sonuçları (Li vd., 2009)

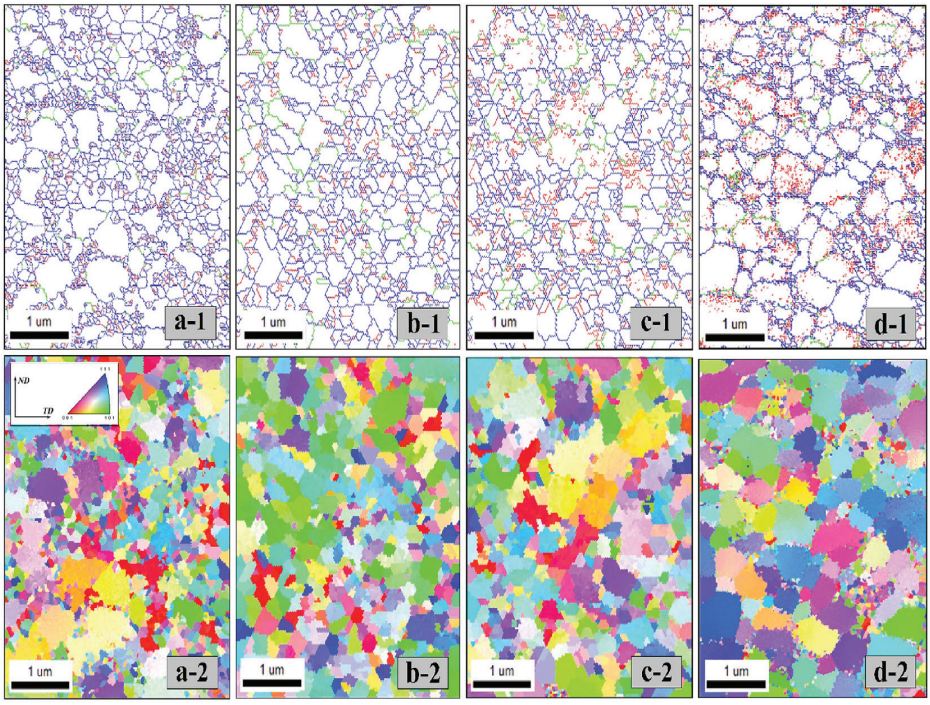


Şekil 6. Retrogression Süresine Bağlı Olarak Akma, Çekme Dayanımını ve % Uzama Değerlerini Göstermektedir

RRA ısıl işlemi, farklı retrogresyon süreleri için 185 ° C'de gerçekleştirilir. Retrogression sıcaklığı arttıkça, atomik difüzyon hızlanır ve η

fazının oluşumunu ve büyümesini destekler. Ayrıca, yüksek retrogression sıcaklığı, çökeltilerin kabalaşması ve evrimi açısından uzun gerileme süresine karşılık gelir. Bu nedenle, gerileme süresi ve sıcaklık arttıkça, η fazının kabalaşması nedeniyle mekanik dayanım azalır (Yao vd., 2012).

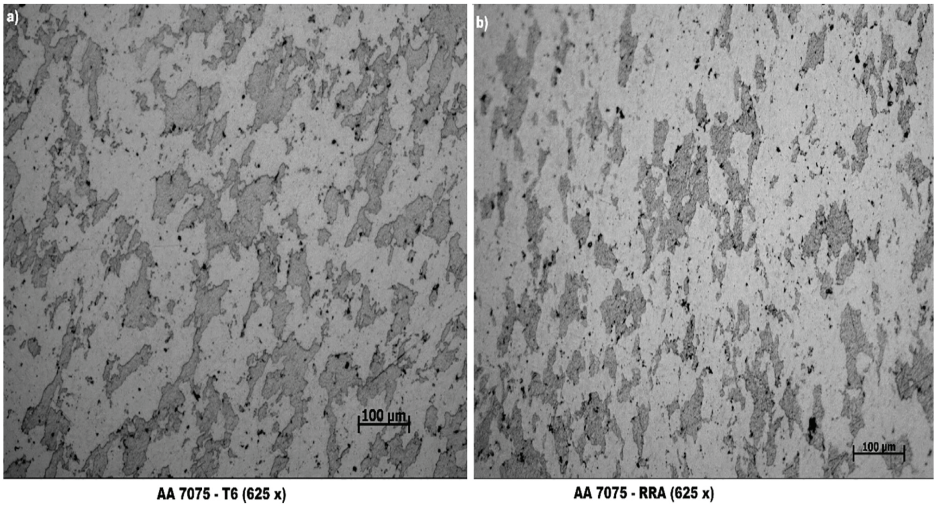
RRA koşullarına bağlı olarak, RRA ile işlem görmüş Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının elektriksel iletkenliği T6 ve T76 ile işlem görmüş muadillerinden daha yüksek, ancak T73 ile işlem görmüş olanlardan daha düşüktür.(Peng vd., 2012). Örneğin Su ve ark., T6-, T76-, T73- ve RRA ile işlenmiş 7075 Al alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerlerini sırasıyla% 31.6, 36.7, 40.2 ve 39.1 IACS olarak ölçmüşlerdir. Daha da ilginci, elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım genellikle ters yönde değişir (Su vd., 2016).



Şekil 7. Farklı Sıcaklıklarda ECAP Tabi Tutulan 7075 Al Alaşımının EBSD Tane Sınırı Haritaları ve Oryantasyon Renk Haritaları

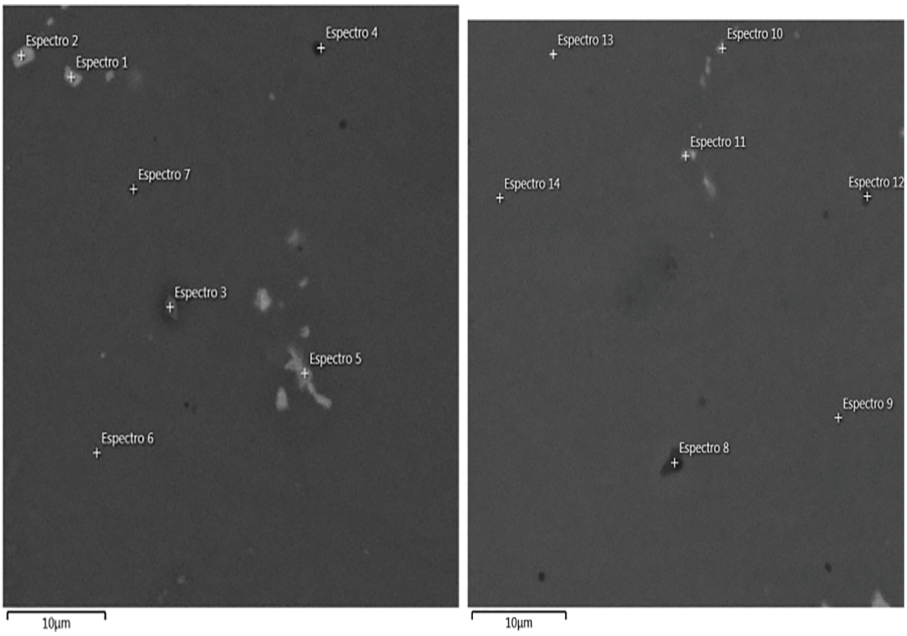
(a) oda sıcaklığında 3 geçiş, (b) 120 °C'de 3 geçiş, (c) 150 °C'de 4 geçiş ve (d) 180 °C'de 4 geçiş.

Şekil 7 gösteriyor ki bu şekilde, mavi, yeşil ve kırmızıçizgiler sırasıyla 15'in üzerinde, 5 ile 15 arasında ve 2 ile 5 arasında yönelim bozukluğu açılarına sahip tane sınırlarına karşılık gelir. Açıkça görüldüğü gibi, ECAP iri eş eksenli taneleri daha ince tanelere parçalayabilir ve mikro yapıyı rafine edebilir, böylece tane sınırları ve üçlü bölgelerin yakın çevresinde yeni taneler oluşur. Deformasyon sıcaklığına bağlı olarak, düşük açılı tane sınırları yüksek açılı olanlarla değiştirilir ve uygun bir sıcaklık uygulanırsa ve anormal tane büyümesini bastırırsa iki modlu bir tane boyutu mikroyapısı oluşması muhtemeldir (Shaeri vd.,2016).



Şekil 8. Al 7075 T6 ve RRA Koşullarının Mikro yapısı (Silva Savonov vd., 2019)

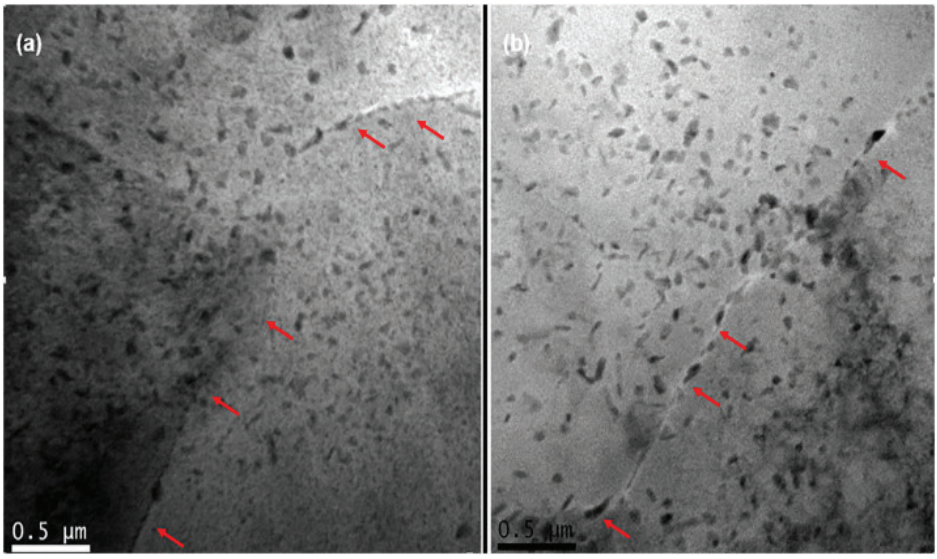
Şekil 8 AA7075 alaşımının T6 koşulundaki ve RRA koşulundaki örneklere göre tipik enine kesit görüntülerini gösterir. Düzgün bir tane dağılımından ve ikinci faz parçacıklarının, resimlerde gösterilen siyah noktaların varlığından oluşurlar**.** En kaba ikinci faz partikülleri tercihen tane dış hatlarında bulunurken, daha ince ikinci faz partikülleri daha homojen bir dağılıma sahiptir. AA7075-T6 alaşımında ikinci faz partiküllerinin varlığı ve bu alaşımda tanımlanan ana metaller arası partiküllerin demir içerdiği yapılan eds analizi sonucunda görülmüş, burada $Al_{23}CuF_{e4}$ ve Al_7Cu_2Fe en yaygın fazlardır. Bu çökeltiler daha yüksek boyutlara, düşük deforme olabilirliğe, yüksek elastikiyet modülüne sahiptir ve alüminyum matris ile tutarlı değildir (Guo vd., 2015).



Şekil 9. a) AA7075 –T6 Alaşımının EDS analizi b) AA7075 –RRA Alaşımının EDS Analiz

Şekil 9'da spektrum 3, 4 ve 7 olarak işaretlenen koyu gri faz ikinci partiküller, ana elementler olarak Al, Zn ve Mg içeren bileşimlerinde Fe içermemiştir. Diğer spektrumlara bakıldığında ısıl işlemin ikinci faz parçacıklarının bileşimini değiştirmediğini gösterdi. Bu parçacıklar ısıl işlemlerle çözünmezler ve katılaşma işlemi sırasında ötektik reaksiyonlardan türetilirler ve genellikle Si veya Fe içerirler. Spektrum 10 ve 11 olarak işaretlenen açık gri ikinci faz parçacıkların bileşimlerinde Fe bulunmuştur. Spektrum 12 olarak etiketlenen en koyu gri parçacık, Hatch tarafından bildirilen intermetalik faz Mg2Si ile uyumlu ana elementler olarak Al, Mg ve Si'yi göstermiştir Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemi sırasında Si, magnezyum ile birleşerek Mg_2Si oluşturur. Ayrıca karmaşık çözünmeyen fazlar oluşturmak için Fe ve diğer elementlerle birleşebilir. Fe ve Si, ticari alüminyum alaşımlarında en yaygın safsızlıklardır ve genellikle metaller arası parçacıklar şeklinde bulunur. Artan miktarda Fe ve Si, çözünmeyen intermetalik fazların hacimsel fraksiyonunu arttırır, bu da alaşımın kırılma tokluğunu azaltır. Bu büyük çözünmeyen

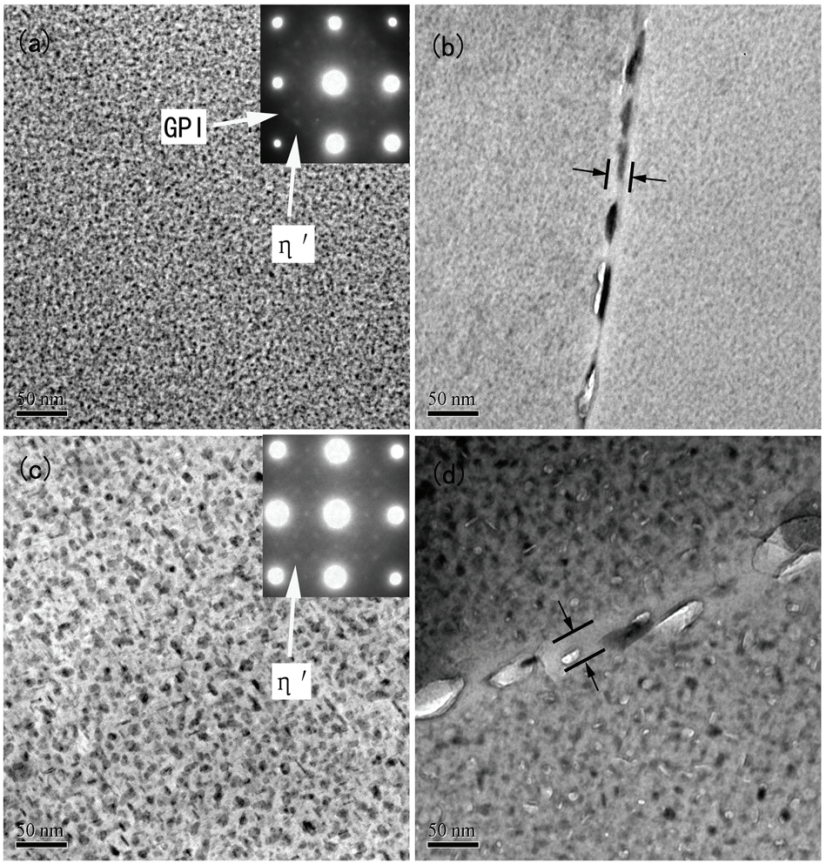
partiküllerin dağılımının ve miktarının yeterli kontrolü, alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi için faydalıdır (Hatch, 1984).



Şekil 10. Tane Sınır Bölgesindeki (a) AA7075-T6 ve (b) AA7075-RRA İçindeki Çökeltilerin Dağılımını ve Şeklini Gösteren MET Mikroskobu. (Silva Savonov vd., 2019)

Şekil 10 (a) ve (b), tane sınırları bölgesinde RRA ve T6 koşullarının mikro yapılarındaki ana farklılıkları gösterir, RRA koşulu, tane sınırlarında η fazı çökeltilerinin daha fazla olduğunu gösterir. T6 koşulu ile karşılaştırıldığında daha kabadır. Birkaç çalışma, yeniden çözündürme sırasında ana mikroyapısal değişikliklerin GP bölgelerinin çözünmesi olduğunu ve yeniden yaşlanma sırasında yeniden çökelen alüminyum matrisinde η ′ ince kısımların çökeldiğini, tane sınırlarında ise η oluşup büyüyebileceğini bildirmiştir.

En kaba ve aralıklı η fazı çökeltileriyle tane sınırlarında daha heterojen mikro yapı, Şekil 10 (b) 'de gösterilen tane sınırı etrafındaki hafif bölge olan daha büyük bir çökeltisiz bölge ile sonuçlanır. Bu daha heterojen mikro yapı, korozyon direncinin artmasını sağlar (Wang vd., 2014).

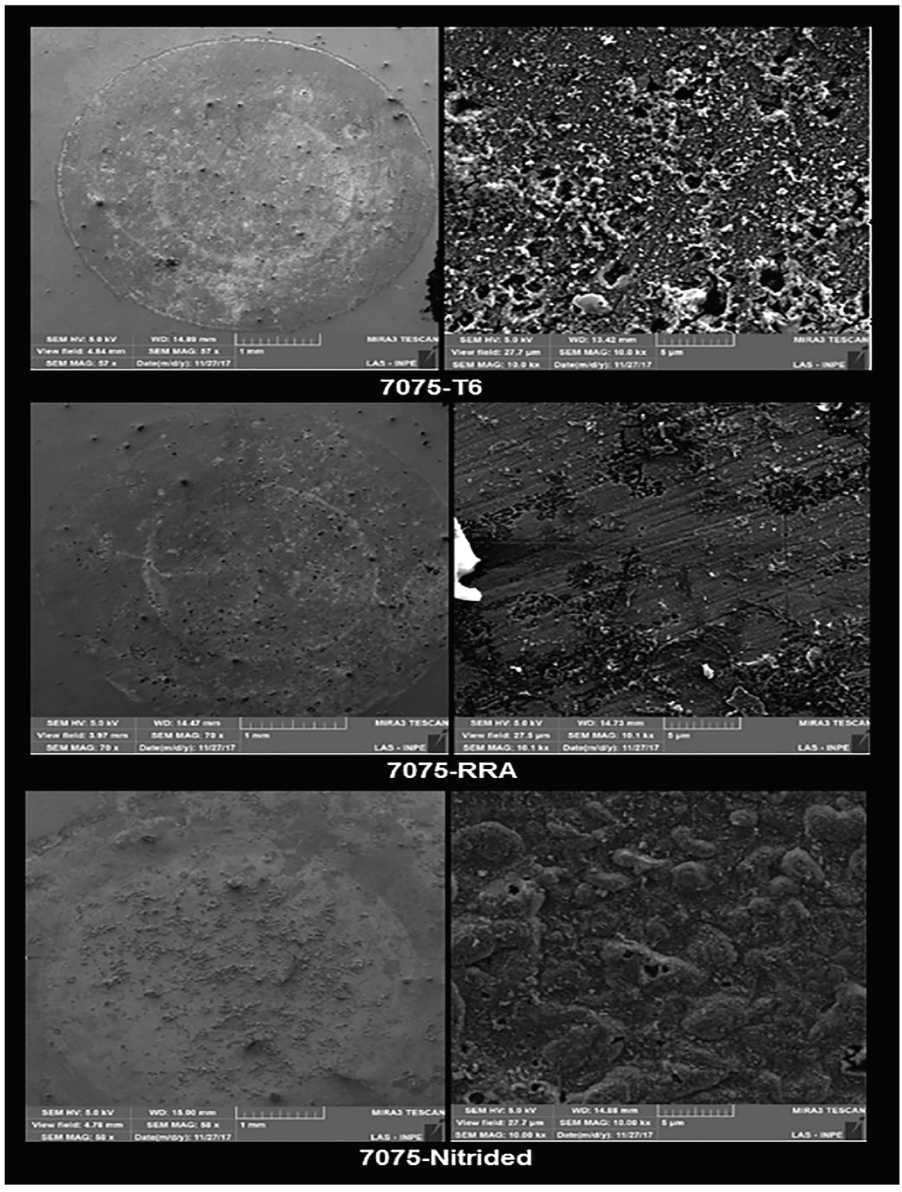


Şekil 11. 7075 -T6 Al Alaşımının TEM Parlak Alan Mikro Yapıları

(a) ve (c) RRA1 (160°C de 10 dk Retrogression ve 100 °C 24 saat reaging yapılan), (b) ve (d) RRA2 (160°C de 120 dk Retrogression ve 100 °C 96 saat reaging yapılan)

Yapılan bir çalışmada şekil 11(a) da gösterildiği gibi, tane içi yoğun ve ince çökeltiler RRA1 numunesinde sergilenmiştir. {220}Al 1/3'ü ve 2/3'ündeki parlak kırınım noktaları, η' çökeltilerinin varlığını öne sürerken, 〈100〉 Al {1, 3/4, 0} hafif zayıf kırınım noktaları az miktarda da GPI bölgesini belirtmektedir. RRA1 ile tavlanmış numunede tane içi çökeltilerinin esas olarak η 'çökeltilerinden ve GPI bölgelerinden oluştuğu anlamına geliyordu. Buna karşılık, Şekil 11 (b) 'de görüldüğü gibi RRA2

ile tavlanmış numunede daha büyük ve ayrı çökeltiler mevcuttu. Şekil 11 (b), RRA2 ile tavlanmış numunede η' çökeltilerinin bulunduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, uzun yeniden yaşlandırma süresiyle bağlantılı olarak düşünüldüğünde, tane iç kısmındaki kaba çökeltiler η çökeltilerini içermelidir. RRA tavlanmış numunede genişlemiş tane içi çökeltilerin uzamış gerileme ve yeniden yaşlanmaya atfedilmesi gerektiği sonucuna varılabilir. Şekil 11 (c) ve (d), iki farklı RRA temperlenmiş numunenin tane sınırı mikro yapılarını gösterdi. Bunlardan, her iki RRA tavlanmış numunede kaba ve süreksiz olarak dağıtılan η fazı partikülleri gözlemlendi. RRA2 ile temperlenmiş numunede tane sınırı çökeltileri (GBP), RRA1 ile temperlenmiş numuneden biraz daha büyük göstermiştir. Ayrıca, RRA1 ile temperlenmiş numunede daha dar PFZ'lerin (çökeltişiz bölge) (yaklaşık 30 nm) mevcut olduğu görülebilir. Retrogression süresinin uzatılması, RRA2 ile temperlenmiş numunede biraz daha geniş PFZ'ler (yaklaşık 40 nm) olduğunu gösterir. Dahası, nispeten düşük bir retrogression sıcaklığının kullanılmasından dolayı, önceki referanslara göre PFZ'lerin genişliği, aşırı yaşlanmış 7000 serisi alaşımdakinden daha küçüktür (Xia vd.,2016).



Şekil 12. Korozyon Testlerinden Sonra Numunelerin SEM Görüntüleri

Şekil 12 gösteriyor ki nitrürlenmiş durumda daha az yoğun, daha lokalize ve daha yüzeysel olduğunu ve maruz kalan alanın çoğunu koruduğunu göstermiştir. Korozyon testlerinde nitrürlenmiş koşulun per-

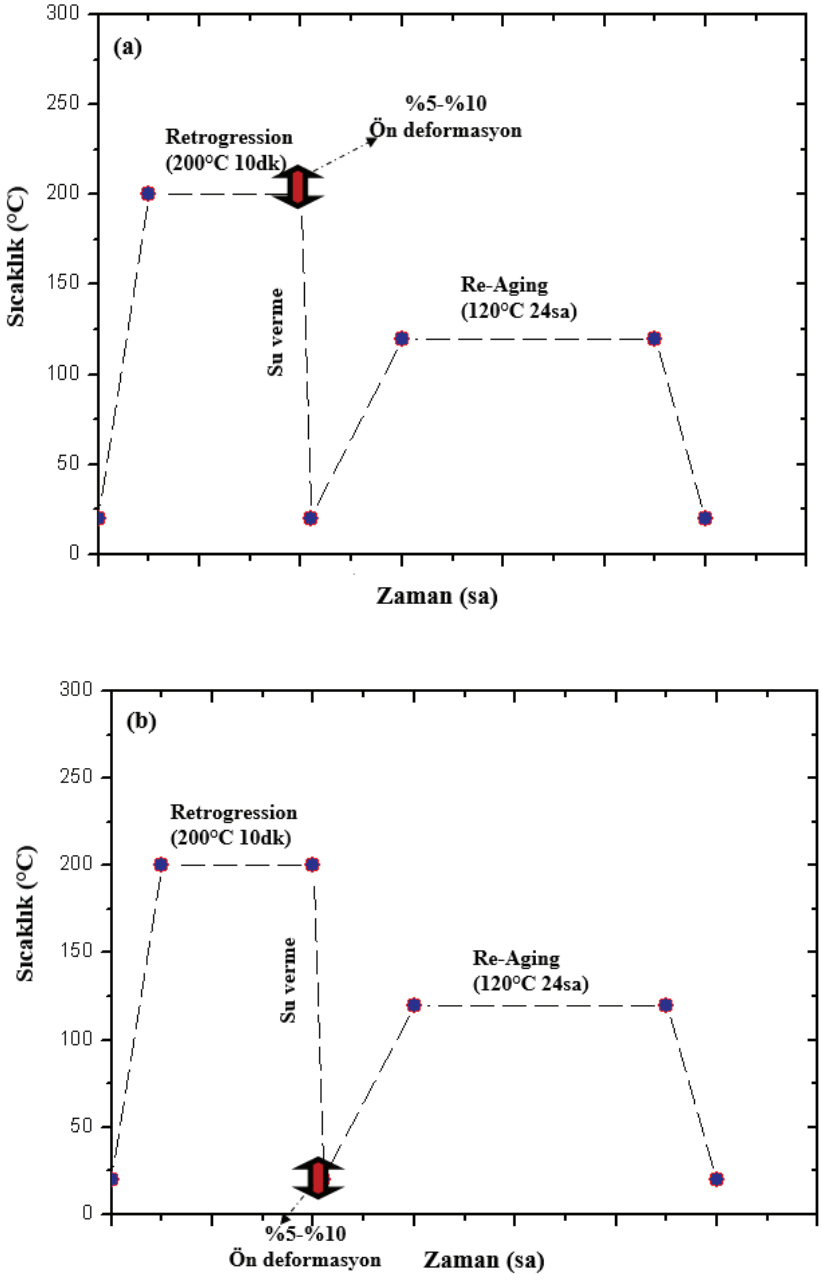
formansı daha iyi, alaşıma korozif sürece karşı daha iyi koruyucu özellikler kazandırmak için plazma işlemiyle değiştirilen katmanla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Nitrürlenmiş AA7075 koşulunun lokalize korozyon sunması gerçeği, bu katmandaki olası süreksizliklerle ilişkili olabilir, bu da matrisin korozyon sürecine daha duyarlı bir şekilde maruz kalmasıyla sonuçlanır. (Silva Svonov vd.,2019) Süreksizliklerin varlığı, alüminyum alaşımının ve alüminyum nitrürün ısıl genleşme katsayısı arasındaki büyük farkla ilişkili olabilir; bu, nitrürlenmiş tabakada çatlama ve bozulmaya neden olan sıkıştırma gerilimleri oluşturur (Totten ve MacKenzie; 2003).

7075-T651 Al Alaşımına Uygulanan RRA Isıl İşlemin ve Ön Deforsmasyonun Etkisi

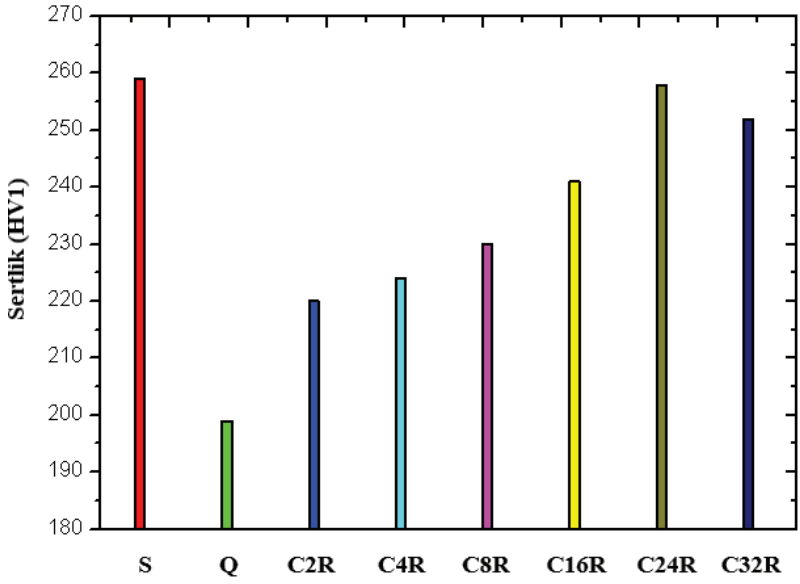
Bizim çalışmamız da 7075 -T651 Al alaşımına RRA ısıl işlemi sırasında ön deformasyon miktarının etkileri incelenmiştir. S olarak kodlanan numune 7075-t651 ticari satın alınan numunedir. Q olarak kodlanan ise yeniden çözeltiye alındıktan sonra su verilen numunedir. Öncelikle klasik RRA işlemi 2-4-8-16-24-32 saat yeniden yaşlandırma yapıldı. En yüksek değerler 24 saat yeniden yaşlandırılan numunede elde edildi.

Bu numune de C24R olarak kodlandırıldı.24 saatlik yeniden yaşlandırma baz alınarak RRA ısıl işlemi sırasında uygulanacak ön deformasyon işlemleri iki farklı şekilde uygulanmıştır. İlk olarak; Retrogresyon (yeniden çözeltiye alma) sıcaklığında (200 °C) rezistans yardımıyla 10 dk süre bekletilerek %5-%10 oranlarında çekme yükü altında deforme edilen numunelere su verilip 120°C sıcaklıkta 24 saat re-aging (yeniden yaşlandırma) uygulanmış ve bu numuneler sırasıyla 5QR ve 10QR olarak kodlanmışlardır. Bu durum literatürde ilk defa denenmiş olup patent tescil sürecimiz devam etmektedir.

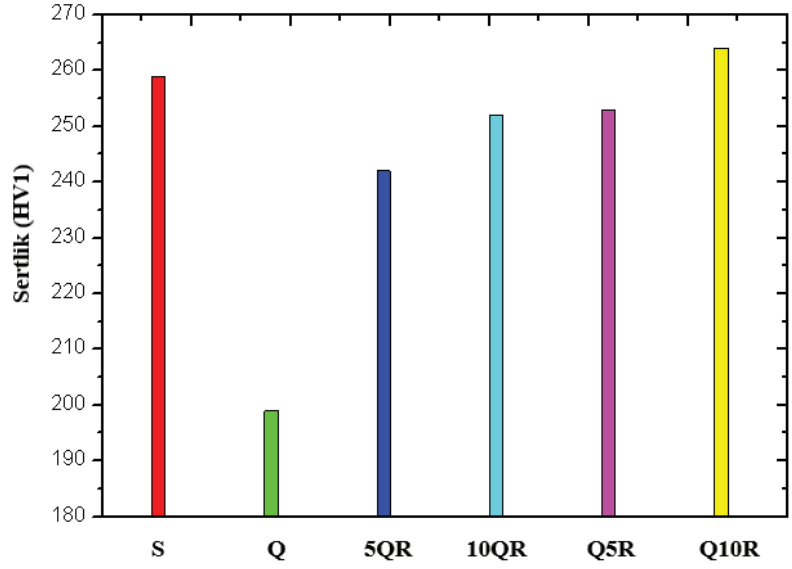
Diğer yöntemde ise 200 °C sıcaklıkta 10 dk süre bekletilerek retrogresyon (yeniden çözeltiye alma) işlemi uygulanıp oda sıcaklığındaki suda su verilen numuneler %5-%10 oranlarında çekme yükü altında deforme edilip 120°C sıcaklıkta 24 saat re-aging (yeniden yaşlandırma) uygulanmış ve sırasıyla Q5R ve Q10R olarak kodlanmışlardır.



Şekil 13.7075 Al Alaşımına Uygulanan Ön Deformasyon İşlemlerine Ait Diyagramlar



Şekil 14. Klasik Yöntemle RRA Isıl İşlemi Uygulanmış Numunelerin Sertlik Grafiği



Şekil 15. Ön Deformasyon Etkisiyle RRA (24 Saat Yeniden Yaşlandırma) Isıl İşlemi Uygulanmış Numunelerin Sertlik Grafiği

Şekil 14 ve 15 de görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri Q10R de elde edilmiştir. Şekil 14 de görüldüğü üzere 24 saate kadar yeniden yaşlandırılan numunelerin sertlik değerlerinin arttığı 32 saat yeniden yaşlandırılan numunenin sertliğinde azalmaya meydana geldiği görülmüştür. Bununun nedeni ise çökelti boyutunda aşırı büyüme başladığından sertlik değerinin azalmasına neden olmaktadır.

Tablo 1. Çekme Dayanımı ve % Uzama Verileri

	S	Q	C24R	5QR	10QR	Q5R	Q10R
Çekme Dayanımı (N/mm2)	560	480	568	555	545	550	544
% Uzama	%14	%19,8	%16	%18	%15	%20	%14

Tablo 1 de görüldüğü gibi en yüksek dayanım C24R de ve en yüksek uzama Q5R de görülmüştür. Böylece daha iyi şekillendirilebilirlik istenilen uygulama alanlarında 7075 Al alaşımlarına Q5R numunesinde yapılan işlemler yapıldığında daha iyi sonuç verdiğini deneyler sonucu ispatlamış olduk.

SONUÇ

Bu çalışma, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının çökelme sertleşmesi ve RRA ısıl işleminin mekanik performans etkileri hakkında bir genel bakış sunmaktadır. Buna göre, $MgZn_2$ fazı, oluşumu, dağılımı ve geometrik özellikleri yaşlanmanın işleme parametrelerine ve ilerleyişine oldukça duyarlı olan 7xxx serisi alaşımlarda ana kuvvetlendirici çökeltidir. Denemiş olduğumuz ön deformasyonlu RRA ısıl işlemi literatürde ilk olarak yapılmıştır. En yüksek % uzama değer Q5R numunesinde elde edilmiştir. Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının yaşlanmasına ilişkin çok sayıda deneysel veri mevcut olduğundan, işleme parametreleri ve diğer malzeme değişkenlerine bağlı olarak optimum pencereleri gösteren işleme-mikro yapı-özellik haritalarını türetmek mümkün görünmektedir.

KAYNAKÇA

Adenis D, Guilhaudis A. Me´m Sci Rev Me´tall 1967;64:877–89.

Azarniya, A., & Hosseini, H. R. M. (2015). A new method for fabrication of in situ Al/Al3Ti–Al2O3 nanocomposites based on thermal decomposition of nanostructured tialite. Journal of Alloys and Compounds, 643, 64-73. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.145

Azarniya, A., Hosseini, H. R. M., Jafari, M., & Bagheri, N. (2015). Thermal decomposition of nanostructured Aluminum Titanate in an active Al matrix: a novel approach to fabrication of in situ Al/Al2O3–Al3Ti composites. Materials & Design, 88, 932-941.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.050

Brown J. , Foseco Non-ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, 1999.

Buha J, Lumley RN, Crosky AG. Secondary aging in an aluminum alloy 7050. Mater Sci Eng A. 2008;492:1–10 https://doi:10.1016/j.msea.2008.02.039

Chun, F. E. N. G., LIU, Z. Y., NING, A. L., LIU, Y. B., & ZENG, S. M. (2006). Retrogression and re-aging treatment of Al-9.99% Zn-1.72% Cu-2.5% Mg-0.13% Zr aluminum alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16(5), 1163-1170. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60395-6

Cina B, Gan R. Reducing the susceptibility of alloys, particularly aluminum alloys, to stress corrosion cracking the United States patent 3856584 (1974).

Cina B, Ranish B. Aluminum industrial product. Pittsburgh: American Society for Metals; 1974.

Degischer, H. P., Lacom, W., Zahra, A., & Zahra, C. Y. (1980). Decomposition Processes in an Al--5% Zn--1% Mg Alloy. II.--Electromicroscopic Investigation. Zeitschrift fur Metallkunde, 71(4), 231-238. https://doi 10.1007/s10853-009-3879-8

Emani SV, Benedyk J, Nash P, Chen D. Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions. J Mater Sci. 2009;44:6384–91.

Esawi, A. M., & Aboulkhair, N. T. (2015). Bi-modally structured pure aluminum for enhanced strength and ductility. Materials & Design, 83, 493-498.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.062

Gregson, P. J. (1995). Aluminium alloys: physical metallurgy, processing and properties. In High Performance Materials in Aerospace (pp. 49-84). Springer, Dordrecht.

Guo, W., Guo, J., Wang, J., Yang, M., Li, H., Wen, X., & Zhang, J. (2015). Evolution of precipitate microstructure during stress aging of an Al–Zn–Mg–Cu alloy. Materials Scienceand Engineering: A, 634, 167-175. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.047.

Hatch J.E. Aluminum Association. (1984). Aluminum: properties and physical metallurgy. ASM international.

Hou, X., & Bai, P. (2017). Evaluation of strain fields caused by the η′ phase in an Al-Zn-Mg-Cu alloy. Materials Science and Engineering: A, 683, 90-93.

https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.065

Komura, Y., & Tokunaga, K. (1980). Structural studies of stacking variants in Mg-base Friauf–Laves phases. Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry, 36(7), 1548-1554..

Lei, C., Yang, H., Li, H., Shi, N., & Zhan, L. H. (2017). Dependences of microstructures and properties on initial tempers of creep aged 7050 aluminum alloy. Journal of Materials Processing Technology, 239, 125-132.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.004

Li J, Birbilis N, Li C, Jia Z, Cai B, Zheng Z. Mater Charact 2009;60:1334

https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.06.007

Li X, Starink MJ. Analysis of precipitation and dissolution in overaged 7xxx aluminum alloys using DSC. Mater Sci Forum.2000;331–337:1071–6.

Li, J. F., Birbilis, N., Li, C. X., Jia, Z. Q., Cai, B., & Zheng, Z. Q. (2009). Influence of retrogression temperature and time on the mechanical properties and exfoliation corrosion behavior of aluminium alloy AA7150. Materials Characterization, 60(11), 1334-1341. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.06.007

Li, X. Z., Hansen, V., Gjønnes, J., & Wallenberg, L. R. (1999). HREM study and structure modeling of the η′ phase, the hardening precipitates in commercial Al–Zn–Mg alloys. Acta materialia, 47(9), 2651-2659. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00138-X

Luiggi NJ, Valera M. Kinetic study of phase precipitation of an AA7075 alloy under T6 and T7 Temper (in Spanish; RLMM:Accepted);

https://doi 10.1007/s10973-017-6683-8

Marlaud T, Baroux B, Deschamps A, Chemin JL, He´non C. Mater Sci Forum 2006;519–521:455.

Marlaud, T., Deschamps, A., Bley, F., Lefebvre, W., & Baroux, B. (2010). Evolution of precipitate microstructures during the retrogression and re-ageing heat treatment of an Al–Zn–Mg–Cu alloy. Acta materialia, 58(14), 4814-4826.

https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.05.017

Naeem HT, Mohammed KS. Retrogression and re-aging of aluminum alloys (AA 7075) containing nickel. Dig J Nanomater Biostruct. 2013;8(4):1621–32.

Peng, G. S., Chen, K. H., Chen, S. Y., & Fang, H. C. (2012). Influence of dual retrogression and re-aging temper on microstructure, strength and exfoliation corrosion behavior of Al–Zn–Mg–Cu alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22(4), 803-809. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61248-X

Qi, Y., Lapovok, R., & Estrin, Y. (2016). Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods processed by severe plastic deformation. Journal of materials science, 51(14), 6860-6875..

Ranganatha, R., Kumar, V. A., Nandi, V. S., Bhat, R. R., & Muralidhara, B. K. (2013). Multi-stage heat treatment of aluminum alloy AA7049. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(6), 1570-1575. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62632-1

Ryum N. Microstructures in a precipitation-hardened Al–Zn–Mg-Alloy, with particular reference to structures developed during welding. Z Met. 1975;66:338–45.

Sha G, Cerezo A. Early-stage precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy (7050). Acta Mater. 2004;52(15):4503–16. https://doi:10.1016/j.actamat.2004.06.025

Shaeri, M. H., Shaeri, M., Ebrahimi, M., Salehi, M. T., & Seyyedein, S. H. (2016). Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloy. Progress in Natural Science: Materials International, 26(2), 182-191.

https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.03.003

Silva Savonov, G., Camarinha, M. G. G., Rocha, L. O., Barboza, M. J. R., Martins, G. V., & Reis, D. A. P. (2019). Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy. Surface and Coatings Technology, 374, 736-744. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.047.

Starke Jr, E. A., & Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. Progress in aerospace sciences, 32(2-3), 131-172.

https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6

Su, R. M., Qu, Y. D., & You, J. H. (2016). Study on a new retrogression and re-aging treatment of spray formed Al-Zn-Mg-Cu alloy. Journal of Materials Research, 31(5), 573-579.

Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing. CRC press.

Wallace W, Beddoes J, de Malherbe M. Can Aeronaut Space J 1981;27:223.

Wang, Y. L., Pan, Q. L., Wei, L. L., Li, B., & Wang, Y. (2014). Effect of retrogression and reaging treatment on the microstructure and fatigue crack growth behavior of 7050 aluminum alloy thick plate. Materials & Design, 55, 857-863.

Warner T. Mater Sci Forum 2006;519–521:1271.

Xia, P., Liu, Z., Bai, S., Lu, L., & Gao, L. (2016). Enhanced fatigue crack propagation resistance in a superhigh strength Al–Zn–Mg–Cu alloy by modifying RRA treatment. Materials Characterization, 118, 438-445. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.06.023

Xia, Y. P., Pan, Q. L., Li, W. B., Liu, X. Y., & He, Y. B. (2011). Influence of retrogression and re-aging treatment on corrosion behaviour of an Al–Zn–Mg–Cu alloy. Materials & Design, 32(4), 2149-2156. http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2016.06.023

Xu, X., Zheng, J., Li, Z., Luo, R., & Chen, B. (2017). Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu alloy during isothermal aging: atomic-scale HAADF-STEM investigation. Materials Science and Engineering: A, 691, 60-70. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.032

Yao, N. G., Warikh, B. A. R. M., Zolkepli, B., Nadiah, N., & Leng, S. C. (2012). Effect of retrogression medium to the mechanical properties of aluminum alloy 7075. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 165, pp. 6-11). Trans Tech Publications Ltd.

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.165.6

TALAŞLI İMALATTA BEYAZ TABAKA

Emin ÖZDEMİR[1]

Öz: Beyaz tabaka, bir metalin tane yapısının son derece rafine olduğu mikro-yapısal bir durumdur. Metalik malzemelerde dağlamaya direnen ve mikroskop altında özelliksiz ve beyaz görünen sert malzeme tabakalarını ifade eder. Birçok araştırmacı tarafından çeliklerdeki beyaz tabaka oluşumunun martenzitik faz dönüşümünden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Talaşlı imalat işlemlerinde beyaz tabaka oluşumunu etkileyen, termal ve mekanik iki mekanizma vardır. Yüksek kesme hızlarında beyaz tabaka oluşumunun öncelikle termal olarak indüklenen martenzitik faz dönüşümünden kaynaklandığı, düşük ve orta kesme hızlarında ise dönüşüme mekanik etkilerin baskın olduğu aşırı plastik deformasyonun indüklediği tane inceltme mekanizmasının hâkim olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle agresif işleme parametreleri uygulandığında veya aşınmış bir kesici takım kullanıldığında işlenmiş parça yüzeylerinde beyaz tabaka meydana gelir. Talaşlı imalat işlemlerinde, kesici takımdaki tedrici yan yüzey aşınması sonucu yükselen sıcaklık nedeniyle beyaz tabaka kalınlığı artarken, artan takım aşınması ile işlenen yüzeyde çekme tipi kalıntı gerilmeler meydana gelir. Genelde beyaz tabakalar yüzeyde çekme tipi kalıntı gerilme içerirken, gerilmenin durumu yüzey-altında derine indikçe basma tipi haline gelir. Proses kaynaklı beyaz katman, komponentin yorulma dayanımı ve servis performansında, istenmeyen önemli değişikliklere yol açar. Çünkü işlenen yüzeydeki çekme gerilmesi, yorulma çatlaklarının başlamasını teşvik ederken, basma gerilmeleri bu çatlakların başlamasını ve ilerlemesini engeller. Yüzeyde beyaz tabakası olan numunelerin beyaz tabakası olmayanlara göre ortalama 7 kat daha kısa ömre sahip olduğu bildirilmiştir. Diğer yandan bazı araştırmacılara göre, beyaz tabakanın yorulma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, İstanbul / Türkiye, emin.ozdemir@iuc.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6517-9270

yoktur, ancak zararlı olan işlenmiş yüzey üzerindeki kalıntı gerilmelerdir. Beyaz tabaka oluşumunun sebebi konusunda değişik öneriler olmasına rağmen sorun tam olarak anlaşılmadığından daha fazla çalışma ve literatür incelemesi, bu karmaşık durumu netleştirmeye yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı İmalat, Tornalama, Taşlama, Beyaz Tabaka, Yorulma

GİRİŞ

Talaşlı imalat sırasında oluşan beyaz tabakalar, ürünlerin yüzey kalitesi ve yorulma mukavemeti üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Beyaz tabaka genellikle sert bir fazdır ve yüzeyin kırılgan hale gelmesine neden olarak çatlak geçirgenliğine ve ürün bozulmasına yol açar (Bosheh ve Mativenga, 2006). "Beyaz tabaka" terimi, özellikle çelik malzemelerde dağlamaya direnen ve mikroskop altında özelliksiz ve beyaz görünen sert malzeme tabakalarını ifade eder (Griffiths, 1997). Çelikler dışında demir içermeyen metalik malzemelerde de gözlemlenmiştir (Ranganath vd., 2009). Oluşumları yaklaşık olarak üç ana alana ayrılır. İlk olarak, mühendislik bileşenlerinin hizmet ortamından çıkarıldıktan sonra malzeme yüzeyinde beyaz tabakalar bulunmuştur. İkinci, farklı koşulların simüle edilmesine izin veren tipik pin on disk aşınma deneylerinde oluşan laboratuvar araştırmalarında elde edilenlerdir. Üçüncü tip ise imalat süreçleri sonucunda oluşan beyaz tabakalardır (Griffiths, 1997).

Beyaz tabaka, alttaki malzemeden daha sert olan çok ince bir kabuk malzeme tabakasıdır. Beyaz tabaka oluşumu, kalıntı östenit açısından zengin bir faz dönüşümüdür (Bartarya ve Choudhury, 2012). Talaşlı imalat esnasında meydana gelen hızlı ısınma ve soğumadan dolayı işlenen yüzeyde beyaz tabaka oluştuğuna inanılır (Han vd., 2008). Talaşlı imalat işleminde parçaların yüzeyinde oluşan sert, gevrek ve normalde çekme gerilmesi barındıran beyaz tabaka, yüzey kalitesi, yorulma dayanımı ve servis performansı üzerinde negatif etkiye sahiptir (Aramcharoen vd., 2008; Bosheh ve Mativenga, 2006). Beyaz tabaka, yüksek temas gerilimleri olan ve yorulma hasarlarının meydana gelebileceği ürünlerde istenmemektedir. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde parçanın servis performansı açısından bu kabul edilemez bir durumdur

(Bosheh ve Mativenga, 2006). En yaygın olarak rulman çelikleri üzerinde oluşur ve en çok yüksek temas gerilimleri alan rulman yatakları gibi parçalar için sorunludur. Çünkü beyaz tabaka zamanla deleminasyona uğrayarak (katmanlara ayrılarak), rulman arızasına neden olabilir (Bartarya ve Choudhury, 2012).

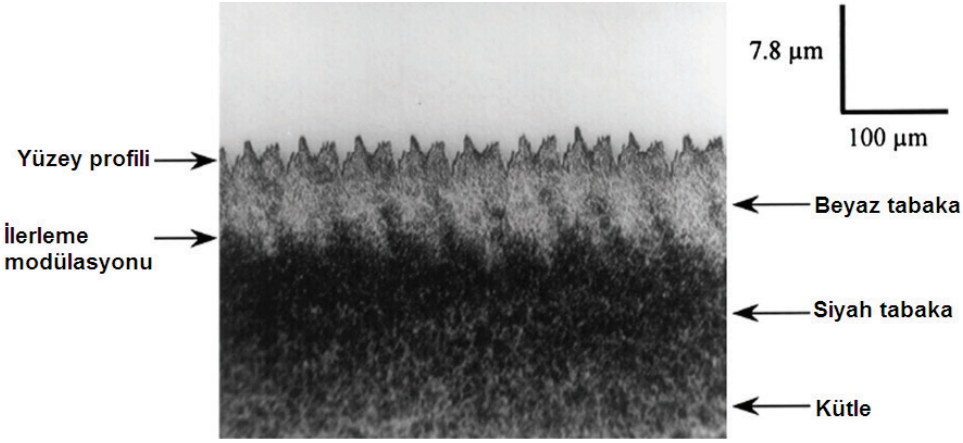
İşlenen yüzeyler, Griffiths'e göre (Griffiths, 1987), 1) hızlı tane incelmesine neden olan ciddi plastik deformasyondan veya 2) hızlı ısıtma ve soğutma sonucu olarak faz dönüşümlerinden kaynaklanabilen beyaz tabaka oluşumuna maruz kalır. Mevcut araştırmalara göre keskin kesici takım ile yapılan işlemede beyaz tabaka oluşmaz, ancak takım körlendikçe beyaz katman oluşmaya başlayabilir. Yüksek sıcaklıklara veya yüksek basınçlara sebep olan kör bir takım, yukarıdaki mekanizmalardan birini tetikleyebilir. Beyaz tabaka, taşlama ve tornalama başta olmak üzere hem kuru hem de ıslak talaşlı imalat uygulamalarında görülebilir. Endüstride, genelde tespit edilen beyaz tabakalar tipik olarak 2 μm'den daha az kalınlıktadır ve süper finiş gibi başka bir bitirme işlemi ile kaldırılır (Dawson, 1999; Soroka 2004).

BEYAZ TABAKANIN KARAKTERİZASYONU

Sert, gevrek ve normalde çekme gerilmesi barındıran beyaz tabaka, yüzey kalitesi ve yorulma dayanımı üzerinde negatif etkiye sahiptir (Aramcharoen vd., 2008; Bosheh ve Mativenga, 2006; Warren vd., 2009). Sert bir fazdan oluşan beyaz tabaka, yüzeyin gevrekleşmesi sonucu çatlakların ilerlemesine ve hasara sebep olur. Sert tornalanmış numunelerin yorulma ömrünü inceleyen Guo ve Warren (2006), beyaz tabakalı sert tornalanmış numunelerin beyaz tabakası olmayan yüzeylere göre 7 kat daha kısa ömre sahip olduğunu bildirmiştir.

Morfoloji ve Faz Analizi

Beyaz tabaka, işlenen yüzeylerde mikron mertebesinde kalınlıkta görülen bir tabakadır (Şekil 1). Prosesin ısısı ve ardından bazı soğutma mekanizmaları veya prosesle ilişkili yüksek gerinme seviyeleri nedeniyle oluşan faz dönüşümünün neden olduğu ince taneli beyaz tabaka meydana gelir (Griffiths, 1987).



Şekil 8. Sert Tornalanmış AISI 52100 Çeliğinde, Yüzey-Altı Tabakada Oluşan Mikroyapı Optik Mikroskop Görüntüsü (Chou, Y. K., & Evans, C. J. 1999)

Görsel incelemeyle fark edilemeyen bu katmanın varlığını belirlemek için dilimleme ve parlatma gibi tahripli metalografik inceleme gerekir. Laboratuvarda mikro yapıyı ve beyaz tabakayı gözlemlemek için tipik yöntem, numunenin enine kesitinin parlatma sonrası kimyasal olarak dağlanmasıdır. Bir numune dağlandıktan sonra optik mikroskopla gözlemlendiğinde, en üstte yüzeye yakın yer alan ince aşırı plastik deformasyon tabakası beyaz görünür. Bu aşırı plastik deformasyon tabakası SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) altında gözlenirse, özelliksiz görünür (Chou ve Evans, 1999). Beyaz tabakadaki taneler ve sınırları, kimyasal dağlamaya karşı dirençli oldukları için değil, çok küçük olduklarından dolayı ışığı dağıttıkları için görüntülenememektedir (Akcan vd., 2002). Beyaz tabakaların optik mikroskop ve SEM ile özelliklerinin gözlemlenememesi, yapının, yüksek deformasyon hızı ve gerinme değerlerinde uygulanan aşırı plastik deformasyon sonucu indüklenen dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle nanokristal bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Nitekim bir araştırmada beyaz tabaka tane boyutu 30-500 nm arasında ölçülmüştür (Akcan vd., 2002).

Beyaz katmanın hemen altında genellikle bir 'siyah katman' bulunur, ancak siyah katman beyaz katman olmadan da oluşabilir. Adından da anlaşılacağı gibi, siyah katman, dağlama işleminden sonra esas kütle

malzemeye göre daha koyu görünür (Akcan vd., 2002). Çelik yüzeyinde meydana gelen beyaz tabakaların kalınlıkları deformasyon şartlarına bağlı olarak değişiklik arz eder. Genelde 10 μm'ye kadar olan beyaz tabakanın altındaki siyah tabaka iki veya üç kat daha kalın olabilir (Ramesh, 2002). Beyaz ve siyah katman arasındaki geçiş genellikle anidir ve 1 μm'den daha az olan bir geçiş bölgesinde oluşur (Akcan vd., 2002).

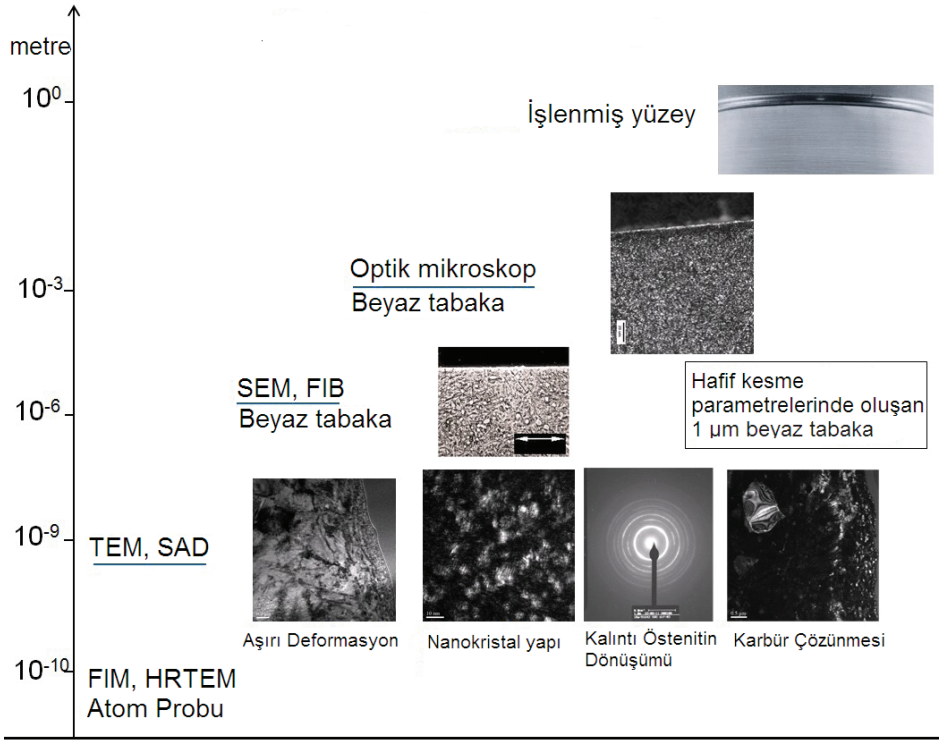
Beyaz tabakanın mikro yapısını ve morfolojisini anlamak için yapılan az sayıdaki çalışmadan birinde Griffiths (1987), beyaz tabakanın yüksek sertliği nedeniyle o dönemde düşünüldüğü gibi geleneksel tavlanmamış martenzit ile açıklanamayacağından bahsetmiştir. Ayrıca beyaz tabakayı tanımlayabilecek belirli bir kompozisyon veya yapı olmadığını öne sürmüştür. Bununla birlikte, beyaz tabakanın farklı şekillerde ve genellikle yaklaşık 575 °C sıcaklıkta temperlendiğinden bahsedilmiştir (Bedekar, 2013). Kesin olmamakla birlikte beyaz tabaka bazen temperlenmemiş martenzit olarak adlandırılırken, siyah tabaka, ısıl işlem kusurlarına benzer özelliklerinden dolayı aşırı temperlenmiş martenzit olarak adlandırılır (Abrão ve Aspinwall, 1996).

Beyaz tabaka araştırması yapılan çalışmaların çoğunda karakterizasyon için optik mikroskop, SEM ve konvansiyonel X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler, sınırlı çözünürlükleri nedeniyle nanometre boyutundaki beyaz katman yapılarını ortaya çıkarmak için çok sınırlı kullanıma sahiptirler. Ayrıca, konvansiyonel XRD analizinin 1-2 μm kadar sığ X-ışını penetrasyon derinlikleri, 5-10 μm kalınlığındaki beyaz katman derinlikleri ile karşılaştırıldığında yetersiz kalmaktadır (Bedekar, 2013). Bu yüzden, mekanik veya termal olarak etkilenen işlenmiş yüzeylerin deformasyon tabakasındaki kalıntı östenit dönüşümünü analiz etmek için Bakış Açısı XRD (GAXRD) tekniği kullanılmıştır (Hosseini, 2012).

Çok fazla olmamakla birlikte birkaç araştırmada (Barry ve Byrne; 2002, Ramesh vd., 2005) beyaz tabakayı karakterize etmek için TEM (Transmisyon Elektron Mikroskobu), etkili bir araç olarak kullanılmıştır. Araştırmalardaki enstrümantasyon sınırlamaları nedeniyle, tane boyutunun 30-100 nm aralığında olduğu tahmin edilmiştir. AISI 52100 malzemede oluşan beyaz tabakanın TEM ile incelenmesi sonucu, yapının 10 nm mertebesinde küçük boyutlu, çok ince, nanokristal farklı yönlenmiş

hücrelerden oluştuğu ve konvasiyonel martenzite benzemediği belirtilmiştir (Barry ve Bryne 2002). Bir başka araştırmada sertleştirilmiş AISI 52100 rulman çeliğinin tornalama işlemi sonucu oluşan beyaz tabaka, TEM ile incelenmiş, fakat beyaz tabakadaki tane yapısı 60000x büyütmede bile çözümlenemediğinden tane boyutunun 5 nm kadar küçük olabileceği tahmin edilmiştir. Ayrıca beyaz tabakadaki TEM analizleri sonucu martenzit ile birlikte sementit tespit edilmiştir (Ramesh vd., 2005).

Diğer yandan, genelde beyaz tabakanın neden olduğu düşünülen yorulma hasarının temel nedenlerini tam olarak araştırmak için mikro yapının çok ölçekli bir analizine ihtiyaç vardır (Kang vd.,2012). Şekil 2, talaşlı imalat sonucu oluşan beyaz katmanların karakterizasyonu için uyarlanmış çok ölçekli bir analizin şemasını göstermektedir.

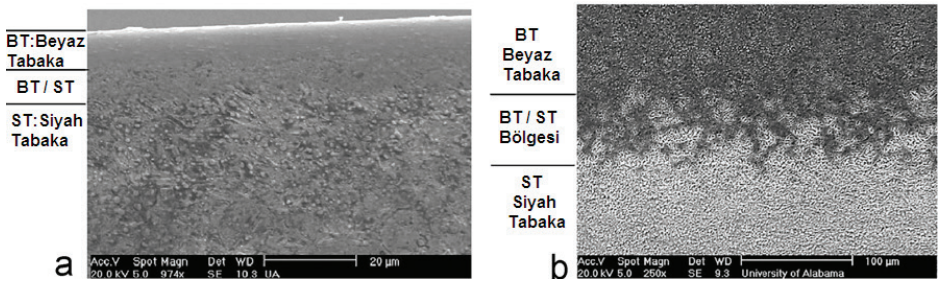


Şekil 2. Beyaz Tabakanın Çok Ölçekli Analizi (Bedekar, 2013)

Şekil 2′ de hafif kesme parametreleri ile işlenmiş bir rulman yatağı yuvasının çeşitli görüntüleri sunulmuştur. Optik mikroskop altında

1 µm'den küçük kalınlıktaki beyaz tabaka görüntülenememiştir. Optik mikroskop ile karşılaştırıldığında, herhangi bir ek bilgi sağlamayan SEM, beyaz tabakayı tane sınırlarının belli olmadığı özelliksiz bir yüzey katmanı olarak ortaya çıkarmıştır. Beyaz tabakadaki tane boyutu, deformasyon derinliği, fazlar ve karbür morfolojisi, TEM ve Seçilen Alan Kırınımı (SAD) teknikleri ile görüntülenebilmiştir. Atom Probu Tomografisi (APT) kullanılarak yapılan ileri analiz, tane sınırlarında karbon ayrışmasını gösterme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle, geleneksel teknikler ile mümkün olmayan beyaz tabaka özelliklerini görüntülemek, gelişmiş bir mikroskop ile mümkündür. Anlaşılan, beyaz tabaka kalınlığının 1 µm'den küçük olduğu durumlarda, TEM gibi gelişmiş karakterizasyon tekniklerinin kullanılması zorunlu hale gelmektedir (Bedekar, 2013).

Beyaz tabakanın metalürjik analizi sonucu demir ve kromda azalma, karbon ve oksijende artma görülmüştür (Bosheh ve Mativenga, 2006). Ayrıca işlenmiş yüzeyin Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile beyaz tabakadaki karbon oranın zamanla ve artan tabaka kalınlığı ile yükseldiği tespit edilmiştir (Poulachon vd., 2005). AISI 52100 esas kütle malzemede %11 oranında kalıntı östenit bulunurken, beyaz tabakadaki kalıntı östenit oranının %33 olduğu XRD ile tespit edilmiştir (Chou ve Evans, 1999). Bir başka araştırmada, AISI 5115 esas kütle malzemede %20, beyaz tabakada ise %70 kalıntı östenit gözlemlenmiştir (Tönshoff vd.,1995). Kalıntı östenitteki artış, kesici takımdaki aşınan yan yüzey ile işlenmiş yüzey arasındaki artan temas süresinin yüksek sürtünmeye neden olması ve yüzeyde çok uzun süre yüksek sıcaklıkların tutulmasına atfedilmiştir (Barry ve Bryne, 2002).

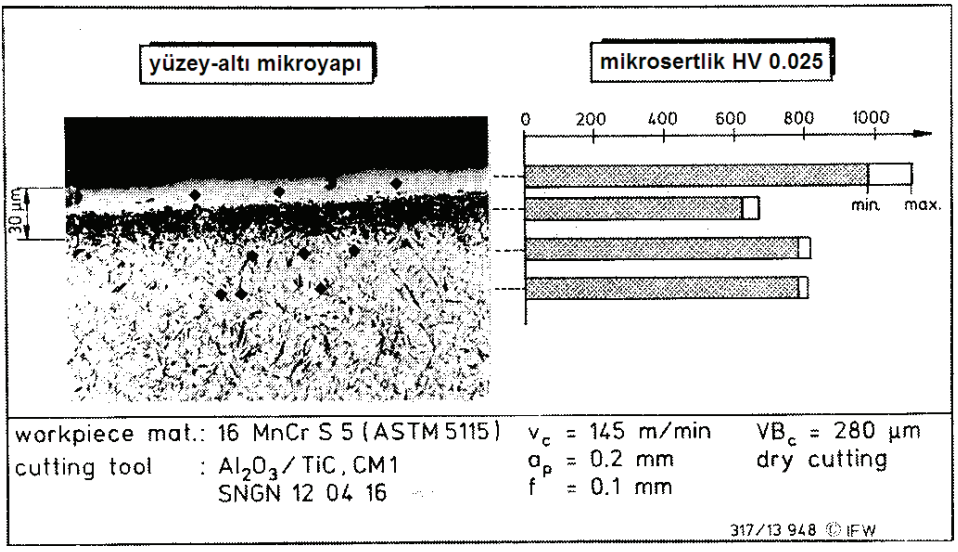


Şekil 3. a) Sert Tornalanmış, b) Taşlanmış Yüzeylerde Beyaz ve Siyah Tabaka Oluşumu (Guo ve Sahni, 2004)

Talaşlı imalat işlemlerinde oluşan beyaz tabakalar uygulanan prosese göre farklı özellikler gösterir. Örneğin tornalama ve taşlama işlemleri sonucu oluşan beyaz tabakalar; yüzey özellikleri, mikro sertlik, mikro yapı ve kimyasal bileşim olmak üzere temelde dört açıdan farklıdır. Tornalanmış beyaz bir katman, taşlanmış beyaz bir katmandan çok daha fazla deformasyona uğrar. Taşlanmış bir yüzeyde, siyah tabakanın beyaz tabakaya kalınlık oranı, tornalanmış yüzeye göre çok daha büyüktür (Şekil 3). Her iki işlem için de mikro sertlik profili aynı olabilir, ancak taşlanmış beyaz tabaka tornalanmış beyaz tabakadan %40 daha serttir. Tornalanmış beyaz bir tabaka aşındırmaya karşı dayanıklı iken taşlanmış beyaz tabaka dayanıklı değildir. Ayrıca tornalanmış beyaz bir tabaka, taşlanmış olandan çok daha fazla kalıntı östenit içerir (Guo ve Sahni, 2004).

Sertlik

Beyaz tabakanın, esas kütle çeliğe göre sertliğinin önemli ölçüde yüksek olduğu talaşlı imalat araştırmalarında gözlemlenmiştir (Akcan vd., 2002; Bosheh ve Mativenga, 2006). Ayrıca Griffiths, (1997) beyaz tabaka sertliğinin 65 HRc'den çok daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Yaklaşık 15 μm kalınlığında oluşan bir beyaz tabakanın mikro sertliğinin 1000 HV (~70 HRc) civarında olduğu belirtilmiştir (Tönshoff vd 1995). Ayrıca aşırı temperlenmiş siyah katmanın esas kütleden daha yumuşak olduğu bildirilmiştir (Şekil 4). Aşınmış kesici takım ile oluşturulan beyaz tabakalı bir yüzeyin nanosertliğinin 14-15 GPa aralığında son derece yüksek olduğu ve beyaz katman olmayan yüzeyden 2,5 GPa daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Warren vd., 2006). Nano sertlik ölçümleri kullanılarak yapılan bir araştırmada, esas kütle malzemenin 10,70 GPa, beyaz tabakanın ise yaklaşık 12,85 GPa nano sertlik değerinde olduğu tespit edilmiştir (Akcan vd., 2002).



Şekil 4. Beyaz Tabakanın Sertliği (Tönshoff vd., 1995)

Diğer yandan yüksek kesme hızlarında oluşan beyaz tabakanın nano sertliğinin, düşük kesme hızlarında oluşandan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Düşük kesme hızında (300 SFPM) üretilen beyaz katmanın büyük ölçüde plastik deformasyondan, yüksek kesme hızında (900 SFPM) üretilen beyaz katmanın ise yüksek sıcaklıklardan dolayı martenzitik faz dönüşümünden kaynaklandığı varsayılmıştır. Termal dönüşüm sonucu oluşan yüksek sertlik, çözeltideki yüksek karbon içeriğine atfedilmiştir (Ramesh vd., 2005).

Kalıntı Gerilmeler

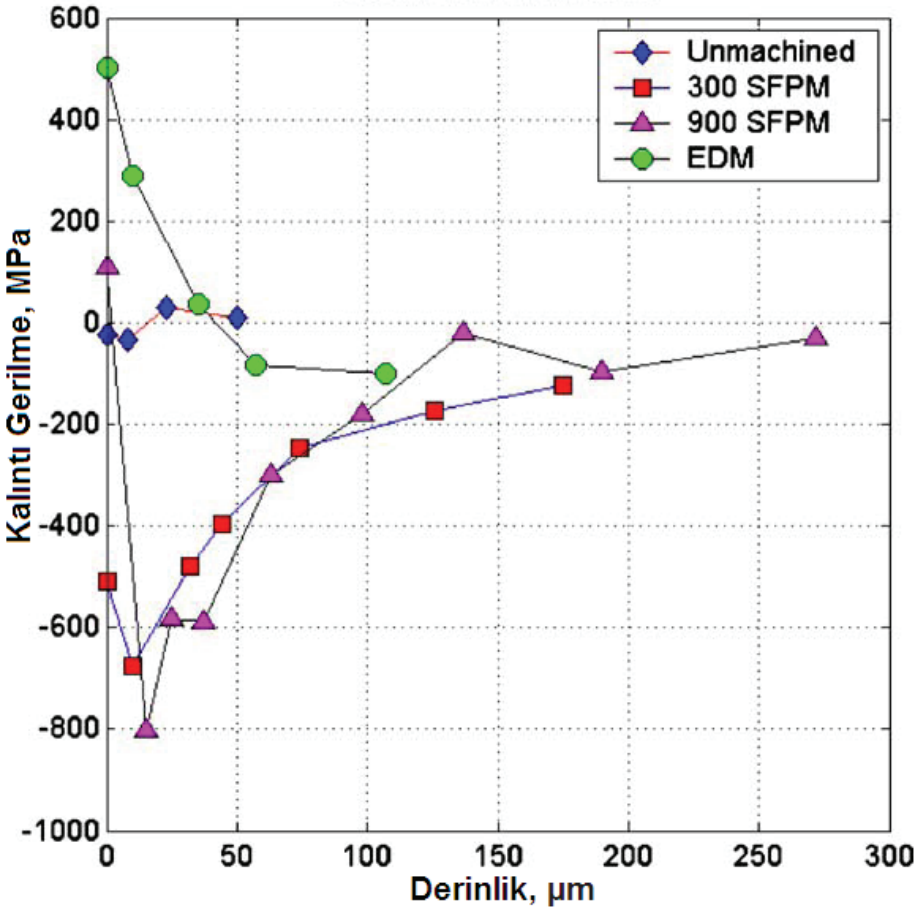
Katı bir kütle içindeki ve farklı alanlar arasındaki gizli gerilimler, kalıntı gerilmeler olarak ifade edilir. Kalıntı gerilmeler; ısıl işlem, imalat, soğuk deformasyon vb. işlemler nedeniyle meydana gelirler (Totten, 2002). Kalıntı gerilmelerin mekanik, termal ve metalürjik olmak üzere üç etkinin sonucu olduğu bilinmektedir. Takım yan yüzey aşınmasındaki artış, yüzeydeki kalıntı gerilmeyi çekme tipinde arttırırken, maksimum basma kalıntı gerilmesini yüzeyden daha derine kaydırır. Beyaz tabaka, pik basma gerilmesinin iş parçası yüzey-altına doğru kaymasına neden olur. Bu nedenle beyaz tabakalar, takım aşınmasına bağlı olarak yüksek

sürtünme enerjisinin veya yüksek kesme hızında kesme bölgesinde üretilen ısının bir sonucu olarak adlandırılabilirler (Bartarya ve Choudhury, 2012; Guo vd., 2010).

Tornalama sırasında kesici takımın neden olduğu yüksek hertz basıncı, kalıntı gerilmelerdeki farklılıklar için belirleyici faktördür. Takım aşınmasının neden olduğu yüksek hertz basıncının ve hızlı sıcaklık değişiminin birleşik etkileri, sonuçta ortaya çıkan çekme kalıntı gerilmesinde önemli rol oynar. Yüksek bir çekme kalıntı gerilmesi, tornalanmış veya taşlanmış beyaz bir tabakanın varlığı ile ilişkilidir (Ranganath vd., 2009). Aşınmış bir kesici takım veya taşlama diski, işlenen yüzeylerde çekme kalıntı gerilmelerine neden olur (König vd., 1990; Tönshoff vd., 1995; Xiao vd., 2002). Sert tornalama ile oluşan beyaz tabakadaki çekme kalıntı gerilmesi, taşlanmış beyaz tabaka için olandan daha yüksektir. Bununla birlikte, taşlanmış beyaz tabakanın içerdiği kalıntı gerilme, sert tornalanmış beyaz tabakada olduğu gibi doğası gereği çekme tipinde olup tüm derinlik boyunca devam eder (Ranganath vd., 2009).

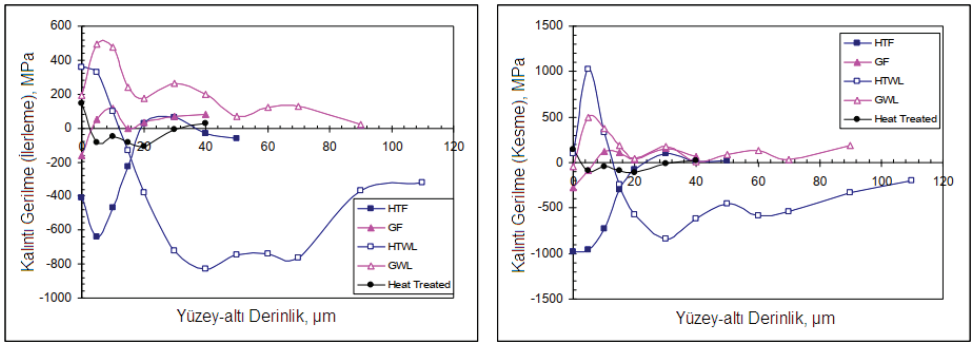
Kesici takımdaki tedrici yan yüzey aşınması sonucu yükselen sıcaklık nedeniyle beyaz tabaka kalınlığının arttığı ve artan aşınma ile çekme tipi kalıntı gerilmeler oluştuğu gözlemlenir. Beyaz tabakada gerilmeler çekme tipinde iken alttaki aşırı temperlenmiş bölgede gerilmenin sıkıştırıcı hale geldiği tespit edilmiştir. Yüzeydeki gerilme durumu takım aşınmasındaki artışla, kademeli olarak çekme tipine dönüşür. Aşınmadaki artış aynı zamanda basma kalıntı gerilmesinin büyüklüğünün artmasına ve yüzey-altında daha derine kaymasına neden olur (Schwach ve Guo, 2005, Tönshoff vd. 1995, Guo vd., 2009, Warren ve Guo, 2009).

Genelde düşük kesme hızlarında oluşan beyaz tabaka, mekanik etkilerden kaynaklandığı için basma kalıntı gerilmelere neden olurken, yüksek kesme hızlarında oluşan beyaz tabaka ise daha çok termal etkilerden kaynaklandığı için çekme tipi kalıntı gerilmelere yol açar. Örneğin, AISI 52100 çeliğinin tornalandığı bir çalışmada, yüksek hızda (900 SFPM) işlenen yüzeyde oluşan beyaz katmanın çekme tipinde olduğu, düşük hızda (300 SFPM) oluşturulan katmanın ise basma tipinde olduğu bildirilmiştir (Şekil 5) (Ramesh vd., 2005).



Şekil 5. Çevresel Kalıntı Gerilme Profili (Ramesh vd., 2005)

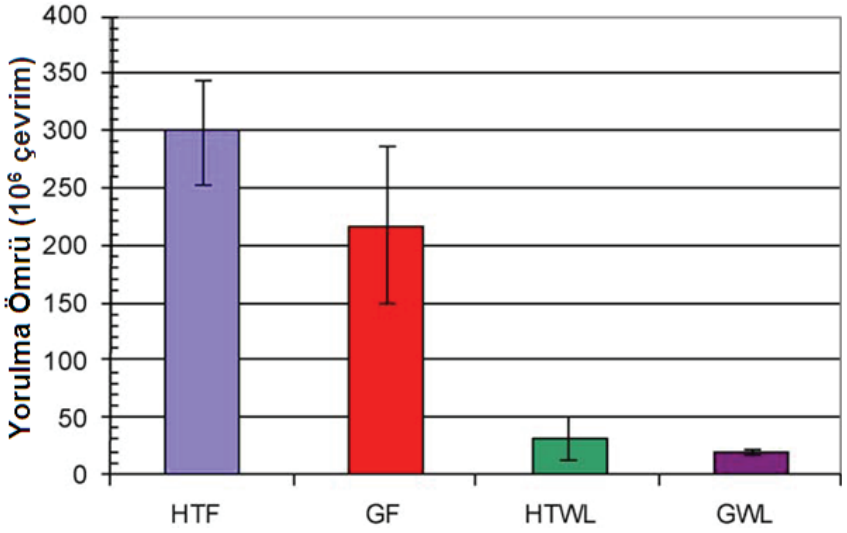
Diğer yandan bir araştırmada, sert tornalama sonucu oluşan beyaz katmanlı yüzey (HTWL) çekme gerilmesi içerirken, yeni bir kesici uçla tornalanan yüzeylerde (HTF) beyaz tabaka bulunmadığı ve yüzeylerin basma gerilmesi içerdiği tespit edilmiştir (Şekil 6) (Guo vd., 2010). Keskin bir kesici takımla işlenen yüzeyde, basma kalıntı gerilmesi ve yüzey-altında maksimum basma kalıntı gerilmesi ile karakterize edilen "kanca" şekilli kalıntı gerilme profili başka araştırmalarda da bildirilmiştir (Guo vd., 2009, Warren ve Guo, 2009).



Şekil 6. Kalıntı Gerilmeler; a) İlerleme Yönü, b) Kesme Yönü (Warren ve Guo, 2009)

Yorulma Ömrü

Bir parçanın yüzeyindeki basma kalıntı gerilmeler, yorulma ömrünü uzatıp (Zhu vd., 1998), çatlak yayılımını (Moshier ve Hillberry, 1999) ve gerilmeli korozyonu (Toribio, 1998) önlerken, çekme kalıntı gerilmeler ise malzemenin performansını düşürür. Basma gerilmesi oluşan çatlakları kapatmak için hareket ederken, çekme gerilmesi çatlağa ek stres uygulayarak açmaya çalışır. Çatlak oluşumunun yorulma hasarının birincil nedeni olduğuna inanıldığından, üretim spesifikasyonlarının basma kalıntı gerilmelerini gerektirmesi yaygın bir yaklaşımdır (Moshier ve Hillberry, 1999). Ayrıca rulman yorulma ömrü için, derin basma kalıntı gerilmesinin, daha büyük değerdeki sığ kalıntı gerilmeden daha faydalı olduğuna inanılmaktadır. Eğer parça yüzeyinde çekme kalıntı gerilme varsa, bu, parçanın içindeki basma gerilmesi ile dengelenir (Lu, 1996).



Şekil 7. Yorulma Ömrünün Karşılaştırılması (Guo vd., 2010)

Beyaz tabakanın kalınlığı arttıkça yorulma ömrü azalır (Bartarya, Choudhury, 2012). Griffiths (1987), 12,5 μm'ye kadar beyaz tabaka derinliğinin yorulma sınırını %35 oranında azaltabileceğini belirtmiştir. Sert tornalanmış beyaz tabakalı (HTWL) numunelerin, sert tornalanmış beyaz tabakasız (HTF) numunelere göre 7,6 kat daha düşük yorulma ömrüne sahip olduğu görülürken, taşlanmış beyaz tabakalı (GWL) ve taşlanmış beyaz tabakasız (GF) numunelerde de benzer eğilim gözlemlenmiştir (Şekil 7) (Guo vd, 2010).

Genelde beyaz tabakalar yüzeyde çekme tipi kalıntı gerilme içerirken, gerilmenin durumu yüzey-altında derine indikçe basma tipi haline gelir. Yüzeydeki çekme gerilmesi, yorulma çatlaklarının başlamasını teşvik eder (Ramesh vd., 2005). Beyaz tabakası olmayan yüzeylerin, beyaz tabakalı yüzeylere göre yorulma çatlağı başlangıcına karşı daha dirençli ve daha uzun ömürlü olduğu belirtilmiştir (Guo ve Schwach 2005). Ayrıca beyaz tabakada bulunan yüksek orandaki kalıntı östenit numunelerin yorulma ömrünü azaltan bir faktördür. Yorulma kırılması analizinden, bazen yorulma çatlaklarının kalıntı östenitin tane sınırlarında başladığı ve çatlağın transgranüler modda ilerlediği gözlemlenmiştir (Bedekar, 2013).

Diğer yandan beyaz tabakada, termal etkilerin yanında plastik etkilerin de hâkim olabilmesi bir çelişki doğurmaktadır. Ayrıca bazı araştırmalarda beyaz tabakanın basma kalıntı gerilme sergilediği tespit edilmiştir (Ramesh vd., 2005; Warren ve Guo, 2009). Bu durumda, beyaz katmana sahip parçaların, beyaz katmansız olanlara göre daha uzun yorulma ömrüne sahip olması gerekir. Ek olarak, rapor edilen kalıntı gerilmeler yalnızca normal kalıntı gerilmelerle sınırlı olup, kayma kalıntı gerilmeleri tam olarak anlaşılmamıştır. Genelde yorulma ömrü çalışmaları, mikroyapı, tane boyutu, sertlik ve kalıntı östenit durumlarını göz önünde bulundurmadığından, yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar kesin sonuçlara varmak için tutarlı görünmemektedir.

Nadiren de olsa yorulma ömrünün, numunelerin yüzey topografyası ölçümü, metalografi, kalıntı gerilme ölçümleri, TEM ve nano-girinti sertlik testleri gibi yüzey bütünlüğü özellikleri kullanılarak karakterize edildiği çalışmalar mevcuttur (Smith vd., 2007). Sert tornalanmış AISI 52100 çeliğinde beş farklı yüzey koşulu tipi, gözlemlenen yüzey bütünlüğü ve yorulma performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yüksek devirli gerilim-gerilim yorulma testleri, beyaz tabakanın varlığının yorulma ömrünü olumsuz etkilemediğini ve ortalama olarak sert tornalanmış yüzeyin taşlanmış yüzeyden daha iyi olduğunu hatta daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kalıntı gerilmelerin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin beyaz tabakanın etkisinden daha önemli olduğunu göstermiştir. Sert tornalanmış yüzeyler için yorulma ömrünün hem yüzeydeki basma kalıntı gerilmesi hem de maksimum basma kalıntı gerilmesi ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir.

BEYAZ TABAKA OLUŞUM MEKANİZMALARI

Talaş kaldırma proseslerinde ortaya çıkan yüzey tabakadaki başkalaşma sebeplerinin, yüzeydeki aşırı plastik deformasyon sonucu oluşan yüksek sıcaklık veya yüksek sıcaklık değişimi, plastik deformasyon ve kimyasal reaksiyonlar olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak beyaz tabaka oluşumundan sorumlu üç ana mekanizma olduğu öne sürülmüştür (Griffiths, 1997), bunlar:

1) Faz dönüşümüne neden olan hızlı ısıtma ve soğutma (su verme) mekanizması

2) Homojen veya çok ince taneli bir yapı oluşturan plastik deformasyon mekanizması

3) Çevresel etkilerden dolayı nitrürlenme, karbürlenme ve oksitlenme gibi bozunmalara sebep olan yüzey reaksiyonu mekanizması

Talaşlı imalat prosesleri ile işlenmiş yüzeyler, bu mekanizmalardan genellikle termal ve mekanik olanlardan kaynaklanabilen beyaz tabaka oluşumlarına maruz kalırlar. Ayrıca talaşlı imalat sürecinde beyaz tabaka oluşumu için dikkate alınması gereken; basınç, deformasyon hızı ve soğutma hızı gibi başka faktörler de vardır (Bosheh ve Mativenga, 2006). Spesifik kesme basıncının dönüşüm sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yapıdaki östenit, ferritten daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, basınç, faz dönüşüm sıcaklığını düşürecektir. Yüksek deformasyon hızının neden olduğu ısı oluşumu, deformasyon için gerekli gerilmenin azalmasına neden olur. Soğutma hızı, yalnızca dönüşüm sıcaklığını değil, aynı zamanda düşük karbon içeriğinde elde edilen sertliği de etkileyen bir diğer faktördür.

Termal Etkiler

Beyaz tabaka oluşumunda termal ve mekanik etkiler kabul edilmiş olsa da, önceki çalışmalarda fenomen yalnızca termal etkiye atfedilmiştir. Örneğin Brinksmier ve Brockhoff (1999), işlemede karşılaşılan aşırı ısınma ve soğutma hızları nedeniyle martenzitik sertleştirilmiş çelikte çok ince taneli bir yapının oluşabileceğini belirtmişlerdir. Bu koşullar altında, sıcaklığın çeliğin östenitleşme noktasını aşması durumunda beyaz tabaka oluşabileceğini bildirmişlerdir. Tornalama, taşlama ve delme gibi talaşlı imalat proseslerinde özellikle agresif şartlarda ölçülen sıcaklıkların 900 °C civarında olduğu, fakat kesici takım-iş parçası arayüz sıcaklığının daha yüksek olmasının muhtemel olduğu ve bu durumun östenitleşme için yeterli olduğu belirtilmiştir. Beyaz tabakanın yüksek sertliği (1000~1300 HV), konvansiyonel bir martenzitik dönüşüm ürünü olma olasılığını ortadan kaldırmaktadır. Beyaz tabaka sertliğinden düşük olan konvansiyonel martenzitin sertlik aralığı, %0,3 ve %1,0 karbon içeriğine bağlı olarak sırası ile yaklaşık 600 ve 900 HV'dir (Eyre ve Bax-

ter, 1972). Dikkate alınması gereken bir diğer faktör de beyaz tabakanın 80-120°C arasında temperlenmeye başlayan konvansiyonel martenzitten farklı olarak temperlenmesidir. Örneğin, Manion ve Stock (1970), beyaz tabakayı dönüştürmek için 575 °C'lik bir tavlama sıcaklığının gerektiğini, Kuznetsov vd. (1963) ise beyaz tabakanın sertliğini 800°C'ye kadar koruduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, beyaz tabakanın konvansiyonel martenzite kıyasla farklı sertlik ve temper özellikleri, beyaz tabakanın rafine edilmiş martenzitik bazlı bir dönüşüm ürünü olduğunu dışlamaz (Griffiths, 1997).

AISI 4340 çeliğinin (52 HRC) aşınmış ve aşınmamış takımlarla sert tornalanmasında oluşan beyaz tabakaların TEM analizi sonucunda, beyaz tabaka oluşumu, termal ve dinamik yeniden kristalleşme etkilerinin bir kombinasyonuna bağlanmıştır (Barry ve Byrne, 2002).

Tavlanmış AISI 1045, 1070 ve 4340 çeliklerinin işlenmesi sonucunda, 200 m/min'den yüksek hızlarda 1-2 μm kalınlığında beyaz tabaka oluştuğu gözülemlenmiştir (Kim ve Kwon, 2002). AISI 1045 ve 1070 çeliklerindeki beyaz tabalarda kalıntı östenit ve temperlenmemiş martenzit görünürken, AISI 4340 çeliğinde sadece temperlenmemiş martenzit bulunmuştur. İşlenen malzemelerdeki beyaz tabakanın, perlit-östenit-martenzit faz dönüşümünden kaynaklandığı doğrulanmıştır. Ayrıca, AISI 1070 çeliği yüzeyinde beyaz tabaka oluşumu için gereken 225 m/min kesme hızının, AISI 1045 çeliği için gereken hızdan (275 m/min) düşük olması dikkate değerdir. Bu durum, AISI 1070 çeliğinin östenitleşme sıcaklığının (738 ^{o}C), 1045 çeliğinin östenitleşme sıcaklığından (800 ^{o}C) düşük olmasına atfedilmiştir (Kim ve Kwon, 2002).

AISI1045 çeliğinin sert tornalanması sonucu, malzemenin nominal östenitleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda faz dönüşümünden dolayı beyaz tabaka meydana geldiği tespit edilmiş ve olası nedenin plastik deformasyon olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca tüm işleme koşullarında oluşan beyaz tabakalarda kalıntı östenit bulunmuştur (Han vd., 2008). Yukarıdaki açıklamalardan, yüksek deformasyon hızlarında, östenizasyon sıcaklığının altında faz dönüşümü ve beyaz tabaka oluştuğu anlaşılmaktadır.

Mekanik Etkiler

Plastik deformasyon, işlenen yüzey tabakada pekleşmeye ve beyaz tabaka oluşumuna katkıda bulunduğu öne sürülen başka bir faktördür. Keskin kesici takımlarla kesme işlemi sırasında, işlenen yüzeyde oluşan gerinmeler 6 veya 7 mertebesinde olabilirken (Turley, 1973), yeni işlenmiş yüzey ile kesici takımın ön boşluk yüzü arasındaki sürtünme bu duruma daha fazla katkıda bulunabilir. Bu yüzden oluşan beyaz tabakaların, genelde agresif koşullar altında ve özellikle aşınmış takım ile yapılan talaşlı imalat işlemlerinde oluşması önem arz etmektedir. Konvansiyonel deformasyon sertleştirmesi tek başına bu kadar yüksek beyaz tabaka sertliklerine neden olamaz, ancak ısıl işlemle birleştirildiğinde, O'Niell (1967) tarafından gösterildiği gibi sertlikler önemli ölçüde artar. O'Niell'in grafiğine göre %0,4 karbonlu çelik için, hava soğutmada ~160 HV, soğuk deformasyonda ~350 HV, su vermede ~550 HV, su verme artı soğuk deformasyonda ~900 HV sertlik değerleri elde edilebilir (Griffiths, 1997).

Bununla birlikte bazı kanıtlar, yeniden östenitleme olmaksızın beyaz tabakanın oluşabileceği durumlar olduğunu göstermiştir. Turley vd. (1974) su ile soğutma altında düşük hızda elle aşındırılan yüzeylerde beyaz tabaka oluştuğunu tespit etmiştir. Testler, yeniden östenitleşmenin meydana gelmediğini, bunun yerine beyaz tabakanın aşırı plastik deformasyon altında oldukça parçalanmış bir alt tanecik tabakasından oluştuğunu göstermiştir. Bu nedenle, düşük sıcaklıkta yüksek plastik deformasyon sonucu veya düşük deformasyon durumunda yüksek sıcaklıkta beyaz tabaka oluşabilir (Griffiths, 1997).

Turley başka bir araştırmada (Turley 1975), 49 HRc setliğindeki yüksek mukavemetli çeliğin raybalanmasında oluşan beyaz tabakaları, sıcaklık artışının nispeten küçük olduğu elle aşındırma sonucu oluşan beyaz tabalar ile karşılaştırmış ve her iki durumda da beyaz tabakalarda karbür ve kalıntı östenit fazlarına rastlamamıştır. Kalıntı östenit tipik bir şekilde termal olarak indüklenen martenzitik faz dönüşümünün bir sonucu olduğundan ve plastik deformasyon nedeniyle karbür tükenmesi meydana gelebileceğinden, raybalamada oluşan beyaz tabakanın östenitleme sıcaklığının çok altında meydana gelen aşırı plastik deformasyondan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

AISI 52100 çeliğinin sert tornalanması sonucu yapılan detaylı incelemeler neticesinde, termal etkilerin baskın olması beklenen yüksek kesme hızlarında (274 m/min) oluşan beyaz tabakada sementit bulunmadığı tespit edilmiştir. Sementit fazının olmaması, ters martenzitik faz dönüşümü ile üretilen martenzitik yapıdaki tüm karbonun çözünmesine bağlanmıştır. Buna karşılık, mekanik etkilerin baskın olduğu ve sıcaklıkların çeliğin östenitleşme noktasını aşamayacağı daha düşük bir kesme hızında (91 m/min) oluşan beyaz tabakada sementit gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek kesme hızında beyaz tabaka oluşumunun öncelikle termal olarak indüklenen martenzitik faz dönüşümünden kaynaklandığı, düşük ve orta kesme hızlarında ise dönüşüme mekanik etkilerin baskın olduğu aşırı plastik deformasyonun indüklediği tane inceltme mekanizmasının hakim olduğu sonucuna varılmıştır (Ramesh, 2002; Ramesh vd., 2005).

Diğer yandan çelikler dışında demir içermeyen metalik malzemelerde de plastik deformasyondan kaynaklı beyaz tabaka oluşumuna rastlanmıştır (Ranganath vd., 2009). Nikel alaşımının düşük hızda işlenmiş yüzeyinde gözlenen beyaz tabakanın, uzamış ve bükülmüş tanelere sahip, çarpık bir yapı içerdiği görülmüştür.

TALAŞLI İMALAT PARAMETRELERİNİN BEYAZ TABAKAYA ETKİSİ

Bu alanda yapılan önceki çalışmalar, esas olarak işleme parametrelerinin ters martenzitik dönüşümle oluşturulan sert yüzey tabakasının oluşumu üzerindeki etkilerini anlamaya odaklanmıştır. Bu yüzden, beyaz katman oluşumunda, prosesin tipi ve işlenen malzemenin türü yanında; kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, kesici takım ve aşınması gibi işleme parametrelerinin karşılıklı ilişkisini karakterize etmek ve anlamaya çalışmak önem arz etmektedir.

Prosesin Etkisi

Talaşlı imalat işlemlerinde oluşan beyaz tabakalar uygulanan prosese göre farklı özellikler gösterir. Örneğin tornalama ve taşlama işlemleri sonucu oluşan beyaz tabakaların özellikleri; yüzey özellikleri, mikro

sertlik, mikro yapı ve kimyasal bileşim olmak üzere dört açıdan temelde farklıdır. Tornalanmış beyaz bir katman, taşlanmış beyaz katmandan çok daha fazla plastik deformasyona maruz kalır. Taşlanmış bir yüzeyde, siyah tabakanın beyaz tabakaya kalınlık oranı, tornalanmış yüzeye göre çok daha büyüktür (Şekil 3). Her iki işlem neticesinde mikro sertlik profili aynı olabilir, ancak taşlanmış beyaz tabaka, tornalanmış beyaz tabakadan %40 daha sert olabilir. Tornalanmış beyaz bir tabaka, aşındırmaya karşı dayanıklı iken taşlanmış beyaz tabaka dayanıklı değildir. Ayrıca tornalanmış beyaz tabaka, taşlanmış olandan çok daha fazla kalıntı östenit içerir (Guo ve Sahni, 2004).

AISI 52100 çeliğinin (62 HRc) sert tornalama işlemi sonucu oluşan beyaz tabakalı (HTWF) yüzeylerdeki çekme kalıntı gerilmesi, taşlanmış beyaz tabakalı (GWF) yüzeylerdekinden daha yüksektir. Ayrıca sert tornalanmış beyaz tabakalı (HTWF) yüzeylerde, kalıntı gerilme profillerinin temel şekli değişirken, taşlanmış beyaz tabakalı (GWF) yüzeylerde değişmemiştir (Warren ve Guo, 2009).

Malzemenin Etkisi

Çeliklerin karbon içeriği, alaşımlama ve ısıl işlem gibi malzeme özelliklerinin talaşlı imalatta beyaz tabaka oluşumunda rol oynadığına yaygın olarak inanılmaktadır. Taşlama işleminde meydana gelen hızlı ısıtma sırasında östenit fazına difüze olan karbon, soğutma sırasında temperlenmemiş martenzit oluşumuna yol açar. Çelik malzeme ağırlıkça %0,025'ten daha az karbon içerdiğinde, östenit ve martenzit fazı olmaksızın ferrite dönüştüğünden dolayı, Fe-C faz diyagramından, gözlemlenebilecek mikroyapısal değişikliğe neden olacak faz değişikliğini elde etmek için gerekli minimum karbon miktarının ağırlıkça %0,025 olduğu sonucuna varılmıştır (Shaw ve Vyas, 1994).

Farklı seviyelerde karbon veya alaşım içeren AISI 1045, 1070 ve 4340 tavlanmış çeliklerin işlenmesi sonucunda; AISI 1070 çelikte 225 m/min kesme hızında beyaz tabaka oluşurken, AISI 1045 çeliğinde beyaz tabaka 275 m/min gibi daha yüksek bir kesme hızında gözlemlenmiştir (Kim ve Kwon, 2002). Diğerlerine göre daha düşük östenitleşme sıcaklığından dolayı AISI 1070 çelikte beyaz tabaka oluşma olasılığı daha yüksektir. Aynı kesme hızında işlenmelerine rağmen, AISI 1045 çeliğe

nazaran AISI 4340 çelik yüzeyinde daha kalın beyaz tabaka tespit edilmiştir. Daha kalın beyaz tabakanın nedeni, AISI 4340 çeliğin daha düşük östenitleşme sıcaklığına atfedilmiştir (Kim ve Kwon, 2002). Fakat bu beklenti, AISI 4340 çelikteki Mo ve Si alaşım elementlerinin östenitleşme sıcaklığını artırma eğilimi ile çelişmektedir (Krauss, 1990).

Karbon ve alaşım içeriklerinin yanında çeliklerin mikro yapılarının da beyaz tabaka oluşumu üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. İnce mikro yapıya sahip çeliğin, kaba mikro yapıya sahip çeliklere göre daha kalın beyaz tabaka sergilediği görülmüştür (Poulachon vd., 2005).

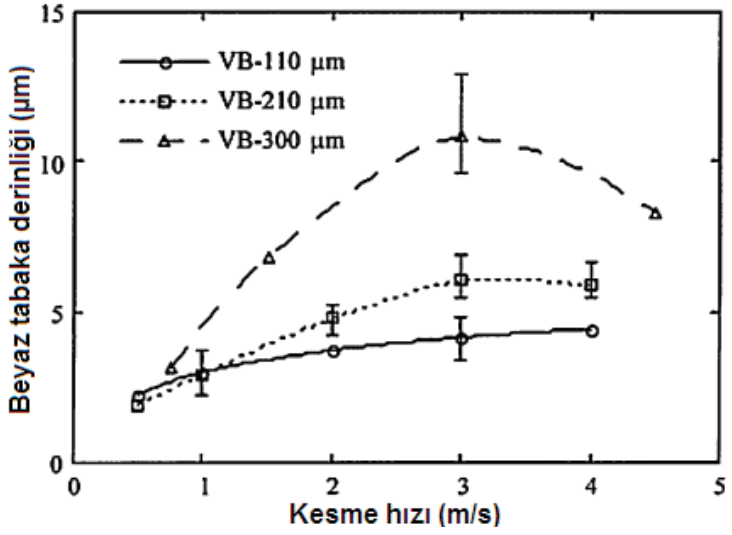
İşleme Parametrelerinin Etkisi

Beyaz katmanların oluşumunda işleme parametrelerinin rolü hakkında pek çok bilgi mevcuttur. Aşağıda, işlenmiş bir komponentin beyaz tabaka özelliklerini etkileyen temel kesme parametreleri verilmiştir:

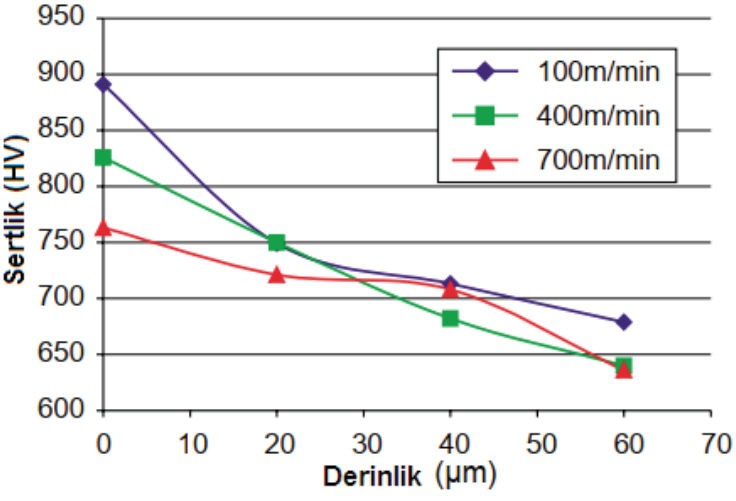
a. Kesici uç geometrisi (talaş açısı, honlama yarıçapı)
b. Takım aşınması (yan yüzey aşınması)
c. Kesici uç tipi (kaplamalı veya kaplamasız)
d. İşleme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği)

Talaşlı imalatta, agresif kesme parametreleri kullanıldığında, yeni bir takım kullanılsa bile, çekme geriliminin eşlik ettiği beyaz tabaka oluşumu beklenir. Yeni kesici takım ile birlikte daha az agresif parametreler kullanılırsa, işlenen yüzeyde beyaz tabaka oluşumu beklenmez ve hatta yüzeyde basma kalıntı gerilmeler oluşabilir. Ancak takım aşındıkça bu arzu edilen özellikler azalır ve beyaz bir tabaka oluşur. (Akcan vd., 2002; Ramesh, 2002). Kesici takımdaki tedrici yan yüzey aşınması sonucu yükselen sıcaklık nedeniyle beyaz tabaka kalınlığı artar (Poulachon vd., 2005, Schwach ve Guo, 2005) ve artan aşınma ile işlenen yüzeyde çekme tipi kalıntı gerilmeler gözlemlenir (Schwach ve Guo, 2005). Aşınmadaki artış aynı zamanda basma kalıntı gerilmesinin büyüklüğünün artmasına ve yüzey-altında daha derine kaymasına neden olmuştur. İlerlemedeki azalma yüzey kalıntı gerilmelerini daha fazla sıkıştırırken, maksimum basma kalıntı gerilmesi ise yüzey-altında daha sığ kalmıştır. Küçük ilerleme ve keskin kesici takım, bileşenin yorulma ömrünü iyileştirmek için uygun bir yüzey bütünlüğü sağlayabilir (Schwach ve Guo, 2005). Ayrıca beyaz katmanlar, düşük veya yüksek kesme hızların-

da oluşabilir. Düşük hızlarda tane incelmesi nedeniyle oluşurken, yüksek hızlarda, hızlı ısıtma ve soğutma nedeniyle oluşur (Akcan vd., 2002; Ramesh, 2002). Diğer yandan kaplamalı takımlar, kaplamasız takımlara kıyasla, düşük sürtünme katsayıları nedeni ile daha düşük iş parçası ve takım sıcaklıkları doğuracağından, yüzey tabakada daha az sertleşme etkisi ve beyaz tabaka oluşumuna neden olacaklardır (Aramcharoen ve Mativenga, 2008).



(a)



(b)

Şekil 8. a) Beyaz Tabaka Derinliği, b) Sertliği (Bosheh ve Mativenga, 2006)

Kesme hızının yükselmesi ile zamanla takım aşınması artarken, beyaz tabaka derinliği ve sertliğinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 8a ve b). Bunun nedeni, yüksek kesme hızlarında talaşın sıcaklığı artarken iş parçası malzemesinin sıcaklığının düşmesi olabilir. İşlenen yüzeyin sıcaklığındaki azalma, talaşın daha hızlı kaldırılması ve ortamdan uzaklaştırılması ile yetersiz temas süresinden kaynaklanabilir. Bu nedenle, üretilen ısının çoğu hızlıca talaş tarafından kesme bölgesinden uzaklaştırılırken, iş parçasına daha az ısı iletilir. Bu durum, beyaz tabaka oluşumu ile aşınma arasında doğrudan bir ilişki olmayabileceğini, korelasyonun aşınma moduyla bağlantılı olabileceğini düşündürmektedir (Bosheh ve Mativenga, 2006). Ayrıca yüksek kesme hızlarının ihmal edilebilir bir kalınlıkta beyaz tabaka oluşturabileceği belirtilmiştir (Aramcharoen ve Mativenga, 2008). Diğer yandan, yukarıdaki açıklamaların aksine, hem kesme hızı hem de ilerlemedeki artışla beyaz tabakanın arttığı tespit edilmiştir. Fakat siyah tabaka, kesme hızının yükselmesiyle azalırken, ilerleme hızı artırıldığında hemen hemen sabit kalmış veya biraz azalmıştır (Umbrello ve Filice, 2009). Daha yüksek negatif takım geometrileri ve yüksek ilerleme hızları beyaz tabaka oluşumunu artırma eğilimindedir.

AISI 52100 çeliğinin 300, 600 ve 900 SFPM hızlarında sert tornalanması sonucu oluşan beyaz tabakaların TEM ile incelenmesi sonucu, işlenen üç numunedeki deformasyon tabakasında sementit ile birlikte martenzit görülmüştür. Düşük hızlarda işlenmiş yüzeylerde mevcut olan sementit halkaları yüksek hızda (900 SFM) kaybolmuştur. Meydana gelen beyaz tabakalardaki mikroyapının esas kütle malzemeden daha ince olduğu görülmüştür. 900 SFPM hızda işlenmiş yüzeyin diğerlerinden daha iri tanelere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek hızda oluşan ve tane irileşmesine neden olan yüksek kesme bölgesi sıcaklığına bağlanmıştır. Artan hız ile tane boyutunun yanında kalıntı östenit miktarının da arttığı belirtilmiştir (Ramesh ve Melkote, 2000).

Tavlanmış AISI 1045, 1070 ve 4340 çeliklerinin işlenmesi sonucunda, 200 m/min'den yüksek kesme hızlarında 1-2 μm kalınlığında beyaz tabaka gözlemlenmiştir. XRD testleri, AISI 1045 ve 1070 çeliklerinde kalıntı östenit ve temperlenmemiş martenziti gösterirken, AISI 4340 çeliğinde sadece temperlenmemiş martenziti göstermiştir. İncelenen çeliklerde

beyaz tabaka oluşumundan perlit-östenit-martenzit faz dönüşümünün sorumlu olduğu doğrulanmıştır. İlginç bir şekilde AISI 1070 çeliğinde, AISI 1045 çeliğinde beyaz tabaka oluşturmak için gerekli kesme hızından (275 m/min) daha düşük hızda (225 m/min) beyaz tabaka oluşmuştur. Bu durum, AISI 1070 çeliğinin östenitleştirme sıcaklığının (738 ^{o}C), 1045 çeliğininkinden (800 ^{o}C) daha düşük olması gerçeği kullanılarak doğrulanmıştır (Kim ve Kwon, 2002).

SONUÇ

Birçok araştırmacı tarafından beyaz tabaka oluşumunun termal ve/veya mekanik etkiler sonucu martenzitik faz dönüşümünden kaynaklandığı ve beyaz tabakalı yüzeylerin genelde zararlı çekme kalıntı gerilmelere sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak belirtilen yüzey kalitesi için gerekli kesme parametrelerinden ödün vermeden, işlenmiş yüzeydeki bu çekme gerilimlerini azaltmak için çok az çalışma yapılmıştır. Termal etki sonucu oluşan beyaz tabakanın çekme kalıntı gerilemesi ve yorulma ömrü üzerindeki olumsuz etkileri kabul edilmesine rağmen, bileşenin yorulma ömrünü artıracak kesme parametrelerini uyarlamak için proses mühendislerine kılavuzluk edebilecek, termal olarak ve plastik olarak baskın bölgeleri ayırmak için süreç haritaları geliştirilmemiştir. Genelde kuru şartlarda yapılan talaşlı imalat işlemlerinde yoğun termal etkiler sonucu yüzeyde çekme kalıntı gerilmeler oluştuğu bildirilmiştir. Özellikle etkili ve farklı yöntemlerle uygulanan bir soğutma, kesme bölgesi sıcaklığını ve kesici takım aşınma hızını düşüreceğinden dolayı beyaz tabaka kalınlığı ile zararlı çekme kalıntı gerilmelerini kontrol etmeye yardımcı olabilir. Ayrıca talaşlı imalatta, beyaz tabaka ve çekme tipi kalıntı gerilme oluşumlarının ana nedenlerinden sayılan aşınmış takım kullanımının önüne geçmek için otomatik bir takım durumu izleme sistemi geliştirilebilir. Optimize edilmiş takım ömrü için kesici takımı incelemek veya beyaz tabaka oluşumunun ötesinde kesinleşen ayar noktasını belirlemek için görüş sistemleri ve diğer temassız teknikler burada kesinlikle önemli bir rol oynayacaktır.

Beyaz tabaka incelemelerinden elde edilen sonuçlar, kalıntı gerilmelerin ve kalıntı östenitin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin, beyaz tabakanın etkisinden daha önemli olduğunu göstermektedir. Fakat kalıntı

gerilme karakterizasyon çalışmalarında, mikro yapının etkileri ve gerilmenin kayma bileşeni görmezden gelinmiştir. Bu nedenle, beyaz tabaka ve yüzey kalıntı gerilmesini gösteren veriler çelişkilidir. Genelde beyaz tabakanın karakterizasyonu, beyaz tabakanın morfolojisi ve tane yapısı ile ilgili herhangi bir bilgi veremeyen optik ve taramalı elektron mikroskopları ile yapılmıştır. Bu yüzden, mikroyapı, tane boyutu, sertlik ve kalıntı östenit durumlarını yeterince göz önünde bulundurmadığından, beyaz tabakanın yorulma ömrüne etkisi üzerine yapılan çalışmalar tutarlı görünmemektedir.

Diğer yandan, deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop ve SEM gibi karakterizasyon teknikleri, aşırı plastik deformasyonla oluşan nano-metre boyutundaki alt-taneleri içeren beyaz tabakaları karakterize etmek için gerekli çözünürlükten yoksun olduğundan TEM gibi ileri teknikler kullanılmalıdır. Ayrıca, araştırmalarda, dönüşüm mekanizmasını anlamak, kalıntı gerilme durumunu ve kalıntı östenit seviyesini belirlemek için konvansiyonel XRD kullanılmıştır. Derin penetrasyon derinliklerinde uygulaması sınırlı olan konvansiyonel XRD yerine Bakış Açısı XRD (GAXRD) kullanılmalıdır. Beyaz tabakadaki mikroyapı, nano tane boyutu, tabaka kalınlığı, kalıntı östenit durumu, faz ve karbür morfolojisi, tane sınırlarındaki karbür ayrışması vb. karakterizasyon çalışmalarında; TEM, SAD, GAXRD, APT gibi gelişmiş tekniklerin kullanılması, beyaz tabaka fenomeninin daha iyi anlaşılması ve çözüm önerileri geliştirilmesi hususunda faydalı olacaktır.

Tüm bunlara ek olarak, beyaz tabaka alanındaki ayrıntılı deneysel araştırmaların bazıları, kesme parametrelerinin beyaz tabaka oluşumu üzerindeki etkileri hakkında çok tutarlı ve güvenilir bilgiler sunmuştur. Fakat çalışmaların çoğu, sertleştirilmiş AISI 52100 rulman çeliği etrafında geliştirilmiş ve diğer çelik ve demir dışı malzeme türleri göz ardı edilmiştir. Sonuç olarak; beyaz tabaka oluşumunun sebebi konusunda değişik öneriler olmasına rağmen sorun tam olarak anlaşılmadığından konu hala araştırılmaktadır. Diğer malzemeler için de gelişmiş karakterizasyon teknikleriyle yapılacak deneysel çalışmalar ile parametrelerin etkileri belirlenmeli ve elde edilen veriler matematiksel olarak modellenmelidir. Böylece talaşlı imalatta oluşan beyaz tabakanın ortadan kaldırılması için optimum değerler önerilebilir.

KAYNAKÇA

Abrão, A. M., & Aspinwall, D. K. (1996). The Surface Integrity of Turned And Ground Hardened Bearing Steel. *Wear*, 196(1-2), 279-284.

Akcan, S., Shah, W. S., Moylan, S. P., Chandrasekar, S., Chhabra, P. N., & Yang, H. T. Y. (2002). Formation of White Layers in Steels By Machining and Their Characteristics. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(4), 1245-1254.

Aramcharoen, A., & Mativenga, P. T. (2008). White Layer Formation and Hardening Effects in Hard Turning of H13 Tool Steel with CrTiAlN and CrTiAlN/MoST-Coated Carbide Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(7), 650-657.

Barry, J., & Byrne, G. (2002). TEM Study on The Surface white Layer in Two Turned Hardened Steels. *Materials Science and Engineering: A*, 325(1-2), 356-364.

Bedekar, V. (2013). *Nanostructural Evolution of Hard Turning Layers in Carburized Steel*. PhD Thesis, The Ohio State University, Ohio.

Blunt L.A. (1989). PhD Thesis, Coventry Polytechnic, UK.

Bosheh, S. S., & Mativenga, P. T. (2006). White Layer Formation in Hard Turning of H13 Tool Steel at High Cutting Speeds Using CBN tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2), 225-233.

Brinksmeier, E., & Brockhoff, T. (1999, March). White layers in machining steels. In Proceedings of the 2nd International Conference on HSM, Darmstadt.

Chou, Y. K., & Evans, C. J. (1999). White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(12), 1863-1881.

Dawson, T. G. (1999). *Effects of Cutting Parameters and Tool Wear in Hard Turning*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Eyre, T. S., & Baxter, A. (1972). The Formation of White Layers at Rubbing Surfaces. *Tribology*, 5(6), 256-261.

Griffiths, B. J. (1987). Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and Deformation Processes. *Journal of Tribology*, 109:525-530.

Guo, Y. B., Anurag, S., & Jawahir, I. S. (2009). A Novel Hybrid Predictive Model and Validation of Unique Hook-Shaped Residual Stress Profiles in Hard Turning. *CIRP annals*, 58(1), 81-84.

Guo, Y. B., & Sahni, J. (2004). A Comparative Study of Hard Turned and Cylindrically Ground White Layers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(2-3), 135-145.

Guo, Y. B., & Schwach, D. W. (2005). An Experimental Investigation of White Layer on Rolling Contact Fatigue Using Acoustic Emission Technique. *International Journal of Fatigue*, 27(9), 1051-1061.

Guo, Y. B., Warren, A. W., & Hashimoto, F. (2010). The Basic Relationships Between Residual Stress, White Layer, And Fatigue Life of Hard Turned and Ground Surfaces in Rolling Contact. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 129-134.

Han, S. (2006). *Mechanisms and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steel*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Han, S., Melkote, S. N., Haluska, M. S., & Watkins, T. R. (2008). White Layer Formation Due to Phase Transformation in Orthogonal Machining of AISI 1045 Annealed Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2), 195-204.

Hashimoto, F., Guo, Y. B., & Warren, A. W. (2006). Surface Integrity Difference Between Hard Turned and Ground Surfaces and Its Impact on Fatigue Life. *CIRP annals*, 55(1), 81-84.

Kang, J. H., Hosseinkhani, B., & Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. (2012). Rolling Contact Fatigue in Bearings: Multiscale Overview. *Materials Science and Technology*, 28(1), 44-49.

Kim, W., & Kwon, P. (2002). Phase Transformation and Its Effect on Flank Wear in Machining Steels. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 124(3), 659-666.

König, W., Klinger, M., & Link, R. (1990). Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges—Field of Applications and Limitations. *CIRP Annals*, 39(1), 61-64.

Krauss, G. (1990). *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. ASM International, 497.

Kuznetsov, V. D., Savitskiy, K. V., & Sukharina, N. N. (1963). Some Properties of The Structure of White Layers. *Fiz. Met. Metalloved*, 15, 145-147.

Lu, J. (Ed.). (1996). *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Fairmont Press, NJ.

Manion, S. A., and Stock, T. A. C , "Adiabatic Shear Bands in Steel," Int. Jrnl. Fracture Mech., Vol. 6, 1970, pp. 106-107.

Moshier, M. A., & Hillberry, B. M. (1999). The Inclusion of Compressive Residual Stress Effects in Crack Growth Modelling. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (Print)*, 22(6), 519-526.

O'Niell. (1967). *Hardness Measurement of Metals & Alloys*. Published by Chapman & Hall, 2nd Ed., p. 147.

Poulachon, G., Albert, A., Schluraff, M. A., & Jawahir, I. S. (2005). An Experimental Investigation of Work Material Microstructure Effects on White Layer Formation in PCBN Hard Turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2), 211-218.

Ramesh, A. (2002). *Prediction of Process-Induced Microstructural Changes and Residual Stresses in Orthogonal Hard Machining*. Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Ramesh, A., & Melkote, S. N. (2008). Modeling of White Layer Formation Under Thermally Dominant Conditions in Orthogonal Machining of Hardened AISI 52100 Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(3-4), 402-414.

Ramesh, A., Melkote, S. N., Allard, L. F., Riester, L., & Watkins, T. R. (2005). Analysis of White Layers Formed in Hard Turning of AISI 52100 Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 390(1-2), 88-97.

Ranganath, S., Guo, C., & Hegde, P. (2009). A Finite Element Modeling Approach to Predicting White Layer Formation in Nickel Superalloys. *CIRP annals*, 58(1), 77-80.

Turley, D. M. (1973). Deformed Layers Produced by Machining. *Tech. Paper IQ 73-604, Society of Manufacturing Engineers*, 20501 Ford Rd., Dearborn, Mich. 1973, 14 p.

Turley, D. M., Doyle, E. D., & Samuels, L. E. (1974). The Structure of The Damaged Layer on Metals. *In Proc. Int. Conf. Prod. Eng* (pp. 142-147).

Schwach, D. W., & Guo, Y. B. (2005). Feasibility of Producing Optimal Surface Integrity by Process Design in Hard Turning. *Materials Science and Engineering: A*, 395(1-2), 116-123.

Shaw, M. C., & Vyas, A. (1994). Heat-Affected Zones in Grinding Steel. *CIRP annals*, 43(1), 279-282.

Smith, S., Melkote, S. N., Lara-Curzio, E., Watkins, T. R., Allard, L., & Riester, L. (2007). Effect of Surface Integrity of Hard Turned AISI 52100 Steel on Fatigue Performance. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1-2), 337-346.

Toribio, J. (1998). Role of Crack-Tip Residual Stresses in Stress Corrosion Behaviour of Prestressing Steel. *Construction and Building Materials*, 12(5), 283-287.

Totten, G. E. (Ed.). (2002). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Materials Park, ASM international, OH.

Turley, D. M. (1975). The Nature of The White-Etching Surface Layers Produced During Reaming Ultra-High Strength Steel. *Materials Science and Engineering*, 19(1), 79-86.

Tönshoff, H. K., Wobker, H. G., & Brandt, D. (1995). Hard Turning-Influences on The Workpiece Properties. *Transactions-North American Manufacturing Research Institution of Sme*, 215-220.

Umbrello, D., & Filice, L. (2009). Improving Surface Integrity in Orthogonal Machining of Hardened AISI 52100 Steel by Modeling White and Dark Layers Formation. *CIRP annals*, 58(1), 73-76.

Warren, A. W., & Guo, Y. B. (2009). Characteristics of Residual Stress Profiles in Hard Turned Versus Ground Surfaces With and Without A White Layer. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(4), 616-623.

Warren, A. W., Guo, Y. B., & Weaver, M. L. (2006). The Influence of Machining Induced Residual Stress and Phase Transformation on The Measurement of Subsurface Mechanical Behavior Using Nanoindentation. *Surface and Coatings Technology*, 200(11), 3459-3467.

Xiao, G., Stevenson, R., Hanna, I. M., & Hucker, S. A. (2002). Modeling of Residual Stress In Grinding of Nodular Cast Iron. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 124(4), 833-839.

Zhu, L., Tao, X. Y., & Cengdian, L. (1998). Fatigue Strength and Crack Propagation Life of in-Service High Pressure Tubular Reactor Under Residual Stress. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75(12), 871-877.

4D BASKI TEKNOLOJİSİ VE GELECEKTEKİ UYGULAMALAR

Faruk MERT[1], *Özge OLMUŞ*[2]

Öz: 4D baskı teknolojisi kısaca, akıllı malzemeler kullanılarak fiziksel yapıların üretilmesi olarak tanımlanabilir. Bir uyarana yanıt olarak şekil, özellik veya işlev değiştirmek için nesne elektrik, ışık, ısı, nem ve basınç gibi birçok uyarıcıya ihtiyaç duyar. 4D baskı teknolojisi, bilimsel literatüre 2013 yılındaki ilk girişinden bu yana birçok sektörü etkilemiştir. Bu gelişme ile birlikte baskı teknolojilerine daha fazla ilgi gösterilmiştir. Bu yapıları üretmek için şu anda mevcut olan akıllı malzemeler kullanılmakta ve geliştirilmeye devam edilmektedir. 4D baskı ile mevcut yeteneklerin ötesine geçilmeye çalışılmaktadır. Daha geniş bir uygulama yelpazesine yaklaşan hassas ve evrensel katlama teknikleri, tamamen yeni fiziksel modelleme serisini ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Dönüşebilen özel açılı yapılar, bir şekilden başka bir 3D katı yapıya, kavisli yüzeyler için yüzey kıvrımını ve gradyan malzeme dağılımını kullanarak yeni bir dinamik yapının keşfedilmesini imkân kılmaktadır. Bu incelemede, 4D baskı teknolojisinin geniş kapsamda tanımını, nasıl ortaya çıktığını ve 4D baskıda kullanılan malzemelerin özelliklerini baskıdaki gelişim süreci nasıl gerçekleştiği anlatılmaktadır. 4D baskı üretim süreci ve yöntemlerinin aşamaları modelleme, baskı ve baskı sonrası süreçler olarak nasıl gerçekleştiği detaylandırılmıştır. 4D baskı teknolojisinden istifade edecek öncelikli sektörlerden tıp, eklemeli imalat, havacılık, robotik, inşaat, mimari, gıda endüstrisi ve tekstil sektörlerini getireceği yenilik ve gelişmeler ile mevcut uygulamaların örnekleri verilmiştir. Son olarak, 4D baskıda gelişmeler ve gelecek beklentileri tartışılmıştır.

1 Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara / Türkiye, fmert@ybu.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-7298-6225

2 Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara / Türkiye, ozge.olmus@outlook.com, Orcid No: 0000-0000-0000-XXXX

Anahtar Kelimeler: 4D Baskı, Katmanlı Üretim, Akıllı Malzemeler, Uyaran

GİRİŞ

3D baskı; araştırmacılara, üreticilere ve özel kullanıcılara bilgisayar destekli tasarım (CAD) gibi özel yazılımları kullanarak özel 3D nesneler üretilmesini sağlayan yeni bir teknolojidir. Birçok alanda özelleştirilebilir ve kullanım esnekliği sağlamaktadır. Daha uygun fiyatlı ve serbest formaların da kolaylıkla çalışılmasını sağlayan, imalatta malzeme ve enerji kullanımı azaltan teknolojik bir yaklaşımdır. 4D baskı ise çevresel uyaranlara bağlı olarak baskı konfigürasyonunda zaman içerisinde değişiklikler göstermiştir (Nkomo, 2018).

4D baskı il ilgili olarak akıllı tekstil, otonom-robotik, askeri uygulamalar, tıp-sağlık, eklemeli imalat, havacılık, robotik, inşaat-mimari, gıda teknolojileri ve doku mühendisliği alanlarında çalışmalar yürütülmektedir. 4D baskının doğal analoglara ve çevresel uyaranlara tepki verdiği hareketler, doku tarafından yönetilen dinamik şekillenmelere yol açar. Nem, ışık ve diğer uyaranlara tepki olarak hareketlenmeler yapar. 4D baskı teknolojisi katmanlı imalatın ekonomik, jeopolitik, çevresel ve stratejik sonuçlarına sahiptir (Khare vd., 2017).

4D baskı teknolojisi ilk olarak 2013 yılında Massachusetts Insttute of Technology'de (MIT) Skylar Tibbits grubu tarafından tanımlanmıştır ve o zamandan beri ilgili malzemeler, 3D yazıcılar, teşvik mekanizması, yenilikçi kurallara göre tasarım ve uygulamalar geniş çapta araştırılmış ve incelenmiştir. pH seviyesi, çözücü bileşen, manyetizma, elektriksel tepki, gerginlik, sıkıştırma vb. uyaranlar fiziksel yapıların tahmin edilebilir başka bir yapıya dönüştürülmesini sağlamaktadır. 4D baskı; uyarıcıya duyarlı malzemeler, akıllı malzemeler, teşvik edici unsurlar, matematiksel modelleme ve etkileşim mekanizmasının bir ürünü olarak düşünülebilir. Bu kavram, malzemelerin çeşitlenme oranları veya termal genleşme katsayılarıyla 3D baskı aracılığıyla basılabilir ve şekil değiştirme davranışlarına göre daha da değiştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca 4D baskı, mekanik olarak deforme olan uyarıcıya duyarlı aktif akıllı malzemeler olarak da tanımlanabilir (Shie vd., 2019).

"Akıllı" sıfatlı ürünler, malzemeler ve mimari sistemler oluşturmak için önceden ek bileşenlere ihtiyaç duyulmaktaydı. Bu sistemler pahalı, arızaya meyilli ve montajı kolay olmayan unsurlar içermekteydi. Bununla birlikte, 4D baskı artık akıllı malzemelerin doğrusal aktüatörleri, katlama mekanizmaları, kıvrılan/bükülen yüzeyler için malzeme yönünden gelişmiştir. Özünde, baskı teknolojisi bir malzeme ve üretim bilimi olabilir. Ancak tasarımcı, malzemelerin biriktirilmesini özelleştirebilir, anizotropik davranışlar ve çevreye dayalı aktif algılama sağlatabilir (Tibbits vd., 2014).

1984 yılında 3D baskının piyasaya sürülmesinden bu yana yaşanan gelişmeler, gelişmiş imalat teknolojisinde birden çok malzeme kullanımı ve farklı maliyetleri ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, bu yapıların bir eksikliği, statik ve katı yapılar olmasıdır. Yani bulundukları şekli korumak için basılmıştır ve genellikle yalnızca bir işlev gerçekleştirirler. Aktif bileşen dâhil etme dürtüsü bu sınırlamaların üstesinden gelmek için 3D baskı sürecine giren malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Dinamik yapılar oluşturmak için dört boyutlu (4D) baskı teknolojileri, şekillerin zaman içinde veya uyaranlara yanıt olarak kendini değiştirebilen 3D nesnelerin üretim sürecidir. Bu teknikle çok çeşitli aktif programlanabilir malzemeler üretilebilir ve geliştirilebilir. Bir şekilden diğerine, kendi kendine dönüştürme yeteneğine sahip ürün olma özelliği taşırlar (Bajpai vb., 2020).

Son gelişmeler nedeniyle çoklu malzeme imalatı, örneğin Poly-Jet teknolojisi kullanılarak ve işlevsel olarak baskı, Seçici Lazer Eritme (SLM) teknolojisi kullanarak üretilen metal parçalar, 3D Eklemeli İmalatın (AM) bir başarısıdır. 2018 yılındaki yapılan analize göre katmanlı imalat pazarı yüzde 28,6 artarak 12,8 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. Bu umut verici pazar fırsatı, 4D baskı teknolojisi için araştırma gereksinimlerine ve ilgili uygulamalara odaklanmaya, bilimsel ve endüstriyel alanlarda çalışmaya olan ihtiyacı iyice artırmıştır. (Khan vb., 2018).

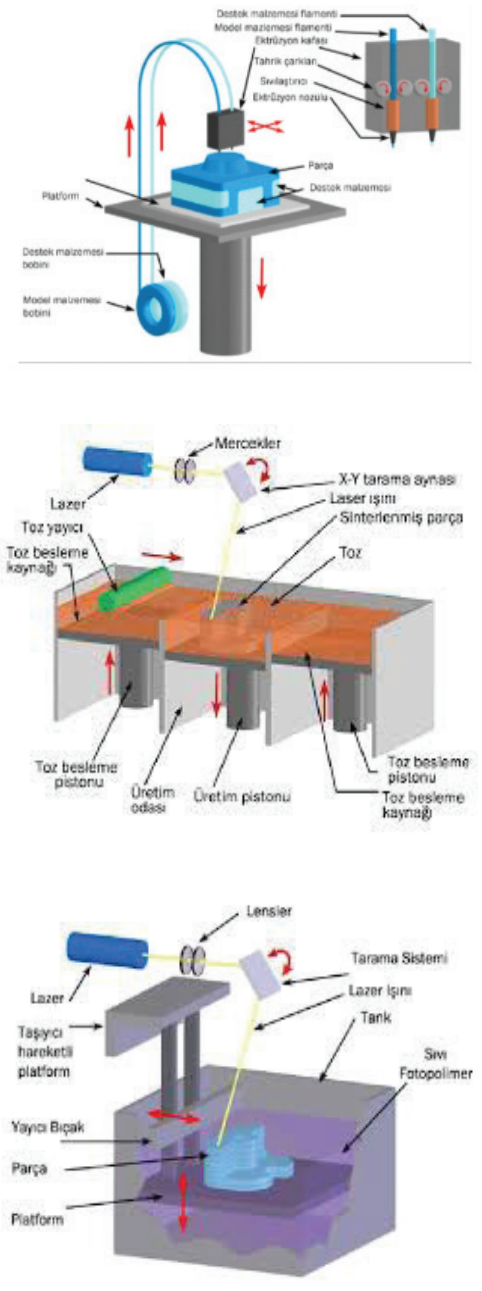
Son birkaç yılda, zamanla gelişen 4D baskı üzerine öncü çalışmalar, makro ölçekte akıllı polimerlere dayalı yapılar üzerine olmuştur. Ancak, makroskobik (tipik olarak toplam boyutta birkaç santimetre) 4D baskı yapılırken, mikro ölçekte 4D baskı henüz emekleme aşamasındadır. 4D mikro baskı, bu gelişmekte olan alanıyla ilgili olarak sanatın malzeme

tasarımına özel odaklanmasına gidebilir. Ek olarak, biyotıp, mikro robot veya optik gibi alanlarda kritik uygulamaları mümkün kılmak için aşılması gereken zorluklarda dış uyaranlara uyumluluk önemli bir ölçüttür (Spiegel vd., 2020).

Bu çalışmada günümüze kadar baskı teknolojilerine ek olarak son zamanlarda gelişen 4D baskı teknolojisi konusunda gelişen ve değişen teknolojinin detaylı incelenmesi ve tartışılması amaçlanmaktadır. 4D baskı teknolojinde kullanılan malzemeler ve özellikleri, 4D baskı kullanacak sektörler ve uygulama alanları, 4D baskı üretim yöntemleri ve süreçleri ile birlikte, 3D ve 4D baskı teknolojileri arasındaki farklılıklar ve gelecekteki gelişim ile birlikte uygulamalar alanlar analiz edilmiş ve tartışılmıştır.

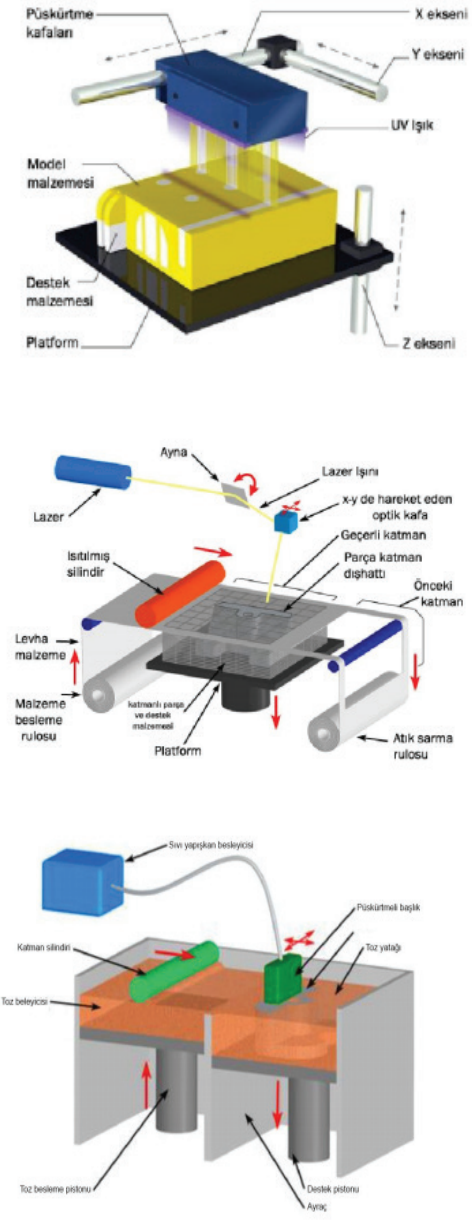
3D BASKI NEDİR?

3D baskı teknolojisi, nesneleri sıralı biçimde dilimlemeye göre imal etmek için kullanılan eklemeli/katmanlı üretim olarak bilinmektedir. 3D baskı; malzemesi katı, sıvı ve toz tabanlı yöntem olarak sınıflandırılır. Katı tabanlı model, eriyik biriktirme modellemesinden (FDM) oluşur. Toz tabanlı model, seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemlerini içerir. Sıvı bazlı desen stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP), doğrudan mürekkeple yazma (DIW) ve mürekkep püskürtmeden oluşur (Quanjin vd., 2020). Tipik olarak Şekil 1'de FDM, SLS ve SLA'nın 3D baskı teknolojisinin çalışma prensibini şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. FDM, SLS ve SLA Baskı Teknikleri

Tipik olarak Şekil 2'de POLY-JET, LOM ve BİNDER JET 'nın 3D baskı teknolojisinin çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2. POLY-JET, LOM ve BINDER JET Baskı Teknikleri

Tipik olarak Şekil 2'de POLY-JET, LOM ve BİNDER JET 'nın 3D baskı teknolojisinin çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir.

Hâlihazırda 3D yazıcıların kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır. Farklı alanlarda farklı 3D baskı teknolojileri ile uygulamalar yapılmakta ve çalışmalar devam etmektedir.

- *Otomotiv Parçaları*
- *Mühendislik*
- *Mimarlık ve İnşaat*
- *Kuyumculuk ve Aksesuar*
- *Sanat*
- *Kalıp*
- *Medikal Parçaları*
- *Dental*
- *Beyaz Eşya Parçaları*
- *Eğitim*
- *Havacılık*
- *Uzay*
- *Mobilya*
- *Aydınlatma*
- *Gıda*

Bazı hammadde imalatçıları tarafından, bu teknolojik gelişimin ticaretin doğasını değiştireceği öngörmektedirler. Çünkü son kullanıcılar, kişilerden ve şirketlerden ürün satın almak için ticaret yapmak yerine kendi imalatlarını yapabileceklerini düşünmektedirler. Bu da maliyet masraflarını düşürecek ve enerji kaybına yol açmayacaktır (Lui vd., 2019).

Enerji kullanımı, atık azaltma, kişiselleştirme, ürün bulunabilirliği, ilaç, sanat, mimari ve mühendislik bilimleri üzerindeki etkileriyle 3D baskı teknolojisinin üretim dünyasını değiştireceği düşünülmektedir. Daha yaygın biçimde kullanılması hedeflenen 3D baskı için ülkeler kendi bünyelerinde birçok destek sağlamaktadır. Eğitim alanlarında da bu teknolojik gelişmelerin takip edilmesi amacı ile alanla bağlantılı eğitim

kurumlarında ilkokullar, liseler ve üniversitelerde 3D yazıcıların eğitim ortamında neler yapabileceğini göstermesini sağlayan çalışmalar bulunmaktadır.

Şu anda, pazarda uygun fiyatlı masaüstü yüzden fazla 3D yazıcı çeşidi bulunmaktadır. Farklı malzemeler ve işlevlere hizmet veren birkaç eklemeli/katmanlı üretim tekniği vardır. Yöntemlerin özelliklerini ve farklılıklarını anlamak için 3D baskı yöntemleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Ayrıca, açıklamalarda güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri gösteren 3D baskı teknolojisinin SWOT analizi sonucu gösterilmektedir. 3D baskının farklı yöntemlerle SWOT analizinin teknik özelliklerinin değerlendirilmesi ve belirtilmesi açısından faydalı olduğu vurgulanmaktadır (Şahin ve Turan, 2018).

Tablo 1. 3D Baskı Teknolojilerinin Karşılaştırılması (Şahin ve Turan, 2018)

YÖNTEM	ÇALIŞMA PRENSİBİ	KULLANDIĞI MALZEME	ÇÖZÜNÜRLÜK	MUKAVEMET	PÜRÜZLÜLÜK	AÇIKLAMA
FDM (Eriyik Yığma Modelleme)	Birleştirmeli yığma tekniği	ABS, PLA	ORTA	İYİ	ORTA	Ofis ortamında kullanılabilir. Çok parçadan oluşan, hareketli fonksiyonel, elastik modeller üretmek için uygundur. Parçalar suya ve neme dayanıklı, üretim maliyeti düşük, hızlı. Küçük parçalarda, detay bölgelerde ve ince kesitlerde çok iyi değil

SLS (Seçici Lazer Sinterleme)	Tozun CO2 lazer ile sinterlenmesi	Poliamid, polistren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid, polikarbonat, paslanmaz çelik,kobalt, seramik	ZAYIF	İYİ	ZAYIF	Geniş malzeme desteği, malzeme değişimi zor, düşük maliyetli
SLA (Tarayarak Işıkla Kürleme Tekniği)	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırılması	Reçine bazlı malzemeler,akrilik,epoksi, polipropilen	İYİ	ORTA	İYİ	Yüksek doğrulukta parça üretimi için tercih edilir. Renklendirme yapılabilir. Yaygın kullanılır. Parçalarda çarpılma ve büzülme olabilir
POLY-JET (Çoklu jet)	Fotopolimer püskürtme ve UV ile katılaştırılması	Akrilik	İYİ	ZAYIF	İYİ	Kullanımı kolay, hızı yüksek, kalite yüksek, ofis/ev ortamına uygun
LOM (Tabakalı Yapıştırmalı Parça İmalatı)	Tabakaların lazerle kesilip yapıştırılması	Kâğıt, plastik köpük, metal ve seramik tozu emdirilmiş malzemeler	ORTA	ORTA	ORTA	Büyük hacimli parçalar yüksek hızda üretilebilir. Parçaların mekanik özellikleri iyi değildir
BİNDER JET (Bağlayıcı püskürtme tekniği)	Toz ile dolu tabakaların yapışkan sıvıyla doldurulması	Plastik toz	ORTA	ORTA	ORTA	Detaylı parçaların üretiminde kullanılabilir

4D Baskı Nedir?

4D baskı teknolojisi kısaca 3D baskı ile gelişen akıllı malzemelerin birleşimi olarak tanımlamak yeterli olabilir. İşlenebilir şekillere veya işlevselliğe sahip dinamik yapılar üretebilen herhangi bir baskı tekniği 4D baskı olarak adlandırılabilir. (Wu vd., 2018).

Dijital verilerden 3B koordinatlarda statik yapılar oluşturmak için 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır, 4 D baskı çevresel uyaranlara bağlı olarak zaman içinde basılı konfigürasyonda değişim kavramını ekler. 3D ve 4D baskı arasındaki temel fark, akıllı tasarım ve akıllı malzemelerdir, çünkü 4D baskılı yapılar şekil veya işlev olarak dönüşebilir. Bu, nesnenin beklenen herhangi bir zamana bağlı deformasyonunu hesaba katarak 4D basılı yapıların ayrıntılı olarak tam olarak programlanması gerektiği anlamına gelir. 4D baskı, ilk olarak Massachusetts Institute of Technology (MIT) 'nin bir araştırma grubu tarafından tanıtıldı ve zamanın bir fonksiyonu olarak uyarlanabilir ve programlanabilir şekiller, özellikler veya işlevselliğe sahip 3D baskılı yapıların üretimi olarak tanımlandı.

4D baskının gerçekleşmesi için 3 temel öğenin yerine getirilmesi gerekir. Birincisi, farklı özelliklere sahip çoklu malzemeleri birleştiren uyarıcıya duyarlı kompozit malzemelerin kullanımıdır. İkincisi, nesnenin canlanmasına neden olan nesneye etki edecek uyaranlardır. Bu uyaranlara örnek olarak ısıtma, soğutma, yerçekimi, ultraviyole (UV) ışık, manyetik alan, su ve hatta nem dâhildir. Son olarak, simülasyonun gerçekleşme zamanıdır. Sonuç olarak nesnenin durumunun ilk halden son haline evrilmesidir (Nkomo, 2018).

Son teknoloji ürünü ticari basılabilir malzemeler, çeşitli son uygulamaları karşılamak için esas olarak sert, elastik, şeffaf, renkli veya geri dönüştürülebilir vb. olacak şekilde formüle edilir. Tibbits, 2013 TED konferansında statik basılı bir nesnenin zaman içinde nasıl dönüştüğünü göstermiştir. Bu, 4D baskı konseptinin başlangıcı oldu. 2013'den beri 4D baskı, 3D baskının gelişmiş bir alanı olarak gösterildi ve araştırmacılar tarafından giderek daha fazla dikkatini çekti (Wu vd., 2018).

4D baskının temel özelliği, nesnelerin artık statik değil aktif olmasıdır. Malzemeler, önceden programlanmış ve aktif bir şekilde zaman

içinde yeniden şekillenebilirler ve süreçte işlev gelişimi ile birlikte olabilirler. Şimdilerde 4D baskının standart bir tanımı yoktur. Aktif ve akıllı malzemelerin kullanımının 4D baskıdaki yazıcılarla adapte olabilmesi çok önemlidir. Teknolojinin daha da ileriye gitmesi için yazıcılara uyum sağlayan akıllı malzeme geliştirmek için daha fazla araştırma yapılmalı ve geliştirilmelidir.

Özellikle aktif şekil değiştiren malzeme kullanımı çeşitlilik açısından çok daha farklı fırsatlar sağlar. Bugün kullanılan 4D baskı teknikleri ve malzemeleri tamamen polimerlerle ilgilidir. Bundan dolayı 4D baskı için aktif veya akıllı polimerlere (malzemelere) dikkat çekilmektedir. 3D baskı ve aktif polimerlerin birleşmesiyle matematiksel modelleme ile birlikte uyarımla birlikte, basılı nesnenin dönüşmesine izin verir.

Başka bir etken madde olarak sıcaklık, nem, pH, manyetik alan gibi harici uyaranlara yanıt olarak bir hacim değişikliğine uğrayabilen uyarıcıya duyarlı hidrojellerdir. Bugüne kadar, 4D baskıda kullanılan aktif polimerler, SMP'ler ve hidrojellerdir (Kuang vd., 2019).

SMP'leri hidrojellerden ayıran en önemli özellik, bazı hidrojeller şekil hafızası işlevlerine sahip olacak şekilde formüle edilebilmesine rağmen, SMP'ler için şekil değiştirme yolunun basıldıktan sonra programlanabilmesidir. SMP'ler ve hidrojeller, tek malzemeli bir yapı oluşturmak için basılabilir ve daha sonra değişime uğrayabilir. Bununla birlikte, 4D baskı üzerine yapılan ilk çalışmalarda, farklı aktif materyallerin ve aktif olmayan materyallerin bir kombine olabilen yapılara odaklanmıştır. Basılan çok malzemeli yapılar, yönlü şekil değişiklikleri sağlamaktadır.

4D baskı, 3D baskının hâlihazırda dikkate değer bir değişiklik yaptığı alanlarda pek çok gelişmeyi beraberinde getirecektir. 4D yazıcıların biyomedikal, robotik ve havacılık uygulamalarından mühendisliğe, iklime ve hatta makro yaşamımıza kadar geniş uygulamaları olacağı düşünülmektedir (Mostakim vb., 2020).

Akıllı malzemeler birçok araştırma alanında kullanılmasına rağmen, akıllı malzemeler için her şeyi kapsayan bilgiyi tanımlamak zordur. Akıllı malzemeler, dış ortama tepki olarak malzeme özelliklerini veya şeklini değiştirebilen malzemelerdir. Akıllı malzemelerin 3D baskı teknolojisinde kullanılması, 4D baskının tanınmasına yol açmıştır. 4D baskı

özünde akıllı malzemeye, katmanlı üretim teknolojilerine ve tasarıma bağlıdır. 4D baskı, çeşitli özelliklerde 3D baskıya göre birçok avantaja sahiptir. Akıllı malzemelerde üretim ve sürekli gelişme, yararlanılacak teknolojinin gelecekteki potansiyeli için artık daha fazla umut olduğunu göstermektedir.

Son zamanlarda 4D baskı alanında faaliyet gösteren araştırmacılar tarafından birçok gelişme yapılmıştır. Bu gelişmelerden bazıları, 4D baskı uygulamalarında ele alınan ve 4D baskı sürecinin matematiksel modellemesi yoluyla simüle edilen parçaların şekil değiştirme davranışını, malzeme yapılarını ve çeşitli uyaranları içermektedir (Khan vb., 2018). Herhangi bir 4D basılı sistemdeki en büyük zorluk, rastgele bir şekilden diğerine dönüşebilen yapıların nasıl tasarlanacağıdır.

Karmaşık malzeme programlanması, hassas çoklu malzeme baskısı ve katlama, kıvrılma, bükme, doğrusal genişleme/büzülme vb. çeşitli son derece spesifik bağlantı tasarımları gerektirir. Yazılım cephesinde, zorluk daha da büyüktür ve karmaşıktır. Simülasyon ve topoloji dönüşümü, üretim ve malzeme kısıtlamalarını ve yakın gelecekte verimli yapılar için malzeme optimizasyonunu içermektedir (Melly vd., 2020).

Son olarak, katlama ve buruşma yerine yüzey kıvrılmasını ve bükülmesini göstermek için dinamik bir alan ve yüzey desenine izin veren bir dizi model üretilmiştir (Tibbits vb., 2014).

4D Baskıda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Akıllı malzemeler, 4D baskı teknolojisinin kullanılması ve geliştirilmesi için çok önemlidir. Akıllı malzemelerin mutlaka şekil değiştirme yeteneğine sahip olması gerekmez (Nkomo, 2018). Sertlik, şeffaflık ve renk değiştirme kabiliyetine sahip malzemelerin kullanılmasında kamuflaj, sinyal verme, yabancı maddelerin tespiti ve biyomedikal uygulamalarda da önemlidir. Tablo 2 'de gösterilen malzemeler, 4D basılı nesneler vererek zaman içinde dönüşebilen nesneler elde etmek için 3D baskıda akıllı malzemeler olarak kullanılabilir.

Şekil, özellik veya işlevsellikteki zamana bağlı değişiklik, farklı türde uyaranlarla tetiklenebilir. 4D baskıda ısı, pH, ısı ve suyun yanı sıra ısı ve ışık kombinasyonu gibi diğer uyaranlar da kullanılabilir.

Tablo 2. 4D Baskıda Kullanılan Tipik Akıllı Malzemeler (Nkomo, 2018)

Malzeme	Girdi/Uyaran	Çıktı/Yanıt	Uygulama
Polimerik Jel	Ph değişimi	Şişme veya kasılma	Yapay kas
Elektro-reolojik sıvı	Elektrik sinyali	Viskozite değişimi	Burulma direksiyon sistemi sönümleyici
Piroelektrik Malzeme	Sıcaklık	Elektrik sinyali	Personel algılayıcı (Açık süpermarket kapısı)
Polimer (İnce film selüloz veya seramik vb.)	Nem değişimi	Kapasite/Direnç değişimi	Nem sensörü
Kendi kendine iyileşen malzemeler	Kuvvet	Kuvvet	Akıllı telefon kasası
Akıllı metal alaşımlar	Sıcaklık	Şekil	Motor aktüatörleri
Dielektrik Elastomerler	Voltaj	Gerginlik	Robot
Seramikler (örn. La katkılı $BaTiO_3$)	Akım	Direnç	Termistor / Aşırı akım koruyucu
Varistör (örn. Bi katkılı ZnO)	Voltaj	Direnç	Dalgalanma koruyucu
Piezoelektrik malzeme	Deformasyon/ Zorlama Elektrik sinyali	Elektrik sinyali	Aktif gürültü kontrol cihazları, basınç ve titreşim hassaslaştırıcı

Termo Duyarlı

Bu materyaller, Şekil Hafızası Etkisi mekanizması üzerinde çalışır (Miao vd., 2017). Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA), Şekil Hafızalı Polimerler (SMP), Şekil Hafızalı Hibritler (SMH), Şekil Hafızalı Seramikler (SMC) ve Şekil Hafızalı Jeller (SMG) olarak sınıflandırılırlar. Araştırmacıların çoğu, bu malzemeler içinde baskı yapmanın kolay olması sebebiyle SMP'leri tercih etmektedirler (Khan vb., 2018).

SMP'ler genellikle çalışma sıcaklıklarından daha yüksek camsı geçiş sıcaklıklarına sahiptir. Camsı geçiş sıcaklıklarının üzerinde belirli ısı ve mekanik işlemler altında programlanırlar. Daha sonra yük olmaksızın geçici bir şekilde sabitlenir ve soğutulurlar. Örnek daha sonra sıcaklık değerinin üzerine çıktıktan sonra orijinal kalıcı şekline geri döner.

Neme Duyarlı

Su veya nem ile temas ettiğinde reaksiyona giren malzemeler bu kategori altında sınıflandırılırlar. Su, bol miktarda neme sahip olduğu için çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu tür malzemeler araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir. Hidrojeller, neme karşı olağanüstü duyarlı malzemelerdir. Hidrojel, su ile kuvvetli bir şekilde reaksiyona girdiği için bu akıllı malzemeler arasında yer almaktadır. Örneğin hidrojeller, suyla temas ettiğinde boyutunu orijinal hacminin % 200'üne kadar genişlemelerine izin verirler (Champeau vd., 2020).

Hidrojellerin davranışını programlamak için, şişmeye çok yönlü şekillenme verilmesi gerekir. Hidrojeller normalde sulu bir ortama batırılırlar ve bu da hidrojellerin ara kontrol edilebilirliğini sınırlayan nem doyma noktasına kadar suyu emmelerine neden olur. Bununla birlikte, hidrojellerin şişmesi, sulu ortamın sıcaklığı ile kontrol edilebilir. Daldırıldığı yerde suyu ısıtarak veya soğutarak, doygunluk noktasını ayarlayarak tersine çevrilebilir çalıştırma elde etmek mümkündür. Aşırı şişmeyi önlemek için özel eklemler kullanılır. Katlama öncesi programlanmış bir açıda duracak şekilde eklemlere sert plakalar basılır. Bu açıya ulaşıldığında, aşırı eğilmeye karşı direnç sağlamak için plaka uçları birbirine temas eder.

Işığa Duyarlı

Isı ve nemden farklı olarak, ışık dolaylı bir uyarıcıdır; ışığa duyarlı bir malzemenin açıkta kalan alanı, ışığı ısı olarak emer (Miao vd., 2017). Işık gücü, eklemin renkleri ve ışık kaynağı ile oranın belirlendiği ısı olarak eklemler tarafından emilir. Işığa duyarlı kromoforlar, belirli konumlarda polimer jeller ile aşılandıklarında, doğal ışığa maruz kaldıklarında ışığı emerek şişerler.

Elektro Duyarlı

Işık gibi elektronik akım da 4D baskıda dolaylı bir uyarıcı olarak kullanılabilir. Su emilimini veya adsorpsiyon kontrol etmek için polipirol (PPy) filmlere de bir akım uygulanır (Choi vd., 2015).

Manyetik Duyarlı

Manyetik alanlara tepki veren 4D baskılı nesneler, manyeto-duyarlı malzemeler olarak adlandırılır (Khan vb., 2018). Manyetik partiküller, nesnenin manyetik kontrolünü elde etmek için basılı nesneye entegre edilir. Entegre edilen demir oksit tozlarının malzeme çözeltisi ile karıştırıldığı ön işlem gerçekleştirilir. Bu mekanik duyarlı malzeme teknolojisi, polimer baskı ve metal baskıda önemli potansiyele sahiptir. Dezavantajı ise, yeterince hafif olması gereken baskının manyetik alandan etkilenmesi için baskı boyutu kısıtlanmalıdır.

4D Baskı Üretim Süreci ve Yöntemleri

4D baskıda, istenen parçaları elde etmek için 3D baskı teknolojileri kullanılmaktadır. Bilindiği kadarıyla, şu anda 4D baskı için özel olarak tasarlanmış bir Katmanlı İmalat (AM) tekniği bulunmamaktadır.

Modelleme

Yöntemler, 3D (CAD) verilerine dayalı olarak malzemenin katman katman biriktirilmesini kullanarak parçayı oluştursa da kullanılan tekniklerde farklılık gösterir. Bilgisayar kontrollü bir program altında fiziksel bir malzeme oluşturmak için sürekli olarak malzeme katmanları oluşturulur.

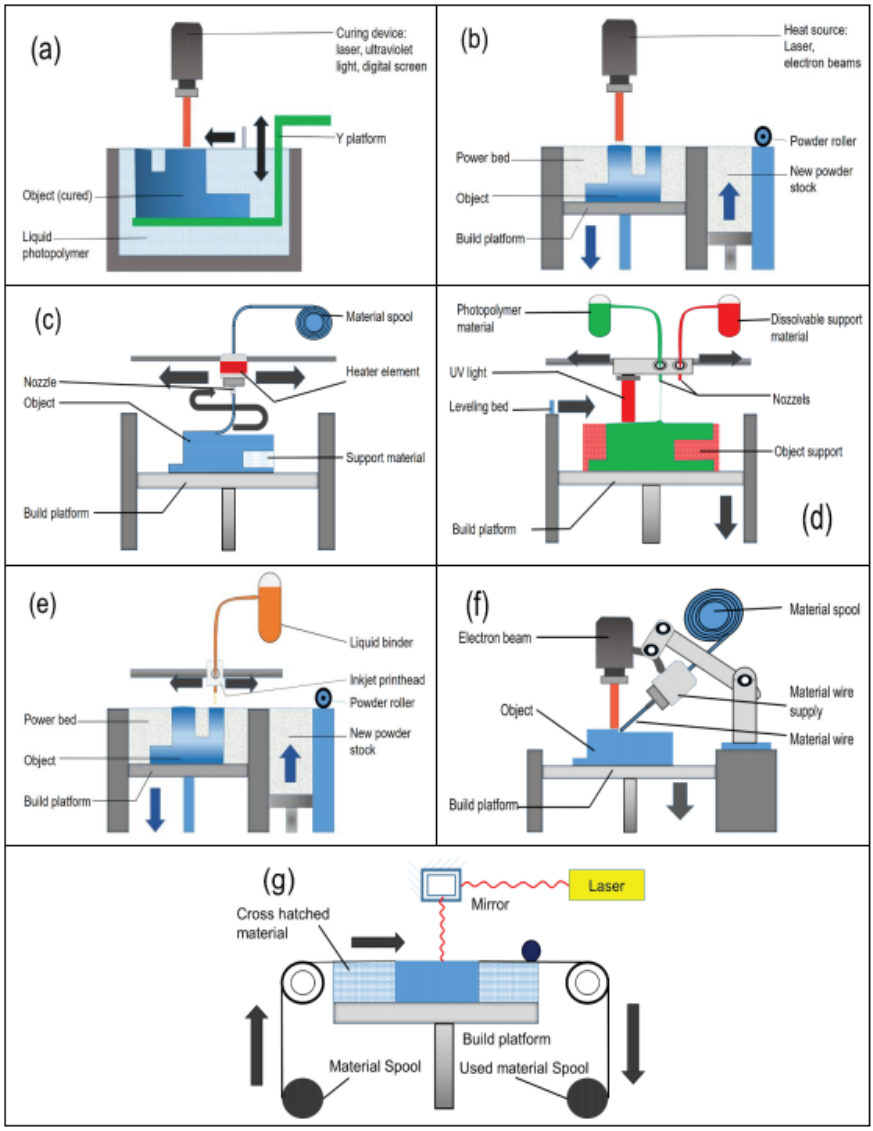
Baskı hızı, lazer frekansı ve nozul sıcaklığı gibi parametreler doğrudan imalat doğruluğunu etkiler. Bu nedenle bunlar araştırılmalı ve optimize edilmelidir. Doğru baskıyı yerleştirmek ayrıca nesnenin şekil hafızası işlevselliğin kolaylaştırır. 3 boyutlu yapıyı üretebilmek için Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modeli gereklidir. Çoğu durumda, tasarım model dijital olarak ince yatay katmanlara bölünür ve yazıcı, malzemenin her katmanını sırayla yazdırarak ortaya çıkarır.

Bir 4D simülasyon yazılımı olan "Project Cyborg", MIT Self-Assembly Lab ve Autodesk ortaklığı ile Stratasys tarafından geliştirilmiştir. Yazılım, programlanabilir malzemeler için simülasyon, kendi kendine montaj ile birlikte tasarım kısıtlamaları ve ek yerleri için optimizasyon sağlamaktadır. 4D baskı süreci için başka bir simülasyon yazılımı olan "4D Modeller" Güney Kore Bilim ve Teknoloji'den Gwangju Insti-tute

tarafından tasarlanmıştır. Bu teknoloji henüz belirli bir seviyeye kadar gelişmiştir. 4D baskı yazılımı geliştirme ve araştırma henüz istenen seviyeye ulaşmamıştır (Zafar ve Zhao 2019). 4D baskı alanında çalışan araştırmacılara yardımcı olması için, şekil hafızalı malzemelerdeki şekil hafızası etkisini simüle etmek için kapsamlı bir çalışma yapılması gerekmektedir.

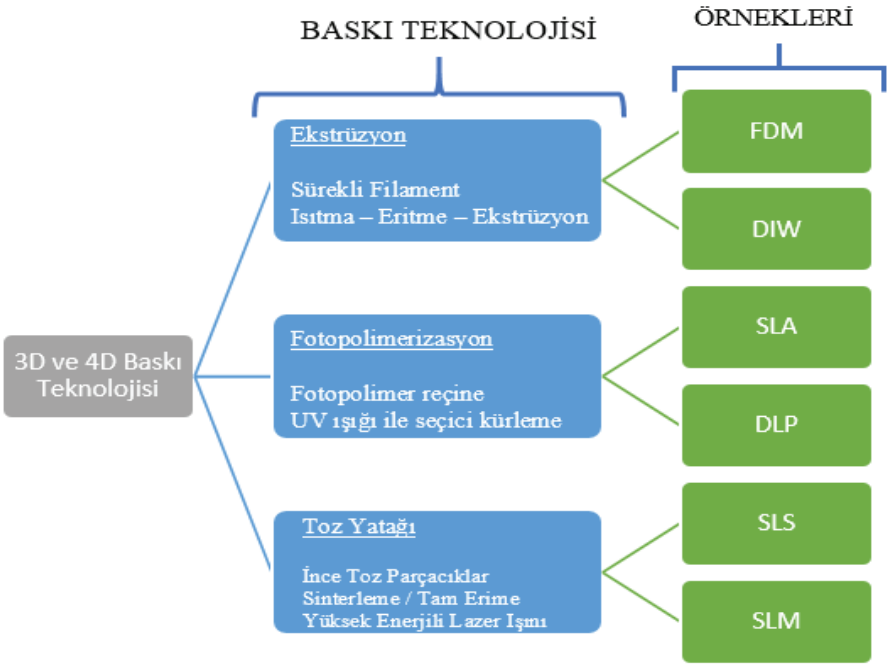
Baskı

Piyasada bulunan ana 4D katkı maddesi üretim süreçleri, ilgili baskı mekanizmalarına göre geniş bir biçimde Şekil 3'te kategorize edilmiştir. Bunlar sıvı katılaşma, toz katılaştırma ve doğrudan malzeme ekstrüzyonu olarak sıralanabilir. Bu yöntemler bir fotopolimerin ışıkla sertleştirilmesi, eriyik malzeme ekstrüzyonu ve doğrudan mürekkep baskısını içermektedir.



Şekil 4. 3D Baskı Yöntemlerinde Kullanılan Farklı Katlamalı İmalat Teknolojileri (a)Fotopolimerizasyon (b) Toz Yatağı (c) Malzeme Ekstrüzyon (d) Materyal – Jetting (e) Binder – Jetting (f) Direk Enerji Birikimi (g) Levha Laminasyonu. 4D Baskıda Kullanılan Katmanlı İmalat (AM) Teknolojileri Kaynaşmış Biriktirme Modellemesi (FDM) ; Seçici Lazer Sinterleme (SLS); Stereolitografi (SLA) ve POLYJET

4D baskıda teknik hem basılacak akıllı malzemelere hem de istenen özelliklere / işleve bağlı olarak seçilir. Şekil 4'de 3D ve 4D baskıda kullanılan baskı teknolojileri ve örnekleri gösterilmiştir (Ding vd., 2019).



Şekil 4. 3D ve 4D Baskıda Kullanılan Ortak Baskı Teknolojileri ve Örnekleri

Baskı Sonrası Süreçler

Skylar Tibbits, 2013 yılında 4D baskı teknolojisini tanıttığında, baskı alınan yapının sadece doksan derece dönüşümle katlandığını ve basılı numune suya batırıldığında aktif hale geldiği göstermişti. Benzer araştırmalar, ısıyla aktivasyon üzerine uzanan kompozit baskılı malzemeler, ışıkla etkinleşen malzemeler ve elektrikle etkinleştirilmiş malzemelerle olduğunu göstermiştir. Bu alanda ilerleme devam ederken, bir şekilden diğerine geçişte evrenselliğe daha çok ihtiyaç vardır. İnsan güdümlü enerji kaynağı yerine otonom dönüşümü kontrol altına almak için daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç bulunmaktadır.

Isı, ışık, mikrodalgalar, su/nem, manyetik alan, basınç ve pH gibi akıllı malzemelere uygulanabilen uyarıcı yöntemler vardır. Uyaran yanıtlarının çoğu malzemeye özgü değildir. Hidrofilik UV ile kürlenen polimer durumunda, suya maruz kaldığında, yapı orijinal hacminin %150'sine kadar hidrojeli emer, şişer ve yeni şekli oluşturur. Yapının şekil dönüşümü bu durumda doğrusaldır ancak polimer yapı su ile farklı tepkimeye giren farklı kompozit malzeme ile birleştirildiğinde karmaşık geometrik dönüşüm meydana gelir (Thomas A. Campbell, 2014).

4D baskı teknolojisi için güçlük ise hem yazılım bölümünü hem de donanım bölümünü için tasarlanmış yapıda olmasıdır. Donanım parçasını tasarlamak ve geliştirilmesi için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Çünkü bu işlem karmaşık ve gelişmiş malzeme programlaması, hassas çok malzemeli baskı, katlama, genişletme, büzülme, kıvrılma, bükme işlemleri için karmaşık eklemler tasarlamayı gerektirmektedir. Donanım birimi ile işbirliği yapan yazılım bölümü ise bundan daha karmaşıktır (Shin vd., 2017).

3D ve 4D Baskı Özellikleri ve Farkları

3D baskı ile 4D baskı arasındaki en büyük fark, basılacak malzemelerin türü ve baskı makinesidir. Tablo 3'de 3D ve 4D baskı arasındaki temel farkları kısa ve özet şekilde açıklanmaktadır (Bajpai vd., 2020).

Tablo 3. 3D ve 4D Baskı Teknolojileri Arasındaki Temel Farklılıklar (Bajpai vd., 2020)

Özellik	3D Baskı	4D Baskı
Baskı	2D malzemenin sıralı katmanlanmasıyla oluşturulan yapı	3D baskının uzantısı ancak şekil hafızalı programlama adımı ile
Malzeme	Metaller, Polimerler, Seramikler, Biyomalzemeler, Nanomalzemeler	Akıllı Malzemeler: Şekil Hafızalı Polimerler (SMP), Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA), Hidrojeller, Kompozitler, Biyomalzemeler
Tasarım	Dijital veriler: 3D model	Dijital veriler: Programlanmış 3D model
Yazıcı	SLS, SLA, FDM	Çok malzemeli 3D yazıcılar
Şekil Esnekliği	Sert yapı oluşturur	Dış uyarana maruz kaldığında yapı değişir
Şekil Hafızalı Programlama	Programlama adımı yok	Farklı uyaranlara karşı programlanabilir
Uygulama	Mücevherat, Oyuncak, Mode, Eğlence, Tıp, Mühendislik, Diş Hekimliği, Robotik, Savunma, Havacılık, Otomotiv vd.	Tüm uygulamalar için 3D baskının dinamik olarak değiştirilebildiği alanlar

Gelecekteki Gelişmeler ve Uygulama Alanları

4D baskı kavramı ilk kez 2013'de ortaya çıktı ve ilk birkaç yılda, yalnızca ticari malzemeler, yazıcılar ve baskı süreçlerine dayanan mekanik geçmişi olan araştırmacılar tarafından birkaç araştırma yapıldı. 4D baskıyla ilgili heyecan, aynı "problemlere" çok farklı açılardan yaklaşan hemen hemen her disiplinden araştırmacıların (örneğin kimyagerler, malzeme bilimcileri ve yazılım mühendisleri) artan ilgisini çekmeye başlamıştır (Wu vd., 2018).

Teknoloji ilerledikçe, yazılım programları, baskı yöntemleri, yeni malzemeler ve makineler sürekli geliştirilmekte ve iyileştirilmektedir.

4D baskı, bilim ve mühendislik tekniklerini birleştiren bir sanattır ve dış uyaranlara yanıt olarak zaman içinde yapısal veya işlevsel dönüşümlere sahip olma konusundaki benzersiz yeteneği nedeniyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. 4D baskının bilimsel yönleri, matematiksel modellemede ve yeni akıllı materyallerde temel araştırmanın geliştirilmesini içermektedir (Zhang vd., 2019).

Benzer şekilde, araştırmacılar, yeni malzeme özelliklerini ve işlevsel davranışları denemek ve keşfetmek için kendi kendine gelişen yapıları ve dinamik modelleri kullanabilir. Kendi kendini dönüştüren yapıların heyecan verici uygulamaları tıbbi cihazlar, robotik, havacılık, imalat, gıda endüstrisi, askeri savunma, inşaat, mimarlık, mobilya ve tekstil gibi sektörlerde görülebilir (Tibbits vb., 2014).

Tıp ve Medikal

Tıp ve sağlık hizmetleri, potansiyel olarak 4D baskının teknolojisinden en fazla yararlanabilecek sektörlerden başındadır. Ortama insan vücuduna göre uyum sağlayabilen biyomedikal ateller oluşturmak için kullanılan 4D baskı örnekleri günümüzde vardır. Tıp alanında 4D baskı teknolojisini kullanarak bir hava yolu ateli tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu yardımcı destek ateli, çocuk büyüdüğünde hava yolunun genişlemesine bağlı olarak çökmesini engeller. Atel, hava yolunu bebeğin kendini destekleyecek kadar güçlü olana kadar desteklemek için yeni doğan yoğun bakım ünitesinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

3D baskı teknolojisi kullanılarak basılan biyomedikal atel, insan vücudunda büyümeyle ve hareketle birlikte uyum sağlanması beklenmektedir. Hastanın bağışıklık sistemi ile biyo-uyumlu olması ve vücut içindeki dış çevre dokuları adapte edebilmesi gereken bu 4D baskılı yapının başarılı örnekleri olmuştur. Bir başka uygulamada 3D yazıcı yardımıyla stentin basılması için bir biyomateryal olan Polikaprolakton (PCL) kullanılmıştır (Gladman, 2016).

4D baskı teknolojisinin gelecekte birçok implant ve onarıcı cerrahiye katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Araştırmacılar, solunum güçlüğü çeken hastalara yardım etmenin yanı sıra plastik cerrahide yüz onarımı, kulakların onarımı gibi insan iskelet deformasyonunu düzeltmek için kullanımlarını araştırmaktadırlar.

Biyomedikal mühendisliğindeki potansiyel uygulamalar arasında, bağlanmamış mikro yakalayıcılar gibi minimal invaziv cerrahi için 4D yumuşak robotlar şu anda bu teknolojiyi entegre etmek için en uygun yöntem olarak görülmektedir (Mitchell vb., 2018). Bu artan ihtiyaçlar ile birlikte, 3D/4D baskı teknolojileri olgunlaştıkça, minyatürleştirilmiş üretim, biyomedikal uygulamalar için "yeni" norm haline gelecektir ancak büyük ölçüde düzenlenmiş bir endüstri için bu gerçekleşme yavaş olabilir (Zafar ve Zhao, 2019). 4D baskının, organ nakline ihtiyaç duyanlar için yapay organlar yaratmanın yolu haline gelebileceği beklenmektedir. Protez uzuvlar, aynı zamanda büyüyen protezler tıbbın yararlanabilecek diğer alanlardır.

İmalat

İmalatta paketleme teknolojisinde kendi başlarına genişleyen hacmi artan ve daha sonra yeniden kullanım için yeniden satılan kutular yaratma konusunda çalışmalar vardır (Gurung, 2017). Üretim süreçlerini basitleştirecek, enerji tasarrufu sağlayacak, hacimsel küçülme yaratan, zamandan ve paradan tasarruf sağlayacak makine bileşenleri oluşturmak için 4D baskının kullanımı, imalat alanını önemli bir noktaya getirebileceği düşünülmektedir.

Havacılık ve Uzay

Havacılık, 4D baskının kullanımından önemli ölçüde yararlanabilecek başka bir sektördür ve bu teknolojiyi kullanan gelişmeler hali hazırda mevcuttur. NASA'nın Jet Tahrik Laboratuvarı'ndaki araştırmacılar, esnek bir metal kumaş geliştirdiler. Buna uzay zinciri postası adını verdiler ve uzay aracını göktaşlarından koruyan büyük antenlerde kullanılmak üzere tasarlamışlardır.

MIT Research Scientist Skylar Tibbits ve Airbus'tan Emerging Technology and Concept ekibi, özel hava girişi bileşeni geliştirmek için birlikte çalışmışlardır. Airbus ile yapılan bu işbirliğinin amacı motoru soğutmasını sağlamaktır. Hava akışını otomatik olarak kontrol eden yeni bir hava girişi geliştirilmiştir. Mevcut havalandırma girişleri statik olduğundan, hava akışı bir uçağın hızına göre değişmektedir. Yeni bile-

şenleri kullanmanın bir başka avantajı da yakıt tüketimini azaltması ve dolayısıyla yakıt maliyetlerini düşürmesidir (Tibbits, 2014).

Robotik

MIT ve Harvard Üniversitesi'nden bir araştırma ekibi, kendilerini rastgele şekillere katlayabilen ve sürünerek uzaklaşabilen yeniden yapılandırılabilir robotlar olan origami robotları geliştirmişlerdir. Prototip robot tamamen yazdırılabilir parçalardan oluşmaktadır (Tibbits, 2014).

Hem robotik hem de 4D baskı, 21. yüzyılda araştırmaların büyük ilgi duyduğu alanlar olacaktır. Gelecekte robotların potansiyel olarak kendilerini tasarlayabileceğini, basabileceğini, monte edebileceğini ve 4D baskı yapabileceğini bile savunana araştırmacılar vardır. Ayrıca, uzmanlar 4D baskının robotik uzmanlarının yumuşak robotikte ilerleme kaydetmesine yardımcı olabileceğini söylüyorlar. Yumuşak robotik, canlı organizmalarda bulunanlara benzer uyumlu malzemeler kullanarak robotlar yaratmayı amaçlamaktadır (Hann vd., 2020).

Askeri ve Savunma Uygulamaları

4D ile yapılan nesneler, askeri alanda geniş uygulama alanlarına sahip olacaktır. ABD ordusu ve Donanması sahada üç boyutlu baskılı yedek parçalar geliştirmektedirler. Elektrik, sıhhi tesisat ve diğer teknik yapılar gibi gerekli tüm bileşenlerle, tam bina haline gelen programlanabilir elemanların üretimi üzerine çalışmalarını yoğun bir şekilde sürdürmektedirler (Mitchel, 2018).

4D baskı teknolojisi, malzemelerin şeklini değiştirmesine izin verdiğinden, askeri teçhizat, arabalar ve kumaşların da kamuflajlarını değiştirmelerini sağlayabilir. Otomobillerde neme ve oksitlenmeye karşı yapısını değiştiren kaplama malzemesi geliştirilmesi muhtemeldir. Benzer şekilde, yol ve hava durumuna bağlı olarak lastiklerin dönüşümü için çalışmalar yapılacaktır.

İnşaat ve Mimarlık

4D baskı teknolojisini tahmini, stratejik ve uyarlanabilir malzemelerle ilgili olması, bu teknolojinin inşaat ve mimaride bu kadar çok po-

tansiyele sahip olmasının ana sebeplerindendir. 4D baskının aşırı iklim değişikliğine sahip bölgelerde inşaat için önemli bir potansiyelde yararlı olduğunu belirtilmektedir. Ayrıca, insan gücüne ve inşaat makinelerinin kullanıldığı çok büyük altyapı projelerinde çok yaralı olabilecek potansiyele sahiptir. Bu durumlarda 4D baskının kullanılmasının potansiyel olarak inşaat sektöründe verimliliğini artıracağına inanılmaktadır. Mühendislik alanında firmalar şu anda programlanabilir ve akıllı malzemeler kullanılarak inşa edilen sıhhi tesisat borular geliştirmektedirler. Kendi kendine su basıncını kontrol altına almak ve gerekli durumlarda basıncı ayarlamak için tasarlanmış borular 4D baskı teknolojisinin bu alanda getirdiği bir yeniliktir. Boru içinde belirli bir noktada sabitlenecek olan yapı ve bir kimyasal, pH veya sıcaklığın varlığına yanıt olarak genişleyecektir. Borular bağımsız olarak uyum sağladığından ve ayarlandığından, boru üzerinde veya içinde hasarları önleyen, herhangi tadilata gerek kalmadan, kolay ve uygun maliyetli bakım yapılmasına yardımcı olacaktır. Bu kazanım, inşaat sürecine duyarlı işlevsellik getirecektir (Rafiee vb., 2020).

Gıda Endsütrisi

4D baskı teknolojisini araştırmacıları şaşırtabileceği bir sektör gıda endüstrisidir. 3D baskı, gıda üretiminde önemli bir rol oynamıştır. Şimdi, teknolojik gelişmeler ile birlikte, 4D baskı teknolojisi kullanılarak yiyecekler yaratılması için araştırmalar yapılmaktadır. MIT Media Lab'de çalışan araştırmacılar, 3D yiyecekler oluşturmak için 2D yiyecekler kullanan ve ardından teknolojiyi 4D yiyecek yapmaya çeviren çalışmalar yapmaktadırlar. 4D süreci, 3D şekiller oluşturmak için su emilimiyle farklı şekillere dönüşen 2D yiyecek şeritlerinin kullanılmasını içermektedir. Bu işlemi gıda üretiminde kullanmanın temel yararı, üreticilerin gıdayı düz bir şekilde paketleyebilmeleri ve böylece ihtiyaç duyulan paketleme hacmini düşürerek aynı zamanda imalat alanında maliyet düşürerek tasarruf sağlamaktır (Wang vd., 2017).

Moda ve Tekstil

Dış ortama tepki olarak şeklini ve işlevini ayarlayan ve kullanıcıyı rahatlatan kıyafet fikri ortaya atılmaktadır.

4D baskı, sadece şeklini değil, aynı zamanda tekstil yüzeyinin rengini ve dokusunu da değiştirerek tekstil ve kamuflaj teknolojisinde kullanım alanı bulabilir (Nkomo, 2018). Tekstiller, hava şartlarından farklı uyaranlara tepki verebilir ve amorf, kullanıcıya daha iyi havalandırma veya yalıtım sağlayarak konforu artırabilir. Malzemede meydana gelen herhangi bir hasar kendi kendine onarılabildiğinden, kendi kendini onaran polimerler, ömrünü uzatma olasılığına sahiptir.

SONUÇ

Katmanlı üretim, halen emekleme aşamasında olan ve büyüyen bir endüstridir. Yeni malzemeler, yazılımlar, makineler ve baskı yöntemleri sürekli geliştirilmekte ve yenileştirilmektedir. Son zamanlarda 4D baskı daha da dikkat çekmektedir. 4D baskılı nesnelere akıllı malzemeler kullanarak sıcaklık, su/nem, basınç, manyetik alan, mikrodalgalar ve pH gibi uyaranlara yanıt olarak zaman içerisinde şekil veya işlevde değişiklik yapma kabiliyetine sahiptir.

Akıllı malzemeler, 3D olarak basılmış dış uyaranlara maruz bırakıldığında yapıların kendi kendine değişimine izin verebilir. Dış uyaranlar, üretim maliyetlerinden ve zamandan tasarruf ederek istenilen şekle dönüşür. Bunlar dinamik yapıları oluşturur. 3D baskı, katı serbest biçimli imalatta büyük potansiyel gösterirken, 4D baskıda daha değişken formlarda üretimler ve çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bazı alanlarda ve sektörlerde kullanım için araştırmalar başlanmış ancak uygulamaya geçmemiştir.

Bu yazıda 4D baskı teknolojisi üzerine kısa bir inceleme sunulmuştur. 4D baskısında nasıl ve ne şekilde kullanıldığı, 4D baskıdaki gelişmeler benzersiz akıllı malzemelerin önemli rolü, 3D ve 4D yazıcılar arasındaki farklar son olarak 4D baskının gelecekteki görünümü ve kullanılacak alan sektörler de anlatılmıştır. Kısacası şunu söylemek yanlış olmaz 4D baskının geleceği için daha fazla araştırma yapmak hayati önem taşımaktadır. 4D baskıda kullanılacak tekniklerin gelişmesi için mevcut

malzeme seçeneklerin genişletmek ve daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Kullanılacak alan eklemeli imalat tekniklerinin ve teknolojinin potansiyelini en üst seviyeye çıkarılmasını gerektirmektedir.

4D baskının ilgili endüstriyel uygulamalar için katmanlı imalatın gelişimsel bir basamağı olarak kullanılması gerekir. Gelecekte 4D baskı teknolojisi, hayati bir rol oynayacak. Son olarak, yeni ortaya çıkan bir teknoloji olarak yakın gelecekte pratik uygulamalar üzerinde inanılmaz bir etkisi olacaktır.

KAYNAKÇA

Bajpai, A., Baigent, A., Raghav, S., Brádaigh, C. Ó., Koutsos, V., & Radacsi, N. (2020). 4D Printing: Materials, Technologies, and Future Applications in the Biomedical Field. *Sustainability*, *12*(24), 10628.

Campbell, T. A., Tibbits, S., & Garrett, B. (2014). The next wave: 4D printing. *Atlantic*.

Champeau, M., Heinze, D. A., Viana, T. N., de Souza, E. R., Chinellato, A. C., & Titotto, S. (2020). 4D printing of hydrogels: a review. *Advanced Functional Materials*, *30*(31), 1910606.

Choi, J., Kwon, O. C., Jo, W., Lee, H. J., & Moon, M. W. (2015). 4D printing technology: a review. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *2*(4), 159-167.

Ding, H., Zhang, X., Liu, Y., & Ramakrishna, S. (2019). Review of mechanisms and deformation behaviors in 4D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*(11), 4633-4649.

Gladman, A. S., Matsumoto, E. A., Nuzzo, R. G., Mahadevan, L., & Lewis, J. A. (2016). Biomimetic 4D printing. *Nature materials*, *15*(4), 413-418.

Gurung, D. (2017). Technological comparison of 3D and 4D printing: Analytical study.

Hann, S. Y., Cui, H., Nowicki, M., & Zhang, L. G. (2020). 4D printing soft robotics for biomedical applications. *Additive Manufacturing*, *36*, 101567.

Khan, F. A., Celik, H. K., Okan, O. R. A. L., & Rennie, A. E. (2018). A short review on 4d printing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, *2*(2), 59-67.

Khare, V., Sonkaria, S., Lee, G. Y., Ahn, S. H., & Chu, W. S. (2017). From 3D to 4D printing–design, material and fabrication for multi-functional multi-materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *4*(3), 291-299.

Kuang, X., Roach, D. J., Wu, J., Hamel, C. M., Ding, Z., Wang, T., ... & Qi, H. J. (2019). Advances in 4D printing: materials and applications. *Advanced Functional Materials*, *29*(2), 1805290.

Lui, Y. S., Sow, W. T., Tan, L. P., Wu, Y., Lai, Y., & Li, H. (2019). 4D printing and stimuli- responsive materials in biomedical aspects. *Acta biomaterialia*, *92*, 19-36.

Miao, S., Castro, N., Nowicki, M., Xia, L., Cui, H., Zhou, X., ... & Zhang, L. G. (2017). 4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration. *Materials Today*, *20*(10), 577-591.

Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., & Semprimoschnig, C. J. A. M. (2018). Additive manufacturing—A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, *24*, 606-626.

Melly, S. K., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2020). On 4D printing as a revolutionary fabrication technique for smart structures. *Smart Materials and Structures*, *29*(8), 083001.

Mostakim, K., Masuk, N. I., Hasan, M. R., & Islam, M. S. (2020). International Journal of Energy Technology.

Nkomo, N. (2018, September). A review of 4D printing technology and future trends. In *11th South African Conference on computational and applied mechanics*.

Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Kumar, N. M., Abdullah, M. H., & Reddy, G. R. (2020). Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective. *Procedia Computer Science*, *167*, 1210-1219.

Rafiee, M., Farahani, R. D., & Therriault, D. (2020). Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. *Advanced Science*, *7*(12), 1902307.

Shie, M. Y., Shen, Y. F., Astuti, S. D., Lee, A. K. X., Lin, S. H., Dwijaksara, N. L. B., & Chen, Y. W. (2019). Review of polymeric materials in 4D printing biomedical applications. *Polymers*, *11*(11), 1864.

Shin, D. G., Kim, T. H., & Kim, D. E. (2017). Review of 4D printing materials and their properties. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *4*(3), 349-357.

Spiegel, C. A., Hippler, M., Münchinger, A., Bastmeyer, M., Barner-Kowollik, C., Wegener, M., & Blasco, E. (2020). 4D Printing at the Microscale. *Advanced Functional Materials*, *30*(26), 1907615.

Şahin, K., & Turan, B. O. (2018). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, *2*(2), 97-116.

Tibbits, S. (2014). 4D printing: multi-material shape change. *Architectural Design*, *84*(1), 116-121.

Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D., & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation.

Wen Wang, Lining Yao, Chin-Yi Cheng, Teng Zhang, Daniel Levine, Hiroshi Ishii, Transformative Appetite: Shape-Changing Food Transforms from 2D to 3D by Water Interaction through Cookingi, CHI 2017.

Wu, J. J., Huang, L. M., Zhao, Q., & Xie, T. (2018). 4D printing: history and recent progress. *Chinese Journal of Polymer Science*, *36*(5), 563-575.

Zafar, M. Q., & Zhao, H. (2019). 4D printing: future insight in additive manufacturing. *Metals and Materials International*, 1-22.

Zhang, Z., Demir, K. G., & Gu, G. X. (2019). Developments in 4D-printing: a review on current smart materials, technologies, and applications. *International Journal of Smart and Nano Materials*, *10*(3), 205-224.

KOROZYON VE KOROZYONDAN KORUNMA

Zeki ÇİZMECİOĞLU[1], *Senai YALÇINKAYA*[2]

Öz: Korozyon, metallerin çevreleri ile girdikleri elektrokimyasal bir reaksiyon sonucu hasara maruz kalmasıdır. Korozyon hasarı, mekanik yükleme gibi aniden ortaya çıkan bir hasar olmayıp, yavaş ilerleyen bir reaksiyondur. Altın ve platin gibi soy metaller hariç, metallerin birçoğu tabiatta, kükürt, oksijen vb. elementlerle bağlanmış olarak mineral adı verilen bileşikler halinde bulunur; çünkü bu şekil, kimyasal bileşiklerin en kararlı hallerinden ikisidir. Bu bileşikler oluşurken enerji açığa çıkar. Bu bileşikleri parçalamak ve "saf metal" elde etmek için, bu bileşikler oluşurken açığa çıkan enerjiye özdeş bir enerji harcamak gerekir. Yüksek enerji verilerek elde edilmiş metalleri servis şartlarında kullanırken metaller tekrar tabiattaki ilk bulunuş şekline dönmek eğilimi gösterirler ki bu korozyonun sebebidir. Bu bölümde, korozyonun, teorisi, mekanizması, elektrokimyasal reaksiyonlarının incelenmesi, bulundukları ortama göre çeşitleri açıklanmıştır. Ayrıca raylı sistemlerde ve bu sistemdeki tünel, yapı ve hatlarında korozyona karşı yapılması gerekenler ile deprem bölgesi olan ülkemizde betonarme binalar ve alt yapı donatılarının durumları açıklanmıştır. Çalışmada korozyona karşı alınması gereken önlemler örneklerle açıklanmış yapılabilecek çalışmalar ve betonarme korozyon hususunda alınabilecek tedbirler belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, Donatı Korozyonu, Raylı sistemler, Koruma

1 İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul / Türkiye, zcizmecioglu@ticaret.edu.tr, Orcid No: https://orcid.org/ 0000-0003-0593-5510

2 Marmara Universitesi Teknoloji Fakültesi,Makine Mühendisliği, İstanbul / Türkiye, syalcinkaya@marmara.edu.tr, Orcid No: https://orcid.org/ 0000-0001-7076-7766

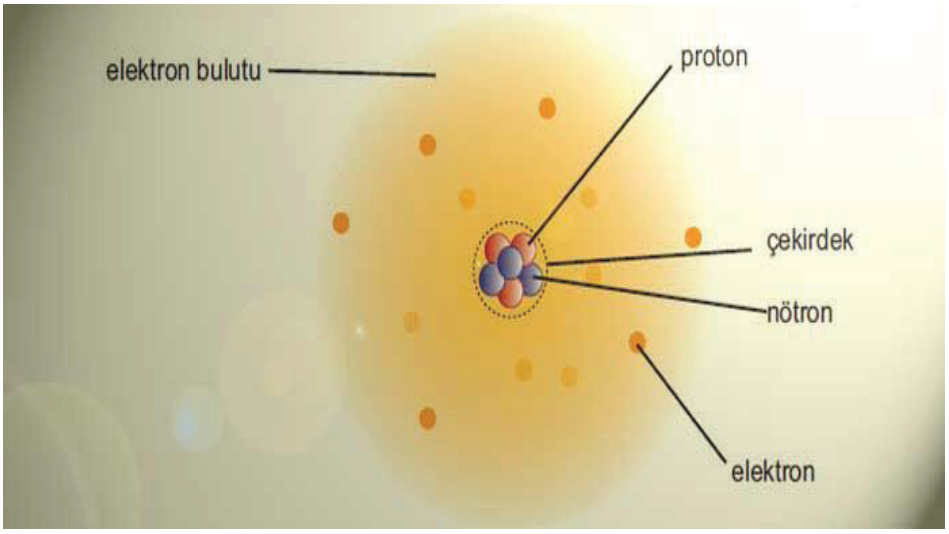
GİRİŞ

Korozyon, bir ülkenin en büyük israf kaynaklarından birisidir. Korozyon sonucunda, yapılan köprüler ve binalar çökebilmekte, boru hatları hasar görebilmekte, doğal gaz borusunun delinmesi halinde bazı felaketler yaşanabilmektedir. Korozyon sebebiyle malzeme, enerji ve emek kaybının yıllık değeri ülkemiz için Gayri Safi Milli Gelirin % 4-5'i civarında olduğu tahmin edilmektedir (Çizmecioğlu, 1998). Metallerin kullanıldığı bir tasarım yapılırken korozyonun göz önünde bulundurulması gerekir; çünkü bu hasar yapı güvenliğini ve ömrünü doğrudan ilgilendirmektedir. Gerçekleştirilmeleri için büyük yatırım yaptığımız metal yapıların, iskele ve boru hatlarının zamanla kullanılamaz hale gelmelerini önlemek, yatırımın verimliliği bakımından son derece önemlidir. Bunun için doğru ve kalıcı bir koruma gereklidir. Kaynakların, ürünlerin ve iş gücünün boşa harcanmasına sebep olan korozyon, çevre ve insan sağlığı açısından da önemlidir.

KOROZYON TEORİSİ ve KOROZYON MEKANİZMASI

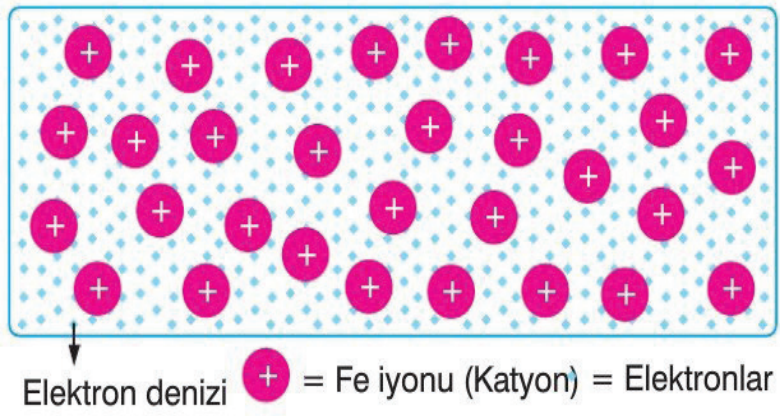
Atom, bir elementin kimyasal özelliklerini taşıyan en küçük yapı taşıdır. Atom, temel olarak bir çekirdek ve onun etrafındaki orbital adı verilen enerji seviyelerinde çok hızlı hareket eden elektron bulutundan oluşur. Çekirdek pozitif yüklü protonlar ve yükü olmayan nötronlardan oluşur. Atomda bulunan elektron sayısı ile proton sayısı eşit olduğunda atom normal halde elektriksel olarak yüksüzdür. Şekil 1'de Modern atom modeli görülmektedir.[3]

3 https://www.nenedirvikipedi.com/wp-content/uploads/2018/07/Modern-Atom-Modeli-Elektron-bulutu.jpg



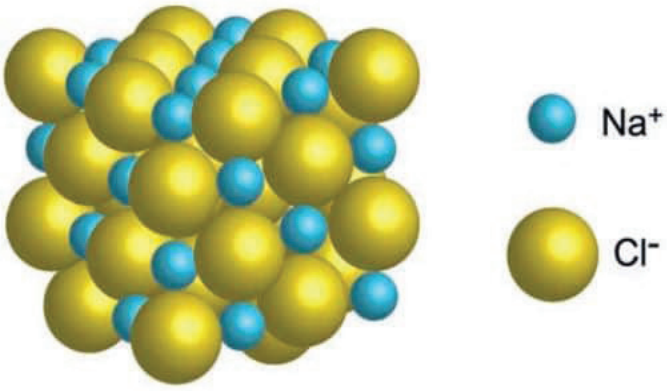
Şekil 1. Modern Atom Modeli

Metal atomlarını bir arada tutan bağa metalik bağ denir. Şekil 2'de gösterilen Pozitif Fe iyonu(katyon) ve elektron denizi ihtiva eden metalik bağ, metal atomlarının en dış kabuktaki valans elektronların atomdan ayrılan serbest elektronlarla elektron denizi oluşturması ve elektronlarını verdiğinden dolayı pozitif iyonları çevrelemesi, bir harç gibi bir arada tutması ile ortaya çıkar. Bütün saf metal ve alaşımların atomları metalik bağ ile bağlıdırlar. Metalik bağ esnek bir bağdır. Metalik bağın sonucu olarak metaller yüksek iletkenlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek mukavemet, yüksek tokluk vb. mekanik özellikler gösterirler, yoğunlukları ve ergime sıcaklıkları da yüksektir. Ancak soy metaller hariç metallerin çoğu bu elektron denizinin malzemeden ayrılabilmesi sebebi ile elektronlarını kolayca başka bir malzemeye vererek, kimyasal bir reaksiyon yapma eğilimi gösterirler. Bu eğilim tabiattaki ilk kararlı haline dönme eğilimidir. Şekil 2'de Pozitif Fe iyonu(katyon) ve elektron denizi ihtiva eden metalik bağ yapısı gösterilmiştir (Çizmecioğlu, 2021).



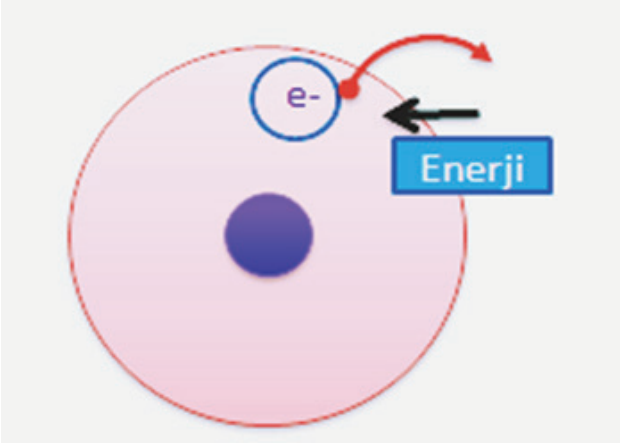
Şekil 2. Pozitif Fe İyonu(Katyon) ve Elektron Denizi İhtiva Eden Metalik Bağ

Atomlarda bulunan elektron sayıları ve proton sayıları eşit olmadığında iyon olarak adlandırılırlar. İyonlar kararsız yapılardır ve yüksek enerjilerinden kurtulmak için ortamda bulunan başka iyon ve atomlarla etkileşime girerler. Şekil 3'de iyonik bağlı metal bileşiği görülmektedir (Liu, 2020).



Şekil 3. İyonik Bağlı Metal Bileşiği (Liu, 2020)

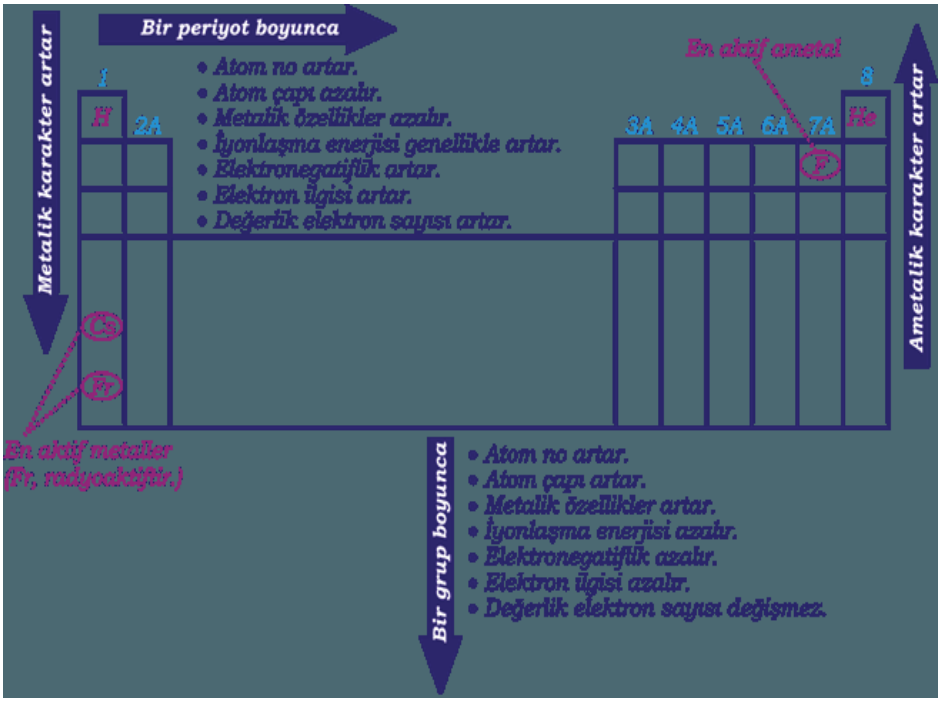
İyonlaşma Enerjisi: İyonlaşma enerjisi gaz halinde olan atomlardan elektron koparmak için kullanılan en az seviyedeki enerji miktarına denmektedir. (Şekil 4)



Şekil 4. İyonlaşma Enerjisi[4]

Periyodik tablo elementlerin sıralandığı tablodur. Periyodik tabloda soldan sağa doğru gidildiği zaman iyonlaşma enerjisi artar. Artan iyonlaşma enerjisi ise birincil iyonlaşma enerjisidir. Solda sağa doğru gidilince artmasını sebebi elektrik çekim gücünden kaynaklanmaktadır. Soldan sağa doğru gidildikçe çekirdek yükü artar ve iyonlaşma enerjisi de aynı doğrultuda artmaktadır. Sağa doğru gidildikçe iyonlaşma enerjisi arttığı gibi atom çapı da zıt orantılı olarak küçülmektedir. Değerlik elektron sayısı, temel enerji seviyesi, elektron alışverişi ve elektron ilgisi iyonlaşma enerjisini arttırır. Periyodik Tablo, Atom Özellikleri ve İyonlaşma Enerjisinin Değişimi şekil 5'de verilmiştir (Lee vd., 2011).

4 http://bilgioloji.com/pages/fen/kimya/periyodik/iyonlasma-enerjisi-nedir/



Şekil 5. Periyodik Tablo, Atom Özellikleri ve İyonlaşma Enerjisinin Değişimi

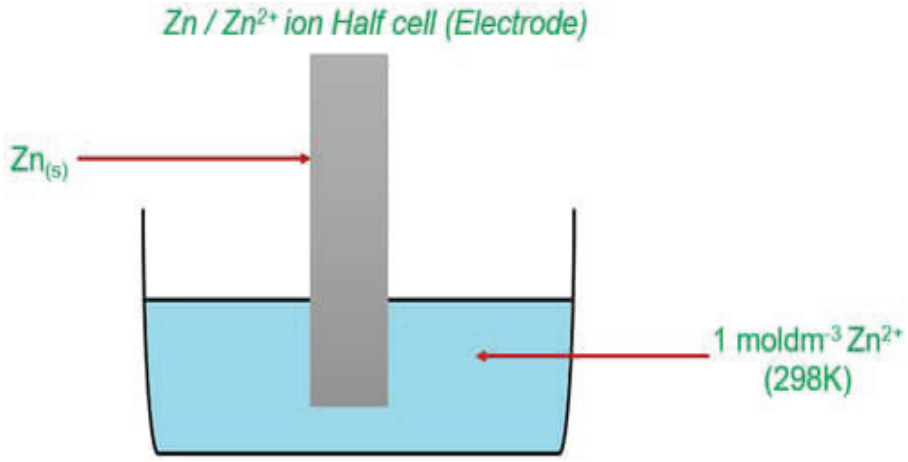
Yarım Hücre: Yarım hücre elektrolitik veya voltaik bir hücrenin yarısıdır, burada oksidasyon veya redüksiyon meydana gelir. Anotta yarı-hücre reaksiyonu oksidasyon olurken katottaki yarım hücre reaksiyonu azalmaktadır. Şekil 6.'da çinko elektrot ve çinko çözeltisinden oluşan Zn/Zn^{2+} iyonu yarım hücresi görülmektedir[5] (Half Cells, 2021). Metaller, en dış kabuktaki Valens elektrolarını vererek iyonlaşma eğilimi gösterirler. Anot reaksiyonu olarak da bilinen bu oksidasyon reaksiyonu, sulu ortamda bulunan metalin elektronlarını elektrotta bırakarak iyonlaşması reaksiyonu dengeye ulaşır.

5 https://www.chemistryscl.com/electrochemistry/electrochemical-cell-half-cell-salt-bridge/index.php.

$M = M^{n+} + ne^-$

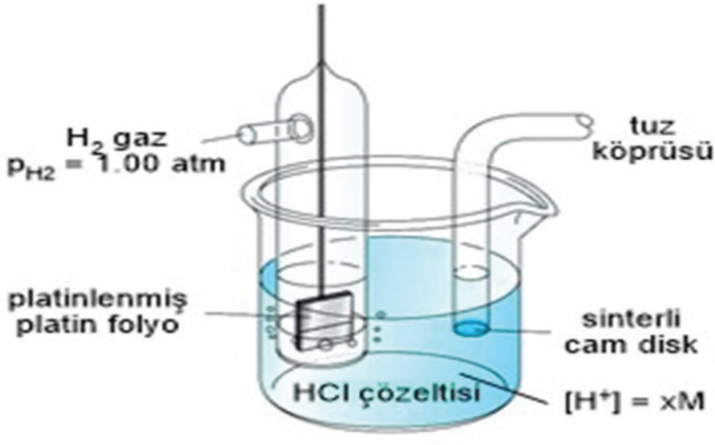
Elektrod iyonlar Pozitif elektronlar Elektrotta kalan

Çinko yarım hücresi için reaksiyon dengesi: $Zn = Zn^{2+} + 2e^-$



Şekil 6. Zn/Zn^{2+} İyonu Yarım Hücresi

Standart hidrojen referans elektrodu çalışmasında reaksiyon dengesi Şekil 7 de gösterilmiştir.[6]

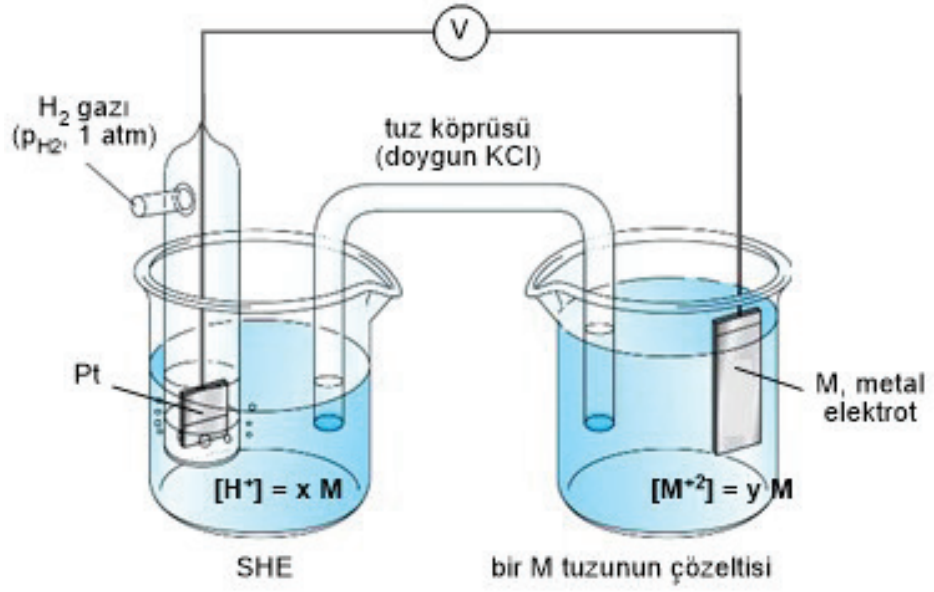


Şekil 7. Standart Hidrojen Referans Elektrotu

6 http://www.cyut.edu.tw/teacher/ft00008/Introduction%20to%20Electrochemistry.ppt#7

Şekil 7'de verilen standart hidrojen referans elektrotu Reaksiyon dengesi

H2 = 2H+ +2e-



Şekil 8. Standart Hidrojen Referans Elektrotu Yardımı ile Metal Elektrotun Yarım Hücre Potansiyelinin Ölçülmesi[7]

Standart hidrojen referans elektrotu yardımı ile herhangi bir metalin yarım hücre potansiyeli Şekil 8'deki devre yardımı ile ölçülebilir. Korozyon (oksidasyon reaksiyonu) anod yüzeyinde, hidrojen çıkışı katod yüzeyinde meydana gelir. Metallerin 25oC'de Standart (İndirgenme) Potansiyellerini Şekil 8'deki gibi standart hidrojen elektrotuna göre devre potansiyellerinin ölçülmesi ile Tablo 1. Nernst Skalası (Metallerin Aktiflik Sırası) oluşturulur. Elementlerin bileşik oluşturma kabiliyetlerine Aktiflik denir. Bu tabloda en aktif metal lityumdan en soy metal altına kadar bütün metaller hidrojen elektrotunun potansiyeli sıfır volt olmak üzere bağıl olarak iyonlaşma potansiyellerine göre sıralanmıştır.

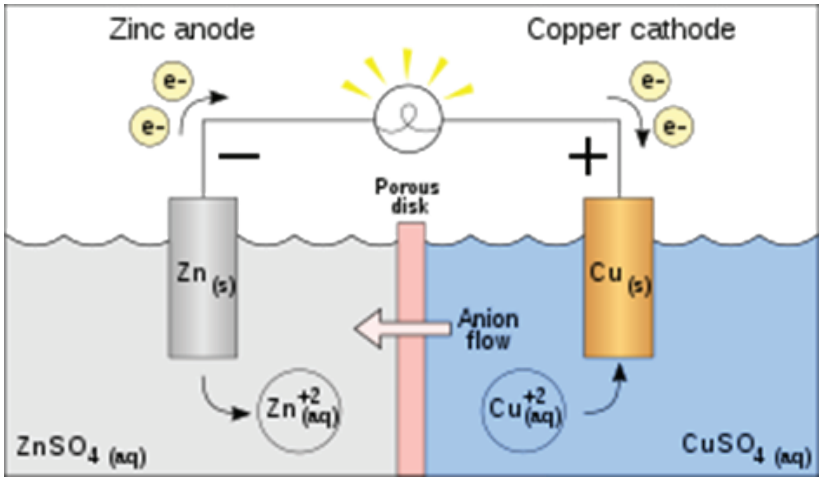
7 http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/183-yari-hucre-veya-elektrot.html

Tablo 1.Metallerin 25°C'da Standart (İndirgenme) Potansiyelleri

Standard (Reduction) Potentials of Metals at 25°C

Electrode	E^o Volts	Reaction	
Li^+/Li	−3.00	$Li^+ + e \rightarrow Li$	
Rb^+/Rb	−2·92	$Rb^+ + e \rightarrow Rb$	
K^+/K	−2·92	$K^+ + e \rightarrow K$	
Sr^{++}/Sr	−2·92	$Sr^{++} + 2e \rightarrow Sr$	
Ca^{++}/Ca	−2·87	$Ca^{++} + 2e \rightarrow Ca$	
Na^+/Na	−2·71	$Na^+ + e \rightarrow Na$	
Mg^{++}/Mg	−2·39	$Mg^{++} + 2e \rightarrow Mg$	
Al^{+++}/Al	−1·67	$Al^{+++} + 3e \rightarrow Al$	base metals
Zn^{++}/Zn	−0·76	$Zn^{++} + 2e \rightarrow Zn$	
Cr^{+++}/Cr	−0·60	$Cr^{+++} + 3e \rightarrow Cr$	
Fe^{++}/Fe	−0·44	$Fe^{++} + 2e \rightarrow Fe$	
Ni^{++}/Ni	−0·24	$Ni^{++} + 2e \rightarrow Ni$	
Sn^{++}/Sn	−0·14	$Sn^{++} + 2e \rightarrow Sn$	
Pb^{++}/Pb	−0·12	$Pb^{++} + 2e \rightarrow Pb$	
H^+/H_2	0·00	$H^+ + e \rightarrow \frac{1}{2}H_2$	
Cu^{++}/Cu	+0·34	$Cu^{++} + 2e \rightarrow Cu$	
Ag^+/Ag	+0·80	$Ag^+ + e \rightarrow Ag$	noble metals
Au^{+++}/Au	+1·35	$Au^{+++} + 2e \rightarrow Au$	

Şekil 9'da görüldüğü gibi iyonlaşma eğilimi farklı iki farklı metalin iyonik iletken bir ortama daldırılması halinde pil (korozyon) hücresi oluşur. Daha aktif olan çinko yarım hücresinde, daha soy olan bakır yarım hücresine göre daha yüksek iyonlaşma seviyesinde denge kurulur. Ayrıca, Çinko elektrotunda elektron yoğunluğu bakır elektrotuna göre daha yüksektir.



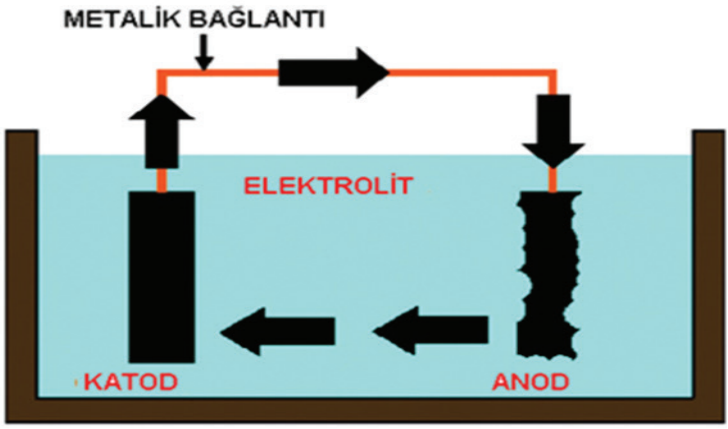
Şekil 9. Pil (Korozyon) Hücresi[8]

Le Chatelier Prensibi: Dengede bulunan bir sisteme dışarıdan bir etki yapıldığında sistem bu etkiyi azaltacak yönde tepki yapar.

Çinko elektrotu ile bakır elektrotu iletken bir telle birleştirildiğinde çinko elektrotundan bakır elektrotuna doğru elektron akımı olur. Bu elektron akımı çinko yarım hücresinde kimyasal dengeyi bozar. Le Chatelier Prensibi'ne göre yarım hücrelerdeki etkiye karşı ters tepkiler oluşur. Sonuç olarak çinko elektrotu iyonlaşma yönünde bakır elektrotu ise iyonlaşmama yönünde reaksiyonlarını ilerletirler.

Elektrokimyasal korozyon mekanizması dört farklı bölümden oluşur. Bu bölümler katod, anot, elektrolit ve metalik bağlantıdır. Elektrokimyasal korozyon sadece bu dört bölüm görüldüğünde meydana gelir. Şekil 10.'da Elektrokimyasal korozyon mekanizması görülmektedir.

8 https://www.muhendisbeyinler.net/galvanik-hucre-pil-potansiyeli/



Şekil 10. Elektrokimyasal Korozyon Mekanizması[9]

Anod

Anodlar, korozyon hücresinin en çok dikkat çeken bölümleridir ve korozyonun meydana geldiği yerlerdir. Bu kimyasal reaksiyon, oksitlenme reaksiyonudur ve metalin elektron kaybetmesi nedeniyle metalin başka bir elementle birleşmesidir. Bu metal çelik olursa malzemede demir pası oluşur.

Katod

Katodlar, korozyon hücresinin korunan yerleridir. Burada oluşan kimyasal reaksiyon azaltma reaksiyonudur.

Anod/Katod ilişkisi

Elektrokimyasal korozyon hücrelerinde oluşan potansiyel farka göre elektrodların anod veya katod olduğu anlaşılabilir. Elektriksel olarak daha negatif olan veya daha aktif olan elektrod anod olarak belirlenir. Katod elektrod geriye kalan elektroddur. Katod, korozyona maruz kalmayan, korunan bölümdür.

9 https://metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2014/63/yer-alti-celik-boru-hatlarinin-dis-etkenlerden-korunmasinda-katodik-koruma-metodu.html

Elektrolit

Korozyon hücresi üçüncü bölümdür ve iyon akışı gerçekleşmektedir. Elektrolit hem katoda hem de anoda temas eder ve burada hem katoda hem de anoda iyon akışı vardır.

Metalik Bağlantı

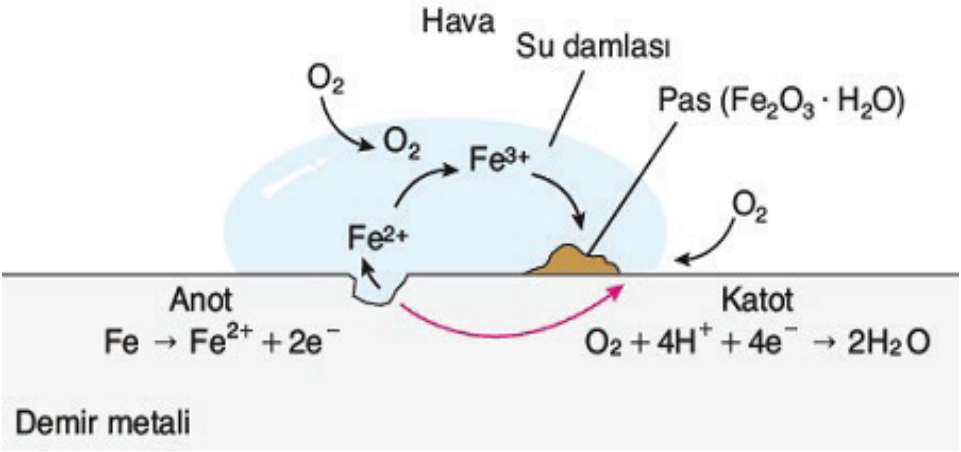
Korozyon hücresinin son (dördüncü) bölümüdür ve elektriksel devreyi tamamlar. Aynı zamanda elektron akışını da sağlar. Metalik bağlantı hem katod hem de anoda temas eder ve elektron akışını sağlar. Elektron akışı elektrokimyasal reaksiyon oluştuğu zaman görülür.

Demirin Korozyonu (Paslanması)

Korozyon reaksiyonunda, pozitif iyonlar ve negatif iyonlar arasındaki çekim kuvvetinin bir sonucu olarak, kararsız metal elektron denizinde serbest elektronlarını pozitif iyonlar oluşturmak için verir ve bu işlem sonucu elektronları alan malzeme negatif iyonlar oluşturur. Bu alışveriş sonucu negatif ve pozitif iyonların çekim kuvveti oluşturması ve bir iyonik bağlı kararlı bir metal bileşiğinin metal yüzeyinde korozyon ürününe yani pasa dönüşür ve metale zarar verir. Korozyon reaksiyonunun oluşumu için oksijen ve rutubete neden olacak miktarda su gereklidir. İkisinden biri bile olmazsa reaksiyon devam edemez.

Elektrik akımlarının geçişini sağlayacak ıslak iyi bir iletken veya elektrolit olmazsa elektrik akımları gerçekleşmez. Bu durumda da korozyon görülemez. Korozyon olabilmesi için elektrolitin var olması nerede kaçınılamaz bir gereksinimdir. Sulu ortamlar özellikle tuzlu su mükemmel bir elektrolit örneğidir. Korozyon reaksiyonları, anodik ve katodik reaksiyonların toplamıdır.

Elektrik akımının katı içinde yönü, elektronların akış yönünün tersidir yani katottan anoda doğrudur. Korozyon hızı olarak da bilinen anodun çözünme hızı, hücreden geçen akımla doğru orantılıdır. Şekil 11. de demirin su ve oksijen içeren ortamda anot ve katot reaksiyonları ile demirin paslanması görülmektedir.



Şekil 11. Demirin Korozyonu (Paslanması)[10]

Anot Reaksiyonu:

Fe = Fe $^{2+}$ + 2e-

Katot Reaksiyonu (Redüksiyon), oksidasyonda açığa çıkmış elektronların birikmesini önler. En yaygın çeşidi hidrojen gazının açığa çıktığı ve oksijen gazının redüklendiği reaksiyondur. Elektron yüklenebilecek iyon veya molekül olmazsa katodik reaksiyonlar yapılamaz.

Katot Reaksiyonu

O_2+4H^+ + 4 e^-→2H_2O

Anot reaksiyonlarında oluşan metal iyonları, bulundukları sulu ortamda çözülürler, dağılırlar veya çökelirler. Bu durumların sonucunda korozyon ürünü oluşur ve anot olan metalde malzeme kaybına neden olurlar.

KOROZYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Korozyon akımı sınırlandırılabilir. Bu sınırlandırma çeliğin pasif olmadığı bazı durumlarda oksijenin yetmemesi sonucu katodun polarizasyonuyla sağlanır. Korozyonu durdurmak için anotta veya katotta

10 https://sitecenneti.com/kimya/ayt-kimya/kimya-ve-elektrik/6-korozyon/

eş bir akım olmamasını sağlamak yeterlidir. Herhangi bir sebepten dolayı korozyon potansiyeli olsa bile, korozyon duracaktır. Korozyonun katodik kontrol altında bulunduğu söylenebilir. Bu durum oksijen girişi olan birimler arasında hiçbir elektriksel bağlantının olmadığı tamamen doymuş hatta deniz suyu ile doymuş izole birimler arasında sıklıkla görülebilmektedir. Kimyasal Reaksiyonların hızı veya akımların akış değerleri korozyon miktarına etki eder. Bu neredeyse tüm korozyonların elektrokimyasal reaksiyon olmasından kaynaklanır. ***Korozyon miktarı üzerine etki edebilen etkenler aşağıda belirtilmiştir;***

- Devreden akan akımın değerine etkili olabilecek herhangi bir faktör elektrokimyasal reaksiyon yani korozyon miktarı üzerinde etkilidir.
- Anot ile katot arasında bulunan potansiyel farkı elektromotor kuvvet oluşturur. Potansiyel farkın artışı veya daha yüksek gerilim daha çok korozyona neden olabilir.
- Elektrolitin sahip olduğu direnç korozyon miktarına etki eder. Direnç akımla ters orantılıdır ve akım ile elektrokimyasal hücrede bulunan korozyonla eş oranlı olduğu için, direnç korozyona da ters orantılıdır. Elektrolit direncinin değeri, elektrolitin içinde bulunan iyonların hareketini belirler, bu elektrolitin, içinde iyonların hareket ettiği bir malzeme olmasından kaynaklıdır.
- Anot ve katodun elektrolite olan geçiş dirençlerinin etkisi elektrolitik direncinin etkisiyle aynıdır. Düşük dirençlerde yüksek akım yani yüksek miktarda korozyon oluşur.
- Elektrotla elektrolit arası direnci arttıran etkenlerden biri katot üzerindeki hidrojenin yayılımı, ilave kaplama gibi bir etki yapması, suyu katot yüzeyinden uzaklaştırması, elektrolitteki iyon konsantrasyonunu azaltmasıdır. Bu, polarizasyon tabakası ve bu tabakaya bağlı değişimlerin katota faydalı etkiler yapmasından dolayı gerçekleşir. Film tabakasının oluşumu (polarizasyon tabakası) elektrokimyasal akım akışındaki değişmedir ve bu değişim sonucu oluşan tabakadır.
- Çoğunlukla sıcaklık artışı korozyon miktarını da arttırır.
- Korozyon tuzun varlığına, çözünebilir oksijen miktarına, pH derecesine ve çevresel değişikliklere bağlıdır.

KOROZYON TÜRLERİ

Uniform (Homojen) Korozyon

Homojen korozyon, metale ait her bölgede aynı oranda gerçekleşen korozyon türüdür. Korozyonun sonucunda metalin kalınlığı her bölgede aynı miktarda azalır. Tamamen aynı cins malzemeden üretilen metaller, atmosfer ortamında ve herhangi bir dış etkenden etkilenmeyen metallerde homojen korozyon oluşur. Homojen korozyon en yaygın korozyon türüdür. Neden olduğu metal kaybı yüksektir ve metalin atmosferde bulunan mevcut oksijen ve karbondioksit miktarına, bunun yanında korozyonu uyaracak SO2 ve kloritlerle reaksiyona girmesi sonucunda oluşur. En yaygın ve yüksek zarara neden olan bir korozyon olmasına karşın korkulan bir korozyon türü değildir. Bunun sebebi basit laboratuvar deneyleriyle saptanabilir olması ve bu deneyler sonucu korozyona maruz kalacak yapının ömrünün belirlenebilmesidir.

Çukurcuk Korozyonu

Korozyon sonucu metal yüzeyde oyuklar oluşumu çukurcuk korozyonu olarak bilinir. Bu korozyon çeşidi her bölgede aynı oranda gerçekleşmez. Anot ile katot, kesinlikle birbirlerinden ayrı konumdadırlar. Yükseltgenme reaksiyonunun gerçekleştiği kısım olan anot yarı-hücre çukurun içinde iken, katot çukurun dış kısmında kalan alandır. Çoğunlukla yüzeyi koruyan tabakada hasar olursa veya çatlarsa metalin bir kısmı katota dönüşür.

Kompozisyon farklılığı olan bölgelerin arasına, çatlaklara veya çiziklerin arasına sızan malzemelerin korozyona neden olacak şekilde ilerlemesi sonucu oluşur. Özellikle $CaCl_2$, NaCl, MgCl2, NaBr ve AlCl3 içeren ortamlarda, tanklarda ve borularda akış hızının düştüğü bölgelerde görülür. En korkutucu korozyonlardan biridir ve bunun nedeni bozucu etkiye sahip, yaygın ve kontrol edilmesi zor bir korozyondur. Çukurçuk korozyonun özellikle paslanmaz çeliklerde ve alüminyum alaşımlarında oluştuğu görülmüştür. (Acar Can Kocabıçak etc., 2021)

Korozyon etkenliğini sürekli olarak artıracak olan bu olay otokatalitik olarak da tanımlanır ve bu olay çukurların içindeki ortama asit özelliği kazandırır. Oksijen reaksiyonu (Katodik olay) çukurların gereken

miktarda oksijen bulunduran ağız kısımlarında oluşmaya devam edebilen ve metal çözünümünün tekrarıyla çukur diplerinde yoğunlaşmaya çalışacaktır.

Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, metal yüzeyin metal ile metal veya metal ile elektron iletkeniyle oluşan korozyon türüdür. Temas eden elektrik potansiyelleri birbirinden farklı metal ve alaşımların aynı ortamda bulunması sonucu oluşur. Ortamdaki malzemelerden soy olan katot (+) görevi görür. Daha az soy olan anot (-) görevi görür ve korozyona uğrar. Galvanik korozyonun önüne geçilebilecek birkaç yöntem vardır. Bunlar:

Aynı ortamda çalışacak malzemelerden farklı çeşit malzeme olmak koşuluyla galvanik seride birbirine yakın olan malzemelerin seçilmesi, korozyona uğramaya daha yatkın (anot) olan malzemenin yüzey alanının mümkün olduğunca büyük olması veya anodik karaktere sahip üçüncü bir metalin bağlanmasıyla katodik korumanın oluşturulması, ortama korozyon yavaşlatıcı etkiye sahip madde ilavesi yapılması ve parçalar arasına iyi yalıtım yapmaktır.

Taneler Arası Korozyon

Metal atomların kristalleşmesi daima geometrik bir düzen içinde gerçekleşir. Katı çözelti en az iki metalden oluşan homojen yapıda alaşımların belli bir düzen içinde kristalleşmesidir. Heterojen yapıda alaşımlarda en az iki katı fazlı karışımın bulunması gerekir. Bu tür alaşımda kristaller homojen yapıya sahip değildir. Tanelerin arasında korozyon, tanelerin arasında sınır çizgilerinde oluşur. Bu bölgelerde metallerden birinin konsantrasyonu diğer metale göre daha azdır. Bu nedenden dolayı sınır çizgileri korozyona uygun bir ortam oluşturur. Bu korozyon çeşidi yaşlanan alüminyum alaşımların, paslanmaz çeliklerin kaynak edilmelerinde yavaş soğuma ile tane sınırlarında karbür çökelmesi olursa görülür.

Paslanmaz çeliklerde, malzeme uzun süre 500 ile 850°C sıcaklıkları arasındaysa tane sınırlarında Cr23C6 türünde karbür çökelmesi olur. Karbon ve krom difüzyonu olduğu takdirde bu karbürün çökelir. Bu

difüzyon, tane sınırı bölgelerin korozyona maruz kalmasına neden olur, bu da tane sınırların yakınlarında krom konsantrasyonu düşük olan bölgeler oluşmasından kaynaklanır (Öner ve Yalçınkaya, 2020).

Paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyonu önlemek için;

-Malzemelerin kullanımından önce, malzemelerin yüksek sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulması gerekir. Bu ısıl işlem karbürlerin çözünmesini sağlamak içindir.

-Alaşımda krom karbür çökeltisinin oluşumu engellenmelidir ve bu alaşıma titanyum ve niyobyum eklenerek krom-karbür yerine TiC ve NbC oluşturulmasıyla sağlanır.

Aralık Korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan çatlak içi veya dar aralıkta oluşan korozyon çeşididir. Bu korozyonun oluşumunun temel nedeni, aralık veya çatlağın içi ile çevre elektroliti arasında oksijen konsantrasyonunun veya metal iyonu konsantrasyonunun farkındandır. Çatlağın dış kısımları katot olacaktır ve katot olan bölgede korozyon görülemez. Bu çeşit korozyonu azaltıcı en iyi yöntem, bölgesel farklılık yaratacak tasarımlar kullanmamaktır. Perçinli ve civatalı bağlantılar yerine kaynak dikişi kullanmak oluşabilecek korozyonu büyük oranda azaltabilir. Bu önlemin başarılı olması için tüm ara boşlukların kaynakla kapatılması gerekir.

Seçici Korozyon

Alaşımlarda belirli bir metal veya belirli bir elementin korozyona uğraması ve alaşımdan uzaklaşmasına neden olan korozyon türüdür. Seçici korozyon genellikle Elektrokimyasal gerilim dizisinde birbirinden uzak metaller arasında gerçekleşir. Örnek olarak pirinç alaşımının içinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğramasıdır. Çinko elementinin korozyon yüzünden uzaklaşması durumunda geriye gözenekli yapıya sahip bakır kalır ve bakırın mekanik dayanımı pirince göre düşük olur.

Alaşımın içinde bulunan çinko arttıkça korozyona karşı dayanıklılık oranı azalır. Seçici korozyonun bozucu etkisi malzemenin uğradığı mu-

kavemet kaybıdır. Büyük ölçüde mukavemet kaybına karşı korozyona uğrayan parçaların dış görünümünde renk değişimi dışında hiçbir farklılık görülmeyebilir. Bu tür korozyon oluşumu düzenine ilişkin farklı görüşler vardır.

Çinko ve bakırın eş zamanlı çözündükleri fakat çinko iyonlarının ortamda kalırken daha soy durumda olan bakır iyonlarının indirgendiği ve yeniden metalik duruma geçtikleri söylenebilir.

Bu olaylar çinkonun çözülmesine ve ortama karışmasına yol açarlar. Bakır-çinko alaşımından kalan bakır ve korozyon ürünlerinin oluşturduğu boşluklu, belirli ölçüde geçirgen zayıf bir yapıdır. Pirincin özgün sarı renginin kızıla döndüğü görülür. Çinko kaybına karşı en iyi önlem bu tür korozyona dayanabilen malzemeler kullanmaktır. %1 Sn içeren sarı pirinç veya arsen, fosfor ve antimuan gibi elemanları küçük miktarlarda içeren yavaşlatılmış alaşımlar (örneğin %70 Cu, %29 Zn, %1 Sn ve %0,04 As) bu amaçla kullanılabilecek bakır-çinko alaşımlarıdır.

KAÇAK AKIM KOROZYONU

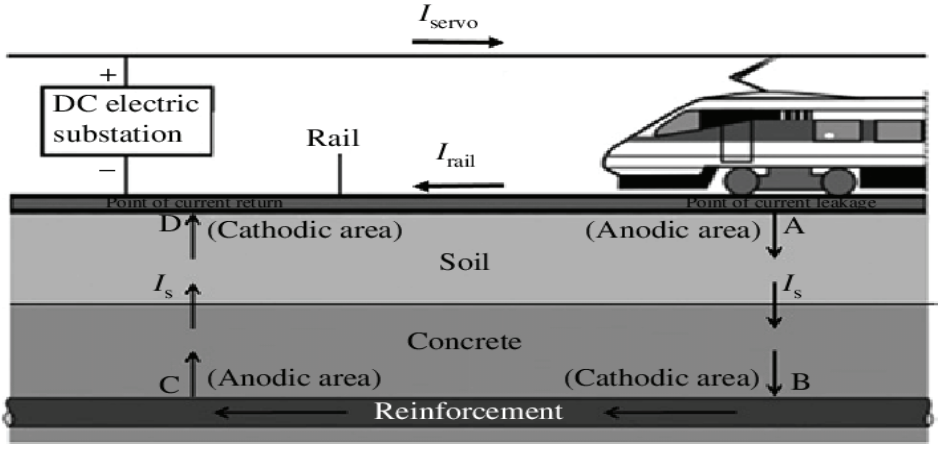
METRO KAÇAK AKIMLARI

Doğru akım ile çalışan raylı ulaşım sistemlerinde devreyi tamamlayıp, ray üzerinden dönen akımın rayın yeterince yalıtılamaması sebebi ile akımın bir kısmının sızıntı şeklinde toprağa akmasına **kaçak akım** denilmektedir. Şekil 11'de raylar üzerinden geri dönen akımın tünel toprağına sızması, ray altı ve tünel donatısı üzerinden ilerlemesi görülmektedir. Kaçak akım riskini sınırlamak mümkün, ancak tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Tünel çelik donatısının korozyonuna sebep olan kaçak akım değerinin mümkün olduğunca düşük olabilmesi için dönüş iletken sistemindeki gerilim düşümünün az olması ve rayların tünelden iyi yalıtılması gerekmektedir. Raylar ile tünel toprağı arasında elektriksel iletkenliği olan bağlantılara asla izin verilmemelidir (Çizmecioğlu, 2000).

DC cer gücü sistemlerini tasarlarken doğru ve güvenli bir sistem için dikkat edilmesi gereken en önemli nokta cer akımları için olabildiğince düşük dirençli bir geri dönüş yolunun sağlanmasıdır. Trenlerin üzerinde hareket ettiği çelik taşıyıcı raylar bu amaç için kullanılır. Taşıyıcı rayların geri dönüş akımlarına yol olarak kullanılması esasen

çok iyi bir mühendislik tasarımıdır ve gerekli tedbirler alındığı takdirde de gayet başarılı şekilde çalışır. Yalnız bu sistemin güvenli bir şekilde çalışması için taşıyıcı raylar topraktan tamamı ile izole edilmelidir. Tünel çelik donatısında ilerleyen kaçak akımın istenilen yoldan saptığı her noktada korozyon oluşacağı göz önünde bulundurularak raylarda ve civardaki metalik yapılar üzerinde korozyona karşı önlemlerin alınması gereklidir. Özellikle aracın ve CER odalarının bulunduğu civarlarda korozyonun etkisi fazla olacaktır.

Koruyucu önlemlerin amacı, kaçak akımların yol açtığı korozif etkilerden tünel donatısını, demiryolu tesislerini ve diğer metalik yapıları korumaktır. Bir yandan kaçak akımlar sınırlanırken, diğer yandan dönüş devresindeki hatalar tanımlanıp düzeltilerek sistem ömrünün uzatılması amaçlanır. Dönüş devresinden düşük değerli boylamasına gerilim düşümü ve taşıyıcı rayların toprak izolasyonunun iyi derecede olması, kaçak akımları sınırlamada en önemli faktörlerdir. Boylamasına gerilim düşümü şalt tesisleri arası mesafelere ve dönüş devresinin direncine bağlı olsa da kaçak akım koruması gereken şalt tesisi sayısını ve dolayısı ile proje maliyetlerini de etkilemektedir (Çizmecioğlu, 2000).



Şekil 11. Raylı Sistemde Kaçak Akımların Tünel Çelik Donatısına Girişi

Kaçak Akımın Azaltılması Için Yapılması Gerekenler (Çizmecioğlu, 2000)

- Hat üzerinde bulunan cer trafo merkezleri arası mesafeyi mümkün olduğunca kısa tutarak böylece ray üzerinde voltaj düşüşünün azaltılması,
- Taşıyıcı raylar ve toprak arası izolasyonun mümkün olduğunca geliştirilerek, ray-zemin arası yüksek direnç sağlanması,
- Ray iç direncinin düşük olması,
- Sisteme giren ve çıkan metalik yapıların yalıtılması,
- Rayın elektrik direncinin rayların boyuna direnci % 5'ten daha fazla artmaması için tüm kesintisiz ray uzunluklarının kaynak yapılması,
- Ray contalarının düşük dirençli bağlama yöntemi ile bağlanması,
- Taşıyıcı raylar arasında yeterli paralelleme yapılması,
- Sinyalizasyon faktörünün müsaade ettiği yerde boyuna direnci azaltmak için, seyir rayları ve/veya yolların çapraz bağlantısı kullanılarak azaltılması, Çift rayın yaklaşık 200 m'lik, çift raylı sistemin dört rayı için 400 m'lik mesafede bir bağ ile bağlanması,
- Yol rayların toprak hattı yönünde yalıtım kalitesi suyla önemli ölçüde azaltılmayacak şekilde tasarımlanması,
- Dışarıdan sisteme giriş ve çıkış yapan metalik tesisat boruları ve kablo ekranlarının giriş noktalarında yalıtılması,
- Yollar ve taşıma sistemleri arasındaki ara tabakaların yalıtılması,
- Geri dönüş devresinin hiçbir parçası toprak hattından izole edilmemiş tesislere, bileşenlere ve metalik yapılara doğrudan bir bağlantıya sahip olmaması,
- Hizmet, kurulum ve yapıların DC sisteminden izolasyonu,
- Kaçak akımın etkin bir sistem ile tahliyesidir.
- En önemli olan şey hattın temiz olmasıdır. Hat temiz ise sistem verimli çalışır.

KAÇAK AKIM KOROZYONUNUN MEKANİZMASI

Ray altından ray altı ve tünel betonuna sızan kaçak akım tünel yapısının metal donatısını seçerek akmaya devam eder, devrelerini tamam-

lamak için daha küçük geçiş dirençli yerde buraları terk ederler. Kaçak akım, cer sistemi dönüş akımının toprak veya tünel donatısı gibi harici iletkenler üzerinden akmasıdır. Bu kaçak akımlar donatı üzerinden toprağa geçişlerde donatıda elektrolitik paslanmaya ve betonun çatlamasına sebep olurlar. Bu nedenle sistem tasarımı aşamasında bu kaçak akımı en az seviyeye indirmek için önlemlerin alınması gerekmektedir. Tren işletme esnasındaki potansiyel farkının değeri ile işletmede olmadığı esnadaki potansiyel farkının değeri, Avrupa Standardına göre +100mV değerinin altında olması gerekmektedir (TS EN 50122-1, 2011a)

Bu voltaj, sistem içindeki konuma ve güç akışına bağlı olacaktır ve yerel toprağa göre pozitif veya negatif olabilir. Kaçak akım, özellikle metal yapıları seçerek akıp devrelerini tamamlamak için daha küçük geçiş dirençli yerden metalik yapıyı terk ederler. Metale girdikleri bölge katot olurken çıktıkları yer anot olur ve şiddetle korozyona uğrayıp yapıyı hasara uğratır.

Anodik bölgede iki tip reaksiyon oluşur (Poursaee, 2016).

Anodik Reaksiyonlar

$Fe = Fe^{2+} + 2e-$

$2Fe + 3H_2O = Fe_2O_3 + 6H^+ + 6e-$

$Fe + 2H_2O = HFeO_2^- + 3H^+ + 2e-$

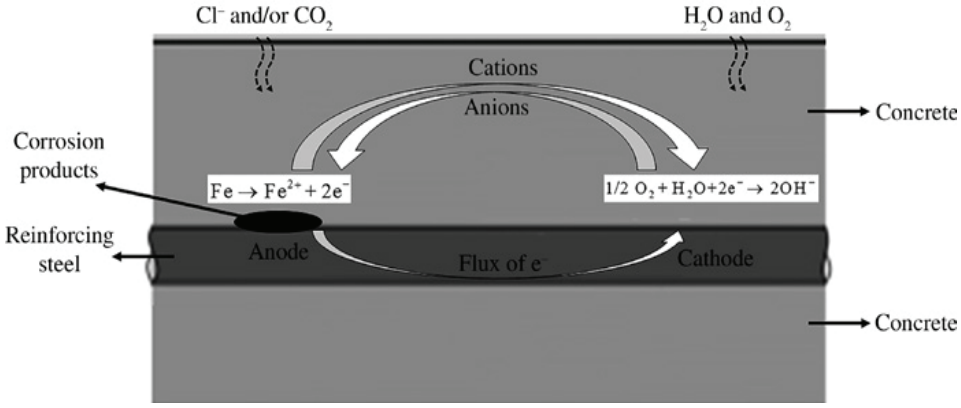
$3Fe + 4H_2O = Fe_3O_4 + 8H^+ + 8e-$

Katodik Reaksiyonlar

$O_2 + 2H_2O + 4\ e- = 4\ OH-$ (Alkali Ortam)

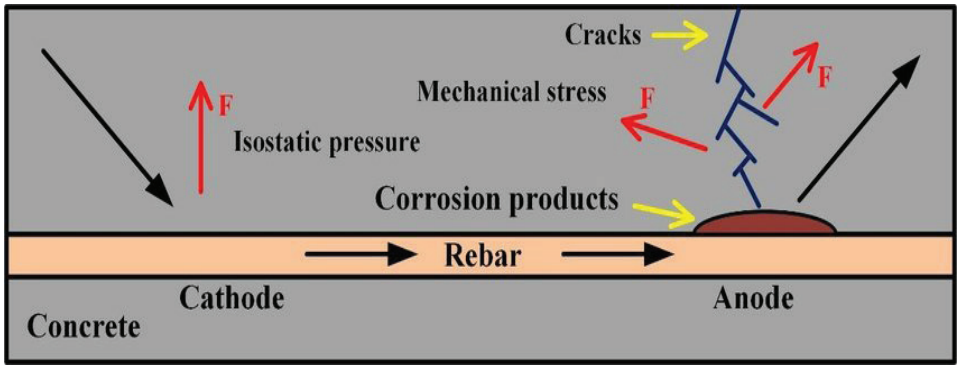
$2\ H^+ + 2\ e- = H_2$ (Asidik Ortam)

Şekil 12'de beton içerisindeki donatının korozyon reaksiyonları ile paslanmasını göstermektedir.



Şekil 12. Kaçak Akımların Tünel Betonunun Çelik Donatısını Paslandırması

Şekil 13'de görüldüğü gibi paslanan çelik, hacımca 12-14 misli genleşme yaparak betonu çatlatır.



Şekil 13. Kaçak Akımların Tünel Betonunun Çelik Donatısını Paslandırması ve Çatlatması

Dönüş devresi dışında bulunan ve paralel metal iletkenlerden veya yapı donatı çubuklarından geçen kaçak akımlar, metali terk ederken elektrolitik korozyona neden olabilirler, bu nedenle yapı donatıları korozyona karşı korunmalıdır.

Özellikle tünellerdeki raylı sistem uygulamaları için kaçak akımdan dolayı oluşacak korozyonun önlenmesi için gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu konularla ilgili taleplerin sağlanması amacıyla ilgili standartlar çerçe-

vesinde tesis topraklama sisteminin belirlenmesi ve seçilmesi gereklidir. Bu kurallar gerek inşaat işleri yapım aşamasında, gerekse elektromekanik montaj aşamasında ve işletme sırasında uygulanmalıdır (TS EN 50122-2, 2011).

İNŞAAT YAPIM TEKNİĞİ

TÜNEL İNŞAATINDA SU İZOLASYONU

Doğru akım ile beslenen raylı ulaşım sistemlerinde kaçak akım korozyonunun kontrolü için tünel inşaatlarının yapım aşamasında su izolasyonu ile ilgili olarak dikkat edilmesi gereken hususlar kapsamında İBB Topraklama ve kaçak akım sistemi Teknik Şartnamesi-Madde 25.2'de "Bilhassa binaların/yapının zemin ile temas eden yüzeyleri için su ve nemin olumsuz etkilerine karşı alınan yalıtım önlemleri kapsamında membran ve benzeri malzemelerin uygulanması ile yapılan bina/yapı yalıtımlarının hasar görmemesi için gerekli önlemler alınacak ve yöntemler uygulanacaktır." denilmektedir. Bina veya yapı yalıtımında bu şartnamede belirtilen kurallara uyulması büyük önem arz etmektedir.

Tünel inşaatı yapım tekniğinde "Binayı nem, yiğidi gam öldürür" atasözü ve "Su içeri sızdığında, gelirler dışarı sızar." sözü tünel su yalıtımının önemini ortaya koymaktadır. Tünellerin yeryüzü şekillerinin içine oyularak yerleştirilmesinden dolayı diğerlerine göre birçok noktadan su sızması ve nemin içeri girme ihtimali bulunmasından dolayı itinalı bir su yalıtım sistemine ihtiyacı olmaktadır. Tünellerin yapısı gereği yer altı suları çok daha fazla tehlikeli olmakta ve devamlı bir baskı oluşturmaktadır. Bu baskılara diğer dış etmenlerde katkıda bulunabilmektedir. Bunlar, Jeolojik olanlar, trafikten dolayı olan titreşim ve dinamik yükler, değişen yüklerden dolayı tünelde kullanılan kaplama malzemelerinin yorulması ve etkilenmesi, yer altından su sızması, su basman seviyesini aşacak seviyede yağışların olması gibi nedenlerdir. Metro giriş ve çıkışı tünel giriş ve çıkışı gibi yeryüzüne yakın bölgeler su sızıntılarının çoğunlukla karşılaşıldığı bölgelerdir. Bu kısımlarda alt ve üst taban tamamen membran ile kaplanmalıdır. Drenajlardan aşağı inen sular bir bağlantı ile drenaj borusuna aktarılmalıdır. Tünel yapılacak zeminin su yüzeyi belirlenmelidir. Yeraltı suları, yüzeye yakınsa seviyesi düşürülür veya

su derin kuyulara drene edilmelidir. Yeraltı sularının yaratacağı tabla basıncı çok önemlidir. Bunun tüm aşamalarda ölçülüp izlenmesi, ayna ve tabladan gelebilecek sularında ölçülüp izlenmesi ve suyun debi ve akışının ölçülmeside çok önemlidir. Metro hattı boyunca zeminin korozif özellikleri hakkında önemli bilgi veren toprak elektrik özgül direnci ölçümlerinin değerlendirilmesi ile tünelden gelebilecek suyun ve nemin olabileceği bütün bölgeler önceden belirlenmeli, kullanılacak membran ve yapıştırma malzemeleri itinalı seçilmelidir.

Yeraltı sularına maruz kalan tüneller için korozyon riski mevcut olduğundan tünel membran malzemesinin yapımına özen gösterilmesi ve hasar görmemesi için gerekli önlemler alınmalı, hasar olup-olmadığı kontrol edilmeli, hasar var ise mutlaka tamir edilmelidir. Aksi halde tünel içerisine giren su, kaçak akımların miktarını ve olumsuzluklarını arttıracak, kaçak akımın kontrolünü zorlaştıracaktır.

Kaçak akım kaynağının, betonun içinde yalıtımı gereklidir. Bu nedenle rayların taşınmasını sağlayan betonun iç kısmına yüzer metrelik hasır çelikler tesis edilmelidir. Art arda iki hasır çeliklerden aynı kaçak akım bağlantı ve test terminaline toplam iki adet kablo ayrı olarak çekilmelidir. Bu çekilen kabloların halojensiz zırhlı XLPE izoleli ve 1x35 mm2 kesitli olması gereklidir. Kablolar ile hasırlar arasındaki bağlantılarda klemens kullanılmalıdır. Bütün kaçak akım test ve bağlantı terminalleri arasında halojensiz siyah renkli ve 1x185 mm2 kesitli kablo çekilmelidir ve bu şekilde irtibat sağlanmalıdır. Ayrıca bütün istasyonların platform uçlarında tünel bölgesinin başlangıcında referans elektrot bağlantısı için tünel yüzeyinden izole edilmiş 1'er adet block out kutusu tesis edilmeli ve kutular 1x185 mm2 kesitli kablo hattına irtibatlanmalıdır. Döşeme betonu ve tünel kaplamaları içlerindeki demirlerin ek yerlerinden punto kaynağı yapılmak sureti ile elektrik iletkenliği sağlanmalı, rayları taşıyan beton içindeki çelik hasırdan izole edilmelidir.

Bu sistem kapsamında hat boyunca tünel ve ray altı hasırı için kaçak akım durumları nedeniyle test, ölçü ve bağlantı terminalleri yapılmalıdır. Bu nedenle takılacak terminallerin montajlarının yapılacağı yüzeylerden yalıtılmaları gereklidir. Terminallerin kutularının montajı birlikte yapılmalıdır ve ihtiyaç durumunda aralarında bağlantı yapılmasına imkân verecek bir yapıda tasarlanmalıdır. Bu süreklilik herhangi bir yer-

de ray-zemin yalıtım hatalarını ölçmek ve test etmek için sökülebilir bir bağlantı ile yalıtıla bilinmelidir. Kaçak akım toplama kabloları istasyon trafo merkezi toprak noktasına (koruma toprağına) çekilmelidir.

Tünel topraklama sistemi tesis edilirken tünel segmentleri ve partileri, ikinci aşama beton dökümünden önce çevresel olarak bağlanacak, beton altında kalacak bağlantıların uçları, tünel boyunca tünel segmentlerine bağlanabilecektir. Elektromekanik işler yapılana kadar, açıkta kalan uçlar atmosfer korozyonundan korunması için epoksi ile kaplanmalıdır.

TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ

Raylı sistemlerde sürdürülebilir bir topraklama sistemi zorunludur. Sistemde bulunan binalar ve hatta bulunan istasyon yapıları mutlaka temelden topraklama sistemi uygulanmalıdır ve genel topraklama sistemine dâhil edilmelidir.

Tüm yapıların inşaat işleri aşamasında kurulması gereken ana topraklamaya dahil bağlantılar için bırakılan uçlar, ilgili yapıda elektromekanik işler aşamasında tesis edilecek olan peron altı ana eş potansiyel topraklama baralarına ve OG ekipman odasındaki koruma topraklama barasına sökülüp takılabilir bir bağlantı ile tamamlanmalıdır.

Tüm istasyonlarda, temel topraklama sistemine bağlantılı olarak,

a) İstasyonlarda zayıf akım sistem topraklama barası (haberleşme ve sinyalizasyon sistemi ekipmanları için),

b) Koruma topraklama barası (metal yüzeyleri, tünel ve bina donatısı, borular, tavalar, vb.) ve

c) İşletme topraklama barası (trafo yıldız noktalarını topraklamak için) oluşturulmalıdır.

Raylı sistemlerde binaların her birinin çevrelendiği betonların yüzeylerindeki demir aksamlara en fazla 20x20m boyutlarında bölümler oluşturularak birbiriyle ilişkilendirilmiş galvanizlenmiş şeritler veya yuvarlak çeliklerle binalar enleme ve boylamasına sarılarak kafes gibi yapılacaktır. Çelik malzemelerin (şerit veya yuvarlak), birbirlerine ve donatıya olan bağlantılarında kaynak yöntemleri veya montaj talimatlarına uygun olarak imalatçı firmanın önerdiği özel bağlantı aksesuarları uygulanabilmektedir.

Tesise dışarıdan gelen veya dışarıya çıkan boru, zırhlı kablolar, Telekom kablolarının metalik aksamı tünel toprağından izole edilmelidir.

Depo sahasına ait cer trafoları ile besleme ayrı olacak ve depo sahasına ait raylar ana hatta bulunan raylardan izole edilecektir. Topraklama ağı depo sahasına özel olacaktır. Depo sahasında tasarlanacak topraklama ağı, raylara irtibatlandırılarak depo sahasında çalışan teknik personelin güvenliğine yönelik yapılacaktır. Orta gerilim tesisleri ve trafoların gövde topraklamaları koruma topraklamasına bağlanmalıdır. O.G. ring kablosunun ekranı ise kablonun sadece bir başından koruma toprağına bağlanmalıdır. Tünel Boyunca Orta gerilim kablo taşıyıcıları olası bir faz-toprak arızasına çıplak bakır iletken ile topraklanmalıdır.

Alçak gerilim güç sistemi olarak tünel içerisinde TN-S sistemi kullanılacaktır. Tünel içi alçak gerilim dağıtım sisteminde nötr iletken ve koruyucu iletken ayrı olarak çekilecektir. Sistem ilave olarak kaçak akım koruma röleleri ile teçhiz edilmelidir. Topraklama bağlantılarında kullanılan bağlantı elemanları azami kaçak akım değerleri esas alınarak boyutlandırılmalıdır.

Bir yapı ayrı yapıların birleşmesinden oluşuyorsa, bütünü için kafes yapı oluşturulmalıdır. Bütünü oluşturan yapıların dilatasyon bölgelerindeki iletken bağlantılar esneyebilen yapıda yapılmalıdır. Bağlantılara ait kesitlerin ölçüleri hesaplamalardan elde edilen değerlerde yapılacak ve köprü oluşturduğu iki uçun kesitinden küçük olmamalıdır. Yapılırken yapısal ihtiyaçlar dikkate alınarak kurulmalıdır.

Bu işler yapılırken raylarla topraklar arasında oluşturulacak izolasyon sorunlarını test edilebilmesi amacıyla EN 50122-2 standardında bahsedilen ölçme yöntemlerini uygulayabilecek şekilde alt yapı kurulmalıdır.

Tüneller ve istasyonlardaki yapıların tesisatlarındaki metal borular ve kabloların ekran lamaları, yapılardan ve bunlara ait donatılardan elektrik iletkenliği anlamında yalıtılmalıdır. İlave olarak sisteme giren ve çıkan tüm metal borular ve kabloların ekran lamaları sisteme giriş ve çıkış bölgelerinde yalıtılıp dışarıdan gelme olasılığı olan potansiyellere sistemi etkileme imkanı verilmemelidir.

İSTASYON KORUMA TOPRAKLAMA SİSTEMİ

Eş potansiyel baraları (Potansiyel dengeleme baraları) onlarla alakalı bağlantılar elektromekanik işler içinde yapılmalıdır. İşletmenin tamamında normalde enerji açısından aktif olmayan kablo taşıma sistemleri, mekanik donanım elemanları (havalandırma kanalları, yangından korunma ve yangınla mücadele sistemi boruları, sıhhi tesisat boruları, vb.) türü metal ve iletkenliği olan yapılarda, bütün metalik yapılarda oluşabilme olasılığı bulunan her çeşit temas gerilimlerinin etkilerini önlemek amacıyla potansiyel dengeleme sistemi kurulmalıdır.

Kablo taşıma sistemleri bütün istasyon ve tünel boyunca, kablo güzergâhları boyunca hesaplanan uygun kesitte izolesiz örgülü bakır potansiyel dengeleme iletkeni kullanılarak topraklamanın devamlılığı sağlanmalıdır. Kabloların tava ve boru gibi metal koruyucuları, mekanik sistemlerin metalik boru ve benzeri donanımları devre koruma iletkenleri anlamında kullanılmamalıdır. Bağlantı noktalarında, olası korozyonun önüne geçmek amacıyla sabitleme klemenslerinde kalay kaplanmış pullar kullanılmalıdır. Tünel koruma topraklaması (çıplak bakır) peron altında tesis edilecek koruma topraklama barasına irtibatlandırılacaktır.

TÜNEL DONATI TOPRAKLAMASI ve KAÇAK AKIM YÖNLENDİRME

Raylarla topraklar arasında oluşturulacak izolasyon sorunlarını test edilebilmesi amacıyla EN 50122-2 standardında bahsedilen ölçme yöntemlerini uygulayabilecek şekilde alt yapı kurulmalıdır. İnşaat sırasında önce tünel segmentlerini ve anolarını çevresel olarak bağlantılanıp sonra ikinci kademe beton dökülmelidir. Tüm donatılarda, tünele ait segmentleri (TBM) ve tünele ait iç kaplama anoları (NATM) birleştirilip iletkenliğin devamlılığı sağlanmış bir şekilde topraklama kurulmalıdır. Devamlılık her bir bölgede, arzu edildiği takdirde o bölgede ray–toprak yalıtım problemlerini ölçerek test ve tespit etmek veya yapıların donatılarındaki demir aksamın referansın toprak olmasına dayanarak potansiyel durumlarının izlenip kontrolünü mümkün olması nedeniyle sökülmesi mümkün bir şekilde bağlantılandırılıp yalıtım edilmelidir. Tünellerin yapı olarak topraklaması amacıyla yol boyunca her 200 metrede bir

test/ölçü ve bağlantı terminalleri yerleştirilecektir. Tünel segmentleri, hat boyunca 100 'er metrelik bloklar halinde elektriksel olarak irtibatlandırılacaktır. Her 100 metrelik ardışık elektriksel bloklar birbirinden izole edilecektir. Tünel segmentleri için, hesaplanarak bulunacak izole kablo, 200 m. de bir tesis edilecek terminasyon kutularına giriş çıkış yapacaktır. Bu kablo; halojensiz, dumanı az çıkan, alev kesicili, tek damarlı, zırhlı, siyah, XLPE yalıtımlı olmalıdır.

Tünel boyunca devam edecek bu kablo, istasyon bölgesine geldiğinde istasyon temel topraklamasına irtibatlatlandırılan ilk baraya kadar götürülerek bu baraya bağlantılanmalıdır. Terminal kutularındaki iletken sürekliliği, test/ölçü ve bağlantı terminalleri üzerinde sökülebilen bağlantılar ile sağlanmalıdır. Topraklama sistemi herhangi bir hata ve arıza durumunda oluşabilecek akımlara dayanıklı olup iletebilecek durumda kurulmalıdır. Bu ekipmanlar, kablo güzergâhları boyunca hesaplanan uygun kesitte izolesiz örgülü bakır potansiyel dengeleme iletkeni ile istasyon koruma topraklama sistemine ayrı bir iletken ile irtibatlandırılacaktır.

HAT BOYUNCA TESİS EDİLECEK TOPRAKLAMA ve KAÇAK AKIM YÖNLENDİRME KABLOLARI

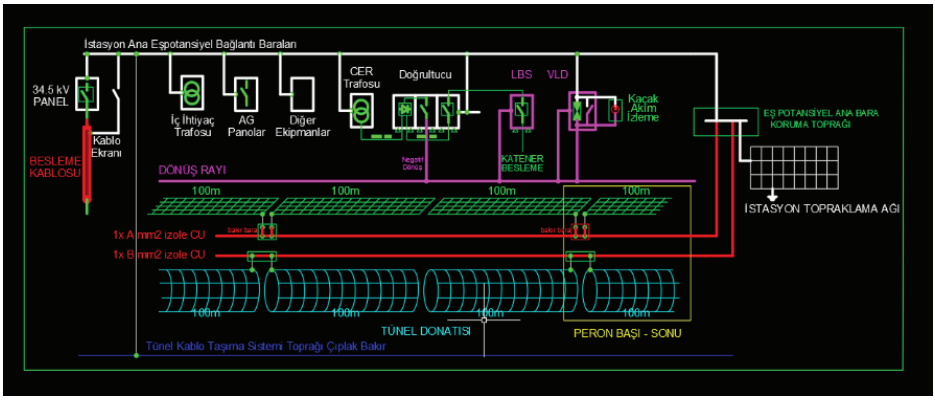
Hat boyunca tesis edilecek koruma topraklaması ve kaçak akim yönlendirme kabloları aşağıda sıralanmıştır.

a. Hat boyu metalik yüzeye sahip ekipmanlar için kablo taşıma sistemleri hattı boyunca çıplak örgülü bakır iletken tesis edilmelidir.

b. Tünel donatısı topraklamasını sağlayacak ve aynı zamanda tünel donatısında oluşabilecek sızıntı akımlarını yönlendirmek için, tünel boyunca yukarıda belirtilen nitelikte tek damarlı izole kablo tesis edilecek ve istasyon bölgesinde temel topraklama ana barasına kadar izole götürülerek irtibatlandırılmalıdır.

c. Ray altı yalıtım bozulmaları kaynaklı, ray altı hasırına sızabilecek kaçak akımları taşımak ve yönlendirmek amaçlı, tünel boyunca yukarıda belirtilen nitelikte tek damarlı izole kablo tesis edilecek ve istasyon bölgesinde temel topraklama ana barasına kadar izole götürülerek irtibatlandırılmalıdır.

İlgili istasyon ve tünel topraklama ve kaçak akım yönlendirme planı aşağıda şematik çizimde belirtilmiştir. Şekil'14 de Tünel ve İstasyon Yapısı Topraklama Planı görülmektedir.



Şekil 14. Tünel ve İstasyon Yapısı Topraklama Planı

GERİLİM SINIRLAMA SİSTEMİ (VLD)

Tünellerde, TS EN 50122-1 standardında belirtilen, rijit katener hattı etkisi altındaki tesis elemanlarına veya yapısal topraklama sistemine, olası rijit katener gerilimi teması nedeniyle tehlikeye yol açacak gerilimlerin oluşmasına engel olmak için, istasyon bölgelerine potansiyel izleme ve sınırlama cihazları (VLD) kurulmalıdır.

DC cer sistemlerinde işletme ve kısa devre akımları nedeniyle dönüş devresi ile yapı toprağı arasında izin verilmeyen temas gerilimleri oluşabilmektedir. Bu gerilimlerin sürekliliği EN 50122-1'e uygun olarak her istasyonda gerilim sınırlayıcısı ile önlenmelidir. Zaman sürecinin bir fonksiyonu olarak da cer sistemlerinde azami müsaade edilebilir vücut gerilimleri Ub, azami olarak verilmiştir TS EN 50122-1. (2011b).

KAÇAK AKIM İZLEME SİSTEMİ

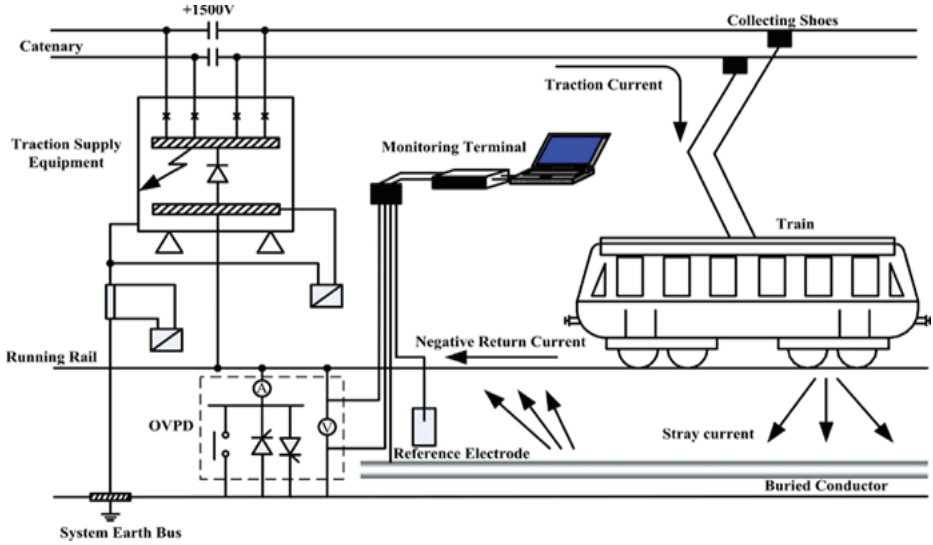
Tüm ray hattı boyunca; negatif (raylar)-toprak arasındaki olası bir yalıtım problemi veya kaçak durumu tespit edilerek gerekli önlemlerin alınması maksadıyla ray potansiyelini sürekli izleyip kayıt eden ve bunu Kontrol Merkezine ileten bir kaçak akım izleme sistemi tesis edilmelidir.

TS EN 50122-2 standardına göre raylı sistemin işletmesi sırasında kaçak akım izleme sistemi ile ray potansiyelinin ve iletkenliğinin sürekli izlenmesi tavsiye edilmektedir. Bu amaçla kaçak akım korozyonunun kontrolü için negatif bara ile referans toprak arasındaki farkı ve korozyon riskini değerlendirmek için gerekli parametreleri SCADA üzerinden sürekli izleyen bir sistemin kurulmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Ray üstü yapısı imalatları ile birlikte gerçekleştirilen ray-toprak geçirgenliği testlerinin olumlu tamamlanmasıyla birlikte, kaçak akım izleme sistemi aktif edilerek, işletme durumunda sistemin normal şartlardaki ray gerilimi değişkenliğini kayıt altına alacaktır. İlerleyen zamanlarda işletme altında oluşabilecek ray gerilimi bozulmaları kumanda merkezine iletilecektir. Şekil 15' de gösterilen kaçak akım izleme sistemi aşağıdaki hususları izlemek üzere kurulmalıdır.

- Yapıların topraklamasının ve donatıların sistemlerinin sürekliliğin izlenmesi,
- Geri dönüş devresi ile raylar arasındaki bağlantının sürekliliğin izlenmesi,
- Negatif ile toprak arasındaki gerilimlerde oluşabilecek anormal sapmaların tespiti,
- Negatif olan hasır ile yapıların donatıları arasında olan geçiş dirençlerinin izlenmesi,
- Kaçak akım toplama sistemiyle herhangi bir etkilenmeyi önleyen test/ölçü terminallerinden potansiyel ölçümü ve referans değerleri ile karşılaştırılması,
- İşletme sırasında raylı taşıt potansiyelinin yirmi dört saat sürekli izlenmesi,
- Merkezi bir birimde potansiyel değerlerinin izlenmesi ve arşivlenmesi,
- İzolasyon eksikliklerinin analizi ve otomatik olarak yerinin belirlenmesi,
- Ray potansiyelinin tekrarlı ölçümleri ile iletkenliğin ve ray yalıtımındaki değişikliklerin izlenmesi,

- SCADA üzerinden gerçek zamanlı olarak bütün verilerin izlenmesi gerekir.



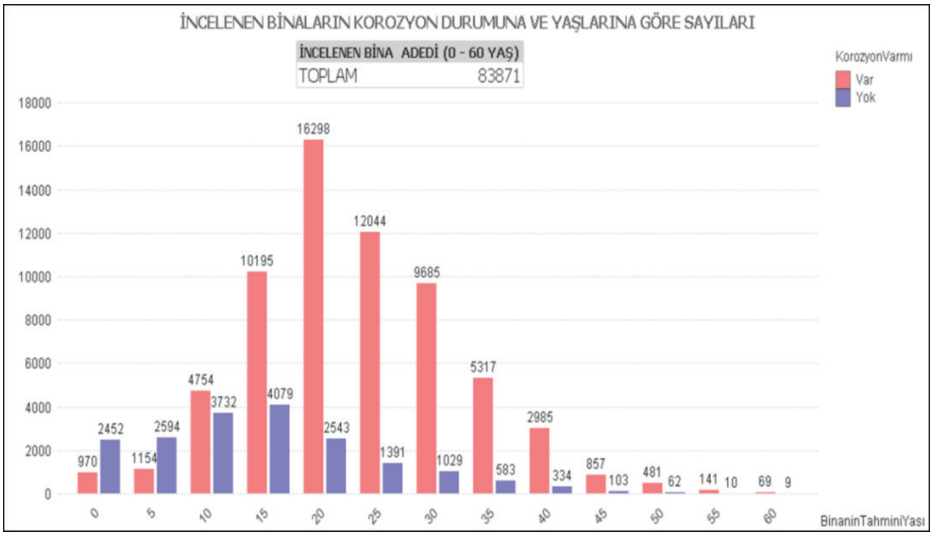
Şekil 15. Kaçak Akım İzleme Sistemi

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONU

BETON YAPILARDA İHMAL EDİLEN KOROZYON HASARININ ÖNEMİ

Boğaziçi İnşaat Müşavirlik A.Ş.'nin (BİMTAŞ – İBB kuruluşu) İstanbul'un genelinde bulunan binalarda oluşan hasarlar ve ana nedenlerini inceleyen araştırmasında, korozyon en önemli ve tehlikeli hasar nedeni olarak ortaya çıkmıştır. Binalar ile ilgili diğer bir çalışmada (İstanbul Deprem Master Planı kapsamında) İstanbul'da Richter ölçeğine göre büyüklüğü 7,5 olan deprem olması halinde yıkılabilecek ve ağır hasarlı olarak çıkacak binalar tespit edilmiştir. Buna göre Zeytinburnu ilçesinde %57, Bayrampaşa, Bahçelievler ve Güngören ilçeleri genelinde %51, Fatih'te ve Küçükçekmece'de %30 oranlarında olacağı bulunmuştur. Bu ilçelerin içinden Bayrampaşa'nın, Güngören'in, Bahçelievler'in, Fatih'in ve Küçükçekmece'nin verileri ayıklanmış korozyonun ciddi bir oranda etkilediği tespit olan sıfır ile altmış yaşları arasındaki 83 bin 871 adet betonarme bina durumun tespit edilebilmesi anlamında incelemeler için

esas veri olarak alınmıştır. Şekil 16. 'de görüldüğü gibi bu çalışmada esas veri olarak kabul edilen 83 bin 871 adetten oluşan betonarme binaların hasar raporları kullanılarak detaylı analiz yapılmıştır (Çizmecioğlu, 2020). Betonarme binalar için faydalı ömür elli yıl olarak varsayıldığında, korozyonu önlemeye yönelik ciddi önlemler alınmadığı için, ***binaların yarı ömürlerinde faydalı kullanılma özelliklerini kaybettikleri ve içinde yaşayanlara ciddi tehditler oluşturdukları tespit edilmiştir.***



Şekil 16. İBB Deprem Çalışmasında Binalar İçin Veri Kabul Edilen 83 871 Adet Binanın Hasar Raporunda Korozyon Hasarının Dağılımı (Çizmecioğlu, 2020)

İSTON tarafından alışılagelen yöntemlerle üretilen kanalizasyonlarda ve alt yapı elemanlarında kullanılan parçalardan bir ürün grubunda içi kaplanmış veya kaplanmamış betonarme borulardır. Betonarme borularda korozyona ve hızlı yıpranmaya yol açan zararlı dış etkenlerden dolayı öngörülen kullanım süresini doldurmadan sızıntı, kırılma vb. problemler çıkarmaktadır. Bunlar su sızıntılarına neden olmakta, özellikle atık suları taşıyanlardan oluşan sızıntılar halk sağlığına, çevrenin kirlenmesine neden olmakta hatta yeraltı suları için potansiyel tehlike oluşturmaktadır (Aydın, 2012).

BİMTAŞ – İBB tarafından binalar için yapılan büyük çaplı bir çalışmaya benzer bir çalışma alt yapı ve benzeri donatılan için yapılma-

mıştır. Hâlihazırda yapılmış tespit ve araştırmalar dikkate alındığında donatıların korozyona uğraması, yapılar için zararlı olabilecek etkenler sıralamasında ancak son sıralarda yer almıştır.

PASLANAN DONATI BETONU ÇATLATIR

Şekil 17.'de görüldüğü gibi betonarme yapının paslanmasının sonucu, paslanan demirde 12-14 misli hacimce genleştiği için iç kısımdan betonu sıkıştırmış ve patlamasına yol açmıştır. Bu tip durumlarda dış kısımların patlayıp dökülmesi dışında ciddi olabilecek çatlaklarda oluşarak betonarme yapının içine su ve rutubet gibi korozyonu oluşturan ve arttıran zararlıların sızması daha kolay hale gelir ve devamında betonarme yapıdan beton kopma noktasına kadar ilerler (Ismaeil ve Yalçınkaya, 2020).



Şekil 17. Paslanan Donatı Betonu Çatlatır

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNUN MEKANİZMASI

Çelik çimento ara yüzeyindeki pasif film dolaylı yollardan gelen klorla veya betonun atmosferde bulunan karbondioksitle tepkileşmesi

neticesinde karbonik asit oluşumuyla pH'ın düşmesinin neticesinde zarar görerek depasivasyona uğrayabilmektedir. Çelik boru ve donatılarda ise sistem farklı çalışmaktadır (Yalçınkaya ve Ismaeil, 2020)

Betonarme yapının içinde bulunan çelikler, korozyona uğradıklarında gözenek sularında çözünürler ve elektronlar verirler.

Anodik reaksiyon: $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$

Anodik reaksiyon sonucunda oluşan iki elektron "elektriksel nötralizeyi sağlamak için çeliğin yüzey kısımlarında herhangi bir yerde kullanılması gerekmektedir. Bu da suyla ve oksijenle tepkimeye girerek gerçekleşir.

Katodik reaksiyon: $2e^- + H_2O + 1/2O_2 \rightarrow 2(OH)^-$

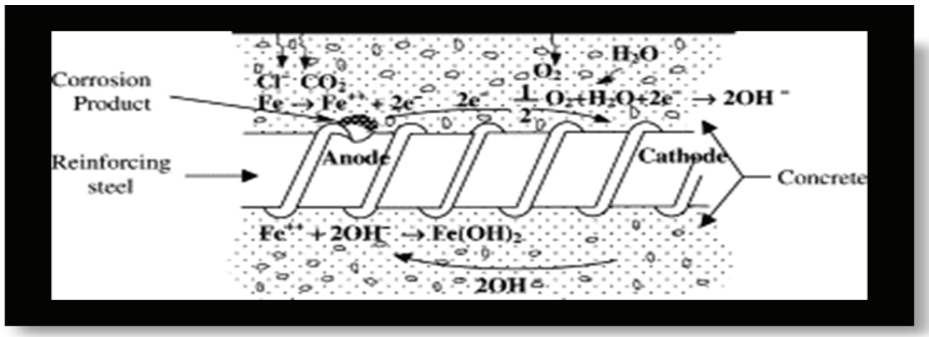
Ortaya çıkan (OH)- iyonları pH'ı artırır. Sonuçta karbonatlaşma ve klor iyonlarının oluşturdukları etkileri geriye çevirip pasif filmi sağlamlaştırır.

Korozyonda, katotta reaksiyonun oluşması için su ve oksijen gereklidir. Bu iki reaksiyon pas oluşmasında başlangıç adımlarıdır. Sonrasında ferro hidroksitin ferrik hidroksitinin oluşup arkasından hidrate ferrik oksit (pas) oluşmasını içeren bir reaksiyonlar dizisidir. Şekil 18' de Beton Yapıda Donatı Korozyonunun Mekanizması görülmektedir. Reaksiyonlar aşağıda gösterildiği gibi ilerler.

$Fe^{2+} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$ Demir hidroksit (kararsız)

$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$ Demir (III) hidroksit

$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3.H_2O + 2H_2O$ Hidratlaşmış ferrik oksit (pas).



Şekil 18. Beton Yapıda Donatı Korozyonunun Mekanizması

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUNA KLORUN ETKİSİ

-Klor iyonu demir ile reaksiyona girerek demir klorür meydana getirir.

$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2$

-Demir klorür ortamdaki su ile reaksiyona girerek kararsız yeşil demir hidroksit meydana getirir.

-Kararsız yapıda olduğu için daha kararlı olan sarı renkli pas olan $Fe(OH)_3$ 'e oksitlenir.

-Demir klorür ortamdaki su ve oksijenle reaksiyona girerek Fe_3O_4 pas'ını meydana getirir.

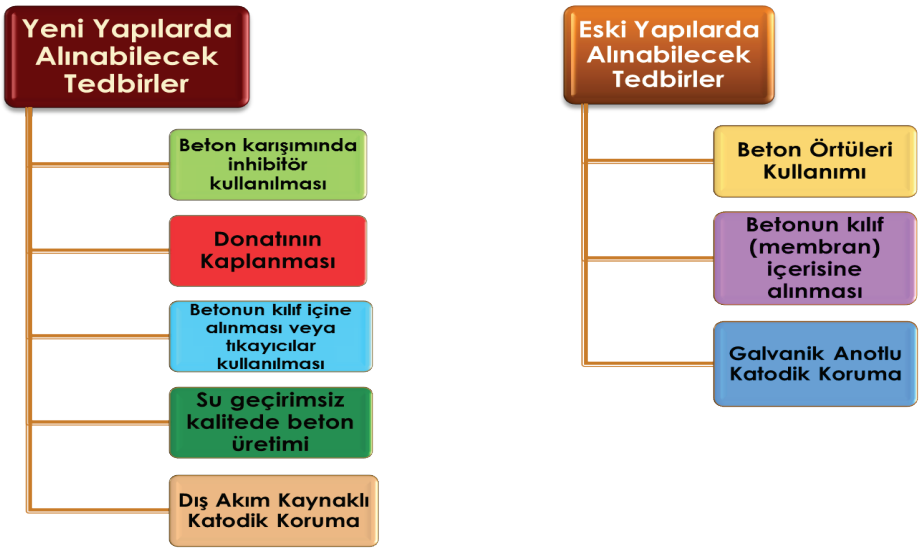
$6FeCl_2 + O_2 + 6H_2O \rightarrow 2Fe_3O_4 + 12H^+ + 12Cl^-$

-Klor iyonlarının yeniden gözükmesi anodik reaksiyonun devamlılığını göstermektedir. Öncelikle pasivasyonu sağlayan $Fe(OH)_3$ tabakasını tahrip ederek anodik korozyonun tekrar başlamasına yol açarlar. Klorun bu etkisi pasivasyon bölgesinin daralmasına yol açar.

BETON YAPILARDA DONATI KOROZYONUN ÖNLENMESİNE YÖNELİK TEDBİRLER PAKETİ

Betonarme yapılarda korozyonun önlenmesi için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, betonun içine inhibitör ilavesi, donatının kaplanması, betonun kaplanması ve katodik koruma gibi önlemler çalı-

şılmıştır. Şekil 20'de Yeni yapılacak ve eski yapılmış betonarme yapılar için korozyona karşı alınabilecek önlemler verilmiştir. Beton yapılarda ve çelik borularda korozyonunun önlenmesine yönelik çözüm alternatifleri detaylı olarak özetlenmiştir (Aydın ve Çizmecioğlu, 2013; Aydın ve Çizmecioğlu 2014; İsmaeil ve Yalçınkaya 2020).



Şekil 20. Betonarme Yapılarda Korozyon Hasarı için Önlemler

SONUÇ

Dünyada var olup kullanılan metallerin başında demir ve çelik gelmektedir. Onların paslanmış halleri zamanla tekrar cevher hali gibi dayanıksız bir oksitlere dönüştükleri için tüm özelliklerini kaybetmektedirler. Dolayısı ile kullanım dışı kalmaktadırlar. Korozyona karşı korunamayan bu malzemelerin ekonomiye kaybı büyüktür. Elektrokimyasal bir sistem olan korozyonun anlaşılması ve ona karşı tedbir alınması yol ve yöntemleri şekil destekli olarak gösterilmiştir.

Bu elektrokimyasal korozyon olayı bir demir çelik kütlesi gibi olan metro ve metro hatları içinde çok potansiyel tehlike gösterdiği için bu hatlarda bulunan tünel, bina ve zemin yapılarının nasıl topraklanması gerektiğinin, bunların nasıl kontrol edilip izleneceğinin yöntemlerinin altı çizilip açıkça anlatılmıştır. Topraklama bu elektrokimyasal koroz-

yon olayının önüne geçmek için elektrik kısmının tehlikeli olmasını önlemede çok etkin bir yöntemdir.

Betonarme binalardaki korozyon özellikle devamlı yağmur suyu ve sızıntı tehdidi altındaki temel betonundaki korozyon hasarı, yaklaşık elli yıllık kullanım ömrü biçilen betonarme binaların yarı ömründen sonra kullanımını çok büyük risk altına sokmaktadır. İtalya'da rutubetin çok olduğu bölgede olan otoyol köprüsü 2018 yılında çökmüştü, köprü 1967 yılı yapımıydı. Bina temelleri gibi yer altında olan metro hatları veya tüneller içinde aynı tehlike geçerlidir. Deprem bölgesinde olmamız nedeniyle korozyona tedbir almamız çok daha önemli ve acil bir durumdur.

Ülke ekonomisi için olduğu kadar insan hayatı içinde oluşturduğu riskler nedeniyle bu yazı ile korozyon ve etkileri hakkında farkındalık oluşturmak ve ilgili resmi ve özel kurumların tedbir, standart ve yönetmelik gibi önleyici aksiyonlara geçmesine katkıda bulunulmaktadır.

KAYNAKÇA

Aptullah Karaka¸s, Acar Can Kocabıçak, Senai Yalçınkaya, and Yusuf Sahin. (2021) Flow Forming Process for Annealed AISI 5140 Alloy Steel Tubes, Springer Nature Singapore Pte Ltd. M. Abdel Wahab (ed.), Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear, Lecture Notes in Mechanical Engineering, https://doi.org/10.1007/978-981-15-9893-7_10.

Aydın, Ö., (2012) "Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Önlenmesine Yönelik Tedbirlerin Araştırılması" Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programı, *Doktora Tezi*. (Danışman: Prof. Dr. Zeki Çizmecioğlu)

Aydın, Ö., Çizmecioğlu Z., (2014). Effectiveness of Coatings on the Corrosion Resistance of the External Surface of Concrete Structures. *Materials Testing*, 56 (5) 419-423.

Aydın, Ö., Çizmecioğlu, Z., (2013) Beton Yapılarda İnhibitör Kullanımının Korozyon Önlemedeki Etkinliğinin Değerlendirilmesi, *Y.T.Ü., SIGMA Dergisi* Cilt 5, Özel Sayı 1, 2013

Beşergil, B. (2021) Yarı–Hücre Veya Elektrot Potansiyelleri (half–cell or electrode potentials), http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/183-yari-hucre-veya-elektrot.html (E.T. 21.10.2021)

Bilgioloji. (2019). . İyonlaşma Enerjisi Nedir?. http://bilgioloji.com/pages/fen/kimya/periyodik/iyonlasma-enerjisi-nedir/ (E.T. 20.10.2021)

Çakar, J. (2018). Galvanik hücre pil potansiyeli, Mühendis Beyinler. Net, (G.T. 21.09.2018). https://www.muhendisbeyinler.net/galvanik-hucre-pil-potansiyeli/ (E.T. 21.10.2021)

Çizmecioğlu Z. (2020), Betonarme Yapılarda Temel Donatı Korozyonunun Önlenmesi İçin Tasarım Geliştirilmesi, *4. Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul* Aralık 2020.

Çizmecioğlu, Z. (1998). İsale Hatlarının Katodik Koruması, İBB, İSKİ, ISBN 9758215280,

Çizmecioğlu, Z. (2000). Doğalgaz çelik borularının tramvay hatlarının kaçak akımlarının korozyonuna karşı korunması çalışmaları, *7.Uluslararası Korozyon Sempozyumu*, Ekim 2000.

Çizmecioğlu, Z. (2021), Malzemede çiftler manzumesi, *5.Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 199, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: Mayıs-2021 E-ISBN: 978-625-7367-14-1

Galvanic Cell. (2021). Introduction to Chemistry, Chapter 18 7. http://www.cyut.edu.tw/teacher/ft00008/Introduction%20to%20Electrochemistry.ppt#7 (E.T. 21.10.2021)

Half Cells. (2021). Types of Electro Chemical Cells, Half Cells, Salt Bridge, Anode, Cathode, Chemistry School, https://www.chemistryscl.com/electrochemistry/electrochemical-cell-half-cell-salt-bridge/index.php. (E.T. 21.10.2021).

Ismaeil K, Yalçınkaya S., (2020), "Petrol Borularında Korozyon Etkisinin İncelenmesi", *Mühendislik Alanında Teknolojik Gelişmeler*, Yayıncı Sertifika No: 36934, E-ISBN: 978-605-7594-56-3, pp: 256-286, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Korozyon. (2021). Kimya Ve Elektrik, TYT-AYT Kimya. https://sitecenneti.com/kimya/ayt-kimya/kimya-ve-elektrik/6-korozyon/ (E.T. 21.10.2021)

Lee, S., Kum, S.-M. M. ve Lee, C.-E. E. (2011). An experimental study of a cylindrical multi- hole premixed burner for the development of a condensing gas boiler. *Energy*, 36(7), 4150–4157. doi:10.1016/j.energy.2011.04.029

Liu, F., Zheng, L., Zhang, R. (2020). Emissions and thermal efficiency for premixed burners in a condensing gas boiler. Energy, 117449. doi:10.1016/J.ENERGY.2020.117449

Modern Atom Modeli. (2018). https://www.nenedirvikipedi.com/wp-content/uploads/2018/07/Modern-Atom-Modeli-Elektron-bulutu.jpg (E.T. 20.10.2021)

Öner. A., Yalçınkaya. S. (2020). Çelik Yüzeylerine Lazer Kaplama (LC) Yöntemi İle Süper Alaşımlar İle Kaplanması ve Aşınma/ Korozyon Dirençlerinin İncelenmesi", *4th International Congress On Engineering And Technology Management*, İstanbul, Türkiye, 13 - 14 Kasım 2020, cilt.4, 110-120, Yayın Türü: Bildiri / Tam Metin Bildiri, Cilt numarası: 4, İstanbul, Türkiye

Poursaee, A. (2016). 2 - Corrosion of steel in concrete structures, *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, 19-33. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00002-X

Şenol, A., Uygunoğlu, T. (2021). Yer Altı Çelik Boru Hatlarının Dış Etkenlerden Korunmasında Katodik Koruma Metodu. Metal Dünyası, https://metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2014/63/yer-alti-celik-boru-hatlarinin-dis-etkenlerden-korunmasinda-katodik-koruma-metodu.html (E.T. 21.10.2021)

TS EN 50122-1. (2011) Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve geri dönüş devresi - Bölüm 1: Elektrik çarpmasına karşı koruyucu önlemler, Nisan 2011. (EN 50122-2 Bölüm 7.2.3,a)

TS EN 50122-1. (2011) Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve geri dönüş devresi - Bölüm 1: Elektrik çarpmasına karşı koruyucu önlemler, Nisan 2011. (EN 50122-1 Bölüm 9.3.2,b)

TS EN 50122-2. (2011). Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve geri dönüş devresi - Bölüm 2: d.a.

cer sistemlerinin neden olduğu kaçak akımların etkilerine karşı önlemler, Ocak 2011.

Yalçınkaya S, Ismaeil K., (2020), "5LX52 Petrol Boru Hattında Malzeme Yüzeyinin Kaplama Yöntemiyle Korozyon Etkilerini İncelenmesi ", *4. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi Kitabı,* Kitap No: 36934, E-ISBN: 978-605-7594-56-3, pp: 128-133, 13-14 Kasım, İstanbul, Türkiye.

HİDROLİK SİSTEMLERDE AŞIRI ISINMANIN ANALİZİ

Hayriye Sevil ERGÜR[1]

Öz: Isı, katıların içindeki atomların veya moleküllerin hareketi ile ilişkili olan iletimle katı ve sıvı ortamdan, konveksiyonla sıvı ortamdan ve radyasyonla boş alandan geçirilebilen bir enerji şeklidir. Mekanik işin yapılmadığı durumlarda, hidrolik sıvının yüksek basınç hattından daha düşük basınç bölgesine aktarılması sırasında, sistemde ısı üretilir. *Isı*, herhangi bir şekilde tasarlanmış her tip hidrolik sistemi etkileyen kirli, küçük, "*üç harfli kelime*" olup hidrolik sistemdeki elemanların başlıca düşmanıdır. Aşırı ısının nedenini ve hidrolik sistem üzerindeki zararlı etkilerinin nasıl azaltılacağını öğrenmek, elemanların kullanım ömrünü, garanti süresinin çok daha ilerisine taşıyacaktır. Verimli ve etkili bir hidrolik sistemdeki bileşenlerin uyum içinde çalışması gerekir. Hidrolik sistemlerde yapılan değişiklikler ve ayarlamalar sistemin dengesinin bozulmasına ve aşırı ısınmaya neden olacak sorunlara yol açabilir. Sıcaklık, basınç düşümüyle ortaya çıkan bir sonuçtur. Sistem bileşenlerindeki kaçaklar, basınç düşüşlerine ve hidrolik sistemin ısı yükünde artışa neden olur. Aşırı ısınma, hidrolik bileşen arızasının en yaygın nedenleri arasında ikinci sırada yer alır. Aşırı ısınmaya neden olan sorunların belirlenmesine ve analizine ilişkin yaklaşımlar, genellikle yanlış yorumlandığı için çözüme ulaşmak uzun sürmektedir. Hidrolik sıvı sıcaklığında kararlı hal için sistemin ısıyı dağıtma hızının ısı yükünden daha yüksek olmasını sağlamak gerekir. Bunu başarıyla gerçekleştirmek için sistemin soğutma kapasitesi belirlendikten sonra bu kapasitenin aşılmasında etkili bazı önlemler alınmalıdır. Hidrolik

1 H. Sevil Ergür-Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir / Türkiye, hsergur@ogu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1679-1137

sistemlerde, aşırı ısınma sorununu çözmenin tek yolu, ısı dağılımında artış veya ısı yükünde azalmayı sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik Devre, Isı Analizi, Isınma, Güç Kaybı, Kapalı ve Açık Devre

GİRİŞ

Düzgün tasarım, küçük boyut, aşırı yüke karşı korumalı olması ve diğer kolaylaştırıcı özelliklere sahip hidrolik sistemler, endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, sistemde artan sıvı sıcaklığı ve kaçak olasılığı, kontrolün doğruluğunu ve kararlılığını etkilediğinden hidrolik sistemde ısınmaya yol açan nedenlerin analizini kapsamlı olarak yapmak ve ısı kaynağını doğru bir şekilde belirlemek, sıvı sıcaklığının izin verilen aralıkta olduğunun kontrolünü yapmak için önemlidir. Hidrolik sistemdeki ısınmasının nedenleri karmaşık ve oldukça zor olduğundan bu alandaki analizler, çok daha fazla zaman ve enerji tüketimi gerektirir. Bazı durumlarda, sistemdeki ısıyı azaltmak için yapılacak ısı yükü analizi; doğru tasarlanmış hava, hidrolik sıvı veya su soğutma sistemindeki valfin ayarlanmasıyla çözümlenecek kadar kolay olabilir. Hidrolik sistemdeki, hiçbir eleman değiştirilmediği halde önlenemeyen ısı sorunu, ısıyı azaltmak yerine aşırı ısıyı dışarı atmak için sisteme ilave edilecek bir soğutucu ile çözülebilir. Sistemdeki ısı yükünü karşılamak için soğutucu seçimi doğru yapılmalıdır (Chapple, 2003).

Endüstriyel sistemlerdeki soğutucu sıcaklığı için ideal değerler, genellikle 50 C^0-60 C^0 iken mobil uygulamalarda ise 70 C^0-80 C^0 arasında kabul edilir. Isının düşürülmesinde genel kural, pompa giriş gücünün 1/3'ünün ısıya dönüştürülmesidir. Soğutucu seçimi, bu etkenlere ve mevcut debiye bağlıdır. Yıllarca sorunsuz çalışan hidrolik sistemde aniden ortaya çıkan ısınma sorununun çözümü, endüstriyel alanda uzmanlaşmış devre kullanıcılarının yetiştirilmesidir. Sıcaklık artışı, genellikle hidrolik sistemde yapılan değişikliklerden kaynaklandığı için basit düzenlemelerle çözüme ulaşılabilir.

Basınç dengeli ve deplasmanlı pompanın kullanıldığı sistemlerde, daha fazla basınç gerekli olduğunda emniyet valfinin ayarlanmasıyla daha yüksek basınçlarda çalışma eğilimi engellenir. Sistem elemanlarının düzgün boyutlandırılmadığı durumlarda ortaya çıkan basınç düşü-

mü, ısı artışına sebep olabilir. Aşırı basınç uygulanarak sıvının iletilmesi için tüm valflerden, borulardan, hortumlardan, dirseklerden ve filtrelerden harcanan atık enerji, ısınmanın en önemli nedenlerindendir. Hidrolik sistem elemanlarının boyutlarını büyüterek ve tesisattaki dirsek sayısını azaltarak, ısınma önlenebilir. Sıvı taşımada, çapın bir üst değere çıkarılmasıyla hız ve ısınmaya neden olan direnç düşer.

Sıvı gücü sisteminde iki temel amaç vardır. Birincisi, boru ve hortum kullanarak aktüatörü hareket ettirmektir. İkincisi ise, aktüatörü belli oranda hassaslaştırarak hareketi kolaylaştırmaktır. Güç hidroliği, sınırları belirlenmiş bir sistemde, basınçlı akışkan kullanarak iş yapar. Hidrolik sistem sıvısı olarak genellikle petrol ürünü sıvı tercih edilir, ancak güvenlik nedeniyle sentetik ve su katkılı sıvılar da kullanılabilir. Bu sıvı tercihi özellikle, takım tezgâhlarına benzer uygulamalarda önemlidir. Herhangi bir hidrolik sistemde, sürekli çalışma için ideal sıvı sıcaklığı, belirtilen maksimum çalışma sıcaklığında veya önerilen sıcaklığın altında olmalıdır. Aşırı ısınmaya izin verilen bir hidrolik sistemde, maliyeti yüksek olan sızdırmazlık elemanlarının bozulması, hidrolik sıvının oksidasyonu veya arızalar kaçınılmazdır. Aşırı ısınmadan dolayı viskozite artacağından, sıvı bozulur yani katılaşır. Bu katılaşmanın sonucunda, çamur haline gelen sıvı, borunun dibine çökerek tıkanmaya ve basınç artışına neden olur. Aşırı ısınmanın oluştuğu bazı durumlarda, valflerin, pompaların ve diğer elemanların sıkışması ile sıvı viskozitesi düşer ve sistemin çalışması düzensiz hale gelir. Endüstriyel hidrolik sistemdeki ideal çalışma sıcaklığının 80°C'yi geçmemesi gerektiği kabul edilir. Önerilen maksimum çalışma sıcaklığı, 50°C ve altındaki değerlerdir. Daha yüksek çalışma sıcaklıklarda, birçok hidrolik sıvının ömrü ciddi oranda kısalır (Kang & Park, 2003; Wu vd., 2017).

Yüksek sıvı sıcaklıkları genellikle, sistemin ısıyı doğru bir şekilde dağıtmaya çalıştığı durumlarda ve artan ısı yükünde ortaya çıkar. Sıvı sıcaklığı 80°C'yi aştığında, sistem zarar göreceğinden sıvı bozulmaya başlar. Sıvı sıcaklığı çok yüksek olduğunda, viskozite değeri, sistem elemanları için öngörülen optimum değerlerin altına düşeceğinden, hidrolik tankta herhangi bir engel veya tıkanma olup olmadığı sıklıkla kontrol edilmelidir. Basıncın doğru ve hassas olarak dengelenmediği bir sistemde, farklı basınç bölgelerinde dolaştırılan sıvı, aşırı ısı üreteceğinden sis-

temin içinde kayıpların oluştuğu kısımlarda, ısı yükü artar. Yüksek sıvı sıcaklıkları, yağ filmini etkileyerek yetersiz yağlamaya yol açabilir.

Hidrolik sistemin normal çalışma düzeni, özellikle yağ sıcaklığı artışından ciddi şekilde etkilenir. Yüksek sıcaklıklarda, hidrolik sıvının oksidasyonu hızlanacağı için metal parçaları aşındıran asitler ve oluşan çamur, sıvının kullanım ömrünü kısaltır. Tekrarlanan ısıtma ve soğutma çevrimleri ile aşırı ısınan hidrolik sıvıların kimyasal özellikleri, önemli ölçüde değişebilir (Wu vd., 2017). Hidrolik ortamın bu şekilde değişimi veya bozulması, özellikle pompa donanımı olmak üzere hidrolik elemanların hasarına neden olur. Aşırı ısınma ile hidrolik sıvının viskozitesindeki azalma, pompa ve ilgili hidrolik tesisattaki hareketli parçaların etkili bir şekilde yağlanmasını engelleyecektir.

Hidrolik sıvının bozulmasında, hidrolik sistemin performansını ciddi boyutta ve olumsuz yönde etkileyen viskoziteyi iyileştirici katkı maddeleri arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar önemlidir. Düşük viskozite, sürtünme ile birlikte aşınma hızını da azaltarak aşınma kaynaklı hasarın önlenmesini sağlar ve böylece sistem elemanları korunmuş olur. Ancak, sürtünmedeki azalma nedeniyle, hidrolik sıvının özelliği tamamen bozularak, sistemde kullanılamayabilir. Viskozitedeki değişim, hidrolik sıvının davranışını ve hidrolik sistemin performansını bir bütün olarak olumsuz yönde etkiler. Basınç ve sıcaklık arasındaki ilişkiye göre bazı sıvılar buharlaşarak, hidrolik sistem ve elemanlarda hasarlara neden olur. Viskozite indeksi yüksek, iyileştirici katkı maddesi içeren bir hidrolik sıvının kullanılması, yüksek sıcaklıklarda karşılaşılan viskozitedeki düşüşü hafifletir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda uzun süre çalışmak, iyileştirici etkinin bozulmasına neden olacağı için katkı maddelerinin iyileştirilmesi, viskozite sorununu ortadan kaldıran basit ve kesin bir çözüm değildir. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta çalışma, köpük azaltıcı, pas önleyici, aşınma önleyici bileşen ve antioksidan gibi diğer kritik katkı maddelerinin tüketilmesine yol açar (Wu vd., 2017; Wankhede & Kolhe, 2015).

KURAMSAL ÇERÇEVE

Pompadaki Güç Kaybının Analizi

Pompanın görevi, gerekli basınç ve debiye sahip hidrolik sıvıyı kullanım noktalarına taşımaktır. Sıvının taşınması sırasında meydana gelen güç kayıpları, mekanik, sürtünme ve hacim kaynaklıdır. Pompa çıkış basıncı (p), pompadan çıkış debisi (Q) ve pompa verimi η olmak üzere, mekanik güç kaybı, denklem (1)' den, benzer şekilde, (α) volumetrik (kaçak) pompa verimi için volumetrik güç kaybı, denklem (2)' den hesaplanır. Toplam güç kaybı ifadesi ise denklem (3) ile verilmiştir (Al-Natour, 1992; Tamioka vd., 2012).

$$W_1 = pQ\,(1-\eta)/\eta \quad (1)$$

$$W_2 = pQ\,(1-\alpha)/\alpha \quad (2)$$

$$W_0 = W_1 + W_2 \quad (3)$$

$$P = V\Delta T/(32{,}4\ \Delta t) \quad (4)$$

(1), (2) ve (3) denklemlerinden görüleceği üzere, pompanın mekanik ve volümetrik verimleri azalırsa, kaybedilen güç artacağından sistemdeki sıcaklık da artar. Isı yükü, P (kW), tank hacmi, V (litre), sıcaklık değişimi, $\Delta T\ (T_2 - T_1)^0\,C$ ve zaman değişimi $\Delta t(t_2 - t_1)\ dk$ olmak üzere güç kaybı için kullanılan bir diğer ifade denklem (4) ile verilmiştir.

Hidrolik Sistemdeki Valflerde Güç Kaybının Analizi

Hidrolik sistemde, farklı amaçla çok sayıda valf kullanılır. Valfteki sıvı direncinden kaynaklanan giriş ve çıkış ağızları arasında belirli bir basınç düşüşü vardır. Her bir valf için güç kaybı W_n, denklem (5)' de ifade edilmiştir.

$$W_n = \Delta P_n \,.\, Q_n \tag{5}$$

Valf sayısı n olmak üzere, sistemdeki valfin kaçıncı sırada olduğuna göre n' inci valf için güç kaybı hesaplanırken, (ΔP_n) valfin giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşümünü, (Q_n) valfteki debiyi gösterir. Hidrolik devredeki valfin kullanım amacına göre valfteki toplam güç kaybı (W), denklem (6) ile hesaplanır.

$$W = W_{n1} + W_{n1} + W_{n3} + \cdots + W_n \tag{6}$$

Bağıntılardan görüleceği üzere, valf gövdesi küçük veya tıkanma söz konusu olduğunda valfteki direnç artar. Böylece, valfin giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşümü ile birlikte güç kaybı artacağından, sistemdeki ısı artışı da belirginleşecektir. Şekil 1' de gösterilen emniyet valfi, pompanın çıkışına ve devreye paralel bağlanacak şekilde monte edilmiştir. Basınç miktarı, izin verilen değeri aştığında, emniyet valfi (RV) açılarak, pompanın ve diğer elemanların hasar görmesini önlemek için basınçlı sıvıyı by-pass yaparak tanka geri gönderir.

$$W_4 = P_4 + Q_4 \tag{7}$$

Normal çalışma koşullarında, emniyet valfi kapalı durumdadır ve akış geçmez. Bu nedenle güç kaybı oluşmaz. Ancak, sistem basıncı çok yüksek olduğunda, emniyet valfi basıncı hatalı bir şekilde ayarlandığında veya emniyet valfi arızalandığında, çok yüksek basınçta hidrolik sıvı, emniyet valfinden geçeceğinden güç kaybına neden olur. Emniyet valfindeki güç kaybı denklem (7)'den hesaplanabilir. Emniyet valfindeki açılma basıncı (P_4) ve emniyet valfinden geçen debi ise (Q_4) ile tanımlanmıştır (Tamioka vd., 2012).

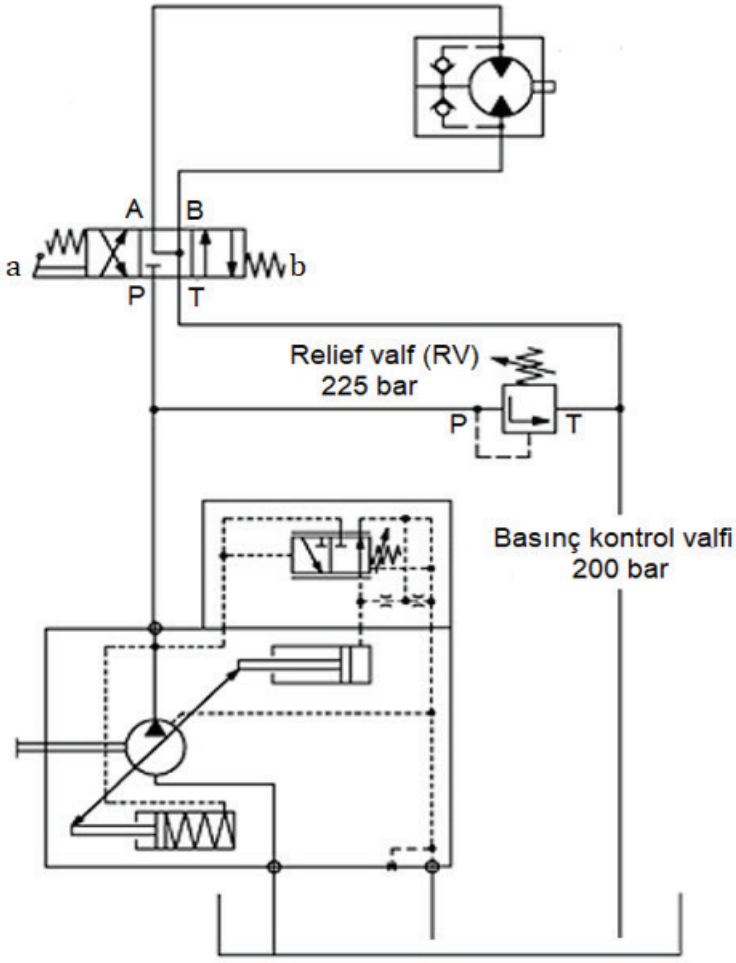
Tesisattaki Güç Kaybı ve Etkileyen Parametreler

Akış halindeki sıvı, boru hattının direncini aşacağından tesisatta meydana gelen güç kaybı, denklem (8) kullanılarak hesaplanır. Tesisatta boru boyu büyük, boru çapı küçük veya debi büyük olduğunda basınç artacağından güç kaybı da artar. Denklem (8)' den görüleceği üzere üretilen ısı miktarı yani güç kaybı, debi ve basınç düşümüne bağlıdır.

$$W_s = \Delta P_s \cdot Q_s \tag{8}$$

Hidrolik eleman, tesisattaki güç kaybının normal değeri aşması durumunda, aşırı ısı kaynağı olarak kabul edilir. Hidrolik sistemin düşük verimde çalışması, hidrolik sıvının ısınmasına sebep olur ve böylece ısıya dönüştürülen miktara eşdeğer giriş gücü kayıpları meydana gelir. Isınmaya harcanan toplam giriş gücü, sistemde oluşan ısıdan daha büyük ise hidrolik sistemde aşırı ısınma kaçınılmaz olur. Isınma sorunlarını azaltmak için soğutucu kapasitesinin, hidrolik sistemin tipine ve uygulamaya bağlı olarak giriş gücünün yaklaşık % 25 ile % 50'si arasında olmasına özen gösterilmelidir. 80°C'nin üzerindeki hidrolik sıvı sıcaklıkları, sızdırmazlık elemanlarına zarar vereceğinden sistemde dolaşan sıvının bozulmasını da hızlandırır. Bu nedenle, hidrolik sistemler, 80°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalıştırılmamalıdır. Ayrıca, sıvı sıcaklığının çok fazla yükselmesini önlemek için sıvı viskozitesinin, hidrolik sistem elemanlarına uygun olarak belirlenen optimum değerin altına düşmemesi gerekir. Bu değer, sıvı viskozitesine bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte 80°C'nin altındadır. Sabit sıvı sıcaklığı elde etmek için hidrolik sistemin ısıyı dağıtma kapasitesi, ısı yükünü aşmalıdır. Örneğin, 100 kW' lık sürekli giriş gücüne ve % 80 verimliliğe sahip sistemin, en az 20 kW' lık ısı yükünü dağıtabilmesi gerekir. Bu sistemin 25 kW' lık bir soğutma kapasitesi olduğu kabul edildiğinde, ısı yükünü 25 kW' ın üzerine çıkaran veya soğutma sisteminin kapasitesini 25 kW' ın altına düşüren her işlem, sistemin aşırı ısınmasına neden olur. Hidrolik sistemlerde, aşırı ısınma problemlerini çözmenin sadece iki yolu vardır. Bunlar sırasıyla, ısı yükünün azaltılması veya ısı dağılımının artırılmasıdır. Hidrolik sistemler nadiren olmakla birlikte sıvı tankıyla ısıyı ya-

yabildiğinden hidrolik tanktaki sıvı seviyesi sürekli kontrol edilmelidir. Tank çevresindeki hava, kir veya döküntü birikmesi gibi bir engel bulunmamalıdır (Pancar & Ergür, 2001; Alia vd., 2010).



Şekil 1. Basınç Dengeli Merkezi Kapalı 4 Yollu Valf Kullanılan Hidrolik Devre (Alia vd., 2010)

Hidrolik sistemde oluşan ısının giderilmesi veya etkisinin azaltılması, dolayısıyla sıcaklığın düşürülmesi için kullanılacak ısı eşanjörünün, ısıyı dağıtma yeteneği, hem hidrolik sıvının hem de eşanjör boyunca dolaşan soğutma havasının veya suyun, akış hızına ve sıcaklığına bağlıdır.

Tüm soğutma devresi elemanlarının performansı kontrol edilir ve gerektiğinde değiştirilir. Merkezi kapalı valfin kullanıldığı devrelerde, ısı üretiminin temel nedenlerinden birisi, değişken deplasmanlı pompa basıncının, basınç kontrol valflerindeki değerin altında veya çok yakınında bir değere ayarlanmasıdır. Bu şekilde yapılan hatalı ayarlama, aynı zamanda sistem basıncının, basınç kontrol valfinde ayarlanan değere ulaşmasını önler. Bu durumda, pompa deplasmanını sıfıra indirmek mümkün olamayacağı için yedekleme valfindeki debi, ısı üretmeye devam eder. Şekil 1' deki gibi merkezi kapalı devrelerde, bu sorunu önlemek için yedekleme (make-up) valfinin basıncı, kontrol valfindeki değerin 20 bar üzerinde olacak şekilde ayarlanmalıdır (Alia vd., 2010; Casey, 2014).

Hidrolik sistemler, genellikle yaz aylarında, daha fazla ısınacağından ortam sıcaklığındaki artışlara gereken önem verilmelidir. Sistemdeki aşırı ısınma çoğu zaman kirli veya kötü yerleştirilmiş bir ısı eşanjöründen kaynaklanıyor olabilir. Bazen ısı eşanjörü üzerindeki by-pass hattı veya emniyet valfi, sistemin aşırı ısınmasına neden olabilir. Sistemin tasarımı değiştirilmedikçe ısı eşanjörü eklemek çözüm olmayabilir. Aşırı ısınan sistemlerin verimli çalışmaması ve genellikle düzeltilmesi gereken dört durum sırasıyla, hatalı ayarlama, boru çapı, aşınmış elemanlar ve sıvı tankının etkisi şeklinde özetlenebilir.

AMAÇ

HİDROLİK SİSTEMDEKİ ISINMANIN NEDENLERİ

Hidrolik sistemler, pompa, yedekleme (make-up) valfi, hidrolik silindir, borular ve diğer elemanları içeren aktüatörlere güç aktarır. Hidrolik sistemde meydana gelen güç kayıpları, ısıya dönüştüğünden hidrolik sıvı sıcaklığının artmasına neden olur. Hidrolik sistemlerdeki aşırı ısınma, yüksek ortam sıcaklığından kaynaklanabileceği gibi çoğu zaman hidrolik sistemdeki ısı üretiminin bir sonucu olduğundan sisteme çok fazla zarar verdiği bilinen ısı üretiminin nedenlerini ortaya çıkarmak, çok önemlidir. Sistemde, hiçbir mekanik iş yapılmadan üretilen ısı, temelde yüksek basınç alanından, düşük basınç alanına akan sıvılardan kaynaklanır. Böyle bir basınç kaybına neden olan bir diğer etki ise sürtünmedir (Wu, vd., 2017). Sistemdeki ısının artmasına neden olan sür-

tünmenin kaynakları; (1) hatalı yağlanmış elemanların kullanılması, (2) yüzeyleri aşırı aşınmaya karşı koruyamayan ve viskozitesi çok düşük bir sıvının kullanılması, (3) sistem için çok yüksek viskoziteye sahip sıvı kullanılması, (4) daralan bir delikten, yüksek hızda geçen sıvı olarak özetlenebilir.

Hidrolik sıvıyı kirleten hava ya da ortamın düzgün havalandırılmamış olması, yüksek sıcaklık ve ısınma nedenidir. Kirlenen sıvı, sistemdeki sorunların kaynağı olabilir. Bazı durumlarda ısı, sistem tarafından üretilmeyebilir. Hidrolik sistem, ısı kaynağına yakın çalıştığında, sistemde sorunlar oluşabilir. Herhangi bir boyutta tasarlanmış hidrolik sistemlerde kullanılan kauçuk gibi genellikle düşük sıcaklıklara karşı çok duyarlı olan elastomerik malzemeler, sıcaklık yeterince düştüğünde, kırılgan özellik gösterebilirler. Düşük çalışma sıcaklıklarında; hidrolik ünite, sızdırmazlık elemanları, bağlantı parçaları, ekleme parçaları ile hortumlar gibi kauçuktan imal edilen elemanlar, ciddi şekilde zarar görebilir.

Çatlak veya yırtılma kontrolü yapmak ve hasarlı elemanların yerine yedeğini bulundurmak gerekeceğinden hidrolik sistemi çalıştırmadan önce devre dışındaki kauçuk elemanlar göz ile kontrol edilmelidir. Viskozite çok artarsa, sistem elemanlarında, yüksek maliyetli hasarlar oluşabilir. Atmosferik yükseklik, sıcaklık ve viskoziteyi etkileyeceği için hidrolik sistemin deniz seviyesinden daha yüksekte çalışması söz konusu olduğunda atmosfer basıncını dikkate alarak, sistemde kullanılan akışkanın beklenen sıcaklıklara uygun olduğu kontrol edilmelidir. Soğuk havalarda, hangi tip hidrolik sıvının kullanılması gerektiği konusunda üretici rehberliğine danışmak, faydalı olacaktır (Wankhede & Kolhe, 2015). Çok az sayıda üretici veya operatör, aşırı ısınan bir motoru çalıştırmaya devam eder. Ancak, benzer durum hidrolik sistemler aşırı ısındığında geçerli değildir. Motor örneğinde olduğu gibi hidrolik elemanlar, contalar, hortumlar ve hidrolik sıvının özelliklerini kaybetmesinde en etkili parametre, yüksek sıcaklıkta çalıştırmaktır. Hidrolik sistemin çalışma sıcaklığı, temelde sistemde kullanılan hidrolik sıvının viskozitesine, viskozite indeksine (sıcaklıkla birlikte viskozitedeki değişim oranı) ve sistemdeki hidrolik elemanların diğer özelliklerine göre değişir. Hidrolik sistemdeki sıvının viskozitesi, yeterli yağlama için ge-

rekli viskozite değerinin altına düştüğünde, sistemin çalışma sıcaklığı aşırı artar. Hidrolik sistemde, paletli pompa kullanılıyor ise sıvı viskozitesi için tavsiye edilen minimum değer, 25 cSt' dur. Viskozite indeksi yaklaşık 100 olan mineral yağlarda, ISO VG22 veya ISO VG68 iken hidrolik sistem için izin verilen maksimum çalışma sıcaklığı 65°C olmalıdır. Mobil uygulamalarda, 80°C'nin üzerinde çalışma sıcaklıkları, yağlama dışında başka sorun yaratmamakla birlikte sızdırmazlık elemanlarına ve hortumlara zarar vererek hidrolik sıvının bozulmasını hızlandırır. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı, 80°C, hidrolik sistem için üst sınır değer olarak kabul edilmelidir ve sistemin mutlaka bu değerin altında çalıştırılmasına yönelik bütün önlemler alınmalıdır (NASA, 2012; Eriksson, 2010).

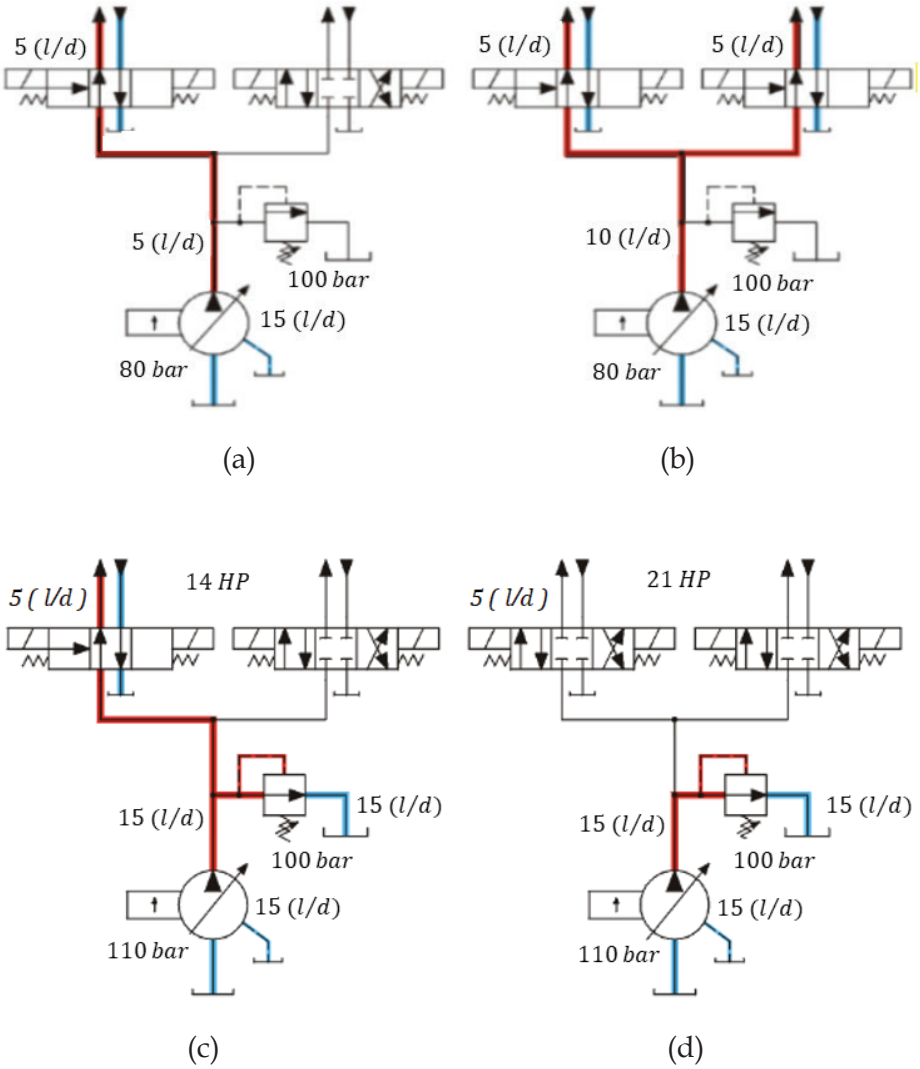
KAPSAM

Hatalı Ayarlama

Aşırı ısınmanın, ilk bilinen nedeni yapılan hatalı ayarlamalardır. Aşırı ısınmayan makinelerde, genellikle ayarlamanın doğruluğu kontrol edilir. Hatalı ayarlanabilen en yaygın eleman, sistem yedekleme valfinin öncesine yerleştirilen pompa kompensatörüdür. Herhangi bir sebepten dolayı sistemdeki basınç artışı, kompensatörde ayarlanmış basınç değerini de artırır, ancak relief valfin ayarını etkilemez. Kompensatördeki değer, relief valfin ayarına yaklaştığında, valf açılmaya başlar ve akışkan tanka yönlendirilir. Sistemdeki basınç arttığında, relif valf daha fazla açılır ve tanka dönen debi artar.

Tasarlanan sistemin talepleri karşılaması için debiyi değiştirmek yerine basınç dengeleme pompası, sabit debili deplasmanlı pompa gibi kullanılarak tam strokta hareket ettirilmelidir. Yükü taşımak için kullanılmayan debi, yedekleme valfi aracılığıyla tanka geri döner. Hareket etmeyen (durma halinde) bir sistemde, pompa çıkışındaki tüm akışkan tanka geri döndürülür. Ortaya çıkan basınç düşüşü, herhangi bir iş gücü yaratmadığı için sisteme yüklenen enerjinin tamamı ısıya dönüşeceğinden sıvı sıcaklığı yükselir (Alia v.d., 2010). Sistem basıncını değiştirmek genellikle hatalı bir uygulama olduğundan optimum sistem basıncını belirlemek için tasarımcıların önerileri ve tasarım kriterleri dikkate alın-

malıdır. Hidrolik sistemlerde, çalışan üniteyi hızlandırmak için genellikle basınç artırma yoluna gidilir. Ancak, basınç artışı, sistemin genel verimini düşüreceğinden bu yöntem tercih edilmemelidir. Aktüatörün hızını sistem basıncı değil akış hızı belirler. Basıncı arttırmak genellikle, akış hızını da artıracaktır. Akış hızını artırmada daha etkili bir çözüm ise akış kontrol valfini açmak veya manuel ses ayarını yükseltmektir.



Şekil 2. Değişken Debili Pompa Kullanılan Devrede Farklı Yerleşimler (Casey, 2014)

Tasarımcılar, sistemdeki yedekleme valfinin genellikle pompa kompensatöründeki değerin yaklaşık 15 bar üzerine ayarlanması önerirler. Şekil 2a' da sistem doğru ayarlanmıştır. Basınç dengeli pompa, 15 l/d' ya kadar enerji iletebilir. Sadece soldaki yön valfi açıkken, sistem 5 l/d kullanır ve pompa, sisteme 80 bar basınç ve 5 l/d debi sağlayacak şekilde çalışır. Şekil 2b' de, ikinci yön valfi açıldığında, daha önceden ayarlanmış 80 bar basıncı korumak için pompa debisi 10 l/d' ya yükselir. Şekil 2c' de ise devredeki kompensatör ayarı 110 bar basınca yükseltilerek relief valf 80 bar basıncın aşağısına ayarlanmıştır. Sistemde 110 bar için ulaşılacak maksimum debi 15 l/d olduğuna göre ısı üreten relief valfi devre dışı bırakarak 10 l/d' nın sadece 5 l/d' sı kullanılır. Şekil 2d' deki sistem boştadır. Pompa tam kapasite çalışırken, debinin 15 l/d' lık bölümü relief valften tanka döneceğinden aşırı ısının belirli bir kısmı sistem dışına atılmayacak ve sisteme 21 HP' lik güç sağlanacaktır (Gannon, 2016).

Boru Çapının ve Aşınmış Elemanların Etkisi

Boru çapının etkisi, orijinal tasarımları değiştirilen sistemlerde, en çok karşılaşılan durumdur. Daha yaygın olarak yapılan sistem iyileştirmelerinden birisi, hızı artırmak için daha yüksek kapasiteli bir akış pompası kullanmaktır. Ancak, sistemdeki borular ve hortumlar, yüksek kapasiteli bu pompadaki basıncı taşıyamayabilir (Wankhede & Kolhe, 2015). Sonuç olarak, aktüatörlerin görevlerini yapabilmeleri için hidrolik sıvının, sistem içerisinde sorunsuz taşınması gerekir. Küçük yarıçaplı dirseklerin bulunduğu boru hatları, sistemdeki türbülansı artırır. Büyük kapasiteli pompa kullanıldığında, debi ile birlikte artan hız, hidrolik kayıpları da artıracağından, oluşacak hasarlara karşı, hidrolik sistemi korumak için boru ve hortumlara, ayrıca özen gösterilmelidir. Hatalı boru çapı kullanımı da, ısı oluşumuna neden olabilir. Örneğin, 40 l/d' da yaklaşık 0,000287 kcal/mh^{0}C ısı açığa çıkarken 80 l/d'da üretilen ısı miktarı 8 kat artarak 0,002296 kcal/mh^{0}C olur.[2] Borular için önerilen akış hızları, sistemdeki basınç farkına göre değişir. Emme borusunda: 1-1,5 m/s,

2 Gannon, M. (2016). Why is it important to minimize overheating in your hydraulic system? https://www.sealingandcontaminationtips.com/important-minimize-overheating-hydraulic-system/

dönüş hattında: 3-5 m/s, orta basınç (30-120 bar) hatlarında: 3-5 m/s, yüksek basınç (120-250 bar) hatlarında ise 7-10 m/s olarak belirlenmiştir (Mccloy & Martin, 1980).

Hidrolik sistemdeki elemanlar aşındıkça, iç kısımlardaki by-pass olasılığı ve beraberinde ısı üretimi artar. Sıkı toleranslara rağmen, kaçak sıvının hızındaki artış, basıncı aniden düşürür ve sistemde, ısı üretilir. Yeni kullanılmaya başlanan bazı elemanlarda sürtünme fazla olacağından ısıyı üreten kaynak kabul edilebilir. Örneğin, servo valfler, oransal valfler ve akış kontrol valfleri yeni kullanılmaya başladığı andan itibaren ısı üretirler, çünkü üzerlerinde her zaman bir basınç düşüşü vardır. Bu elemanlar, belirli bir süre kullanıldıktan sonra yeni elemanı kendine uyumlu hale getiren akışkandaki basınç düşümü azalacaktır. Elemanın ömrünü tamamladığını ve değiştirilme zamanının geldiğini anlamanın en iyi yolu, sistemdeki farklı elemanların sıcaklık kazanımlarının sürekli ölçülmesi ve bu değerlerin kayıt edilmesidir. Arızalı ve aşınmış elemanları bulmak için bu kayıtlardan yararlanılabilir.

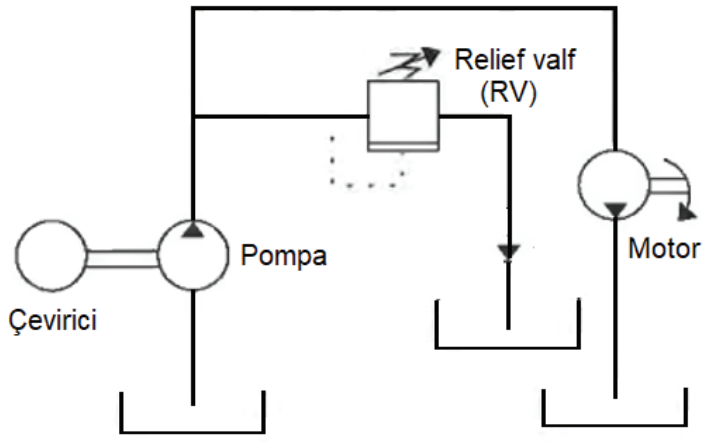
Sıvı Tankının Aşırı Isınma Üzerindeki Etkisi

Sıvı tankının temel amaçlarından birisi, ısıyı ortama yaymaktır. Tankların çoğu silindirik yapıya sahip iken hidrolik tank dikdörtgen şeklindedir. En verimli tank kullanım hacmi, minimum yüzey alanına sahip maksimum hacimli bir küredir. Böyle bir tank kullanımı, bazı uygulamalar için tercih edilebilir, ancak hidrolik sistemde, çok daha fazla yüzey alanının ısıyı yayması istenir. Bir sistem tasarımında, silindirlerin çalışmasıyla birlikte tanktaki sıvı seviyesinin ne kadar yükselip-düşeceği, kirleticilerin dibe çökmesine izin vermek için ne kadar sıvının tankta kalması gerektiği ve atmosfere yayılacak ısı miktarı önceden belirlenmelidir.

Daha yüksek debili pompa kullanıldığında, hidrolik sıvı, ısının dağılmasına izin verecek kadar uzun süre tankta kalmayacaktır. Değişken deplasmanlı pompa kullanıldığında, pompa çıkışındaki sıvı doğrudan tanka taşınır. Bu pompalarda, maksimum debinin yaklaşık % 1-3'ü by-pass edilir. Pompadan çıkan sıvının sıcaklığı yüksektir. Çünkü pompanın içindeki sıkı toleransları aşarak gelen sıvının hızından dolayı kayıplar artarken, üretilen ısı da artacaktır. Isı artışında, daha büyük boyutlu

tank kullanımının hiçbir etkisi yoktur. Ancak, sistem debisinin artmasıyla birlikte çalışma sıcaklığı da artabilir. Sıvı seviyelerinin ve özelliklerinin görsel olarak incelenebilmesi için tüm tankların üzerine sıvı gözetleme camları, sıvı göstergeleri ve seviye monitörleri takılmalıdır (Mccloy & Martin, 1980). Tanktaki yağ seviyesi, sürekli kontrol edilmelidir. Hidrolik tank hacmi, pompa kapasitesinin yaklaşık üç katı olmalıdır. Tank sıvısındaki azalmayı karşılamak için takviye (make-up), yedekleme veya destek devresi olarak adlandırılan ve Şekil 3' de gösterilen hidrolik devre kullanılır. Ayrıca, tankın kir veya sıvı ile kaplı olmadığı, tüm kenarların üst ve alt kısımlarının açık ve hava akımlarından arınmış olduğu bilinmelidir. Hidrolik tank ve sistem elemanlarıyla doğrudan temas eden örneğin güneş ışığı gibi ısı kaynakları bulunmamalıdır.

Hidrolik sistem, enerji dönüşümü ve geçirgenliği sürecini kullanır. Bu süreçler, mekanik ve hidrolik enerjinin ısıya dönüştürüldüğü kayıpları içerir. Çalışma sıcaklığı, hidrolik sistemin verimliliğini düzenleyen faktörlerden birisidir (Yin, 2019:330-331). Hidrolik sıvı sıcaklığını etkileyen parametreler, sistemdeki güç kayıpları, sistemin kurulum yeri, ısı yayan elemanların (tank gibi) yüzey alanı, izin verilen maksimum sıvı sıcaklığı, kullanılan hidrolik sıvı ve sistemin diğer gereksinimleri olarak özetlenebilir. Sistem sıcaklığı çok düşük ise, akış direnci artar ve pompanın emiş gücü azalır. Sıcaklık çok yüksek ise, artan sistem kayıpları dolayısıyla daha fazla aşınma ve daha fazla sıvı kaçağı oluşur.



Şekil 3. Basit-Açık Hidrolik Devre Şeması

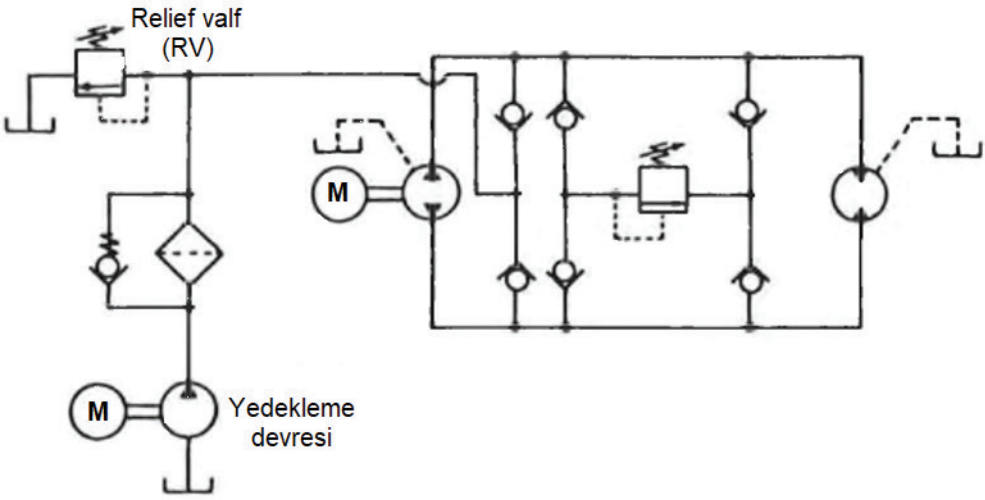
Başlangıçta sabit sıcaklıktaki bir sistem için uygun viskozitede sıvı seçilmiş ise devredeki sıcaklık sabit kalacağından, hidrolik sistem her zaman optimum verimde çalışacaktır. Ancak, böyle bir hidrolik sistem tamamen teoriktir, çünkü gerçekte sistemin girişte sahip olduğu gücün yaklaşık % 20'si ısıya dönüşür. Hidrolik sistemdeki ısı, sürtünme veya dış sıcaklık olmak üzere iki sebepten kaynaklanabilir. Uzun borularla, relief valften büyük debide ve yüksek basınçta geçen sıvı, aşırı ısı oluşturur. Ortam (dış) sıcaklığı çok yüksek ise önemli miktarda ısı, hidrolik sisteme aktarılacaktır (Yin, 2019:330-331; Casey, 2004). Sistemdeki sıcaklığın azaltılmasında, yüksek basınç ve dirençte çalışan akışkanların kullanıldığı hidrolik devreleri değerlendirmek için çalışma amacına uygun olmak üzere sisteme, ısı eşanjörlü veya ısı eşanjörsüz güç ünitesinin ve daha büyük sıvı tanklarının sisteme ilave edilmesi düşünülmelidir.[3]

YÖNTEM

ISI ÜRETİMİNİN AZALTILMASI ve AŞIRI ISINMANIN KONTROLÜ

Hidrolik sistemde çalışan sıvı, kar kadar temiz ve saf olabileceği gibi ısındığında da sistemi, aniden devre dışı bırakabilir. Uygulanan yöntemler, ısıyı azaltan metotlar veya soğutucu eklenmesi, bu sorunu ortadan kaldırarak elemanların uzun ve sağlıklı bir yaşam sürmesine yardımcı olacaktır. Basınçta herhangi bir düşüş gerçekleşmeden, yüksek basınç alanından daha düşük basınç alanına akan hidrolik sıvı, ısı üretir. Sürtünme, akışkan tipi ve sıcaklığı, boru boyu ve çapı, kaplin ve adaptör seçimi ve akış hızı, basınçtaki düşüş miktarını etkileyen önemli parametrelerden bazılarıdır.

3 Casey, B. (2004). Solving hydraulic system overheating problems. https://www.sealingandcontaminationtips.com/important-minimize-overheating-hydraulic-system/

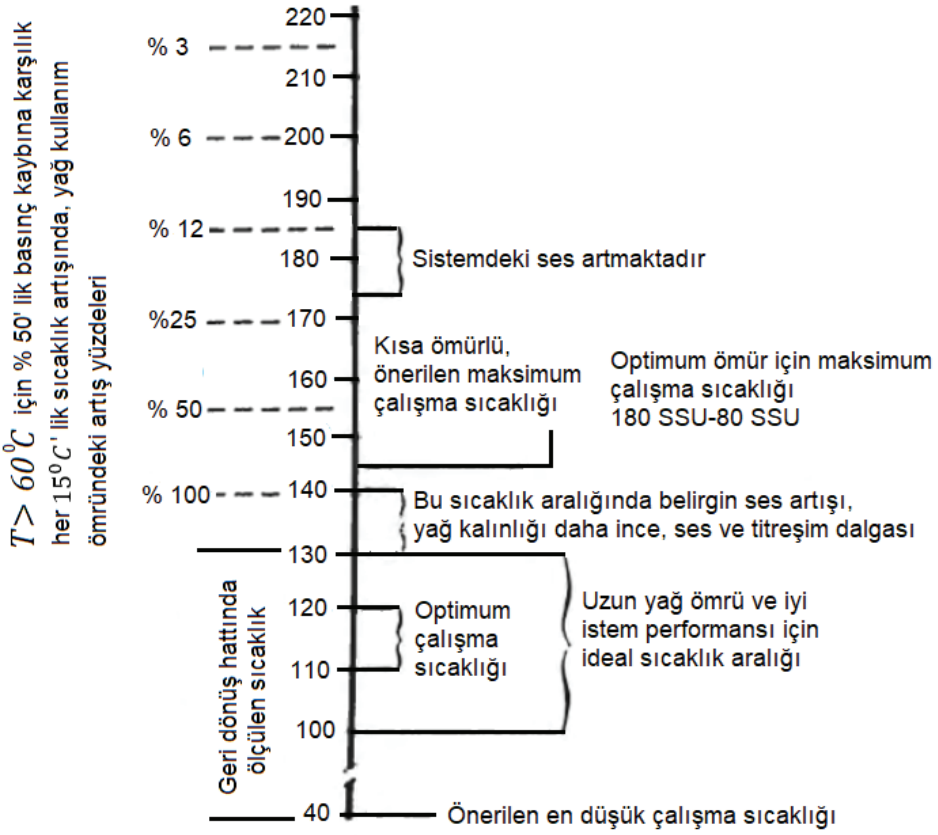


Şekil 4. Destekleme Devresinin Kullanıldığı Kapalı Devre Şeması (Dyson Vd., 2008)

Isı eşanjörünün boyutlandırılması için eşanjör ile toplam devre boyutu arasında, her devre tipine göre değişen temel oranlar mevcuttur. Şekil 4' de gösterilen ve az sayıda valfin kullanıldığı basit-açık tip devrelerde bu oran %25 iken sıvı motorlu basit devrelerde %31' dir. Benzer şekilde, silindirli basit devrelerde %25, servo tabanlı sistemlerde %60-%75, düşük basınçlı devrelerde %15, hidrostatik transmisyon devrelerinde % 35-% 40 olan bu oran, kapalı devrelerde %19' dur.

Sürtünme kaynaklı sorunlar, en basit şekilde, daha büyük boyutlu elemanların kullanımı ve dirsek sayısının azaltılması ile çözümlenebilir. Hortum uzunluğunun yanında, dirsek ve bağlantı elemanlarının sayısı, hidrolik kayıplar üzerinde etkilidir. Isı dağılımında sağlanan artış, aşırı ısınan hidrolik sistemi soğutmak için kullanılan diğer bir yöntemdir. Sabit sıvı sıcaklığı elde etmek için, bir hidrolik sistemin ısıyı dağıtma kapasitesi, kendi doğal ısı yükünü aşmalıdır. Pompa giriş gücündeki artış, hidrolik sistemdeki sıvı sıcaklığının da yükselme olasılığını artıracaktır. Pratikte, değişkenlerin sayısı bilinmediği için bir hidrolik sistemin toplam güç kaybı hesaplanamaz. Hidrolik sistemdeki fazla ısıyı gidermek

için kullanılan ısı eşanjörlerinin devreye alınması sırasında, dikkat edilmesi gereken birçok değişken vardır (Cao, 2011).



Şekil 5. Sıvı Sıcaklığının Hidrolik Sistem Üzerindeki Etkileri (Esposito, 2008)

Hidrolik sistem, pompa ve motor içeren basit bir devre ise ve 30 HP' lik güce sahipse, tankın harcaması gereken güç yaklaşık, $30\ HPx0{,}31 = 9{,}3\ HP$ değerindedir. Aksi takdirde, aşırı ısınma kaçınılmaz olacaktır. Sistem basıncı > 70 bar ve tank hacmi, pompa debisinin 3 katına eşdeğer ise ısı eşanjörü kullanılması gerekir (Dyson vd., 2008). Şekil 5' de, sıcak hidrolik sıvının, sistem performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Termal bakım amaçlı hidrolik bir sistem tasarlamak için hidrolik sistemin ısıyı nasıl ürettiği ve yaydığı bilinmelidir. Hidrolik sistemde, mekanik iş yapılmaksızın sıvının daha yüksek basınçtan daha

düşük basınca aktığı yerde ısı üretilir. Bu, emniyet valfinin tanka bypass yaptığı ve sistem basıncının istenilen seviyede tutulduğu anlamına gelir. Basınç düşümü, yani basınç kaybındaki fark, pompa çıkışı ile bypass (tanka geri dönüş) hattı arasında meydana gelir. Sistem performansını belirleyen hidrolik sistemdeki termal geçişler, genellikle ısıya dönüştürülen güç kayıpları ile ilişkili termodinamik işlemlerde söz konusudur (Walters, 2002). Bu geçişler, sistem çalışırken meydana gelen ısı akış transferini ve ısı kayıplarını içerir. Sıcaklık farkının hidrolik sistemlerde oluşturduğu değişimler ile ısının kararlı haldeki özellikleri karşılaştırılarak, gerekli değerlendirmeler yapılır.

Kauçuk Parçalarda Hızlandırılmış Yaşlanma

Hidrolik sistemde kullanılan farklı tip valflerin contaları gibi çok sayıda ekleme elemanı ve sistemde kullanılan hortum, kauçuk ürünü olabilir. Sıvı sıcaklığındaki artış, kauçuk parçaların performansını da değiştirir. Uzun süre yüksek sıcaklıkta çalışan kauçuk parçaların yaşlanma ve bozulma süresi hızlanacağı için ömrü kısalacaktır. İstatistiklere göre, hidrolik sıvı sıcaklığının her 10 ^{0}C' lik artışına karşılık kauçuk parça ömrü, %50 azalmaktadır (Johnston vd., 2008).

Hidrolik Sistemdeki Sıvının Viskozitesi ve Hidrolik Eleman Arızası

Hidrolik sıvının viskozitesi, sıcaklık değişikliğine çok duyarlıdır. Sıcaklık artışı ile azalan moleküller arası mesafe, viskozitenin de azalmasına neden olur. Viskozite-sıcaklık ilişkisinde, sıcaklık ne kadar yüksek olursa, viskozite o kadar düşük olur. Viskozitedeki azalma, hidrolik sistemdeki kaçakların artışı gibi bir dizi soruna yol açacaktır. Pompanın hacimsel verimliliğinin azalması ile birlikte aktüatörün hareket hızının azalması, hareket kontrolünün hassasiyet ve doğruluğunun da azalmasına neden olacaktır. Hidrolik sistemin performansını ve servis ömrünü etkileyen hidrolik sıvı, sadece bir yağlayıcı değil aynı zamanda gücün aktarılmasını kolaylaştıran en önemli bileşendir.

Hidrolik sistemin çalıştığı ortam için çok yüksek viskozitede sıvı kullanılırsa, soğuk çalıştırma sırasında akışta sorunlar oluşur. Düşük viskoziteli sıvı kullanımında ise, özellikle en sıcak günlerde, sistemin yeterli yağlanması mümkün olmayacağı için yanlış viskozitede sıvı kullanmak, yağlama hasarının ve ana bileşenlerin hızlı arızalanmasının dışında güç tüketimini de artırır (Johnston vd., 2008) Farklı tip hidrolik elemanlar, farklı termal genleşme katsayılarına sahip olduklarından, hidrolik sıvı sıcaklığındaki artış ile iki bileşen arasındaki boşluk küçülecek ve sıkışmaya neden olacaktır. Bu durum istenmeyen arızaları da beraberinde getirir.

Aşırı Isı Kontrolü ve Hidrolik Yağın Çalışma Ömrü

Aşırı ısının kontrolü için farklı akış şemaları düzenlenebilir. Bunlardan en çok tercih edilen ve makine imalat sanayisinde başarıyla uygulanan kontrol şeması, Tablo 1' de verilmiştir. Ayrıca hidrolik sıvının çalışma ömrünü etkileyen yüksek sıcaklık, hidrolik sıvının oksidasyonunu artırır ve sıvının kademeli olarak kirlenmesine sebep olan bazı ketonlar, asitler, asfalt ve diğer maddeler üreterek hidrolik sıvının bozulmasına neden olur. Dolayısıyla, belli bir dereceye kadar oksitlenmiş hidrolik sıvı, kesinlikle kullanılmamalıdır (Walters, 2002).

Tablo 1. Aşırı Isınma Kontrolünde Kullanılan Nomogram (Mulley, 2004)

Aşırı Isınma Sonucunda Karşılaşılan Sorunlar ve Çözümleri			
Isınmış Pompa	Isınmış Akışkan	Isınmış Motor	Isınmış Relief Valf (RV)
Sorun: Isınmış sıvı Çözüm: D maddesi	Sorun: Basınç yüksek Çözüm: D maddesi	Sorun: Isınmış sıvı Çözüm: D maddesi	Sorun: Isınmış sıvı Çözüm: D maddesi
Sorun: Kavitasyon Çözüm: A maddesi	Sorun: RV ayarı yüksek Çözüm: D maddesi	Sorun: RV ayarı yüksek Çözüm: D maddesi	Sorun: Valf (RV) ayarı Çözüm: D maddesi
Sorun: Sıvıda hava var Çözüm: B maddesi	Sorun: Kirli sıvı Çözüm: F maddesi	Sorun: Aşırı yük Çözüm: C maddesi	Sorun: Hasarlı valf Çözüm: E maddesi
Sorun: RV ayarı yüksek Çözüm: D maddesi	Sorun: Hatalı viskozite Çözüm: F maddesi	Sorun: Hasarlı pompa Çözüm: E maddesi	
Sorun: Aşırı yük Çözüm: C maddesi	Sorun: Hatalı soğutma Çözüm: G maddesi		

Sorun: Hasarlı pompa Çözüm: E maddesi	Sorun: Hasarlı elemanlar Çözüm: E maddesi
Çözüm Önerileri (Aşağıdaki maddelerin herhangi biri veya tamamını yerine getiriniz)	
A1: Filtreleri değiştiriniz. A2: Tıkalı girişi temizleyiniz. A3: Tank havalandırmasını değiştiriniz. A4: Sıvıyı değiştiriniz. A5: Pompa dönüş hızını değiştiriniz. A6: Süper şarj pompasının bakımını yapınız. A7: Süper şarj pompasını değiştiriniz.	B6: Salgı kontrolü yapınız. B7: Keçe ve yatakları kontrol ediniz. B8: Sistemde yük kontrolü yapınız. B9: Basınçölçer ilave ederek basınç ayarı yapınız. B10: Filtreleri değiştiriniz B11:Viskozite hatalı ise sıvı değişimi gereklidir. B12: Soğutucu veya filtresini temizleyiniz. B13: Soğutucu valfini değiştiriniz.
B1: Kaçak noktalarını sıkıştırınız. B2: Kaçak noktalarını kapatınız. B3: Tankta seviye kontrolü yapınız. B4: Sistemdeki havayı alınız. B5: Mil keçesini değiştiriniz.	C1: Salgı kontrolü yapınız. C2: Keçe ve yatakları kontrol ediniz. C3: Sistemde yük kontrolü yapınız. D: Basınçölçer ilave ederek basınç ayarı yapınız. E: Revizyon ve değişim gereklidir.

F1: Salgı kontrolü yapınız.
F2: Keçe ve yatakları kontrol ediniz.
G1: Sistemde yük kontrolü yapınız.
G2: Basınçölçer ilave ederek basınç ayarı yapınız.
G3: Revizyon ve değişim gereklidir.

Isı eşanjörlerinin kullanımında dikkate alınması gereken birçok değişken vardır. Isı eşanjörünü boyutlandırırken, Tablo 2' deki değerlerden yararlanılarak girişteki motor gücü (HP), en iyi etki değeri ile çarpılır. Hidrolik sistem, pompa ve motor içeren basit bir devre ve 30 HP' lik güce sahip ise, $30\ HP x 0{,}31 = 9{,}3\ HP$ değerinde güç tüketmesi gerekir. Bunun için gerekli önlemler, tasarımcı tarafından belirlenmelidir (Doddannavar vd., 2005; Akers vd., 2006).

Tablo 2. Aşırı Isınma Hesabında Gerekli Sistem Parametreleri (Akers Vd., 2006)

Devre türü	Etki değeri–Çarpım katsayısı (%)
Minimum valfli basit devreler	25
Silindirli basit devreler	31
Pompa veya motor içeren devreler	31
Hidrostatik şanzımanlar	35–40
Servo tabanlı sistemler	60–75
Düşük basınçlı sıvı sistemleri	15

Belirtilen önerilerin dışında, aşırı ısınmayı engellemek için aşağıda özetlenen noktalara, ayrıca özen gösterilmelidir (Mulley, 2004; Doddannavar vd., 2005).

(a) İşlem dışındaki pompa yükü düşürülmelidir. Bunun için sabit deplasmanlı pompalara, selenoid havalandırmalı bir valf eklenebilir.

(b) Büyük hacimli ve ısı iletim katsayısı büyük malzemeden üretilmiş tank tercih edilmelidir. İmalattaki sorunlar ve malzeme maliyeti dikkate alınmadığında, tank malzemesi olarak bakır seçilebilir. Ayrıca, et kalınlığı oldukça büyük cam tank kullanımı düşünüldüğünde, imalat sorunları açısından bu tür malzemelerden kaçınılmalıdır. Ancak, maliyet faktörü ihmal edilmemelidir. Tankın yerleştirileceği alan, en yüksek miktarda hava akışına ulaşabilmelidir. İzole edilmiş bir tankın, ısı yayma kapasitesi düşeceği için aşırı ısınma aniden ortaya çıkacaktır.

(c) Relief valf (RV) ayarı, işlem için sistemde gerekli basıncın yakın değerlerde olmalıdır.

(d) Isı eşanjörlerini sisteme kurmak veya tasarlamak, aşırı ısının giderilmesine yardımcı olacaktır. Isı değişimleri, hidrolik sistemdeki fazla ısıyı gidermek için kullanılabilir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Hidrolik sistemde sıvılar önemli rol oynar. Hidrolik sıvı olmadan sistemde hiçbir işlem mümkün değildir. Sıcaklık değişiklikleri gibi çevresel değişiklikler, hidrolik sıvıların ve sistemin çalışmasını doğrudan

etkiler. Sıcaklık arttığında sıvı buharlaşacak, düştüğünde de sıvı donacaktır. Bu, hidrolik sıvıyla ilgili en önemli sorunlardan biridir. Hidrolik sistem uygulamaları çok çeşitlilik gösterir. Bu gibi durumlarda tutuşma kaynakları ve sıcak yüzeylerle teması içeren uygulamalar mevcuttur. Etkiler, kullanılan hidrolik sıvının türüne bağlıdır.

Mineral yağlar, ateşe dayanıklı sıvılar, su/yağ emülsiyonları, su/glikol ve fosfat esterler, farklı özellikteki hidrolik sıvı kategorileridir. Mineral yağlar gibi petrol-bazlı hidrolik sıvılar, 150-300^{0}C arasında değişen parlama noktasına sahiptir. Su-bazlı hidrolik sıvılar ise yanıcıdır. Ancak, su-bazlı hidrolik sıvılar kullanılırken korozyon oluşur. Basit veya karmaşık hidrolik sistemlerde karşılaşılacak ortak sorun, hidrolik sistemin aşırı ısınması olacaktır. Isınma problemine gereken önem verilmediğinde, sistem kolay arızalanabilir veya çalışma sahasında ciddi kazalar oluşabilir. Hidrolik sistemler, çalışma sırasında üretilen belirli miktar ısıya dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak aşırı ısınmış hidrolik sistem, 80°C veya üzerinde çalışan sistem anlamına gelir. Bir sistem bu kadar yüksek sıcaklıkta çalışıyorsa, aşırı ısınmanın bileşenler ve çevre üzerindeki olumsuz sonuçları son derece etkilidir.

Hidrolik sistemin sıcaklığı yükseldiğinde, kullanılan akışkan bozulur veya yaşlanır. Ayrıca, artan sıcaklık akışkan viskozitesini düşürerek contaların ve hortumların ömrünü etkiler. Sıvı kirliliği, aşırı ısınan hidrolik sistemde sorun yaratır. Contalar sıcaklık nedeniyle hasar gördüğünde, contaların kauçuk parçacıkları, sıvıyı kirletmenin yanı sıra birikerek kimyasal özelliklerinin de değişmesine neden olur. Ayrıca, aşırı ısınan sistem, çalışanların güvenliği açısından da büyük endişe kaynağıdır. Sıvı viskozitesi düştüğünde, uygunsuz yağlamanın etkisiyle oluşacak aşınma ve yıpranma, hidrolik sıvı kaçaklarına neden olabilir. Sıvı kaçağı, çalışanların basınçlı sıvıyla temas etme riskini artırır ve tehlikeli sağlık sorunlarına neden olur.

Hidrolik sıvıların çoğu yanıcıdır. Burada hidrolik akışkan sıcaklığı arttığında, yangın riski daha yüksek olacaktır. Sadece petrol bazlı hidrolik akışkan değil, su bazlı hidrolik akışkanlar da bu yangından etkilenir. Su bazlı hidrolik sıvıda, sıcaklık arttıkça su içeriği buharlaşacak ve yangına dayanıklılık özelliği azalacaktır. Hidrolik sıvının aşırı ısınmaması için işlevsel soğutma sistemi ve ısı eşanjörü kullanılmalıdır. Hidrolik

sistemin aşırı ısınmasında, farklı nedenler vardır. Ancak sıcaklık arttığında, sistemdeki her bileşen olumsuz yönde etkilenir.

Hidrolik sistemin aşırı ısınmasının yaygın nedenlerinden bazıları; (1) aşırı yüklenmiş sistem, (2) çok düşük/yüksek sıvı viskozitesi, (3) iç kaçaklar, (4) kirlenme, (5) yetersiz tank kapasitesi, (6) kurulumdaki hatalar, (7) uzun süre kesintisiz çalışma, (8) soğutma sıvısı sisteminin hatalı çalışması, (9) hasarlı veya yanlış sistem bileşenleri seçimi olarak özetlenebilir. Sistemin aşırı ısınmasını azaltmak için yararlanılan iki yöntem; hidrolik sistem yükünü azaltmak ve ısı dağılımını iyileştirmektir. Uzmanlar ise ısı yükünün azaltılmasını önermektedirler. Çünkü ısı yükü düşürülürse sistem performansı artacaktır. Büyük çaplı tesisatta ısı yükü en aza indirilebilir ve sisteme ısı eşanjörleri eklenerek ısı dağılımı iyileştirilir. Hidrolik ünitenin çalışması sırasında, hidrolik sıvının ısınmasının en önemli nedeni istem bileşenlerinin verimsizliğidir. Bu verimsizlikler, giriş gücü kaybına neden olacak ve ısı enerjisine çevrilen bu güç kaybı ise sistemin ısı yükünü artıracaktır. Dolayısıyla, hidrolik sistemin ısı yükü, çalışma sırasındaki verimsizlikler nedeniyle sistemde kaybedilen toplam güce eşit olacaktır. Toplam güç değeri, ısıl analizlerde kullanılan temel denklemler ile hesaplanır. Isı dengesini sağlamak için ısı eşanjörü veya soğutucular gibi ısı yayma cihazları kullanılır. Hidrolik sıvıdaki ısı yükü, sistemdeki ısı dağılımına göre daha büyük olacaktır. Isı dağılımı ve ısı yükü arasında denge kurulmalıdır. Isı eşanjörünün doğru seçilmediği durumlarda eşanjörün etkinliği azalacak ve sistemden tamamen dağıtılamayan ısı yükü, hidrolik sıvının sıcaklığını da artıracaktır. Isı yükü, belirli bir sürede sistemden çıkarılması gereken *ısıl değerdir.* Sistemin verimi düşerse ısı yükü artacağından sıvının sıcaklığı da belirgin miktarda artış gösterir.

Hidrolik sıvı sıcaklığı 80^0 C'nin üzerinde ise hidrolik sistem çalıştırmamalıdır. Sıvının viskozitesi optimum değerin altına düştüğünde, hidrolik sıvının sıcaklığı artacaktır. Gereken sıcaklığın muhafaza edilebilmesi için hidrolik sistem, ısıyı dağıtma özelliğine sahip olmalıdır. Hidrolik sistemdeki basınç düşümü ile sistemde oluşan kayıp ısı enerjisine dönüşerek ısı yükünü artıracak ve hidrolik ünitenin aşırı ısınmasına neden olacaktır. Isı, hidrolik sistem bileşenleri üzerinde birçok zararlı etkiye sahiptir. Ancak ısının en zararlı etkisi, sıvıyı parçalamasıdır. Op-

timum performans için sıvı sıcaklıkları 50°C' de tutulmalı ve asla 65°C' yi geçmemelidir. Yüksek sıcaklıklarda hızlanan sıvı oksidasyonu, metal parçaları aşındıran asit ve çamur üreterek sıvının kullanım ömrünü kısaltır. Bu asitler ve çamur, valf deliklerini tıkar ve hareketli bileşenlerin hızlı bozulmasına neden olur. Hidrolik sıvının kimyasal özellikleri, tekrarlanan ısıtma/soğutma döngüleri ile aşırı sıcaklıklarda önemli ölçüde değişebilir. Hidrolik ortamdaki bu değişiklik veya bozulma, hidrolik bileşenleri özellikle de pompalama elemanı için son derece zararlıdır. Isının başka etkisi, sıvının viskozitesini düşürmesi ve pompanın hareketli parçalarını ve ilgili hidrolik bileşenini etkili şekilde yağlayabilmesidir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Yüksek sıcaklıklar, hidrolik sıvının özelliğini kaybetmesine ve çok daha hızlı bozulmasına neden olur. Sıcaklık, ayrıca sıvının viskozitesini azaltmakta ve böylece hidrolik sıvının gücü aktarma yeteneğini de olumsuz etkilemektedir. Sonuçta, hidrolik hortumlar ve contalar da hasar görebilir. Hidrolik sıvı soğutucusu kirlenirse veya tıkanırsa, sıvının çok ısınmasına da neden olabilir. Bu sorun, sıvı soğutucu kanatçıklarının temizlenmesi ile çözümlenir. Sıcaklığın en ciddi etkisi, sıvı viskozitesi üzerinde gerçekleşir. Sistem soğuk ise sıvı viskozitesi artacak ve sıvı kalınlaşacaktır. Yüksek sıcaklıktaki hidrolik sistemlerde, sıvı viskozitesi azalır. Viskozitedeki bu tür değişiklikler, hızlı bir şekilde hidrolik sistem ve elemanlarının kalıcı hasarına yol açabilir. Hidrolik sistemde, sürekli çalışma için sıvı sıcaklığının belirtilen maksimum çalışma sıcaklığında veya önerilen sıcaklığın altında tutulması istenir. Hidrolik sıvısı için uygun çalışma sıcaklığının 80^0C 'den küçük olması gerektiği konusunda, birçok uzman hem fikirdir.

Hidrolik sisteminin aşırı ısınma sorunu olmadan düzgün çalışmasına yönelik bazı tavsiyeler;

- ✓ Hidrolik tank içindeki sıvının hacmi, pompalanan sıvının en az 3 katı olmalıdır.
- ✓ Hidrolik sisteme, ısı eşanjörleri ve soğutucu sistem eklenmelidir.
- ✓ Her zaman daha büyük boyutlu bir sıvı tankı kullanılmalıdır.
- ✓ Hidrolik sistemdeki sıvı seviyesi korunmalıdır.

- ✓ Hidrolik kaçakları önlemek için hasarlı bileşenler değiştirilmeli veya onarılmalıdır.

Sistem basıncını üreticinin ayarladığı ve tavsiye edilen değerden farklı bir değere değiştirmek, çalışan sisteme kesinlikle çok zarar verecektir. Bu şekilde yanlış uygulama, aşırı ısınmaya da neden olur. Dolayısıyla, üretici firma tarafından ayarlanan sistem basıncını değiştirmeden önce çok dikkatli karar vermek gerekir. Bir başka potansiyel problem kaynağı da relief valftir. Valf arızalanırsa veya iyi ayarlanmamışsa, sistem basıncını dolayısıyla sıvının sıcaklığını etkileyebilir. Ayrıca, soğutma vantilatörünün hasarlı veya vantilatör kayışının doğru gerginlikte olmaması da hidrolik sistemin aşırı ısınmasına neden olur.

Hidrolik sistemdeki ısı üretimini azaltmak için aşağıdaki tavsiyelere uyulmasında yarar vardır.

- ✓ Basınç gerekli değil ise donmaya karşı korumak için sistemdeki sıvı boşaltılmalıdır.
- ✓ Sabit deplasmanlı pompa kullanıldığında sisteme selenoid havalandırmalı bir relief valf, basınç dengeli pompalarda ise selenoid havalandırmalı bir kontrol valfi eklenmelidir.
- ✓ Uygulamada mümkün olan en büyük boyutlu sıvı tankı tercih edilmelidir.
- ✓ Tasarım ve ısıl analiz denklemlerini kullanarak hesaplanan hidrolik tank hacmine uygun bir eşanjör seçilmelidir.
- ✓ Sistem ihtiyacının üzerinde olmak şartıyla ana hidrolik sistemde, aşırı direnç ve enerji kaybını önlemek için sitem basıncı, en düşük değerde sabit kalmalıdır.
- ✓ Hidrolik tank, hava akışının en yüksek olduğu bölgeye yerleştirilmelidir.
- ✓ Isı eşanjörü ve soğutma sistemi eklenmelidir. Böylece hidrolik sistemdeki aşırı ısı giderilir.

Hidrolik sıvının seviyesi de çok önemlidir. Tanktaki hidrolik sıvı seviyesi, sistemdeki sıvının aşırı ısınmasına neden olabilir. Seviye düşüklüğü, sıvı ilavesi ile birlikte giderilir. Aynı zamanda, düşük sıvı seviyesi, fark edilmeyen kaçaklardan kaynaklanıyor olabileceğinden kaçak kontrolü ihmal edilmemelidir. Hidrolik sıvı, ısıdan dolayı hasar görmüşse,

daha koyu bir renge ve yanmış sıvı kokusuna sahip olacaktır. Bu durumda, renk ve koku sorunlarının mutlaka çözümlenmesi gerekir. Bir başka ısı üretim kaynağı, sıvıdaki hava kabarcıklarının sıkışmasıdır. Bu kabarcıklar, pompa tarafından artan basınçla birlikte sıkıştırılır. Gaz sıkıştırıldığında sıcaklık artar, böylece hava kabarcıklarının sıkışması ile sıvıya ısı verilmiş olur. Pompadaki kavitasyon probleminin çözümü, kabarcıkların patlaması sırasında oluşan şok dalgalarının neden olduğu hasarı ve ısı üretiminden kaynaklanan sorunları da azaltacaktır. Tüm bunları birlikte düşündüğümüzde, aşırı sıcaklığın onarım maliyeti çok daha yüksek ek sorunlara neden olmanın yanı sıra sistem performansını ve verimliliğini de önemli ölçüde etkileyeceği açıktır.

KAYNAKÇA

Al-Natour, I.S. (1992). *Study of an open circuit hydraulic power system with compact cooler-reservoir unit*, Doctoral Thesis. Dublin City University: Scientific Studies Research Centre, Damascus, Syria.

Alia, M.A., Younes, T. & Sarhan, H. (2010). Hydraulic domestic heating by throttling. *Engineering*, 2, 461-465. https://doi:10.4236/eng.2010.26060

Akers, A., Gassman, M. & Smith, R. (2006). *Hydraulic Power System Analysis*. (1st Ed.). New York: CRC Press, Taylor & Francis.

Cao, Y. (2011). *Temperature rise by throttling and thermal deformation of hydraulic valve*, M.S. Thesis. Lanzhou Univ. of Tech.: College Energy Power Eng., Gansu, China.

Chapple, P. (2003). *Principles of Hydraulic System Design*. UK: Coxmoor Pub. Company.

Doddannavar, R., Barnard, A. & Ganesh, J. (2005). *Practical Hydraulic Systems: Operation and Troubleshooting for Engineers and Technicians*. (1st Ed.). Amsterdam, Boston: Elsevier/Newnes.

Dyson, P., Ransing, R., Williams, P.H. & Williams, R. (2008). *Fluid Properties at Nano/Meso Scale: A Numerical Treatment*. New Delhi, India: Wiley.

Eriksson, B. (2010). *Mobile fluid power systems design with a focus on energy efficiency*. Doctoral Thesis (No.1339). Linköping University: Institute of Technology, Sweeden.

Esposito, A. (2008). *Fluid Power with Applications*. New York: Pearson Education Publication.

Johnston, D.N., Edge, K.A. & Yang, M. (2008, September 10-12). *Condition monitoring and fault diagnosis for vane pumps using flow ripple measurement*. Fluid Power and Motion Control Symposium Proceedings, Session-1, (ss. 41-54). UK: Bath.

Kang, J. & Park, F.C. (2011, October 26-29) *Minimum heat loss control of fluid-powered systems*. 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), (ss. 1383-1387). South Korea: Gyeonggi-do.

Mccloy, D. & Martin, H.R. (1980). *Control of fluid power: Analysis and design*, (2nd Revised Ed.). Michigan: John Wiley & Sons.

Mulley, R. (2004). *Flow of Industrial Fluids: Theory and Equations*. (1st Ed.). Florida, New York: CRC Press.

NASA. (2012). *Mechanical Systems Qualification Standard*, Reference Guide.

Pancar, Y. & Ergür, H.S. (2001). *Hidrolik devreler I ve II*: ESOGÜ, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, Ders Notları.

Tamioka, K., Tanaka, K., Higo, H. & Shimizu, F. (2012, June 12). *A method predicting temperature rise of oil-hydraulic system considering heat balance between oil-passage and housing*. Proc. of the Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation. (ss.128-136). Dauphin-Tanguy: Bruzzone.

Walters, R.B. (2002). *Hydraulic and Electric-Hydraulic Control Systems*. (2nd Ed.). Netherlands: Springer.

Wankhede, A.A. & Kolhe, K.P. (2015). Design and analysis of hydraulic oil cooler by application of heat pipe. *International Journal Science, Engineering & Technology Research*. 4(9), 3189-3194.

Wu, C., Xu, C., Mao, X., Li, B., Hu, J. & Liu, Y. (2017). *Heating analysis in constant-pressure hydraulic systems based on energy analysis*. 1st Int. Glo-

bal on Renewable Energy and Development, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 100 (012147), 1-6.

https://doi:10.1088/1755-1315/100/1/012147

Yin, Y. (2019). Electro Hydraulic Control Theory and Its Applications under Extreme Environment: Y. Yin (Ed.), *Hydraulic components in extreme temperature environments* (ss. 329-351). Butterworth-Heinemann: Elsevier.

https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814056-7.00010-0

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] Casey, B. (2014). *3 big problems caused by hot-running hydraulics*. Hydraulics & Pneumatics. (E.T.29.04.2021).

https://www.hydraulicspneumatics.com/hydraulics-at-work/article/21884669/3-big-problems-caused-by-hotrunning-hydraulics

[2] Gannon, M. (2016, E.T.08.03.2021). *Why is it important to minimize overheating in your hydraulic system?* Journal of Sealing & Contamination: Control Tips, USA. https://www.sealingandcontaminationtips.com/important-minimize-overheating-hydraulic-system/

[3] Casey, B. (2004, E.T.11.11.2018) *Solving hydraulic system overheating problems*. Machinery Lubrication.

https://www.machinerylubrication.com/Read/680/hydraulic-overheating

POLİGON MİL-GÖBEK BAĞLANTILARI: GEOMETRİ, HESAP VE TASARIMI

Volkan KOVAN[1], Tuğçe TEZEL[2]

Öz: Tekerleğin icadı ile mil-göbek bağlantıları tarihte kullanılan en eski makine elemanlarındandır. Teknik ilerleme sürecinde, çok fazla sayıda mil-göbek bağlantıları tasarımlarda kullanılmıştır. Bu farklı mil-göbek bağlantıları: kuvvet bağı, şekil bağı ve malzeme bağı ile döndürme momenti iletenler olarak üç sınıfı ayrılabilir. Şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarında döndürme momenti, milden göbeğe veya göbekten mile doğrudan aktif temas yüzeyleri yardımıyla iletilir. Şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarından olan poligon mil-göbek bağlantılarında aktif temas yüzeyi milin ve göbeğin tüm çevresini kapsamaktadır. Mil-göbek bağlantıları genellikle dinamik olarak zorlanırlar ve dinamik olarak zorlanan tüm makine elemanları gibi yeterli yapısal dayanımı için boyutlandırılmalıdır. Yorulma dayanımı, standartlaştırılmış boyutlara ve tanımlanmış yüzey kalitesine sahip geometrik olarak basit malzeme numuneleri üzerinde deneysel olarak belirlenir. Yapısal dayanım ise herhangi bir geometrik şekle, boyuta ve yüzey kalitesine sahip bileşenin, sınırsız sayıda yük değişikliğine kırılmadan dayanabileceği gerilme değeridir. Bu nedenle, dinamik olarak zorlanan mil-göbek bağlantılarında mil, yapısal dayanıklılık açısından neredeyse her zaman kritik bileşendir. Bir milin yapısal dayanımında, mil üzerindeki çentik etkisi dikkatlice incelenmelidir. Çentik etkisi, büyük ölçüde mil-göbek bağlantısının tipine ve tasarımına bağlıdır. Mil üzerinde uygulanan çentik etkisinin büyüklüğü, genellikle bir mil-göbek bağlantısının seçiminde belirleyici özelliktir. Poligon mil-göbek bağlantıları, çentik etkisi göstermedikleri için diğer bağlantılar arasında

1 Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Antalya / Türkiye, kovan@akdeniz.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0599-525X

2 Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Antalya / Türkiye, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0139-442X

ön plana çıkmaktadır. Tüm bu avantajlarına rağmen poligon mil-göbek profillerini tanımlayan uluslararası bir standart bulunmamaktadır. Bu nedenle poligon mil-göbek bağlantılarının hesabında kullanılabilecek sadece Alman standartları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra pek çok Türkçe makine elemanları kaynağında, poligon mil-göbek bağlantılarının hesapları yer almamaktadır. Bu nedenle, mühendislik öğrencileri için bu kitap bölümü hazırlanma gereği duyulmuştur. Bu kitap bölümünde Alman standartlarında yer alan P3G ve P4C poligon profil mil-göbek bağlantıları anlatılmaktadır. Böylece; geometrilerinin tanımlanması, hesaplanarak boyutlandırılmaları, uygun toleransların tanımlanması, imalatları ve kalite kontrollerine yol göstermek amaçlanmıştır. Bölüm sonunda verilen örnek problem ile kitap bölümünde anlatılanların daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Poligon Mil-Göbek Bağlantıları, P3G, P4C

MİL-GÖBEK BAĞLANTILARI

Makine elemanı terimi, açıkça tanımlanmış yapısal bir fonksiyonu yerine getirmek için kullanılan bileşen sınıflarını (örneğin yataklar) genel olarak tanımlamak için kullanılır. Makine elemanlarını oluşturan sınıflar, alt sınıflara ayrılabilir. Alt sınıflar, işlevlerin (örneğin radyal veya eksenel yataklar) ve/veya işlevleri yerine getirmek için kullanılan fiziksel etkilerin (örneğin hidrostatik veya hidrodinamik yatak) eklenmesiyle elde edilir. Bu sınıflandırma içerisinde miller; ortak bir dönme ekseni ile eksenel seri olarak tasarlanmış, toplam eksenel uzunlukları genellikle en büyük çaplarından çok daha büyük, dönen gövdelerden oluşan, döndürme momenti iletmek için kullanılan makine elemanlarıdır. Giriş döndürme momentini ve dolayısıyla dönme hareketini zorunlu olarak iletirler. Göbekler ise, makine elemanlarının (örneğin dişliler) geometrik bölümleridir. Silindirik veya konik olan dönel simetrik gövdelerin iç yüzeyi boş bölümleridir. Göbek, bir milden gelen döndürme momentini, parçası olduğu makine elemanına veya benzer şekilde ters yönde iletmek için kullanılır. Mil-göbek bağlantıları, döndürme momentini bir milden bir göbeğe veya bir göbekten bir mile aktarır. Radyal yönde mil ve göbek arasındaki bağıl hareketleri önlerler. Mil-göbek bağlantısının tasarımına bağlı olarak eksenel bağıl hareketler engellenir veya serbest

bırakılabilir. Eksenel hareket engellenirse, mil-göbek bağlantıları döndürme momentinin yanı sıra eksenel kuvveti de iletebilir.

Mil göbek bağlantısının malzeme/geometrik tasarımına uygun olarak, döndürme momenti ek bileşenler olmadan veya bunların yardımıyla mil ve göbek arasında iletilebilir. İlk durumda, işlevleri yerine getirmek için mil ve göbeğe ek olarak hiçbir bileşen düzenlenmemiş olsa da her iki bağlantı tipi de mil-göbek bağlantıları olarak makine elemanlarında tanımlanır.

Tekerleğin icadı ile birlikte mil-göbek bağlantıları tarihteki en eski makine elemanları arasındadır. Bu nedenle, teknik ilerleme sürecinde, çok fazla sayıda farklı tasarım kullanılmıştır. Bu farklı mil-göbek bağlantılarından belirli bir teknik görev için en uygun olanını seçebilmek için bunların sistematik olarak sınıflandırılması gerekmektedir. Mil-göbek bağlantıları bu amaçla: kuvvet bağı, şekil bağı ve malzeme bağı ile döndürme momenti iletenler olarak üç sınıfı ayrılabilir.

Mil-göbek bağlantılarında, temas eden aktif yüzey çiftleriyle döndürme momenti ve/veya eksenel kuvvetler iletilir. Kuvvet bağı ile birbirine geçen mil-göbek bağlantıları, bu zorlamaları silindirik veya konik çalışma yüzeylerine teğet düzlemlerde etki eden sürtünme kuvvetleri vasıtasıyla iletir. Şekil bağında milden göbeğe veya göbekten mile doğrudan çalışma yüzeyleri yardımıyla iletilir. Kuvvet ve şekil bağları birlikte de kullanılabilir. Malzeme bağı olması durumunda ise mil ve göbek arasında (genellikle ek malzeme aracılığıyla) ayrılmaz bir malzeme bağlantısı kurulur.

Mil-göbek bağlantıları genellikle dinamik olarak zorlanırlar. Dinamik olarak zorlanan tüm makine elemanları gibi yeterli yapısal dayanımı için boyutlandırılmalıdır. Yorulma dayanımı, standartlaştırılmış boyutlara ve tanımlanmış yüzey kalitesine sahip geometrik olarak basit malzeme numuneleri üzerinde deneysel olarak belirlenir. Yapısal dayanım ise herhangi bir geometrik şekle, boyuta ve yüzey kalitesine sahip bileşenin, sınırsız sayıda yük değişikliğine kırılmadan dayanabileceği gerilme değeridir. Bu nedenle, dinamik olarak zorlanan mil-göbek bağlantılarında mil, yapısal dayanıklılık açısından neredeyse her zaman kritik bileşendir. Bir milin yapısal mukavemeti, mil üzerinde her zaman bir çentik etkisi olduğundan, her mil-göbek bağlantısında dikkatlice in-

celenmelidir. Çentik etkisi, büyük ölçüde mil-göbek bağlantısının tasarımına ve bağlantının tipine bağlıdır. Mil üzerinde uygulanan çentik etkisinin boyutu, genellikle bir mil-göbek bağlantısının seçiminde belirleyici özelliktir.

Bir bileşeni tasarlarken, genellikle iki hesaplamanın yapılması gerekir. Tasarım hesabında temel boyutlar; dış yükler, hedef güvenlik değerleri ve malzemenin mukavemet parametreleri kullanılarak belirlenir. Yapısal tasarımdan sonra, belirleyici hasar kriterlerine karşı gerçek emniyet katsayısı hesaplanmalıdır. Bu doğrulama hesaplaması için girdi verileri aynı zamanda tasarım sürecinde kullanılan dış yükler, mukavemet parametreleri ve geometrik boyutlardır.

Makine elemanlarının mekanik olarak yüklenmesiyle ilgili fiziksel süreçler neredeyse her zaman son derece karmaşık ve çok sayıda değişkene bağlıdır. Fiziksel veya ekonomik nedenlerle etkileyen tüm faktörleri bir mukavemet hesaplamasına dahil etmek mümkün değildir. Bu nedenle ilgili karmaşık olaylar, temel değişkenleri dikkate alan ve makul bir matematiksel işleme izin veren fiziksel bir modele kadar takip edilmektedir. Sonuç olarak, mukavemet hesaplamasının değeri, seçilen modelin kalitesine ve girdi verilerinin güvenilirliğine bağlıdır. Sayısal hesaplama teknolojisinin olağanüstü gelişmiş olanakları, son 30 yılda teknolojinin tüm alanlarında mutlak hesaplama modellerine ulaşılmasını sağlamıştır. Böylece mil-göbek bağlantılarındaki gerilmeler hakkındaki bilgi düzeyi de önemli ölçüde gelişmiştir.

Mukavemet hesaplamaları için girdi verilerinin güvenilirliği çok az seviyede tatmin edicidir. Malzemelerin mukavemet özellikleri, laboratuvar testlerinde bile önemli ölçüde değişmektedir. Teknik bileşenler, laboratuvar numunelerinden farklı çevresel koşullara maruzdur. Laboratuvar koşullarında ölçülen mukavemet parametrelerinin geometrik olarak farklı bileşene aktarılması belirsizliklerle doludur. Bir bileşene etki eden dış yükleri yeterli doğrulukla belirlemek genellikle sorunludur. Mil-göbek bağlantısı genellikle bir makinenin birçok bileşeninden yalnızca bir tanesidir. Bağlantının etrafındaki alandan ve tüm makineden çok sayıda statik ve dinamik kuvvet etki edebilir. Bu kuvvetler, bazıları hesaplama ile belirlenemeyen veya yalnızca tam olarak belirlenemeyen (örneğin titreşimler) çok sayıda etkili değişkene bağlı olabilir.

Bazen, yalnızca çalışan parça üzerindeki ölçümlerle belirlenebilirler ve bu nedenle tasarım aşamasında tahmin edilmeleri gerekir.

Modellemenin kalitesi ve giriş verilerinin güvenilirliği, hesap yapan mühendis tarafından belirlenecek hedef emniyet katsayısı ile mukavemet hesabında dikkate alınmalıdır. Belirtilen belirsizliklere ek olarak, arızanın sonuçları (insanlara, çevreye, makineye verilen zarar) ve standartlar, kılavuzlar ve literatür dikkate alınmalıdır.

ŞEKİL BAĞINA SAHİP MİL-GÖBEK BAĞLANTILARI

Şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarında, bir veya daha fazla aktif yüzey çiftinde, iletilecek dış kuvvetleri dengede tutan normal kuvvetler oluşturulur. Aktif yüzey çiftleri her zaman mil eksenini içeren bir düzleme simetrik olarak düzenlenir. İki aktif yüzey çiftinin böyle simetrik bir düzenlemesi, bir şekil bağlantısı ile sonuçlanır. Her bağlantının simetrisi ise çevresel kuvvetlerin her iki yönde iletilmesini sağlar.

Şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarının sistematik bir sınıflandırması, sürtünmeli bağlantıların aksine sadece geometrik özellikler yardımıyla sınıflandırılır. Doğrudan şekil bağı ile döndürme momenti aktarımı durumunda, aktif yüzeyler yalnızca bağlanacak parçalara (mil ve göbek) işlenir. Dolaylı şekil bağı ile döndürme momenti aktarımı durumunda, mil ve göbek ile araya yerleştirilmiş üçüncü bir bağlantı elemanı arasında bir veya daha fazla aktif yüzey oluşturulur.

Kuvvet bağı ile döndürme momenti aktaran mil-göbek bağlantılarının aksine, şekil bağı olanlar yüksüz durumda gerilmesizdir. Bu nedenle (istisna: radyal pimler) esasen yalnızca döndürme momenti aktarabilirler. Eksenel kuvvetler, aktif yüzey çiftleri boyunca (mil ve göbek arasındaki bağlantıya bağlı olarak) hiç iletilmez veya sadece nispeten küçük bir ölçüde sürtünme yoluyla iletilir.

POLİGON MİL-GÖBEK BAĞLANTILARI

Şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarının sınıflandırılmasına göre poligon bağlantılar, doğrudan şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarına aittir. Kamalı ve dişli mil bağlantılarının aksine, poligon bağlantılarında mil veya göbekte çıkıntı yapan aktif yüzey çiftleri yoktur.

Aktif yüzeyler olarak poligon eğrileri kullanılır. Poligon eğriler, Musyl (1955)'e göre, aşağıdaki parametrik denklemler ile elde edilebilir:

$$x = \frac{D}{2}\cos(\varphi) - e.\cos(n.\varphi)\cos(\varphi) - n.e.\sin(n.\varphi).\sin(\varphi)$$

Burada D ortalama çapı ve n "köşe" sayısını gösterir. Bu formüle göre tüm köşe sayıları için poligon mil-göbek bağlantısı tasarlamak ve üretmek mümkün olsa da pratikte sadece üç ve dört köşeli profiller öneme sahiptir. Poligon profilin tamamı bağımsız bir eğri ile elde edilebiliyorsa, uyumlu bir profil mevcuttur. Eğri parçaları yanında, mil ekseni etrafında dairesel bir silindirin bölümlerini de içeriyorsa, bu uyumsuz bir profildir.

Pratikte kullanılan 3 köşeli geometriler DIN 32711'de standartlaştırılmış P3G poligon mil-göbek bağlantılarıdır. Bu poligon profil P3G, uniform bir kalınlıktadır (adındaki G harfi, Almanca Gleichdick). Geometrisi trokoidin özel bir şekline sahip harmonik bir eğridir. Bu geometri çok az çentik etkisi gösterir ve çoğu zaman çentik etkisi olmadan hesaplanır. Diğer şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarına kıyasla daha yüksek döndürme momenti aktarabilir. Bunun yanı sıra döndürme momenti altından mil ve göbeğin kendilerini merkezlemesini de sağlar. Bu poligon profil ve dairesel kesitler tek bir mil üzerinde aynı ayarda işlendiğinde ekonomik olarak üretilebilir. Ancak P3G profilleri, döndürme momenti altında eksenel hareket ettirilebilen bağlantılar için uygun değildir. Eksenel hareket gerektiği durumlar için uygun olan DIN 32712'de standartlaştırılmış P4C poligon mil-göbek bağlantılarıdır. P4C poligon bağlantıları P3G mil-göbek bağlantıları ile benzer karakteristik özelliklere sahiptir. Ancak, P4C poligon profili, bir trokoidin parçalarının yanı sıra bir dairenin yay kesitlerinin birleştirilmesinden oluşur. P4C poligon profil, döndürme momenti altında mil ve göbeğin birbirine göre eksenel yer değiştirmesi durumunda uygun bir bağlantı sağlamaktadır.

GEOMETRİNİN TANIMI

P3G profili (Şekil 1a), sadece poligon eğrisinin denklemi kullanılarak elde edilebilir. Bu eğriyi elde etmek için gerekli parametrik denklem kartezyen koordinatlarda;

$$x(\varphi) = [r_{ort} - e.\cos(3.\varphi)].\cos(\varphi) - 3.e.\sin(3.\varphi).\sin(\varphi)$$

şeklindedir. Aynı eğri kutupsal koordinatlar için aşağıda verilmiştir:

$$r(\varphi) = \sqrt{[r_{ort} - e.\cos(3.\varphi)]^2 + [3.e.\sin(3.\varphi)]^2}$$

Poligon profil P4C (Şekil 1b) ise farklı eğri kısımlarına sahiptir. Dört hafif kavisli bölüm bir trokoidin parçalarıdır. Dört bağlantı eğrisi parçası ise bir dairenin parçalarıdır. Üretim sırasında tercihen tornalama veya silindirik taşlama işlemi kullanılarak oluşturulurlar.

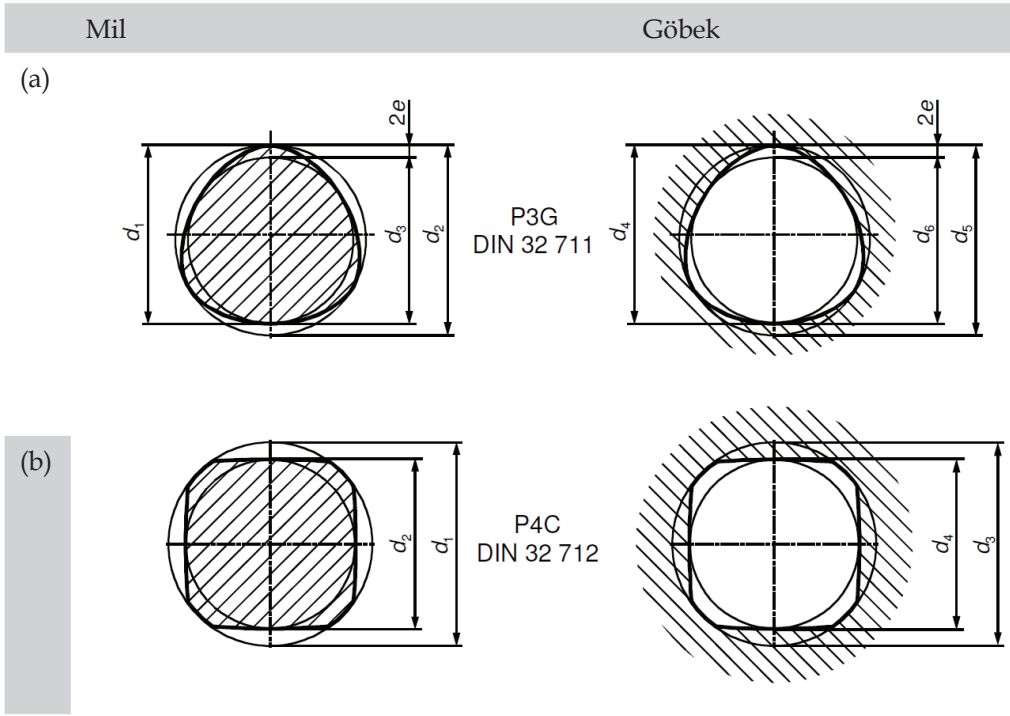
P4C poligon eğrisinin trokoid dallarının parametrik denklemi kartezyen koordinatlarda aşağıda yer almaktadır:

$$x(\varphi) = [r_{ort} - e.\cos(4.\varphi)].\cos(\varphi) - 4.e.\sin(4.\varphi).\sin(\varphi)$$

Aynı eğri kutupsal koordinatlar için aşağıda verilmiştir:

$$r(\varphi) = \sqrt{[r_{ort} - e.\cos(4.\varphi)]^2 + [4.e.\sin(4.\varphi)]^2}$$

Burada r_{ort} trokoidi içten ve dıştan çevreleyen dairelerin yarı çaplarının ortalaması, e ise eksantrikliktir. Parametre açısı φ, 0-360° arasında alındığında her iki profil elde edilebilir.



Şekil 1. Alman Standartlarına Göre Standartlaştırılmış Poligon Profiller

HESAP ve BOYUTLANDIRMA

P3G ve P4C poligon mil-göbek bağlantılarının boyutlandırma ve hesabı diğer şekil bağına sahip mil-göbek bağlantılarına benzer şekilde yapılmalıdır. Bu amaçla mil için burulma ve eğilme gerilmeleri, bağlantının temas yüzeylerindeki yüzey basıncı ve göbek için en küçük cidar kalınlığının hesaplanması önerilmektedir. Burada önerilen hesaplama kuralları hem poligon milin hem de poligon-mil-göbek bağlantılarının boyutlandırılması için geçerlidir. İkinci durumda mil ile göbek arasında boşluk olmadığı kabul edilmektedir.

Formüllerden hesaplanan gerilme değerleri (burulma gerilmesi, eğilme gerilmesi, yüzey basıncı, çekme gerilmesi) güvenlik faktörlerinin eklenmesi ile hesaplanan, müsaade edilen gerilme değerleri ile karşılaştırılmalıdır.

Burulma ve Eğilme Gerilmeleri

Milde meydana gelen gerilmeler, temas yüzeyi için hesaplanmaktadır. Burada burulma gerilmesi, M_b burulma momentinin bir sonucu olarak oluşur ve klasik formül yardımıyla belirlenebilir:

$$\tau = \frac{M_b}{W_p}$$

Benzer şekilde eğilme gerilmesi, eğilme momenti M_e sonucunda oluşur ve aşağıdaki klasik formül kullanılarak belirlenir.

$$\sigma_b = \frac{M_e}{W_e}$$

Her iki profil şekli için bu formüllerde, ihtiyaç duyulan mukavemet momentleri kesitin poligon şeklinden dolayı temel yöntemler ile hesaplanması gerekir. Bu hesaba göre çıkarılmış, P3G poligon bağlantısının polar mukavemet momenti;

$$W_p = \frac{d_1 + 4e}{d_1 + 8e} . \frac{A^4}{20. I_p . d_1}$$

formülüyle elde edilir. P3G poligon bağlantısının eksenel mukavemet momenti içinse

$$W_e = \frac{1}{d_2} . \left(\frac{\pi . d_1^4}{32} - \frac{3\pi . d_1^2 . e^2}{4} - 6\pi . e^4 \right)$$

formülü kullanılır. Yukarıdaki formüller için ihtiyaç duyulan, P3G poligon profilinin kesiti alanı:

$$A = \frac{\pi . d_1^2}{4} - 4\pi . e^2$$

ve polar atalet momenti:

$$I_p = \frac{\pi . d_1^4}{32} - \frac{3\pi . d_1^2 . e^2}{4} - 6\pi . e^4$$

yukarıdaki formüller ile elde edilebilir.

P4C profili için ihtiyaç duyulan polar ve eksenel mukavemet momentleri yaklaşık olarak aşağıdaki formüller ile hesaplanabilir:

$$W_p \approx 0{,}2 . d_2^3$$

$$W_e \approx 0{,}15 . d_2^3$$

Yüzey Basıncı

P3G profilinde döndürme momenti sonucunda oluşan yüzey basıncı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenebilir.

$$p \approx \frac{M_b}{l . (0{,}75\pi . d_1 . \mathrm{e} + d_1^2/20)}$$

Benzer şekilde P4C profilinde döndürme momenti sonucunda oluşan yüzey basıncı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenebilir. Her iki basınç hesabında da eğilme yükünün etkisi ile oluşabilecek yüzey basıncının dikkate alınmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

$$p \approx \frac{M_b}{l . (\pi . (d_2 + 2e) . ((d_1 - d_4)/4) + (d_2 + 2e)^2/20)}$$

Hesaplanan yüzey basınçları, bağlantının boyutlandırılması için milin veya göbeğin müsaade edilen yüzey basıncı ile karşılaştırılmalıdır. Müsaade edilen yüzey basıncı (p_{em}) değeri ü

$$p \leq p_{em} \approx 0{,}9 . R_{p0{,}2}$$

denklemi ile elde edilebilir.

En Küçük Göbek Cidar Kalınlığı

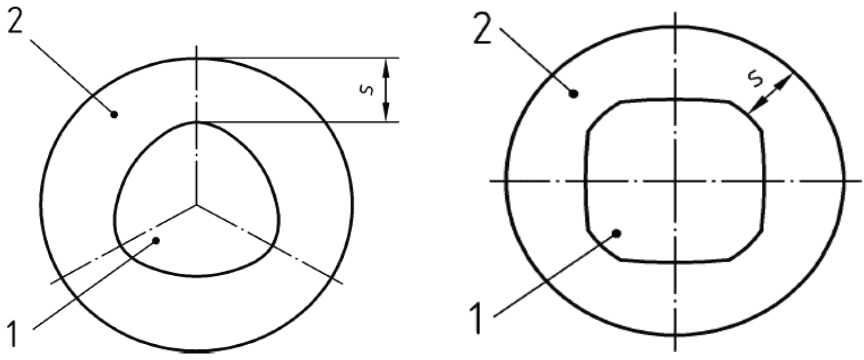
Döndürme momentinin neden olduğu gerilmeler, göbeğin genişlemesine yol açar. Eğer hesapta dikkate alınmadıysa ve cidar kalınlığı yetersizse göbeğin hasar görmesine neden olabilir. P3G profili (Şekil 2a) ve P4C profili için (Şekil 2b) en küçük göbek cidar kalınlıkları görülmektedir.P3G poligon profili için aşağıdaki formüller kullanılarak, döndürme momenti ve göbeğin müsaade edilen çekme gerilmesine bağlı yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$d_4 \leq 35mm; s \approx 1{,}44. \sqrt{\frac{M_b}{\sigma_{em}.l}}$$

P4C poligon profilinde aynı hesaplamalar için aşağıdaki formüller kullanılabilir:

$$s \approx 0{,}7. \sqrt{\frac{M_b}{\sigma_{em}.l}}$$

Müsaade edilen gerilme (σ_{em}) değeri genel uygulamalar için, göbek için kullanılan malzemenin $\sigma_{em} = R_{p0,2}$ olarak kullanılabilir.



Şekil 2. P3G (A) Ve P4C (B) Poligon Göbekler İçin En Küçük Göbek Duvar Kalınlığı, S

TOLERANS DEĞERLERİ

P3G poligon profili için boyut toleransları, d_1 (mil) ve d_4 (göbek) çaplarına verilmelidir. Mil için tavsiye edilen toleranslar g6 - k6 iken göbek için tavsiye edilen tolerans H7 olarak verilmektedir.

P4C poligon profil için hem trokoid eğri parçaları d_2 (mil) ve d_3 (göbek) hem de dairesel bölümler d_1 (mil) ve d_4 (göbek) için tolerans tanımlanmalıdır. Trokoid mil parçaları için (d_2) tavsiye edilen tolerans g6 - k6 iken dairesel mil bölümleri için (d_1) tavsiye edilen tolerans e9 olarak verilmektedir. Benzer şekilde, trokoid göbek parçaları için (d_4) tavsiye edilen tolerans H7 iken dairesel göbek bölümleri için (d_3) tavsiye edilen tolerans H11 olarak verilmektedir.

Şekil toleransları için poligon profilin şeklinin eksantriklik (e) tarafından belirlendiği dikkate alınmalıdır. Her iki profile sahip mil için eksantriklik için boyut toleransı js4 olarak tavsiye edilmektedir. Bu değer, şekil toleranslarının eksantriklik ile ilişkilendirilebileceği ve ayrıca ISO temel toleransları kullanılarak belirlenebileceği anlamına gelir. Sonuç olarak eksantriklik toleransı, bu bölge içinde yer alan tüm profil şekillerini ve ayrıca yüzey dalgalanmalarını da içeren bir şekil tolerans bölgesini tanımlamaktadır.

SEMBOLİK GÖSTERİM

Poligon mil-göbek bağlantılarını tanımlayan uluslararası bir standart bulunmamaktadır. Bu nedenle P3G ve P4C profilleri sıklıkla Alman standartlarına göre tanımlanır. Bu standartta 50 mm nominal boyuta kadar tanımlanmış ana profil parametreleri P3G için Tablo 1'de ve P4CG Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. P3G Poligon Mil Standartlarının Ana Profil Parametreleri

Nominal boyut	Mil			Göbek		
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
14	14	14,88	13,12	14	14,88	13,12
16	16	17	15	16	17	15
18	18	19,12	16,88	18	19,12	16,88
20	20	21,26	18,74	20	21,26	18,74
22	22	23,4	20,6	22	23,4	20,6
25	25	26,6	23,4	25	26,6	23,4
28	28	29,8	26,2	28	29,8	26,2
30	30	32	28	30	32	28
32	32	34,24	29,76	32	34,24	29,76
35	35	37,5	32,5	35	37,5	32,5
40	40	42,8	37,2	40	42,8	37,2
45	45	48,2	41,8	45	48,2	41,8
50	50	53,6	46,4	50	53,6	46,4

Bu standarda göre k6 tolerans alanı ile nominal boyutu 20 olan bir poligon P3G mil profilinin tanımı: DIN 32711 - A P3G 20 k6 olarak yapılmaktadır. Benzer şekilde H7 tolerans alanı ile nominal boyutu 20 olan bir P3G poligon göbek profilinin tanımı ise DIN 32711 - B P3G 20 H7 şeklindedir.

Tablo 2. P4C Poligon Mil Standartlarının Ana Profil Parametreleri

Nominal boyut	Mil		Göbek	
	d_1	d_2	d_3	d_4
14	14	11	14	11
16	16	13	16	13
18	18	15	18	15
20	20	17	20	17
22	22	18	22	18
25	25	21	25	21
28	28	24	28	24
30	30	25	30	25
32	32	27	32	27
35	35	30	35	30
40	40	35	40	35
45	45	40	45	40
50	50	43	50	43

Aynı boyut ve tolerans değerlerinde P4C profile sahip mil ve göbeğin kısa gösterimleri ise sırasıyla; DIN 32712 - A P4C 20 k6 ve DIN 32712 - B P4C 20 H7 şeklindedir.

Bu gösterimlerin yanı sıra sembolik grafik gösterimi için tam trokoid şekli yerine dairesel yay bölümlerinden oluşan basitleştirilmiş bir kontur çizgisi yalnızca sembolik grafik gösterimi için yapılabilir Ancak, herhangi bir basitleştirme, örneğin bir CNC makinesinde bir P3G veya P4C iş parçasının üretimi için asla kullanılmamalıdır. Üretim amacıyla mutlaka geometri tanımı altında verilen parametrik denklemler kullanılmalıdır.

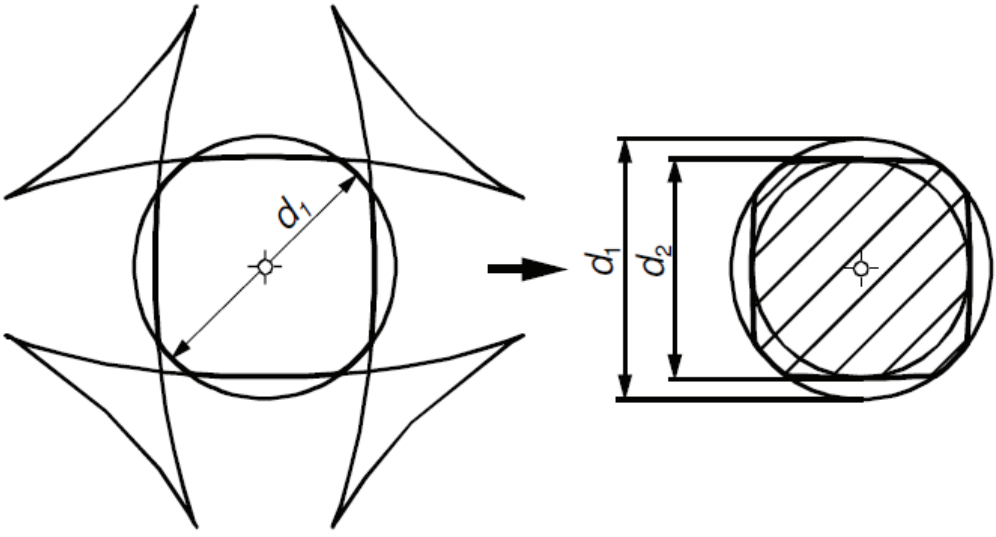
İMALAT

P3G ve P4C poligon profillerini tanımlayan ilk standartlar 1979 yılında Alman standardı olarak yayınlanmıştır. Bu standartların oluşturul-

ması için başlangıç noktası ise bir Alman üreticinin o tarihlerde piyasada bulunan ve mekanik olarak kontrol edilen çokgen taşlama makinesidir. Güncellenen standartlarda verilen denklemler, kinematik olarak kontrol edilen aynı poligon taşlama makinesi ile oluşturulan enine kesitin profil şeklini yansıtmaya ve böylece tam uyumluluk sağlamaya devam etmektedir.

Ancak günümüzde sayısal kontrollü sistemler tornalama, frezeleme, taşlama gibi her çeşit talaşlı imalat tezgahına uygulanmaktadır. Poligon milin üretimi için bu tür sayısal kontrollü sistemler uygundur. Bunların dışında broşlama ve elektroerozyon kesme gibi işlemler de göbek profili için kullanılabilir.

Burada P4C profil mil imalatında dikkat edilmesi gereken bir durum bulunmaktadır. Şekil 3, geometri tanımı altında verilen parametrik denklemlere göre bir P4C milinin üretimi için takım ve iş parçası arasındaki bağıl hareketi göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, takım ve iş parçası arasındaki temas, trokoid bağlantılarda (köşeler) kesilir. Bu nedenle bu bölgeler, tercihen trokoid eğriler oluşturulmadan önce tornalama veya silindirik taşlama işlemi ile oluşturulmalıdır.



Şekil 3. P4C Profil Mil İmalatında Takım Ve İş Parçası Arasındaki Bağıl Hareket

KALİTE KONTROL

Standart iki noktalı veya iki kenarlı ölçüm cihazları, P3G ve P4C millerinin çaplarını kontrol etmek için uygundur. Eksantriklik kontrolü tercihen uzunluk probları olan kadranlı göstergeler ile dönen bir iş parçası ile üzerinden ölçüm ile gerçekleştirilmelidir.

P3G göbekleri kontrol etmek için üç noktalı iç ölçüm cihazları (örneğin üç nokta temaslı delik mikrometresi) kullanılabilir. Şekildeki, özellikle trokoid kenarlardaki sapmaların kontrolü, bir kam şekli ölçüm cihazında veya bir koordinat ölçüm cihazında profillerin noktadan noktaya taranmasını gerektirmektedir. Elde edilen tarama konturunun geometri bölümünde verilen denklemler ile karşılaştırılması esastır.

HESAPLAMA ÖRNEĞİ

Yukarıda sembolik gösterimde verilen DIN 32711 - A P3G 20 k6 ve DIN 32712 - A P4C 20 k6 milleri ile l=20 mm genişliğindeki göbeğe M_b=50 Nm döndürme momenti aktarılmaktadır. Mildeki burulma gerilmesini, poligon bağlantısındaki yüzey basıncını ve göbeğin en küçük cidar kalınlığını hesaplayınız. Göbek için σ_{em}=250 N/mm^2 olarak verilmektedir.

P3G için; Tablo 1'den d_1=20 mm ve d_3=18,74 mm belirlenir, e=(20-18,74)/2= 0,63 mm olarak

$$A = \frac{\pi . d_1^2}{4} - 4\pi . e^2 = \frac{\pi . 20^2}{4} - 4\pi . 0{,}63^2 = 309{,}17\ mm^2$$

$$I_p = \frac{\pi . d_1^4}{32} - \frac{3\pi . d_1^2 . e^2}{4} - 6\pi . e^4 = \frac{\pi . 20^4}{32} - \frac{3\pi . 20^2 . 0{,}63^2}{4} - 6\pi . 0{,}63^4 = 15330\ mm^4$$

$$W_p = \frac{d_1 + 4e}{d_1 + 8e} . \frac{A^4}{20 . I_p . d_1} = \frac{20 + 4.0{,}63}{20 + 8.0{,}63} . \frac{309{,}17^4}{20.15330.20} = 1340\ mm^3$$

$$\tau = \frac{M_b}{W_p} = \frac{50.1000}{1340} = 37{,}31\ N/mm^2$$

Yüzey basıncı:

$$p \approx \frac{M_t}{l.(0{,}75\pi.d_1.\mathrm{e} + d_1^2/20)} = \frac{50.1000}{20.(0{,}75\pi.20.0{,}63 + 20^2/20)} = 50{,}31\ N/mm^2$$

$$d_4 \leq 35mm; s \approx 1{,}44.\sqrt{\frac{M_b}{\sigma_{em}.l}} = 1{,}44.\sqrt{\frac{50.1000}{250.20}} = 4{,}55\ mm$$

P4C için; Tablo 1'den d_1=20 mm, d_2=d_4=17 mm olarak belirlenir ve e=20-17=3 mm olarak hesaplanır.

Polar mukavemet momenti:

$$W_p \approx 0{,}2.d_2^3 = 0{,}2.17^3 = 982{,}6\ mm^3$$

Burulma gerilmesi:

$$\tau = \frac{M_b}{W_p} = \frac{50.1000}{982{,}6} = 50{,}88\ N/mm^2$$

Yüzey basıncı:

$$p \approx \frac{M_b}{l.(\pi.(d_2 + 2e).((d_1 - d_4)/4) + (d_2 + 2e)^2/20)}$$

$$= \frac{M_b}{l.\left(\pi.(17 + 2.3).\left(\frac{20-17}{4}\right) + (17 + 2.3)^2/20\right)} = 31{,}00\ N/mm^2$$

$$s \approx 0{,}7.\sqrt{\frac{M_b}{\sigma_{em}.l}} = 0{,}7.\sqrt{\frac{50.1000}{250.20}} = 2{,}21\ mm$$

KAYNAKÇA

DIN 32711-1:2008, Polygonprofil P3G - Teil 1: Begriffe und Definitionen.

DIN 32711-2:2008, Polygonprofil P3G - Teil 2: Berec.hnung und Dimensionierung

DIN 32712-1:2009-03, Polygonprofil P4C - Teil 1: Begriffe und Definitionen

DIN 32712-2:2009-03, Polygonprofil P4C -Teil 2: Berechnung und Dimensionierung

Frank A., Pflanzl M.: Die Polygon-Verbindungen P3G und P4C - Geometrische Grundlagen, Funktionsverhalten und Fertigung, VDI Berichte 1384 Welle-Nabe-Verbindungen, S. 105-120

Frank A., Trantin H., Pflanzl M.: Die „Polygon – Normen" DIN 32711 und DIN 32712 – „Upgrading" oder Neu¬normung, VDI Berichte 1790 Welle-Nabe-Verbindungen, S 77–89

Göttlicher, Ch.: Entwicklung einer verbesserten Festigkeitsberechnung für P3G-Polygon-Welle-Nabe-Verbin-dungen bei Torsion und kombinierter Biege und Torsionsbeanspruchung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1994.

Kollmann F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen - Gestaltung, Auslegung, Auswahl, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984.

Leidich, E.: FVA-Forschungsreport 2005, Forschungsvorhaben Nr. 477 „Vergleichende Betrachtung der Fertigungstechnologien für P3G-WNV hinsichtlich Fertigungskosten (-zeiten) und Toleranzen0147" FVA-Heft Nr. 801, 2006.

Mechnik, R.-P.: Festigkeitsberechnung von genormten und optimierten Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen unter reiner Torsion. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1988.

Musyl, R.: Die kinematische Entwicklung der Polygonkurve aus dem K-Profil. Maschinenbau und Wärmewirtschaft. 10 (1955) 33-36.

Niemann G., Winter H., Höhn B.R., Stahl K.: Maschinenelemente 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2019.

Reinholz, R.: Tragfähigkeit von P3G-Welle-Nabe-Verbindungen bei Dauerschwingbeanspruchung. Dissertation, TU Berlin, 1994.

Winterfeld, J.: Einflüsse der Reibdauerbeanspruchung auf die Tragfähigkeit von P4C-Welle-Nabe-Verbin-dungen. Dissertation, TU Berlin, 2001.

Wittel H., Jannasch D., Spura C.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2019.

Ziaei, M.: Analytische Untersuchung unrunder Profilformen und numerische Optimierung genormter Polygonprofile für Welle-Nabe-Verbindungen, Habilitationsschrift, Technische Universität Chemnitz, 2002.

Ziaei, M.: Untersuchungen der Spannungen und Verschiebungen in P4C-Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen mittels der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen 1997.

BAZI POLİMERLERİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ TAHMİNİ ANALİZİ

Yusuf ŞAHİN[1], Senai YALÇINKAYA[2]

Öz: Polimerler farklı yerlerde uygulama alanı bulabilmektedir. Bunların polietilen olup politetra fluorethylene (PTFE) Polyamids (PA) polyester (PET) Polipropilene (PP) polivinil klorur (PVC) Fonelik ve Epoksi gibi çeşitleri bulunmaktadır Bu çalışmada; PTFE, Kestamid (KS) ve Kestoil (KT) dökümlerin kuru şartlar altında tribolojik davranışları pim-üzeri-disk metodu aracılığı ile incelenmiş ve iki farklı metod yardımı ile tahmini analiz yapılmıştır. Bu malzeme kimyasal etkilere karşı aşırı dirençli, çok düşük sürtünme katsayısına sahip ve sudan etkilenmediği için tercih edilmiştir. Aşınma davranışları üzerine etkili parametreleri belirlemek amacıyla ortogonal tasarım benimsenmiştir. Sonuçlar regresyon analizi (RA) ve yapay sinir ağları (YSA) ile karşılaştırılmıştır. Her iki metod da çekme dayanımı önemli etki gösterirken kayma mesafesi ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat Taguchi yaklaşımı YSA'dan daha iyi sonuç vermiştir çünkü Taguchi ve YSA'dan elde edilen R^2 değeri sırasıyla 0.97 ve 0.92 bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: PTFE, Döküm Polamid, Kestamid, Yük, Çekme Dayanımı, Aşınma

GİRİŞ

Metalik malzemelere göre polimer malzemeler; hafif olması, kolay kalıplanması, işlenmesinin kolay olması, iyi korozyon direnci, daha yüksek dayanımı ve rijitlik özelliği nedeniyle ilgi çekmektedir. Bilhassa

1 Nişamtaşı Üniversitesi,Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, yusuf.sahin@nisantasi.edu.tr. Orcıd No: 0000-0001-6495-5701

2 Marmara Universitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul / Türkiye syalcinkaya@marmara.edu.tr Orcıd No: 0000-0001-7076-7766

yağlama gerektirmeyen atmosfere açık yerlerde işlemesi gereken; dişli, kasnak, yatak, burç ve benzeri tribolojik uygulamalarda son yıllarda kullanım alanı hızla artmaktadır (Hutching, 1992).

Polimerlerin yapısı karmaşıktır çünkü bunlar monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleri ile birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makro-molekül meydana getirilir (Şahin,2021). Karbon atomları ile başka elementlerin atomlarından oluşmaktadır. Makro moleküler zincirlerden oluştuğu için bileşim, uzunluk, doğrultu değişirse mekanik, fiziksel ve tribolojik özellikleri de değişmektedir.

Polimerlerin yapılarının amorf olduğu için düzenli yapı elde etmenin güç olduğu, kristallerin rastgele yönlendiğini de hatırlatalım. Dolayısi ile piyasada çok farklı polimer türleri üretilmekte ve farklı yerlerde uygulama alanı bulabilmektedir. Bunların en basit şekli polietilen olup Politetra fluorethylene (PTFE), Polyamids (PA), Polyester (PET), Polipropilene (PP), Polivinil Klorur (PVC), Fonelik ve Epoksi gibi çeşitleri bulunmaktadır.

Burada yapılan deneysel ve teorik çalışmada; Teflon olarak bilinen PTFE cinsi çevresel ve kimyasal etkilere karşı aşırı dirençli ve sudan etkilenmediği için seçilmiştir. Ayrıca, çok düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu yağlanamayan makine parçaları yapmak için uygun bir malzeme olduğunu hatırlatalım. PAs (naylon 6 / naylon 6.6) ailesi ise elastik modülü ve dayanımı yüksek ve 125˚C civarında mekanik özelliğini koruma özelliği nedeniyle seçilmiştir. Bu polimerlerin bazı düşük özellikleri su emme özelliği, kendini çekme, düşük dayanım/rijitliği, dolgu maddesi olarak farklı fiber/parçacıklar aracılığı ile daha stabil kompozit yapı haline dönüştürülmektedir. Buda maliyeti düşürmek için yapılabildiği gibi ısıl dayanma direncini veya aşınma direncini artırabilmek amacı ile de yapılabilir (Şahin 2015, Ünal ve Mimaroğlu 2003).

Polimer tipi, kompozisyonu, kontak geometrisi, test şartları, çizik deneyi ve çevrenin tribolojik davranışları üzerine etkisi çalışmaları yapılmıştır (Şahin ve Mirzayev 2014, Franklin 2001). Feyzullah ve Şafak (2008) POM, PET ve Pas; Şahin ve Patrick (2016),

Apichartpattanasiri ve diğ.(2001),

Rasesh ve Bijwe (2005a) Pas; Viswanath ve Bellow (1995) POM, PET, HDPE, Rajesh and Bijwe(2005b), Stuart and Briscoe (1996),

Xiang ve diğ.(2001) ise farklı polimerlerin çizik testleri üzerine çalışılmışken Breeds ve diğ.(1993)

PA, Zsidai ve diğ.(2002), Benebdallah (2003); POM, PET, PTFE, UHMW-PE, PA6,POMC, PTFE/POM gibi çok değişik polimerler üzerine çok sayıda uygulamalı çalışmışlardır.

Yapılan çalışmalar istatistiki metodların tribolojik davranışları üzerine sadece bir kaç tane sınırlı çalışmaya uygulandığı rapor edilmiştir (Feyzullahoğlu ve Şaffak, (2008), Liu ve diğ.(2001),Basawarajappa ve diğ.(2009), Chou ve diğ.(2005).

Bu çalışmada; döküm tekniği ile üretilmiş olan PTFE, KS ve KT polimerlerin aşınma davranışları disk-üzeri-pim deney cihazı aracılığı ile kuru kayma şartlarında farklı deney değişkenleri ile araştırılmıştır.

Bu araştırmada bazı polimerlerin trobolojik davranışlarının tahmini analizleri yapılırken Taguchi ve YSA metodu seçilmiştir değişken olarak yük, sürtünme mesafesi ve çekme dayanımının etkisi araştırılmıştır.

DENEYSEL MALZEMELER

Termoplastik malzemeler uzun dayanım süreleri ve toklukları gibi mükemmel özellikler gösterirler fakat bunların yatak ve contalama işleminde uygulamları artırmak için tahrik edici güç bunları geri dönüşülebilir olmasıdır. Bu çalışmada 3 çeşit polimer seçilştir. Bunlar; PTFE, döküm naylon (Kestamid-KS) ve Kestoil'dir (KT). Bunların kodu, tipi ve bazı mekanik/fiziksel özellikleri Çizelge 1 de gösterilmiştir. Polimerler; temin edilebilirliği kolaydır. Çalışmalarda uygulama alanı ve yağlama özellikleri nedeniyle polimerler seçilirler. (Şahin 2015, Şahin ve Mirzayev 20014, Ünal ve Mimaroğlu 2003).

Uygulama çalışmasında kullanılan malzemeler; 30 mm çapında ve 200 mm uzunlukta Polikim Ltd.Şt, Istanbul/Türkiye tarafından temin edilmiştir. Test edilen Teflon, Kestamid (KS) ve Kestoil (KT) malzemelerin yoğunlukları sırasıyla; 2.15, 1.15 ve 1.14 g/cm$^{3'}$dir.

Taguchi Tasarımı

Bu deneysel çalışmada, üç tane aşınma proses parametresi belirlenmiştir. Bunlar; uygulanan yük, kayma mesafesi ve çekme dayanımıdır. Bunların kontrol parametreleri, sembolleri ve seviyeleri Çizelge 1'de verilmiştir. Deney planı 3 seviyeli olarak L27 (3^{13}) tasarlanmıştır. Her deney en az 3 kere tekrarlanmıştır daha doğru sonuç almak için.

Çizelge 1. Kontrol Parametreleri, Sembol ve Bunları Seviyeleri

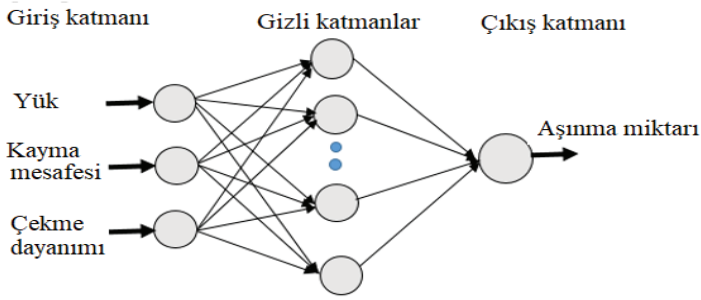
Sembol	Kontrol Parametresi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
L	Yük, (N)	20	40	80
D	Sürtünme mesafesi, (m)	1200	2400	3600
S	Malzemenin çekme dayanımı, (MPa)	23.52	73.50	83.3

AŞINMA TESTİ

Deneyler disk-üzeri-pim sistemi ile polimerler üzerinde farklı şartlar altında gerçekleşmiştir. Karşılık diski AISI 4140 steel, ısıl-işleme tabi tutulmuş olup ortalama 59-63 HRC sertlik elde edilmiştir. Çelik disk boyutu 160 mm çapında ve 12 mm kalınlığında olup taşlanmıştır. Taşlama sonunda yüzey pürüzlülük değerleri ortalama Ra değeri yaklaşık 0.15 μm. Polimer çubuklar silindir şeklinde kesilir torna tezgâhında 6.5 mm çap ve 50 mm boyunda hazırlanmıştır. Polimerler değişik yüklerde sertleşmiş çelik diske karşı ankastre mekanizması yardımı ile test edilir. Aşınma testleri sabit hızda,1 m s^{-1} kuru ortamda oda sıcaklığında gerçekleşir. Test öncesi ve sonrası test edilecek pim asetonla temizlenmeli, kurtulmalı ve elektronik terazide tartılmalıdır. Her test, yeni bir dairede/ taze bir yüzeyle gerçekleşmelidir. Test sonrası ağırlık ölçülür kütle kaybı sonrada yoğunluk ölçülerek hacimsel aşınma miktarları bulunmuştur.

Yapay Sinir Ağları (YSA)

YSA algoritmayı öğrenme yoluyla ağırlıkları azaltarak ve aktivizyon fonksiyounu ile hatayı azaltarak çalışır. Model geliştirmek için üç tane faktör yük, kayma mesafesi ve çekme dayanımı giriş parametresi olarak alınırken aşınma miktarı çıkış parametresi olarak alınmıştır. Her network bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve gizli katmandan oluşmuştur. Bir YSA mimari yapısı Şekil 1 de gösterilmiştir. YSA; FFBN (4-5-1) aracılığı ile uygulanır. YSA algoritmalarını eğitmek için bir çok aktivizyon fonksiyonları kullanılır.



Şekil 1. YSA Mimari Yapısı

Veriler 0 ile 1 arasında aşağıda verilen (1) nolu denklem ile hesaplanır. Veri iki kısma ayrılır, %70'ı eğitim ve %30'ı testing aşamasından oluşur.

$$N = \frac{\beta_1 - \beta_{min}}{\beta_{max} - \beta_{min}} \qquad (1)$$

Bu formülde; N normalize olmuş datayı, βi ölçülen datayı, βmin *ve* βmak *minimum* ve maksimum değerleri gösterir. Normalizasyon tüm faktörlere eşit olarak uygulanır. Her iki modelin verimliliğini ve performansını bulmak için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir. Nedir bunlar?

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_o - Q_m)^2}} \qquad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_p)^2 \qquad (3)$$

Burada; gözlenen data (*Qo*), tahmini data *(Qp) ve* ortalama data *(Qm)* sırasıyla gösterilmiştir. MSE 0 ile -∞ R^2 -∞ ve 0 arasında değişir. R^2 1'e yaklaşırsa MSE 0'a yaklaşırsa bunun anlamı; yüksek verimlilik ve yüksek performanslı model demektir. Polimerlerin aşınma miktarları ile ilgili deneysel verileri, yazarın daha önceki çalışmasından toplanmıştır (Şahin ve Mirzayev, 2014).

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Taguchi Sonuçları

Bu çalışmada deney planı, farklı polimerlerin hacimsel aşınma miktarı sonuçları kuru kayma şartlarında elde edilen teorik hesaplamalar, ortalama kare hatası (MSE) baz alınarak hesaplanmış olup Çizelge 2 de gösterilmiştir.

Bu tabloda verilen deneyler sabit hızda fakat gösterilen parametreler ile yapılmıştır. Bu tablo hem ölçülen hem de hesaplanmış tahmini sonuçları içermektedir. Ölçülmüş değerler ile gözlenen değerler arasında bazı farkların mevcut olduğu görünmektedir. Bu farkların ise buradaki verilerde daha fazla dalgalanmanın varoluşundan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Ortalama kare hatası (MSE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE)'da hesaplanmış olup sırasıyla 1.857 ve 1.365 değerleri elde edilmiştir. Ancak hâlihazırda gösterildiği gibi R^2 değeri 0.97'nin üzerindedir. Bu durum burada geliştirilen modelin performansının iyi olduğunu göstermektedir. Taguchi metodunda deney planı, farklı polimerlerin kuru kaymada ölçülen ve teorik hesaplanmış aşınma miktarı sonuçları Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Taguchi Metodunda Deney Planı, Farklı Polimerlerin Kuru Kaymada Ölçülen ve Teorik Hesaplanmış Aşınma Miktarı Sonuçları

	Test parametreleri			Sonuçlar		
Deney Sırası	Yük (N), L	Kayma Mesafesi (km), D	Çekme Dayanımı (MPa), TS	Ölçülen Aşınma Miktarı (mm^3/km)	Teorik Aşınma Miktarı (mm^3/km)	Ortalama Kare Hatası (MSE)

1	20	1.2	23.52	8.990	8.424438	0.319860
2	20	1.2	83.30	0.582	-0.039111	3.764033
3	20	1.2	73.50	1.901	0.935673	0.125085
4	20	2.4	23.52	8.875	8.4244380	0.203006
5	20	2.4	83.30	0.073	0.039111	1.373845
6	20	2.4	73.50	1.133	0.935673	0.744205
7	20	3.6	23.52	6.266	8.424438	4.658854
8	20	3.6	83.30	0.048	0.039111	0.017985
9	20	3.6	73.50	0.095	0.935673	0.787964
10	40	1.2	23.52	14.380	15.51974	1.299026
11	40	1.2	83.30	0.340	0.869444	3.124253
12	40	1.2	73.50	2.632	0.631140	0.084181
13	40	2.4	23.52	15.233	15.51974	0.082224
14	40	2.4	83.30	0.036	0.869444	0.472579
15	40	2.4	73.50	0.182	0.631140	0.354192
16	40	3.6	23.52	17.791	15.51974	5.158583
17	40	3.6	83.30	0.242	0.869444	0.423077
18	40	3.6	73.50	0.219	0.631140	0.151430
19	40	1.2	23.52	26.357	28.93181	6.629664
20	80	1.2	83.30	0.507	1.908000	0.269361
21	80	1.2	73.50	1.389	0.756481	1.596384
22	80	2.4	23.52	32.248	28.93181	10.99709
23	80	2.4	83.30	0.095	1.908000	2.380851
24	80	2.4	73.50	0.365	0.756481	0.725019
25	80	3.6	23.52	28.488	28.93181	0.196970
26	80	3.6	83.30	0.507	1.908000	2.604998
27	80	3.6	73.50	0.294	0.756481	1.596384
	Ortalama kare hatası (MSE), %					1.857078

İkinci Dereceden Denklemler

Giriş parametreleri ile çıkış parametreleri arasında ilişkiyi bulmak için çoklu ikinci dereceden bir fonksiyon/regresyon (İDF/MQR) kullanılarak modelleme yapılmıştır. Bu ilişki kodlanmamış birimler kullanılarak aşağıdaki hali almıştır.

Regresyon denklemi, $Wr\left(\frac{mm3}{km}\right) = 9.91 + 0.519 * L -$

$0.482 * TS - 0.000324 * L * L$ (5)

*+0.0045*TS*TS-0.006189*L*TS*

Bu Denklemde;

W_R ortalama spesifik aşınma miktarını (mm^3/km)

L uygulanan yükü (N),

TS çekme dayanımı (MPa) ve

L*L quadratik yükü ve

TS*TS is quadratik çekme dayanımını,

L*TS ise L ile TS'nin etkileşimini göstermektedir.

Denklem (12.5); aşınma miktarının, yük artışı ile arttığını ve çekme dayanımında artışla azaldığını göstermektedir.

Ayrıca, L*TS, L*L ve L*TS etkileşimler ile de azaldığını göstermektedir.

Bu ilişkileri gösteren R^2 katsayısı %97.8 değerini bulmuştur.

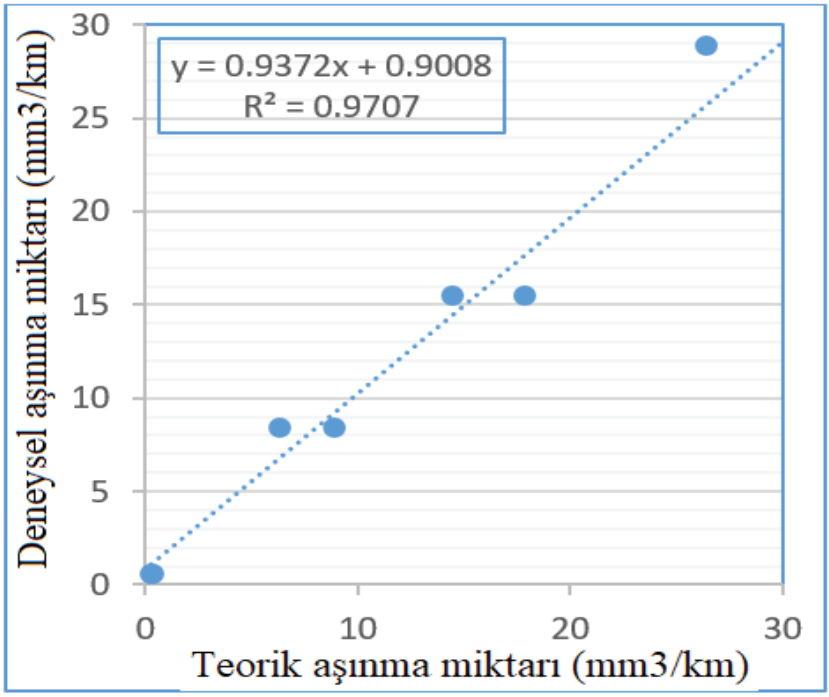
YSA Sonuçları

Çizelge 3 de deney planı hem pratik hem de teorik kuru aşınma deneyi sonuçları tüm deney şartlarında elde edilen MSE ve RMSE değerleri de sunulmuştur. R^2 yaklaşık %95 iken MSE ve RMSE 2.844 ve 1.68 olarak ölçülmüştür. Bunun dışında deneylerin test aşamasında elde edilen ölçülen ve teorik sonuçları da gösterilmiştir.

Seçilen Deney Sonuçları

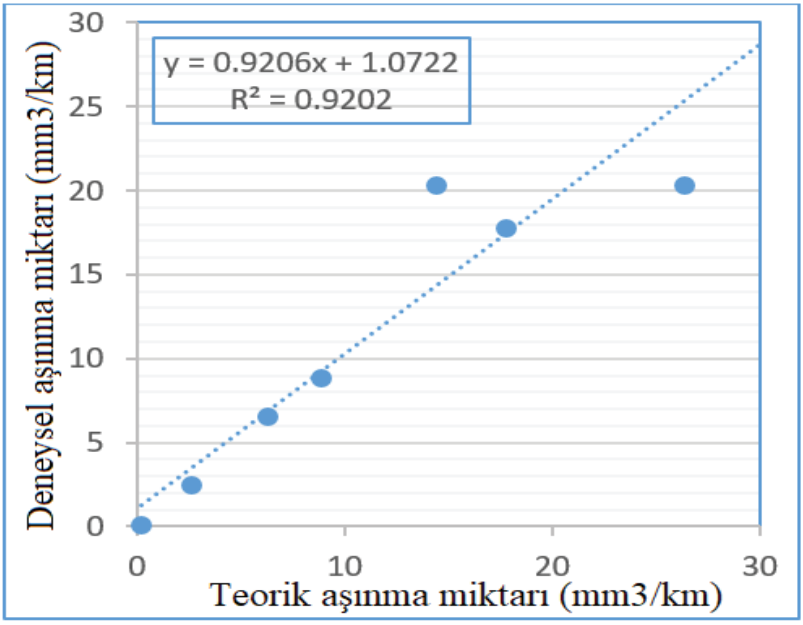
TM ve YSA modelleri için rastgele seçim yapılarak Şekil 2 de gösterildiği gibi tüm test aşaması uygulanmıştır. Burada R^2 ve MSE kriter olarak alınmıştır. Aşınma miktarları 0.00183 mm^3/km'den 1.0 mm^3/km arasında değişmektedir. Data noktaları rasgele seçilmiş olup burada 4,7,10,12,16,18,19 ve 22 numaralı testler baz alınmıştır.

Bu şekil deki test algoritmasında; deneysel ve teorik veriler arasında bazı farklar ortaya çıkmıştır. Buda muhtemelen ölçülen verilerde ki daha fazla dalgalanma olmasından kaynaklı olabilir çünkü bu datalar 0.0183 mm^3/km' den 1.0 mm^3/km'e arasında değiştiği görülmektedir. Buna karşılık gelen normalize olmuş datalar ise 0.182 mm^3/km ile 32.25 mm^3/km arasında olduğu da belirgin tarzda gözlenmektedir.



Şekil 2. Taguchi Metodunda Ölçülen ve Tahmini Edilen Aşınma Miktarları Arasında Karşılaştırma (Seçilmiş Veriler)

Bu ölçümler; öğrenme aşamasında 4,7,10,12, 16, 18,19 ve 22 no'lu deneylerden rastgele seçilmiş olup Şekil 3 da gösterilmiştir. Bu durumda R^2 ve MSE sırasıyla 0.92 ve 2.84 değerini almıştır. Bu sonuçlar deneysel ve teorik hesaplamalar arasında farkın az olduğunu fakat bazı aşırı noktalarda, örneğin, 10 ve 19 nolu deneylerde olduğu gibi fazla olabildiği görülmektedir. Ortalama kare hata oranı sadece 19 nolu deney ihmal edildiği takdirde hata %10 civarına gerilemektedir.



Şekil 3. YSA Metodunda Ölçülen ve Tahmini Edilen Aşınma Miktarları Arasında Karşılaştırma (Seçilmiş Veriler)

Şekil 2 ve 3 de görüldüğü gibi, aşınma miktarının deneysel ve teorik analiz sonuçları TM'de daha hassas netice verdiğini göstermiştir. Bu giriş ve çıkış değişkenleri ve bunların oluşturduğu hatalar ile alakalıdır. Ancak, R^2 değerleri birbirilerine yakın ortaya çıkmıştır (0.92, 0.97). Tahmin edilebilirlik seviyesinin yüksek oluşu RMSE veya MSE'değerlerine elbette bağlıdır.

YSA metodu için, R^2 0.92'e eşit iken Taguchi metodunda bu değer 0.97 değerine çıkmıştır. Diğer taraftan, TM için; MSE 1.86 iken YSA için bu değer 2.84 olarak elde edilmiştir. Fakat, bu değerler her iki metodda bir data ihmal edildiği takdirde değişebilir. YSA metodunda deney planı, farklı polimerlerin kuru kaymada ölçülen ve teorik hesaplanmış aşınma miktarı sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. YSA Metodunda Deney Planı, Farklı Polimerlerin Kuru Kaymada Ölçülen ve Teorik Hesaplanmış Aşınma Miktarı Sonuçları

	TEST PARAMETRELERI			SONUÇLAR		
Deney Sırası	**Yük (N), L**	Kayma Mesafe (km), D	Çekme Dayanımı (MPa), TS	Deneysel Aşınma Miktarı (mm^3/km)	Teorik Aşınma Miktarı (mm^3/km)	**Ortalama Kare Hatası (MSE)**
1	20	1.2	23.52	8.99	8.99094	8.83155E05
2	20	1.2	83.30	0.582	0.652381	0.004953
3	20	1.2	73.50	1.901	3.969605	4.279125
4	20	2.4	23.52	8.875	8.868504	4.21974E05
5	20	2.4	83.30	0.073	0.260569	0.035182
6	20	2.4	73.50	1.133	1.071265	0.003811
7	20	3.6	23.52	6.266	6.541184	0.07572
8	20	3.6	83.30	0.048	0.309235	0.068243
9	20	3.6	73.50	0.095	0.14004	0.002028
10	40	1.2	23.52	14.38	20.38324	36.03893
11	40	1.2	83.30	0.34	0.363868	0.000569
12	40	1.2	73.50	2.632	2.501656	0.016989
13	40	2.4	23.52	15.233	15.23039	6.78998E05
14	40	2.4	83.30	0.036	0.000	0.00129
15	40	2.4	73.50	0.182	0.313207	0.017215

16	40	3.6	23.52	17.791	17.76221	0.000829
17	40	3.6	83.30	0.242	0.155149	0.0075430
18	40	3.6	73.50	0.219	0.096372	0.015037
19	40	1.2	23.52	26.357	20.36002	35.96372
20	80	1.2	83.30	0.507	0.502774	1.78597E-05
21	80	1.2	73.50	1.389	1.832027	0.196273
22	80	2.4	23.52	32.248	32.19963	0.002337
23	80	2.4	83.30	0.095	0.212654	0.013843
24	80	2.4	73.50	0.365	0.185831	0.032101
25	80	3.6	23.52	28.488	28.47918	7.77067E-05
26	80	3.6	83.30	0.507	0.502774	1.78597E-05
27	80	3.6	73.50	0.294	0.337702	0.001909
	Ortalama kare hatası, (MSE) %					2.843623

Özet olarak, polimerlerin tribolojik özellikleri farklı kayma şartlarında TM ve YSA metodu ile araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Polimerlerin hacimsel aşınma miktarları sadece mikro yapı, sertlik, yük, kayma mesafesi değil çekme dayanımı ve uygulanan metoda da bağlı olduğunu göstermiştir çünkü R^2 ve RMSE' kriterine göre giriş/çıkış değişkenleri arasında doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu için TM daha hassas sonuç vermiştir.

SONUÇ

Döküm tekniği ile üretilen PTFE, KS ve KT polimerler kuru kayma şartlarında aşınma davranışı üzerine Taguchi ve YSA metodu aracılığı ile yük, sürtünme mesafesi ve çekme dayanımının etkisi araştırılmıştır.

Deneysel ve Teorik Elde Edilen Sonuçlar Aşağıda Sunulmuştur

1. Sertleşmiş çeliğe karşı farklı polimerler kuru ortamda teste tabi tutulmuş olup hacimsel aşınma miktarı yük ile artmışken çekme dayanımı artışı ile azalmış fakat kayma mesafesi ihmal edilmiştir.

2. Aşınma davranışı üzerine çekme dayanımının daha etkili olduğu, bunu yükün takip ettiğini göstermiştir.

3. Uygulanan metotlar arasında, TM yaklaşımı; R^2, RMSE kriteri baz alındığında daha iyi netice vermiştir. YSA için (R^2=0.92) iken MQR (R^2=0.97). Bunun dışında, bir kaç aşırı nokta dışında YSA metodunda daha az dalgalanma mevcutken TM'de MSE 1.86 iken YSA'da bu değer 2.84 'dir. Netice olarak her iki metodda; herhangi bir malzemenin aşınma davranışının tahmini analizini yapmak amacıyla etkili şekilde kullanılabilir çünkü zaman ve maliyet israfı daha aza indirilebilmektedir.

KAYNAKÇA

Apichartpattanasiri, S.; Hay, J.N.; Kukureka, S.N.; 2001. A study of the tribological behaviour of polyamide 66 with varying injection-moulding parameters, Wear 251:1557–1566.

Basavarajappa, S.; Arun, K.V.; Davim, J. P.; 2009. Effect of filler materials on dry sliding wear behavior of polymer matrix composites – A Taguchi Approach, J. Miner. Mater. Character. Eng. 8:379-391. https//doi.org/10.4236/jmmce.2009.85034 .

Benebdallah, H.; 2003.Friction and wear of blended polyoxymethylene sliding against coated steel plates, Wear 254:1239–46. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00041-3

Breeds A.R.; Kukureka S.N.; Mao K.; Walton D.; Hooke C.J., 1993. Wear behaviour of acetal gear pairs, Wear 166:85–91. https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90282-Q

Cho, M.H.; Bahadur ,S.; Pogosian, A.K.; 2005. Friction and wear studies using Taguchi method on polyphenylenesulfide filled with a complex mixture of MoS2, Al2O3 and other compounds, Wear 258:1825–1835. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.017.

Ducret, S.; Pailler Mattei, C.; Jardret, V.; Vargiolu, R.; Zahouani, H.;2002. Friction characterisation of polymers abrasion (UHMWPE) during scratch tests: single and multi asperity contact, Wear 255:1093–1100. https//doi.org/:10.1016/S0043-1648(03)00242-4.

Feyzullahoglu, E.; Saffak, Z.;2008. The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions, Materials and Design 29:205–211. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.012.

Franklin, S.E.;2001.Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions, Wear 251:1591–1598. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00795-5.

Hutchings, I.M.; Tribology; Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press, London, 1992. .

Liu, C.Z.; Ren, L.Q.; Tong,J.; Joyce,T.J.; Green, S.M.; Arnell, R.D.;2001. Statistical wear analysis of PA-6/UHMWPE alloy, UHMWPE and PA-6, Wear, 249:31–36. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00555-X.

Mens, J.W.M.; de Gee, A.W.J.;1991. Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water, Wear 149: 255–268. https://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90378-8.

Unal, H.; Mimaroglu, A.;2003. Influence of test conditions on the tribological properties of polymer, J. Ind. Lubric. Tribol. 55: 178–183. https://doi.org/10.1108/00368790310480362.

Rajesh, J.J.; Bijwe, J.;2005. Dimensional analysis for abrasive wear behaviour of various polyamides, Tribology Letters 18 (3):331-337. https://doi.org/10.1007/s11249-004-2759-2.

Rajesh, J. J.; Bijwe, J.; 2005. Investigations on scratch behaviour of various polyamides, Wear, 259: 661–668. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.018.

Stuart, B.H.; Briscoe, B.J.; 1996.Scratch hardness studies of polyetheretherketone, Polymer 37:3819–3824. https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00212-1.

Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş, Güncellenmiş 4. Baskı Seçkin Yayın ve Dağıtm A.Ş.,Eylül 2021.

Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş, Güncellenmiş 3. Baskı Seçkin Yayın ve Dağıtm A.Ş.,Haziran 2015.

Şahin, Y.; Mirzayev, H.; 2014. Wear behaviour of polymeric materials by Taguchi's method, V.Tammuzs (Ed.), The XVIII International

Conference on Mechanics of Composite Materials, MCM-2014, Institue of Polymer Mechanics, University of Latvia, Riga, Letonya.

Şahin, Y.; Patrick D. B.; 2016. Dry sliding wear behaviour of polyamides by taguchi method, Key Engineering Materials 689: 81-85,2016. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.689.81,

Viswanath, N.; Bellow, D.G.;1995. The development of the non-linear wear equation for adhesive wear mode of POM, PTFE, high-density polyethylene (HDPE), polyvinylchloride (PVC), Wear 42:181–183.

Xiang, C.; Sue, H.J.; Chu, J.; Coleman, B.;2001. Scratch behaviour and material property relationship in polymers, J. Appl. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 39:47–59.https://doi.org/10.1002/1099-0488(20010101)39:1<47::AID-POLB50>3.0.CO;2-2,

Zsidai L.; Patrick, D.B.; Samyn P,; Kalacska G.; Van Peteghem AP.; Van Parrys F.; 2002.The tribological behaviour of engineering plastics during siliding friction investigated with small scale specimens, Wear 253:673–88. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00149-7.

GEMİ DİZEL MOTORLARINDA NO_X EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kubilay BAYRAMOĞLU [1], *Semih YILMAZ* [2]

Öz: Dünyada taşımacılığın büyük bir bölümünün gemiler aracılığı ile yapılması, gemilerde verimli sevk sistemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde kullanılan en verimli sevk sistemlerinin başında içten yanmalı motorlar gelmektedir. Gemi sevk sistemlerinde çoğunlukla ağır devirli iki zamanlı dizel motorlar kullanılmaktadır. Standart kara taşıtlarında kullanılan dizel yakıttan daha düşük kalitede olan ağır yakıtların (HFO) kullanılması sonucu atmosfere salınan NO_X ve SO_X emisyonları çevresel kirliliklere neden olmaktadır. Gemilerden kaynaklı bu emisyonların azaltılması amacıyla Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) birtakım düzenlemeler getirmiştir. NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla IMO'ya taraf ülkeler tarafından kabul edilen Deniz Kirliliğini Önleme (MARPOL) sözleşmesi ile gemi kaynaklı NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla Tier I, Tier II ve Tier III düzenlemeleri yürürlüğe girmiştir. Bu çalışmada NO_X emisyon mekanizmaları ve NO_X emisyonlarının azaltılmasında kullanılan teknikler incelenmiştir. İncelenen teknikler dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar ve özellikleri, motor yanma parametreleri ve egzoz gazlarından kimyasal yöntemler ile NO_X emisyonlarının azaltılması olarak sınıflandırılmıştır. Her bir teknik alt detaylara ayrılmış ve bu tekniklerin motor performansı ve NO_X emisyonlarına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Gemilerde yenilenebilir alternatif yakıtların NO_X emisyonlarını tamamen ortadan kaldırmasına rağmen, gemilerin yüksek güç gereksinimleri fosil kaynaklı yakıtların en azından yakın gelecekte kullanılacağını göstermektedir. Dolayısıyla NO_X azaltma tekniklerinin

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, İzmir / Türkiye, kubilay.bayramoglu@deu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-5838-6132

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, İzmir / Türkiye, semih.yilmaz@deu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0791-4476

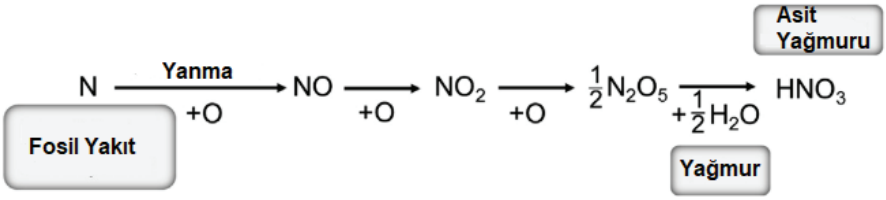
motor performansını en az oranda etkileyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. İncelenen teknikler içerisinde en kullanılabilir teknik SCR sistemleri olarak belirlenmiştir. SCR sistemler motor performansına en az etki eden, egzoz sisteminde kimyasal yollarla NO_X emisyonlarını azaltan bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. SCR sisteminin gemi dizel motorlarda kullanımının en büyük dezavantajı makine dairesi yerleşimidir. Dizel motorlarda NO_X emisyonlarının oluşumunu etkileyen en önemli parametre yanma odası sıcaklığıdır. Yanma odası sıcaklığının azaltılması NO_X emisyonlarının da azalmasını beraberinde getirmektedir. Yanma parametrelerinin değiştirilmesi ile yanma odası sıcaklığı değişmekte buna bağlı olarak da NO_X emisyonları kontrol altına alınabilmektedir. Çalışma NO_X emisyonlarının gemi dizel motorlarında oluşum ve kontrol mekanizmaları hakkında bilgi vererek en uygun NO_X azaltma tekniğinin seçilmesine olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gemi Dizel Motoru, NO_X Emisyonları, Çevre Kirliliği, Küresel Isınma

GİRİŞ

Uluslararası taşımacılığın %90 fazlası gemiler aracılığı ile yapılmaktadır. Dünya taşımacılığında kullanılan gemilerin sevk sistemleri de dizel motorlar ile tahrik edilmektedir. Uluslararası taşımacılıkta kullanılan gemi dizel motorlarının büyük çoğunluğu orta ya da düşük devirli iki zamanlı gemi dizel motorlarından oluşmaktadır. Ucuz ve yüksek verime sahip ağır dizel yakıt (HFO) iki zamanlı dizel makinelerde kullanımı en muhtemel yakıtlardandır (Nielsen, Haglind ve Larsen, 2014). Gemi dizel motorlarında HFO cinsi fosil yakıtların yanması sonucu oluşan zararlı gazların çevresel etkileri ve yakıt tüketimini en aza indirgemek amacıyla evrensel nitelikte düzenlemeler getirilmektedir (Endresen ve diğerleri, 2003). Gemilerde fosil kaynaklı yakıtların kullanımından kaynaklı NO_X, SO_X, CO_2 ve PM gibi sera gazı ve küresel ısınmaya sebep olan zararlı gazlar oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu oluşan NO_X emisyonları NO ve NO_2 bileşenlerinden oluşmaktadır. Nitrojenin bu oksitlenmesi temel olarak havada bulunan oksijen ile oluşmaktadır. NO_X bileşenleri temel olarak kirli hava ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır (McAllister, Chen ve Fernandez-Pello, 2011). Genel olarak yağmurda CO_2 tamamı emildiğinde pH değeri yaklaşık 5.6'dır. Ancak yağmurun pH değeri 5.6 dan küçük olduğunda bu durum asit yağmu-

ru olarak ifade edilmektedir (Okubo ve Kuwahara, 2020). Şekil 1.1 asit yağmuru oluşum diyagramını göstermektedir. Burada, atmosferde fosil kaynaklı yakıtlarda ya da atmosferde bulunan nitrojen yanma etkisi ile NO, NO_2 ya da N_2O_5 bileşenlerine dönüşmektedir. Bu bileşenler de yağmur suları ile birleşerek asit yağmuru olarak tanımlanan nitrik aside dönüşmektedir.

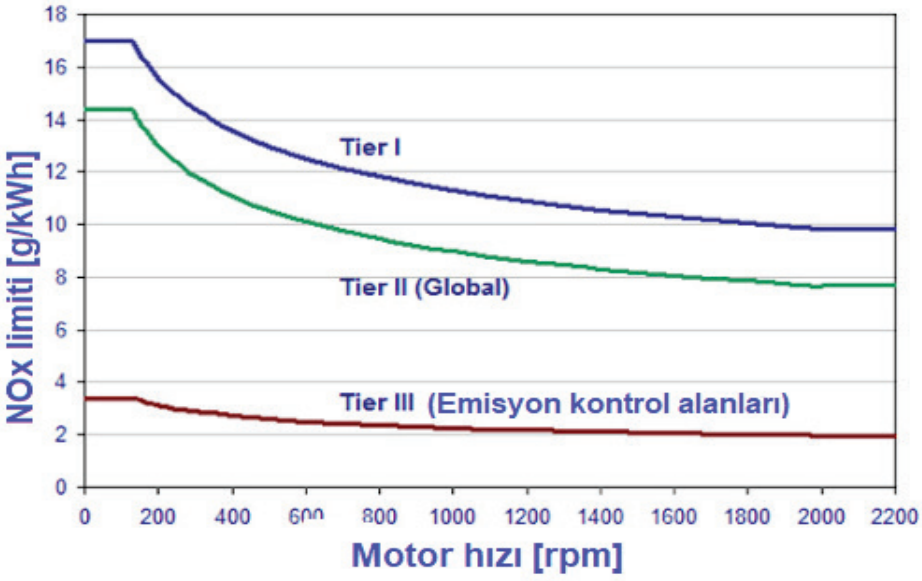


Şekil 1. NO_X Emisyonlarından Kaynaklı Asit Yağmuru Oluşum Mekanizması

Gemilerden kaynaklı NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla çeşitli adımlar atılmıştır. İlk olarak otomobil motorlarında getirilen Euro standartları gibi düzenlemeler zaman içerisinde uluslararası denizcilik örgütü (IMO) tarafından gemi kaynaklı emisyonların azaltılması amacıyla gemi dizel makinelerinde de Tier I, Tier II ve Tier III düzenlemeleri olarak uygulamaya konulmuştur. (Lu, Geng ve Chen, 2020).

Gemilerden kaynaklı NO_X emisyonlarının azaltılması IMO tarafından ilk olarak 1 Ocak 2000 tarihinde Tier I düzenlemesi ile getirilmiştir. Bu düzenleme ile gemi kaynaklı NO_X emisyonlarının motor devir sayısına göre salım miktarları belirtilmiştir. Bu düzenleme ile Uluslararası karasularda çalışan düşük devirli gemi dizel motorlarında NO_X emisyon sınırlaması 16 g/kWh olarak yürürlüğe girmiştir (IMO, 2020a). Bu düzenlemeyi sırasıyla 1 Ocak 2011 tarihinde yürürlüğe giren Tier II ve 1 Ocak 2016 tarihinde yürürlüğe giren Tier III düzenlemeleri takip etmektedir. Şekil 2'de gemi dizel makinelerinden kaynaklanan NO_X emisyonlarının MARPOL Annex VI kapsamındaki değişimi verilmiştir[3] (IMO, 2020b).

3 IMO. (2020b). Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)%E2%80%93-Regulation-13.aspx.



Şekil 2. IMO NO_X Emisyon Sınırları

1 Ocak 2011 tarihinde yürürlüğe giren Tier II düzenlemesi global alanlarda NO_X emisyonlarının sınırlanmasını sağlarken, Tier III düzenlemesi sadece emisyon kontrol alanlarında (ECA) uygulanmaktadır (Chu Van, Ramirez, Rainey, Ristovski ve Brown, 2019). IMO kapsamında emisyon kontrol alanı olarak ifade edilen bölgeler Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Emisyon Kontrol Alanları

Gemilerden kaynaklı NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla getirilen Tier II düzenlemesi maksimum salınabilecek emisyon oranını 14.4 g/kWh ile sınırlamaktadır. Ancak emisyon kontrol alanlarında işletilen gemilerin Tier III NOX emisyon sınırlaması Tier II düzenlemesine oranla yaklaşık %80 azalma ile 3.4 g/kWh olarak düzenlenmiştir (Bayramoğlu, Özmen ve Cerit, 2019). Fosil kaynaklı emisyonların yanma odasında yanması sonucu NO_X oluşumu farklı şekillerde meydana gelmektedir.

Çalışma, NO_X oluşum mekanizmaları ile farklı NO_X indirgeme tekniklerini içermektedir. Çalışmanın amacı özellikle getirilen yeni emisyon kısıtlamaları ile gemi dizel motorlarında uygun NO_X emisyon azaltma tekniklerinin belirlenmesi konusunda literatüre bütüncül şekilde katkı sağlamaktır. Kullanılan her bir teknik, avantaj ve dezavantajları ile birlikte çalışmada sunulmuştur. Ayrıca NO_X oluşum mekanizmalarının ve indirgeme yöntemleri de çalışma kapsamında neden sonuç ilişkisi şeklinde sunulmuştur.

NO_X OLUŞUM MEKANİZMALARI

NO_X emisyonları temel olarak nitrit oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO_2) bileşenlerinden oluşmaktadır. Şekil 1'de de ifade edildiği üzere NO yanma işlemi sonucu oluşur ve oluşan NO bileşenlerinin bir kısmı sıcaklığın düştüğü egzoz bölümünde NO_2 bileşenlerine dönüşmektedir. İçten yanmalı motorlarda oluşan NO_X emisyonlarında NO baskın tür olarak karşımıza çıkmaktadır. Yanma işleminde NO bileşenlerinin üç farklı oluşum türü vardır. Bunlar ısıl NO, ani NO ve yakıt NO'dur (Bayramoğlu, 2018).

Isıl NO

NO oluşumunun temel sebebi ısıl NO'dur. Rus bilim adamı Zeldovich'in 1939 yılında önerdiği ve Zeldovic mekanizması adı verilen NO oluşum mekanizmaları Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3'te sunulmuştur (Özgür, 2015).

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2)$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (3)$$

Kimyasal reaksiyonlarda reaksiyon oranlarının belirlenmesi, yanma işlemi sonucunda oluşan ürünlerin zaman ve miktarlarının belirlenmesinde kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin Denklem 4'te tanımlanan örnek kimyasal reaksiyonu ele alalım (McAllister ve diğerleri, 2011).

$$aA + bB \rightarrow cC + dD \quad (4)$$

Verilen reaksiyonda, *a, b, c* ve *d* herbir bileşen için sitokiyometrik katsayıları ifade etmektedir. Denklem 4'te verilen örnek reaksiyon için reaksiyon oranı Denklem 5 gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{q}_{RxT} = k[A]^a[B]^b \quad (5)$$

Verilen ifadede *k* Arrhenius sabiti olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal reaksiyonlarının hızının velirlenmesinde kullanılan Arrhenius ifades Denklem 6'daki gibi ifade edilebilir.

$$k = A_0 \exp(-\frac{E_a}{R_u T}) \quad (6)$$

Burada, A_0 ön üssel faktör, E_a aktivasyon enerjisini, R_u evrensel gaz sabitini ifade etmektedir. Denklem 6'da verilen Arrhenius ifadesi Denklem 1, 2 ve 3 için Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Isıl No Reaksiyon Katsayıları (McAllister vd, 2011)

Reaksiyon numarası	A_0	E_a
1	$1.8 \cdot 10^{14}$	-38770
2	$1.8 \cdot 10^{10}$	-4680
3	$7.1 \cdot 10^{13}$	-450

Hızlı NO

Azotoksitler, yanma sürecinde alev ile birlikte anında üretilen bileşenlerdir. CH radikalleri ise görece olarak sadece alev cephesinde üretilen bir ara türdür. Yanma işleminde görece sadece alev cephesinde üretilen CH radikalleri ile reaksiyona giren nitrojenler ile NO bileşenleri oluşmaktadır. Denklem 7 ve Denklem 8 hızlı NO oluşum mekanizmalarını ifade etmektedir (Glassman ve Yetter, 2008).

$$CH + N_2 \rightarrow HCN + N \quad (7)$$

$$HCN + N \rightarrow \cdots \rightarrow NO \quad (8)$$

Verilen denklemlerde, N atomları Denklem 7'de verilen reaksiyon ile üretilmektedir. Üretilen bu N atomları iki şekilde NO bileşenlerine dönüşmektedir. Bunlar ya O_2 ile birleşerek ya da HCN radikalleri ile birleşerek NO'ya dönüşüm mekanizmalarıdır. Denklem 7'de verilen ifadenin aktivasyon sıcaklığı yaklaşık 9020 K'dir. Dolayısıyla hızlı NO 1000

K gibi düşük sıcaklıklarda oluşabilmektedir (Glassman ve Yetter, 2008; McAllister ve diğerleri, 2011).

Yakıt NO

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların tamamına yakını fosil kaynaklı yakıtlardır. Fosil kaynaklı yakıtlar içeresinde C, H, O ve N atomları bulunabilmektedir. Yakıt içerisinde bulunan nitrojeninin bir kısmı yanma süresince oluşan yakıtın etkisi ile NO bileşenlerine dönüşmektedir. Yakıt NO oluşum mekanizması Denklem 9 ile ifade edilebilir (Toof, 1986).

$$Yakıt - N \rightarrow \begin{matrix} NO \\ HCN \\ N_2 \end{matrix} \rightarrow NH \tag{9}$$

NO_2 Oluşumu

Yanma sonucu oluşan ürünler ve kimyasal denge oranları, tipik alev sıcaklıklarındaki yanmış gazlarda NO_2/NO oranının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu göstermektedir. Literatürde elde edilen bulgularda NO_X bileşenlerinin yaklaşık %90'ının NO bileşenleri %10'luk kısmı ise diğer bileşenlerden meydana gelmektedir. NO_2 oluşum mekanizmaları Denklem 10 ve Denklem 11 de ifade edilmiştir (Heywood, 1988).

$$NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH \tag{10}$$

$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2 \tag{11}$$

Verilen ifadelerde NO_2 oluşum mekanizmalarının adımları ifade edilmiştir. Denklem 10 sonucu oluşan NO_2 bileşenleri, Denklem 11 ile NO bileşenlerine dönüşmektedir.

N_2O Oluşumu

Yüksek basınç koşulları altında, N_2O oluşumu Denklem 12 ve Denklem 13 de sunulmuştur. Verilen ifadeler 3 bileşenli kombinasyon reaksiyonlarıdır (McAllister ve diğerleri, 2011).

$$N_2 + O + M \rightarrow N_2O + M \quad (12)$$

$$N_2O + O \rightarrow NO + NO \quad (13)$$

Verilen denklemlerde artan basınç, Denklem 12 sonucu oluşan N_2O bileşenlerinin NO'ya dönüşmesine yol açmaktadır. Denklem 13 aktivasyon sıcaklığı yaklaşık 11670 K'dir. Dolayısıyla yaklaşık 1200 K gibi düşük sıcaklıklarda NO oluşabilir.

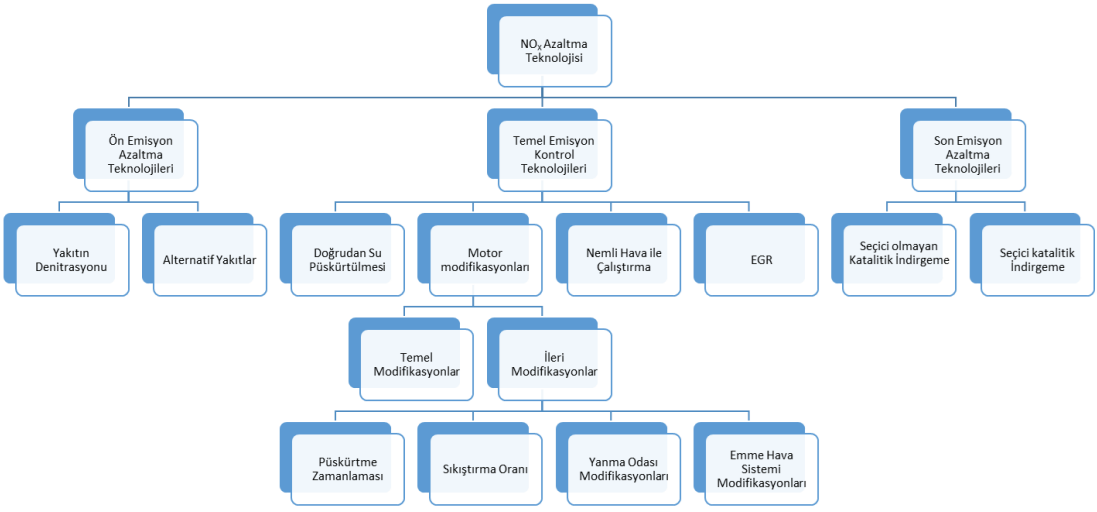
NO_X EMİSYONLARINI AZALTMA TEKNİKLERİ

İçten yanmalı motorlarda NO_X emisyonlarının azaltılması hem motor imalatçıları hem de uluslararası kuruluşlar tarafından önemle takip edilen bir konulardandır. Gemi dizel motorları, hem yük taşımacılığının büyük bir bölümünde aktif rol oynaması hem de kullanılan yakıtların düşük kalitede olmasından dolayı diğer kara taşıtlarına göre daha kirleticidir (Balcombe ve diğerleri, 2019; Lion, Vlaskos ve Taccani, 2020). İki ve dört zamanlı gemi dizel makinelerinden kaynaklı emisyonların azaltılmasında kullanılan teknolojiler Şekil 4'deki gibi ifade edilebilir (Raptotasios, Sakellaridis, Papagiannakis ve Hountalas, 2015).

IMO tarafından NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla üç farklı düzenleme yürürlüğe girmiştir. İlk iki düzenleme uluslararası sularda geçerli iken Tier III düzenlemesi sadece emisyon kontrol alanlarında uygulanmaktadır. Dolayısıyla gemiler, sefer yerlerine göre kendilerine en uygun NO_X azaltma teknolojisini seçmek zorundadır. Tablo 2 NO_X emisyon azaltma tekniklerinin performans değerlerini ifade etmektedir (Yang ve diğerleri, 2012).

Tablo 2. NO_X Azaltma Tekniklerinin Performans Yüzdeleri

NO_X Azaltma Tekniği	NO_X Azaltma Performansı [%]
Alternatif yakıtlar	50-60
Yakıt-su karışımı	50-60
Temel motor modifikasyonları	20
Püskürtme zamanlaması	30
Sıkıştırma oranı modifikasyonları	10-30
Emme havası soğutma	14
Emme havası basınç değişimi	10-40
Doğrudan su püskürtülmesi	40-60
Nemli hava motoru	70-80
Egzoz gaz resirkülasyonu (EGR)	80
Seçici indirgeme sistemi (SCR)	80-99



Şekil 4. NO_X Azaltma Tekniklerinin Şematik Görünümü

Ön Emisyon Azaltma Teknolojileri

NO_X emisyonlarının oluşumunun temel sebebi fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu oluşan sıcaklık etkisidir. Yanma odası sıcaklıklarının düşürülmesi ve NO_X emisyonlarının azaltılması amacıyla ya alternatif yakıtlar kullanılmakta ya da yakıt denitrasyonu sağlanmaktadır (IEA, 2013).

İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanılması hem artan endüstriyelleşme hem de fosil kaynaklı yakıtların azalması ile artmıştır. Bu durum özellikle içten yanmalı motorlarda doğrudan ya da katkı maddesi olarak alkol, doğal gaz, biyodizel ve dimetileter (DME) gibi alternatif yakıtların kullanılmasını beraberinde getirmiştir. Bu yakıtların çoğunlukla kullanılmasının temel sebebi kolay elde edilmesi ve depolanmasıdır (Cheenkachorn, Poompipatpong ve Ho, 2013; Hansen, Zhang ve Lyne, 2005; Shahir, Jawahar ve Suresh, 2015).

Alkoller

İçten yanmalı motorlarda alkolün kullanılması yeni bir yenilik olmayıp, içten yanmalı motorların icadından beri kullanılmaktadır. Alkollerin bu motorlarda kullanılmasının temel sebebi yakıt kıtlığı ve emisyonların azaltılmasıdır. Genel olarak içten yanmalı motorlarda ethanol, methanol ve bütanol yakıt olarak kullanılmaktadır. Alkoller yenilenebilir enerji kaynakları olup, atık ve tarımsal ürünlerden elde edilmektedir (Lion ve diğerleri, 2020).

Metanol, yaygın olarak metil alkol olarak bilinir ve yapısında sadece bir karbon atomu vardır. Genel molekül formülü ise CH_3OH şeklindedir. Metanol 'ün parlama, erime ve kaynama noktası sırasıyla 12 °C, -97.8 °C ve 64.7 °C'dir. Methanol aleve maruz kaldığında alevlenebilme ve patlama özelliğine sahiptir. Metanol, doğada nem çekme özelliğine sahip olup, atmosferden su buharını absorbe edebilir. Absorbe edilen su metanol 'ün yakıt değerini yükseltebilir ve metanol dizel karışımlarında faz ayrılmalarına neden olabilir. Metanol yakıtlar ayrıca dizel yakıtlar ile karıştırıldığında NO_X emisyonlarının azalmasını da beraberinde getirmektedir. NO_X emisyonları, metanolün yanma odası sıcaklığını düşürmesi sonucu daha az oluşmaktadır. Yanma odası sıcaklığının düşürül-

mesi ise yanmanın tamamlanmaması dolayısıyla da CO emisyonlarının artmasını da beraberinde getirmektedir (Deng ve diğerleri, 2021; Shahir ve diğerleri, 2015) .

Etanol; yapısında karbon, hidrojen ve oksijen içeren bir alkoldür. Etanol iki karbon atomuna sahip olup moleküler formülü CH_3CH_2OH şeklindedir. Etanol kauçuk ile reaksiyona girerek yakıt borusunda tıkanmalara neden olabilmektedir. Dolayısıyla yakıt olarak kullanılacak etanol için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Benzinli motorlarda sıkıştırma oranı nedeniyle daha yüksek güç elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yanma odası sıcaklığını düşüren etanol NO_X emisyonlarının azaltılmasını da sağlamaktadır. Dizel yakıtlara oranla tutuşma sıcaklığı daha yüksek olan etanolün depolanması ve nakliyesi daha güvenilirdir. Fermantasyon ve damıtma işlemi ile nişasta bitkilerinden basit şekerlere dönüştürüldükten sonra etanol üretilebilir. Etanol, pirinç samanı, mısır sapları, şeker kamışı küspesi, şalt otu ve kâğıt hamuru gibi çeşitli selülozik hammaddelerden üretilebilir. Atık odundan elde edilen etanol, yaşam döngüsü serasından kaynaklanan CO_2 emisyonunu azaltmak için önemli bir potansiyele de sahiptir. Etanol genellikle dizel yakıtlara katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. (Imran, Varman, Masjuki ve Kalam, 2013; Rosa, Telli, Altafini, Wander ve Oliveira Rocha, 2021; Sandalci, Karagöz, Orak ve Yüksek, 2014).

Dört karbon atomundan oluşan bütanol genel molekül formülü CH_3-$CH_2CH_2CH_2OH$ şeklindedir. Bütanol karbon sayısına göre 2 ve 3 bütanol olmak üzere farklı izomerlere sahip bir yakıt tipidir. Farklı izomerlerin özellikleri farklı olsa da ana uygulamaları aynıdır. Başka bir noktadan bakılacak olursa bütanol izomerlerinin tamamı biokütle yanında fosil yakıtlardan da elde edilmektedir. Bütanol olarak bilinen n-bütanol karbon yapısı, -OH bileşenleri ile düz zincirli bir yapı oluşturması sayesinde sıvı yakıtlarla kolaylıkla karışım halinde kullanılabilmektedir. Bütanol dizel yakıtlar ile katkı maddesi olarak kullanıldığında yanma sürecini iyileştirebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca bir yakıt olarak bütanolun avantajlarına bakıldığında, bunlar kısaca karbon atom sayısının diğer alkollere oranla yüksek olması sonucu ısıl değerinin artmasıdır. İkincil olarak karbon atom sayısının artması alkollerin uçuculuğunu azaltmaktadır. Dolayısıyla bütanol diğer alkoller ile karşılaştırıldığında

düşük uçuculuk özelliğine sahiptir. Son olarak düşük ateşleme problemlerine karşı dayanıklı olması, yüksek viskozite ve yağlama özelliklerine sahip olması da bütanol yakıtı diğer alkollere göre daha güçlü kılmaktadır. Dezavantajlarının başında ise yüksek yakıt tüketimi, motor performansının azalması ve oktan sayısının az olması gelmektedir (Trindade ve Santos, 2017).

Tablo 3. Alkol Yakıtların Özelliklerini İfade Etmektedir (Kumar, Cho, Park ve Moon, 2013)

Özellik	Birim	Metanol	Etanol	Bütanol	Dizel	Benzin
Molekül formülü	-	CH_3OH	C_2H_5OH	C_4H_9OH	C_{12}-C_{25}	C_4 – C_{12}
Yoğunluk	g/ml	0.7866	0.7851	0.8098	0.829	0.74-0.8
Kaynama noktası	°C	65	78	117-118	187-343	27-225
Oktan sayısı	-	104	102	78	-	81-89
Setan sayısı	-	3.8	5-8	25	40-55	91-99
Enerji yoğunluğu	Mj/L	16	19.6	27-29	46	32
LHV	Mj/kg	20.1	26.9	33.1	42.8	43.1
HHV	Mj/kg	22.7	29.7	36.6	44.8	47.3
Donma noktası	°C	-97	-114	-89.3	-37	-40
Parlama noktası	°C	12	13	35	74	-42
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	°C	463	423	397	235	257
Viskozite	10^{-3} Pa·s	0.5445	1.078	2.593	-	0.27

Biyodizeller

Biyodizel yakıtlar, atık bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan, mikrobiyal yağlardan ve alglerden elde edilebilen ve içten yanmalı motorlarda katkı maddesi olarak kullanılabilen yakıtlardır. Biyodizeller yenilenebilir kaynaklardan temel kimyasal işlemler ile üretilebilen temiz, biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan yakıtlardır. Biyodizel üretimi bölgelerin coğrafi şartlarına göre değişmektedir. Örneğin, Malezya ve Endonezya gibi tropikal iklimlerde palm yağı, Hindistan ve Güneydoğu Asya'da jatropha, Amerika Birleşik Devletleri'nde soya fa-

sulyesi yağı, Filipinler'de hindistancevizi yağı ve Avrupa'da kolza tohumu ve ayçiçeği yağları büyük ölçüde biyodizel üretmek için kullanılmaktadır.

Biyodizel üretimi için kullanılan yağlar, yenilebilir yağlar ve fosil yakıtların yerini alabilecek çeşitli yenmeyen yağ kaynaklardır. Yenilebilir olmayan yağların yenilebilir yağlara göre birçok avantajı vardır. Yenmeyen yağlar, onları uygun olmayan hale getiren toksik bileşenlere sahiptir. Biyodizel üretimi için yenmeyen yağların kullanılması, gıda-yakıt sorununu ve diğer sorunları çözmektedir (Gui, Lee ve Bhatia, 2008). Tablo 4 yenmeyen yağların özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4. Yenmeyen Biyodizel Yakıt Özellikleri (Ashraful vd, 2014)

Yakıt Adı	Yoğunluk	Viskozite	Parlama noktası	Setan sayısı	Isıl değer
Karanja (Pongamia)	876-890	4.37-9.60	163-187	52-58	36-38
Polanga	888-910	4-5.34	151-170	57.3	39-41
Mohua	904-916	3.98-5.8	127-129	51-52	39-40
Kauçuk tohumu yağı	860-881	5.81–5.96	130-140	37-49	36.5-41
pamuk yağı	874-911	4-4.9	210-243	41.2-59.5	39.5-40
Jojoba yağı	863-866	19.2-25.4	61-75	63.5	42-48
Tütün yağı	860-888	3.5-4.23	152-165	49-52	38-40
Neem yağı	912-965	20.5-45.5	34	51	33 -40
Keten oil	865-950	16.2-36.6	108	28-35	37-40
Jatropha	864-880	3.7-5.8	163-238	46-55	38-42
Dizel	816-840	2.5-5.7	50-98	40-55	42-45

Biyodizel esas olarak yenilebilir bitkisel yağlardan üretilmiştir. Dünya geneline bakıldığında biyodizel yakıtların %95'inden fazlası, tarım endüstrisinden kolaylıkla temin edilebilen yemeklik yağlardan üretilmektedir. Bununla birlikte, yenilebilir yağlardan sürekli ve büyük ölçekli biyodizel üretimi gıda fiyatlarındaki fazlalık ve gıda maddele-

riyle rekabetten kaynaklı olarak azalmaktadır. Gıda-yakıt arasındaki bu orandan kaynaklı olarak yenilebilir yağların önümüzdeki dönemlerde oranlarının azalacağı, onun yerine yenilemeyen yağların kullanımının artacağı öngörülmektedir (Balat, 2011).

Tablo 5. Yenen Biyodizel Yakıt Özellikleri (Mirhashemi ve Sadrnia, 2020)

Yakıt Adı	Yoğunluk	Viskozite	Parlama noktası	Setan sayısı	Isıl değer
Soya yağı	914	32.6-33.1	254-315	38	37-40
Pirinç yağı	927	38.8	270	-	37.9
Kolza yağı	920	37.3	-	37.6	37.4
Mısır yağı	909.5	34.9	277	37.6	39.5
Ayçiçek yağı	916	33.9	274	37.1	39.6

Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG)

Gemilerde LNG kullanımı son yıllarda giderek önemini arttırmıştır. Doğrudan yakıt olarak kullanılan LNG, temiz yakıt olarak önemini arttırmıştır. LNG yakıtın gemilerde kullanılmasının faydaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (DNV, 2021).

- *Yeni inşa edilen gemilerde EEDI oranını yaklaşık %20 oranında azaltmaktadır.*
- *NO_X emisyonlarının yaklaşık %80 oranında azaltan LNG kimyasal bileşeninde sülfür olmaması nedeniyle SO_X emisyonlarının oluşumuna da neden olmaz.*
- *Modern motor teknolojileri sayesinde sera gazı emisyonlarını yaklaşık olarak %23 oranında azaltmaktadır.*

LNG artık olgun bir alternatif yakıt seçeneği olarak görülüyor. Ancak, belirli gemi tasarımına ve operasyonel gereksinimlere bağlı olarak yapılması gereken birçok teknoloji seçeneği vardır. Rekabetçi bir tasarıma sahip olmak için doğru seçimler belirleyicidir.

LNG yakıtlı gemiler için en büyük zorluklardan biri, yakıt deposu ve ilgili sistemler için bir geminin mevcut alanının en verimli kullanı-

mını bulmaktır. Gemide LNG depolaması, geleneksel akaryakıt depolamasından daha fazla alan gerektirir. Bunun temel nedeni, LNG'nin akaryakıttan daha düşük bir enerji yoğunluğuna sahip olması ve bu nedenle aynı operasyonel aralığı sağlamak için daha büyük bir tank gerektirmesidir. Ayrıca LNG'nin düşük sıcaklığı, tank yalıtımı ve gerekli gaz taşıma sistemleri nedeniyle ek alana ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrojen

Hidrojen kullanımı, hidrojenin yüksek enerji potansiyeli nedeniyle dizel makinelerde motor performansının arttırılmasında önemli rol oynamaktadır (Akal, Öztuna ve Büyükakın, 2020). Ancak hidrojenin yüksek enerji potansiyeline sahip olması, doğrudan yakıt olarak dizel makinelerde kullanılmamasına neden olmaktadır. İçten yanmalı makinelerde hidrojen doğrudan ikinci bir enjektör aracılığı ile dizel yakıta ek olarak ya da emme havasına eklenti olarak kullanılmaktadır (Bayramoğlu ve Yılmaz, 2020).

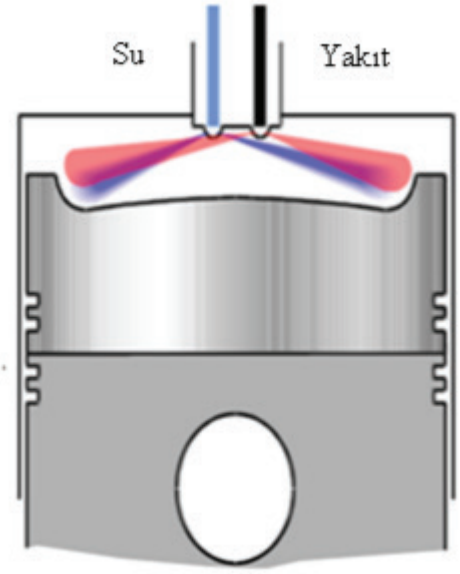
Hidrojenin dizel makinelerinde yakıt olarak kullanılması emisyonların oluşumunu da etkilemektedir. Hidrojen yüksek enerji kapasitesi nedeniyle yanma odası sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Artan yanma odası sıcaklıkları termal NO oluşumunu arttırırken, CO emisyonlarının da azalmasına neden olmaktadır. Ancak biyodizel ya da dizel yakıta eklenti olarak kullanılan hidrojenin NO_X emisyonlarını azalttığı da yapılan araştırmalar sonucu elde edilen bulgulardandır (Tripathi, Sharma, Dhar ve Sadiki, 2019; Yip ve diğerleri, 2019).

Yanma Kontrol Teknolojileri

Dizel motorlarda yanmayı etkileyen parametrelerin optimize edilmesi, yanma sonucu oluşan emisyonların oluşumunu etkilemektedir. Dizel motorlarda NO_X oluşunu etkileyen temel etkenin sıcaklık olduğu yukarıda ifade edilmiştir. Yanma odası sıcaklığının azaltılması NO_X emisyonlarının azalmasını da beraberinde getirmektedir. NO_X emisyonlarının azaltılmasında kullanılan teknikler bu kısımda incelenmiştir.

Doğrudan Su Püskürtülmesi

Yanma işlemlerinde yanma odasına su ya da buhar püskürtülmesi hem NO_X emisyonlarının azaltılmasında hem de motor performansının arttırılmasında kullanılan tekniklerden biridir. Yanma odasına püskürtülen su ya da buharın pompalanmasında harcanan iş havanınkinden daha küçük olduğundan, buhar tarafından üretilen net güç çıkışı, birim kütle akış hızı açısından havanınkinden çok daha yüksektir. Ayrıca, kızgın buharın özgül ısısı, havanın özgül ısısının yaklaşık iki katıdır. Ayrıca buharın entalpisi, belirli bir sıcaklıkta havanın değerinden daha yüksektir. Bu nedenle, buhar püskürtme yöntemi net gücü ve verimliliği artırmanın çok etkili bir yoludur (Kayadelen ve Ust, 2013). Şekil 5 doğrudan su püskürtülmesini göstermektedir (Ayhan, 2009).



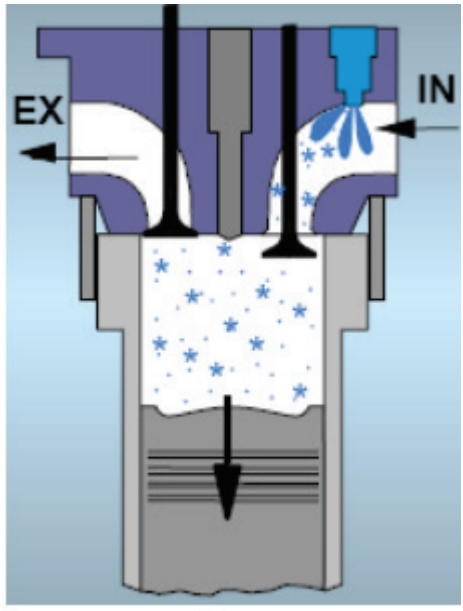
Şekil 5. Doğrudan Su Enjeksiyonu

Nemli Hava

Dizel motorlarda NO_X emisyonlarını azaltmada kullanılan tekniklerden biri de emme havası ile yanma odasına nemli hava gönderilmesidir. Emme havasından gönderilen hava ile dengede olan su, içerisinde

farklı oranlarda çözünmüş O_2 ve N_2 içermektedir. (Pirola ve diğerleri, 2020).

Dizel motorlarda emilen havanın kütlesel olarak %1'i kadar su püskürtüldüğünde, NO_X emisyonlarında %20'lik azalma gösterdiği deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Emme manifolduna gereğinden fazla su göndermenin çeşitli dezavantajları da mevcuttur. Yanma odasına gönderilen fazla suyun buharlaşamaması durumunda silindir yağlamada kullanılan yağın bozulmasına neden olmaktadır. Yağlama yağındaki bozulmalar ise silindirlerde aşınmalara neden olmaktadır. Ayrıca püskürtülen fazla hava emme subabın da korozyon oluşmasını da beraberinde getirmektedir. Şekil 6, emme havasına su enjeksiyonunu göstermektedir (Ayhan, 2009).



Şekil 6. Su enjeksiyonu

Motor Modifikasyonları

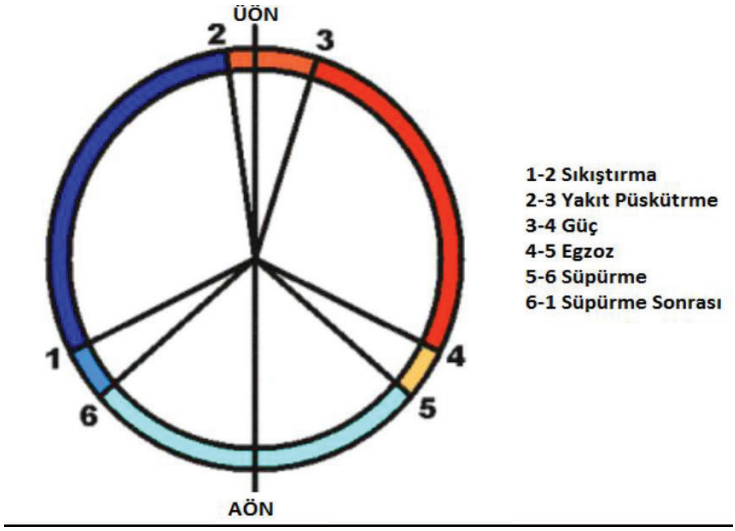
İçten yanmalı makinelerde, yanma performansının ve NO_X emisyonlarının belirlenmesinde yanma odasına alınan havanın miktarının, zamanlamasının, basıncının ve sıcaklığının etkisi vardır. Ayrıca egzoz

gazının bir kısmının tekrar yanma odasına verilmesini sağlayan egzoz gazı resirkülasyon (EGR) sisteminin de incelenmesi gerekmektedir. Bu kısımda yakıt püskürtme zamanlaması, EGR sistemi, sıkıştırma oranı ve yanma odası geometrilerinin motor performansı ve emisyonlara etkisi incelenmiştir.

Püskürtme Zamanlaması

Püskürtme zamanlaması, yanma odası içerisinde yakıt hava karışımının sağlanması amacıyla olabildiğince erken, ancak tutuşma gecikmesi ve yanma koşullarının oluşabilmesi için de üst ölü noktaya en yakın bölgelerde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yanma işlemlerinde yakıtın yanma odasına püskürtülmesi ile yanmanın gerçekleştiği zaman farkına tutuşma gecikmesi denilmektedir. Erken püskürtme zamanlamasında tutuşma gecikmesi yeterli ortam sıcaklığı olmadığından dolayı uzamakta iken, daha geç püskürtme zamanlamasında ise bu zaman azalmaktadır. Dolayısıyla yanma performansı ve elde edilen güç bakımından tutuşma gecikmesinin kısa olması önemli bir etkendir. Diğer bir taraftan, yanma odasında hava yakıt oranının homojen olarak dağılması yanma performansının arttırılmasında önemli bir etken olarak görülmektedir (Dhahad, Fayad, Chaichan, Abdulhady Jaber ve Megaritis, 2021).

Püskürtme zamanlamasının NO_X emisyonları üzerindeki etkisi incelendiğinde, geç püskürtme zamanlamasının NO_X emisyonlarını azalttığı buna karşılık kül ve karbon emisyonlarını arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum erken püskürtme oranlarında hava yakıt karışımının homojenliği ve tutuşma gecikmesi gibi parametrelere bağlıdır. Geç püskürtme oranlarında hava yakıt karışım homojenliğinin tam gerçekleşememesi yanma performansınım azalmasına bu durum da yanma odası sıcaklıklarının düşmesine neden olmaktadır. Düşük yanma odası sıcaklıkları, NO_X emisyonlarının azalmasına neden olan başlıca etmenlerdendir (Liu ve diğerleri, 2021). Genel olarak içten yanmalı motorlarda püskürtme zamanlaması pistonun üst ölü noktaya gelme zamanlamasında 20-25 krank açısı (KA), daha erken olarak yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir (Bayramoğlu ve Nuran, 2020). Şekil 7 dört zamanlı içten yanmalı motorlarda zamanlama ifadelerini göstermektedir.



Şekil 7. İçten Yanmalı Motorlarda Zamanlama Diyagramı

Sıkıştırma Oranı

İçten yanmalı motorlar çalışma prensibi olarak, sıkıştırılan havanın püskürtülen yakıt ile verimli bir şekilde yanması prensibine dayanmaktadır. Dizel motorlarda yanma odasına püskürtülen yakıt, yeteri derecede sıkıştırılmış yakıt ile kendiliğinden tutuşmaktadır. Sıkıştırılan havanın basıncının fazla olması, yanma işleminin daha etkin bir şekilde gerçekleşmesine bağlıdır. Denklem 14 ve Denklem 15 sırasıyla dizel ve benzinli motorlarda sıkıştırma oranının motor verimliliğini üzerindeki etkisini ifade etmektedir (Cengel ve Boles, 2012).

$$\eta_{Dizel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}\left[\frac{r^{k}-1}{k(r-1)}\right] \quad (14)$$

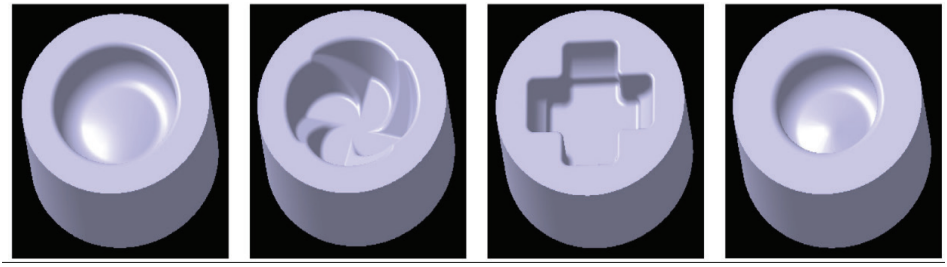
$$\eta_{Benzin} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (15)$$

Verilen ifadeler her iki tip motor içinde sıkıştırma oranı arttıkça yanma verimliliğinin arttığını göstermektedir. Artan yanma verimliliği, yanma odasının sıcaklığını arttırmaktadır. Artan yanma odası sıcaklığı oluşan NO_X emisyonlarının miktarının artmasını da beraberinde getir-

mektedir. İçten yanmalı motorlarda NO_X emisyonlarının azaltılması için sıkıştırma oranı yanma koşullarını sağlayacak en küçük sıkıştırma oranının seçilmesi ile mümkün hale gelmektedir. Ancak sıkıştırma oranının azalması motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Ismet, 2018).

YANMA ODASI MODİFİKASYONLARI

İçten yanmalı motorlarda yanma odası modifikasyonlarının temel nedeni türbülanslı bir akış oluşturmaktır. Türbülanslı akışın temel amacı, yanma odasına püskürtülen yakıtın yanma odasında hava ile homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Bu amaçla çeşitli tiplerde yanma odası geometrisi modellenmektedir (Doppalapudi, Azad ve Khan, 2021). Yanma odasında türbülans oluşumunu sağlamak amacıyla farklı yanma odası geometrileri vardır. Şekil 8 bazı yanma odası geometrilerini göstermektedir (Yan, Wang, Zheng, Qin ve Yao, 2018). Yanma odasındaki akışın türbülanslı olması yanma verimi ve motor performansının arttırılmasında önemli bir etkendir. Ancak homojen hava yakıt karışımı performans artışının yanı sıra yanma odası sıcaklığının da yükselmesini beraberinde getirmektedir. Termal NO oluşumundan dolayı yüksek sıcaklık oluşan NO_X emisyonlarının artmasını sağlamaktadır. Ancak literatürde yapılan bazı çalışmalar modifiye edilmiş yanma odası geometrileri ile performans artışını sağlarken NO_X emisyonlarında da azalmalar olduğunu belirlemişlerdir (Shivashimpi, Alur, Topannavar ve Dodamani, 2018). Dolayısıyla uygun yanma odası modifikasyonlarının motor performansını arttırdığı buna karşılık NO_X emisyonlarında da azalmalar sağlayacağı yapılan çalışmalar ile elde edilmiş bulgulardandır.



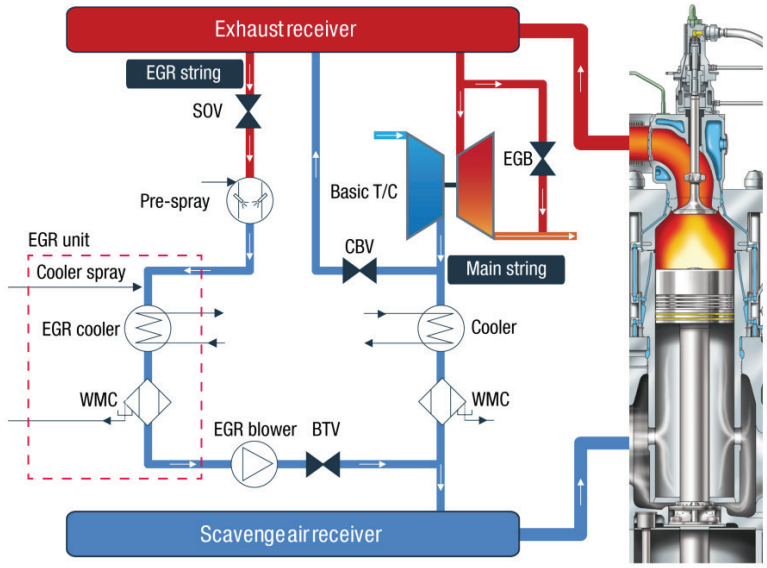
Şekil 8. Yanma Odası Geometrileri

Emme Sistemi Modifikasyonları

İçten yanmalı makinelerde yanma odasına alınan havanın basınç, sıcaklık ve miktarı gibi parametreler motor performansı ve emisyonları etkileyen parametrelerdendir. Emme sıcaklığının artması yanma odası sıcaklığını arttıracağından dolayı yanma performansını arttırırken yanma odasında oluşan NO_X miktarını da arttırmaktadır. Ayrıca aşırı doldurma kullanılarak arttırılan emme basıncının artması tutuşma gecikmesini kısaltacağından dolayı NO_X oluşunu önce arttırmakta, belli bir seviyeden sonra da azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca emme havasından alınan havanın miktarı da performans ve emisyonları etkileyen bir diğer parametredir. Yanma odasına alınan hava, yakıt hava karışım oranının belirlenmesinde önemlidir. Hava yakıt oranı 1'in altında olan karışımlara fakir karışım, 1'in üzerinde olan karışımlara ise zengin karışın denilmektedir. Zengin karışımda yanma odasına püskürtülen yakıtın tamamı yanmakta iken fakir karışımlarda egzozda hidrokarbon oluşumu görülmektedir. Dolayıyla zengin karışımlarda yanma odası sıcaklığının artmasına bağlı olarak NO_X ve motor performansının artmaktadır. NO_X emisyonlarının kontrol edilmesi, emme sistemi parametrelerinin un uygun şekilde seçilmesini gerektirir (Heywood, 1988; McAllister ve diğerleri, 2011).

Egzoz Gaz Resirkülasyon (EGR) Sistemi

Egzoz gazı resirkülasyon (EGR) sistemi, emme havası modifikasyonları ile NO_X emisyonlarının azaltılmasını sağlayan metotlardan biridir. Genel olarak otomotiv motorlarında kullanılan bu yöntem gemi dizel motorlarında Tier II ve Tier III düzenlemesinin sağlanmasında da kullanılmaktadır (Wang, Zhou, Feng ve Zhu, 2017). Gemi dizel makinelerinde EGR teknolojisi ile NO_X emisyonlarının azaltılması, egzoz gazının belirli oranlarda emme havası ile yanma odasına tekrar aktarılması ile sağlanmaktadır. Şekil 9 gemi dizel motorlarında EGR yerleşimini göstermektedir (MAN, 2017a).



Şekil 9. EGR Sistem Yerleşimi

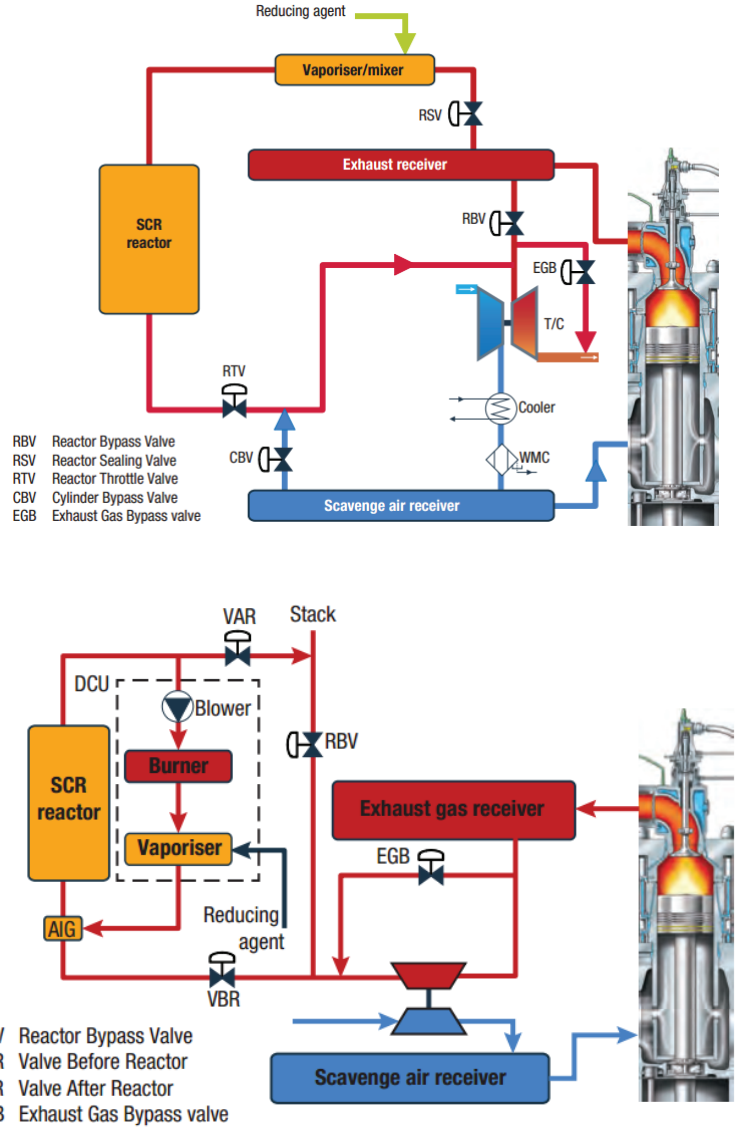
Yanma sonucu oluşan egzoz gazlarının bir kısmı EGR valfi ile tekrardan emme havasına aktarılarak yanma odasına gönderilmektedir. Egzoz hattından alınan gazlar emme havasına verilmeden önce hem soğutulmaktadır hem de temizlenmektedir. Böylece yanma odası sıcaklığı düşülerek NO_X emisyonlarının azalması sağlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda Tier II ve Tier III düzenlemesinin karşılanmasında egzoz hattından emme havasına verilen egzoz oranı yaklaşık %15 ve %35 olarak belirlenmiştir (Wang ve diğerleri, 2017). Artan EGR oranı motor yanma performansının azalmasına bununla birlikte karbon emisyonlarının ise artmasına neden olmaktadır (Woodyard, 2009). EGR sisteminin NO_X emisyonlarını azaltırken, dizel motorlarda yanma hızının düşmesine neden olmaktadır. Bu durumlarda yanma odasına püskürtülen fosil kaynaklı yakıtların tam olarak yanmamakta ve yakıt tüketimi artmaktadır. EGR kullanım durumunda yakıtın tutuşma gecikmesini kısaltmak amacıyla yakıt setan sayısı arttırılarak yanma performansı arttırılabilir. Ayrıca egzoz gazı ile birlikte yanma odasına gelen küçük partiküllerin dizel motor silindir duvarlarında aşınmaya sebep olması gibi olumsuzluklarda görülmektedir (Haşimoğlu, Içingür ve Öğüt, 2002).

Son Emisyon Kontrol Teknolojileri

İçten yanmalı motorlardan kaynaklı NO_X emisyonlarının azaltılmasında kullanılan tekniklerden biri de egzoz gazı arıtma sistemleridir. Bu sistemler egzoz gazındaki NO_X gazları ile reaksiyona girebilecek farklı kimyasallar ile egzoz gazındaki emisyonların azaltılması prensibine dayanmaktadır. Bu sistemlerin başında SCR ve SNCR sistemleri gelmektedir. SCR ve SNCR sistemleri katalizör kullanılıp kullanılmamasına göre değişmektedir.

Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemleri

SCR sistemleri gemi dizel motorlarında Tier III sınırlamalarında kullanılan en etkin tekniklerden biridir. Bu sistemlerin NO_X indirgeme performansları %95 seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu sistemlerin gemilerde kullanımları iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar Yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemi ve alçak basınç koşullarında çalışan SCR sistemleridir. Gemilerde bu farklılığın oluşmasının temel sebebi egzoz gazı sıcaklıklarıdır. Şekil 9 iki zamanlı dizel motorlarda kullanılan SCR sistem tasarımını ifade etmektedir (MAN, 2017b; Zheng, Palmer, Salanta ve Kotrba, 2009).



Şekil 9. Gemi Dizel Motorlarında SCR Sistemi

İki zamanlı gemi dizel motorlarında, egzoz gazı sıcaklıkları turboşarjer çıkışında dört zamanlı motorlara oranla daha düşüktür. Düşük sıcaklıklarda SCR katalizörlerinde reaksiyonların verimli gerçekleşememesi nedeniyle sistem tasarımı doğrudan motor çıkışına yerleştirilmek-

tedir. Dolayısıyla doğrudan egzoz çıkışına yerleştirilen ve yüksek basınç koşullarında çalışan bu sistemlere yüksek basınç SCR sistemi diğer sisteme ise alçak basınç SCR sistemi adı verilmektedir. SCR sistemleri Egzoz gazında bulunan NO_X emisyonları ile NH_3 bileşenlerinin reaksiyona girerek serbest azot atomları ve su buharı oluşturma prensiplerine göre çalışmaktadır. NO_X azaltılmasında kullanılan amonyak bileşenleri ise termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile oluşmaktadır. Denklem 16, 17, 18 ve 19 SCR sistem reaksiyonlarını ifade etmektedir (Sung ve diğerleri, 2020).

$$(NH_2)_2CO \rightarrow NH_3 + HNCO \quad (16)$$

$$HNCO + H_2O \rightarrow NH_3 + CO_2 \quad (17)$$

$$4NH_3 + 4NO \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (18)$$

$$2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (19)$$

Verilen ifadelerde sıvı olarak püskürtülen üre öncelikle amonyak ve isosiyanik asite dönüşmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı ile gerçekleşen Denklem 16 ve Denklem 17 termoliz ve hidroliz reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen reaksiyonlar sonucu oluşan amonyak bileşenleri Standart ve Hızlı SCR reaksiyonu olarak adlandırılan Denklem 18 ve 19 ile serbest azot ve suya dönüşmektedir.

Seçici olmayan Katalitik İndirgeme (SNCR) Sistemleri

Seçici olmayan katalitik indirgeme sistemleri 850 °C ile 1050 °C arası sıcaklıklardaki egzoz gazlarının katalizör kullanılmadan NO_X emisyonlarını azaltmada kullanılan teknolojilerdendir. Bu sistemlerde termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan amonyak bileşenleri doğrudan NO_X emisyonları ile reaksiyona girerek su buharı ve serbest azot atomlarını oluşturmaktadır.

Gemi dizel motorlarında kullanılan bu sistemler, NO_X emisyonlarını azaltırken motor performansında önemli derecede bir kayba yol açmamaktadır. Dizel motorlarda görülen tek dezavantajı ise motor egzoz sisteminde kullanılan katalizörlerden kaynaklı karşı basıncın oluşmasıdır (Masera ve Hossain, 2021).

SONUÇ

Bu çalışmada fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu özellikle gemi dizel motorlarında oluşan NO_X emisyonlarının indirgenme teknolojileri ve bu teknolojilerin motor performansına etkisi incelenmiştir. Gemi dizel motorlarında kullanılan HFO yakıtlar Standard dizel yakıtlar ile karşılaştırıldığında daha kirleticidir. Bu kirletici yakıtlardan kaynaklı NO_X emisyonlarının indirgenmesi amacıyla Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Tier I, Tier II ve Tier III olmak üzere farklı zamanlarda üç farklı kısıtlama getirmiştir. Tier I kısıtlamasının yürürlüğe girdiği 2000 yılı ile Tier III düzenlemesinin yürüklüğe girdiği Tier III kısıtlaması arasında farklı emisyon indirgeme teknolojileri kullanılmıştır. Bu teknolojiler başlıca yakıtlarda gerçekleştirilen değişiklikler, motor yanma bileşenleri üzerinde yapılan modifikasyonlar son olarak da egzoz sisteminden istenmeyen gazların kimyasal teknikler ile uzaklaştırılması olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dizel motorlarda daha temiz yakıtların kullanılması ya da yakıt içerisindeki kirliliğin azaltılması NO_X emisyonlarının indirgenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma kapsamında alkoller, biyodizeller ve yenilenebilir yakıtların kullanımı üzerinde durulmuştur. Alkoller ve biyodizel yakıtlar içten yanmalı motorlarda düşük enerji potansiyeli sebebiyle doğrudan değil katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu yakıtların kullanımı NO_X emisyonların azaltırken motor performansında da azalmalar neden olmaktadır. LNG ve hidrojen yakıtların gemi dizel motorlarda kullanımı üzerine çalışmalar hali hazırda devam etmektedir. LNG yakıtı, NO_X emisyonlarının azaltılmasında etkin rol oynamaktadır. Bu yakıtların kullanılamama sebebi ise dünya üzerinde yeterince LNG terminalinin bulunamaması ve daha büyük yakıt depolama alanına sahip olmasıdır. Hidrojen yakıtı ise yüksek enerji potansiyeline sahip yakıt olup, gelecekte farklı şekillerde kullanılması en muhtemel yakıtlardan

biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidrojenin yüksek enerji kapasitesine sahip olması yanma odası sıcaklığını arttırarak NO_X emisyonlarının da artmasına neden olmaktadır.

Motor modifikasyonları, dizel motor yanma sürecine bağlı emisyon kontrol tekniklerindendir. Dizel motora bağlı püskürtme parametreleri, emme havası parametreleri ve yanma odası geometrik parametreler bu kapsamda incelenmiştir. En uygun püskürtme parametresinin seçimi, yanma odasına su buharı enjeksiyonu gibi NO_X emisyon kontrol mekanizmaları ile de emisyonların azaltılması mümkün hale gelmektedir. Ayrıca emme havası basınç, sıcaklık ve emme havasına katkı maddeleri de yanma sıcaklığını etkileyerek NO_X emisyon oluşum mekanizmasında önemli rol oynadığı incelenen çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Ayrıca yanma odasında en uygun hava yakıt karışımını etkileyen yanma odası modifikasyonları ile de yanma odası sıcaklığı homojen olarak dağılmakta ve NO_X emisyonları azaltılmaktadır. Yanma prosesini etkileyen NO_X emisyon kontrol tekniklerinden biri olan EGR de yine çalışma kapsamında incelenmiştir. EGR sistemlerinin yanma odasına egzoz gazlarının bir kısmının gönderilmesi ile yanma odası sıcaklığı düşürülmekte buna bağlı olarak da NO_X emisyonları azalmaktadır. Tier II düzenlemesini sağlamak amacıyla %15 EGR, Tier III düzenlemesi için %35 EGR oranları kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında son incelenen konu ise egzoz gazlarından NO_X emisyonlarının kimyasal olarak ile azaltılmasıdır. SCR ve SNCR bu kapsamda incelenen tekniklerdendir. Bu sistemler egzoz sistemine püskürtülen üre çözeltisinin buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan amonyağın NO_X emisyonları ile reaksiyona girerek su buharı ve serbest azot atomları oluşturma prensibine dayanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda amonyak NO_X reaksiyonu katalizörde gerçekleşirken, 850 °C'den sonra doğrudan egzoz hattında gerçekleşmektedir. Eğer indirgenme reaksiyonu katalizörde gerçekleşiyorsa SCR, yüksek sıcaklıklarda egzoz sisteminde gerçekleşiyorsa SNCR olarak adlandırılmaktadır.

KAYNAKÇA

Akal, D., Öztuna, S. ve Büyükakın, M. K. (2020). A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2020.02.001

Ashraful, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Rizwanul Fattah, I. M., Imtenan, S., Shahir, S. A. ve Mobarak, H. M. (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. *Energy Conversion and Management*, *80*, 202–228. doi:10.1016/j.enconman.2014.01.037

Ayhan, V. (2009). *Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun NOX ve İs Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması*. Sakarya Üniversitesi Doktora Tezi.

Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production - A review of current work. *Energy Conversion and Management*, *52*(2), 1479–1492. doi:10.1016/j.enconman.2010.10.011

Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A. ve Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, *182*(January), 72–88. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.080

Bayramoğlu, K. (2018). *HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Yöntemiyle Gemi Dizel Motorlarinda Yanma Analizi*. Dokuz Eylul Üniversitesi.

Bayramoğlu, K. ve Nuran, M. (2020). Analyzing the Effect of Fuel Injection Timing and Injection Duration on Performance and Emissions in Diesel Engines. *Journal of ETA Maritime Science*, *8*(1), 38–52. doi:10.5505/jems.2020.99705

Bayramoğlu, K., Özmen, G. ve Cerit, A. G. (2019). The Effect of Exhaust Temperature on Urea-Water Decomposition in Marine SCR Systems. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, *5*(3), 112–118. doi:10.22399/ijcesen.578973

Bayramoğlu, K. ve Yılmaz, S. (2020). Emission and performance estimation in hydrogen injection strategies on diesel engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, (xxxx). doi:10.1016/j.ijhydene.2020.08.135

Cengel, A. Y. ve Boles, M. A. (2012). *Thermodaynamics: An Engineering Approach*. *8. Baskı* (C. 53).

Cheenkachorn, K., Poompipatpong, C. ve Ho, C. G. (2013). Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas). *Energy*, *53*, 52–57. doi:10.1016/j.energy.2013.02.027

Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z. ve Brown, R. J. (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *70*, 123–134. doi:10.1016/J.TRD.2019.04.001

Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C. ve Chen, Z. (2021). A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Science of the Total Environment*, *766*, 144319. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144319

Dhahad, H. A., Fayad, M. A., Chaichan, M. T., Abdulhady Jaber, A. ve Megaritis, T. (2021). Influence of fuel injection timing strategies on performance, combustion, emissions and particulate matter characteristics fueled with rapeseed methyl ester in modern diesel engine. *Fuel*, *306*(X), 121589. doi:10.1016/j.fuel.2021.121589

DNV. (2021). LNG as marine fuel.

Doppalapudi, A. T., Azad, A. K. ve Khan, M. M. K. (2021). Combustion chamber modifications to improve diesel engine performance and reduce emissions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*(May), 111683. doi:10.1016/j.rser.2021.111683

Endresen, Ø., Sørgård, E., Sundet, J. K., Dalsøren, S. B., Isaksen, I. S. A., Berglen, T. F. ve Gravir, G. (2003). Emission from international sea transportation and environmental impact. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi:10.1029/2002jd002898

Glassman, I. ve Yetter, R. A. (2008). *Combustion*. Elsevier.

Gui, M. M., Lee, K. T. ve Bhatia, S. (2008). Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, *33*(11), 1646–1653. doi:10.1016/j.energy.2008.06.002

Hansen, A. C., Zhang, Q. ve Lyne, P. W. L. (2005). Ethanol-diesel fuel blends - A review. *Bioresource Technology*, *96*(3), 277–285. doi:10.1016/j.biortech.2004.04.007

Haşimoğlu, C., Içingür, Y. ve Öğüt, H. (2002). Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi, *26*, 127–135.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw Hill.

IEA. (2013). Alternative Fuels for Marine Applications. *report from the IEA advanced motor fuels implementing agreement*, (May), 108. doi:10.2478/v10161-012-0024-9

IMO. (2020a). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*.

IMO. (2020b). Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. *https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx*.

Imran, A., Varman, M., Masjuki, H. H. ve Kalam, M. A. (2013). Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 739–751. doi:10.1016/j.rser.2013.05.070

Ismet, S. (2018). Sıkıştırma Oranının Bir Dizel Motorun Performans ve Emisyonlarına Etkisi. *14th International Combustion Symposium* içinde .

Kayadelen, H. K. ve Ust, Y. (2013). Prediction of equilibrium products and thermodynamic properties in H 2O injected combustion for CαH βOγNδ type fuels. *Fuel*, *113*(x), 389–401. doi:10.1016/j.fuel.2013.05.095

Kumar, S., Cho, J. H., Park, J. ve Moon, I. (2013). Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *22*, 46–72. doi:10.1016/J.RSER.2013.01.017

Lion, S., Vlaskos, I. ve Taccani, R. (2020). A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines

and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, *207*(January), 112553. doi:10.1016/j.enconman.2020.112553

Liu, D., Li, X., Shang, H., Xie, L., Chen, Y. ve Chang, J. (2021). Combustion performance and fuel injection timing adaptability of a lateral swirl combustion system for direct injection diesel engines. *Fuel*, *296*(March), 120663. doi:10.1016/j.fuel.2021.120663

Lu, X., Geng, P. ve Chen, Y. (2020). NOx Emission Reduction Technology for Marine Engine Based on Tier-III: A Review. *Journal of Thermal Science*, *29*(5), 1242–1268. doi:10.1007/s11630-020-1342-y

MAN. (2017a). *Emission project guide*. *MAN Energy Solutions*.

MAN. (2017b). Emission project guide. *MAN Energy Solutions*, 111.

Masera, K. ve Hossain, A. K. (2021). Modified selective non-catalytic reduction system to reduce NOx gas emission in biodiesel powered engines. *Fuel*, *298*(April), 120826. doi:10.1016/j.fuel.2021.120826

McAllister, S., Chen, J.-Y. ve Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. doi:10.1007/978-1-4419-7943-8

Mirhashemi, F. S. ve Sadrnia, H. (2020). NOX emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review. *Journal of the Energy Institute*, *93*(1), 129–151. doi:10.1016/j.joei.2019.04.003

Nielsen, R. F., Haglind, F. ve Larsen, U. (2014). Design and modeling of an advanced marine machinery system including waste heat recovery and removal of sulphur oxides. *Energy Conversion and Management*, *85*(2014), 687–693. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.038

Okubo, M. ve Kuwahara, T. (2020). Emission Regulations. *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines* içinde . doi:10.1016/B978-0-12-812307-2.00002-X

Özgür, C. (2015). *DEVELOPMENT OF A NOx REDUCTION SYSTEM FOR DIESEL ENGINES*. Çukurova University.

Pirola, C., Galli, F., Rinaldini, C. A., Manenti, F., Milani, M. ve Montorsi, L. (2020). Effects of humidified enriched air on combustion and emissions of a diesel engine. *Renewable Energy*, *155*, 569–577. doi:10.1016/j.renene.2020.03.155

Raptotasios, S. I., Sakellaridis, N. F., Papagiannakis, R. G. ve Hountalas, D. T. (2015). Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied Energy*, *157*, 814–823. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.041

Rosa, J. S., Telli, G. D., Altafini, C. R., Wander, P. R. ve Oliveira Rocha, L. A. (2021). Dual fuel ethanol port injection in a compression ignition diesel engine: Technical analysis, environmental behavior, and economic viability. *Journal of Cleaner Production*, *308*(May), 127396. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127396

Sandalci, T., Karagöz, Y., Orak, E. ve Yüksek, L. (2014). An Experimental Investigation of Ethanol-Diesel Blends on Performance and Exhaust Emissions of Diesel Engines. *Advances in Mechanical Engineering*, *2014*. doi:10.1155/2014/409739

Shahir, V. K., Jawahar, C. P. ve Suresh, P. R. (2015). Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 686–697. doi:10.1016/j.rser.2015.02.042

Shivashimpi, M. M., Alur, S. A., Topannavar, S. N. ve Dodamani, B. M. (2018). Combined effect of combustion chamber shapes and nozzle geometry on the performance and emission characteristics of C.I. engine operated on Pongamia. *Energy*, *154*, 17–26. doi:10.1016/j.energy.2018.04.097

Sung, Y., Choi, M., Park, T., Choi, C., Park, Y. ve Choi, G. (2020). Synergistic effect of mixer and mixing chamber on flow mixing and NOx reduction in a marine urea-SCR system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *150*(x), 107888. doi:10.1016/j.cep.2020.107888

Toof, J. L. (1986). A model for the prediction of thermal, prompt, and fuel NOX emissions from combustion turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *108*(2), 340–347. doi:10.1115/1.3239909

Trindade, W. R. da S. ve Santos, R. G. dos. (2017). Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*(October 2015), 642–651. doi:10.1016/j.rser.2016.11.213

Tripathi, G., Sharma, P., Dhar, A. ve Sadiki, A. (2019). Computational investigation of diesel injection strategies in hydrogen-diesel dual fuel engine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *36*(September), 100543. doi:10.1016/j.seta.2019.100543

Wang, Z., Zhou, S., Feng, Y. ve Zhu, Y. (2017). Research of NOx reduction on a low-speed two-stroke marine diesel engine by using EGR (exhaust gas recirculation)–CB (cylinder bypass) and EGB (exhaust gas bypass). *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(30), 19337–19345. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.009

Woodyard, D. (2009). Exhaust Emissions and Control. *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, 61–86. doi:10.1016/b978-0-7506-8984-7.00003-5

Yan, B., Wang, H., Zheng, Z., Qin, Y. ve Yao, M. (2018). The effect of combustion chamber geometry on in-cylinder flow and combustion process in a stoichiometric operation natural gas engine with EGR. *Applied Thermal Engineering*, *129*, 199–211. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.067

Yang, Z. L., Zhang, D., Caglayan, O., Jenkinson, I. D., Bonsall, S., Wang, J., … Yan, X. P. (2012). Selection of techniques for reducing shipping NOx and SOx emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(6), 478–486. doi:10.1016/j.trd.2012.05.010

Yip, H. L., Srna, A., Yuen, A. C. Y., Kook, S., Taylor, R. A., Yeoh, G. H., … Chan, Q. N. (2019). A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(22). doi:10.3390/app9224842

Zheng, G., Palmer, G., Salanta, G. ve Kotrba, A. (2009). Mixer development for urea SCR applications. *SAE Technical Papers*, *4970*. doi:10.4271/2009-01-2879

SEVİYELENDİRİLMİŞ SÜREÇ DENETİMİ (LPA): HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ

Atakan GERGER[1]

Öz: Seviyelendirilmiş süreç denetimi, işletmenin çeşitli yönetim seviyelerin çalışma talimatlarına, kontrol planlarına, vb. bağlılığını değerlendirmesine ve uygunsuzluğu gerçek zamanlı olarak düzeltmesine izin verecek şekilde tasarlanmış bir Yalın Yönetim aracıdır. Seviyelendirilmiş süreç denetimi, üst düzey yönetim seviyesine kadar iş istasyonlarını günlük yönetimine entegre edilmesini sağlayarak, tüm hiyerarşik düzeylerde yapılandırılmış bir süreç denetimi organizasyonunu tesis edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte; seviyelendirilmiş süreç denetimi, işletmelerde her seviyede ve tüm alanlarda süreçlerin ve spesifikasyonların uygulanmasını iyileştirmek ve böylelikle organizasyonun verimliliğini artırmak için kullanılan başarılı bir yöntemdir. Özellikle dar boğaz yaşanan süreçler başta olmak üzere; üretim akışını kesintiye uğratan alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu özelliğiyle; projelerin başarısını arttırıcı bir unsura sahiptir. Çünkü; her seviyeden yönetimi işin içine çekmektedir. Unutulmamalıdır ki; üst yönetim desteklediğinde ve çalışmalara dahil olduğunda projeler büyük bir çoğunlukla başarılı olmakta aksi durumda bu pek mümkün olmamaktadır. Bu kitap bölümüyle; bu güçlü Yalın Yönetim tekniği detaylı bir şekilde araştırılarak literatürde bir referans kaynak olarak yer alması amaçlanmış ve havacılık endüstrisinde gerçekleştirilen bir uygulama örneği araştırmacılarla paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: LPA, Katmanlı Süreç Denetimi, Seviyelendirilmiş Süreç Denetimi, Yalın Yönetim, IATF 16949

1 Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, atakangerger@gmail.com; Orcıd No: 0000-0002-3782-7613

GİRİŞ

LPA, İngilizce '*Layered Process Audit*' kelimelerinin baş harfinden oluşan bir Yalın Yönetim aracıdır. Türkçe'ye 'Seviyelendirilmiş Süreç Denetimi' ve/veya 'Katmanlı Süreç Denetimi' olarak çevrilmiştir. Bu Yalın Yönetim aracında amaç; üst düzey yönetim seviyesine kadar iş istasyonlarının günlük yönetimine entegre ederek, tüm hiyerarşik düzeylerde yapılandırılmış bir LPA organizasyonu uygulanmasını sağlamaktır. LPA, Kalite Sistem gereksinimlerine uyumu sağlamak için çeşitli yönetim düzeyleri (katmanları) tarafından gerçekleştirilen bir denetimdir. Öncelikli olarak kritik proseslere odaklanmaktadır (Burk & Sprague, 2017).

LPA, tanımlanmış bir sürecin doğru bir şekilde takip edilmesini sağlayan, devam eden basit bir doğrulama kontrolleri zinciridir. Bu güçlü yönetim aracı, problem çözme sistemlerini güçlendirerek ve sürekli iyileştirmeyi rutin hale getirerek; güvenliği, kaliteyi ve maliyet tasarrufunu iyileştirebilir. LPA, bir şirketin kültürünü sürekli iyileştirmeyi benimseyen bir kültüre dönüştürerek işin denetimin ötesine geçer (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007).

LPA, üretim için gerçekleştirilmiş bir yöntem olmasına rağmen günümüzde İş Sağlığı ve Güvenliği'nden (İSG), Pazarlamaya kadar birçok alanda ve hizmette gerçekleştirilmektedir.

LPA, IATF 16949 Otomotiv Kalite Yönetim Sistemi ve ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi başta olmak üzere birçok kalite yönetim sistemi tarafından uygulanması beklenilmektedir. Örneğin; IATF 16949, Madde 8.5.6.1.1 Proses Kontrollerinin Geçici Değişikliği maddesinde LPA aşağıdaki gibi geçmektedir (IATF, 2016):

- Kuruluş, muayene, ölçme, test ve hata önleme cihazları dahil olmak üzere, birincil proses kontrolünü ve onaylanmış yedek veya alternatif yöntemleri içeren süreç kontrollerinin bir listesini tanımlamalı, belgelemeli ve muhafaza etmelidir.
- Kuruluş, muadil kontrol yöntemlerinin uygulanmasını idare eden süreci belgelemelidir.

- Kuruluş, kontrol planında atıfta bulunulan onaylanmış muadil süreç kontrol yöntemlerinin bir tablosunu tutmalı ve sistematik bir zaman planı içerisinde gözden geçirmelidir.
- Her bir alternatif proses kontrol yöntemi için standart çalışma talimatları mevcut olmalıdır.
- Kuruluş, mümkün olan en kısa sürede kontrol planı tarafından tanımlanan standart sürece geri dönmek amacıyla standart çalışmanın uygulanmasını doğrulamak için alternatif süreç kontrollerinin işleyişini en azından günlük olarak gözden geçirmelidir.
- Örnek yöntemler aşağıdakileri içermeli ancak bunlarla sınırlı olmamalıdır:
  a) Günlük kalite odaklı denetimler (Örneğin; uygulanabilir olduğu şekilde Katmanlı Süreç Denetimleri - LPA)
  b) Günlük liderlik toplantıları.

Ayrıca; LPA, Yalın Yönetim Felsefesinin de temel araçlarından biri olup, bu felsefe dâhilinde aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kitap bölümünün kalan kısmı şu şekilde yapılandırılmıştır. İkinci bölümde detaylı olarak Seviyelendirilmiş Süreç Denetimi ele alınmıştır. Üçüncü bölümde; havacılık endüstrisinde yer alan ve küresel bir oyuncu olan ve bu çalışmada ABC olarak anılan firma yaşanan bir dar boğaz ve kalite problemini gidermek için gerçekleştirilen LPA uygulaması tüm boyutlarıyla paylaşılmıştır. Son bölümde ise; LPA konusu özetlenmiştir.

SEVİYELENDİRİLMİŞ SÜREÇ DENETİMİ (LPA)

Otomotiv endüstrisinde amansız bir rekabet hüküm sürdüğünden; kalitesizlik maliyetlerinin azaltılması en önemli amaçlardan biri durumundadır. Bu nedenli yoğun bir rekabetin varlığı ve bir dakikanın çok altında sürelerde banttan araçların inmesi süreçlerin sürekli olarak kontrol altında tutulmasını gerektirmektedir. Durum böyle olunca; üreticiler, tüm yönetim katmanlarını içeren bir tür yüksek frekanslı denetim olan LPA'yı süreçlerini optimize etmek ve süreçlerindeki kayıpları kalıcı olarak ortadan kaldırmak için tek başına güçlü bir yöntem olması dolayısıyla kullanmaktadır. LPA uygulamalarıyla; otomotiv tedarikçilerinin sadece birkaç ay içinde önemli kalite maliyet düşüşleri elde etmelerine

yardımcı olmuştur. Aynı zamanda bir kalite kültürünü teşvik eden yapılandırılmış bir çerçevenin sağlanmasına neden olmuştur. LPA, operatörlerin standartlaştırılmış süreçleri takip ettiğinin tekrar tekrar doğrulanması yoluyla değişkenlikleri ve kusurları azaltmaktadır. Applied Logistics tarafından 2016 yılında yapılan bir araştırmaya göre; üretim hatalarının %75'inin süreçlerdeki uyumsuzluktan kaynaklanmış olduğu görülmüştür. LPA programlarının kalite maliyetlerini düşürmede çok etkili olmasının başlıca nedeni budur (Stoop, 2017).

LPA ile aşağıdaki konuların başarılması amaçlanmıştır. Bunlar:

- Üretim sisteminin en iyi şekilde çalıştığından emin olmak için; uygunluğun doğrulanması ve üretim sürecindeki uyumsuzlukların tespit edilmesi.
- Denetim sürecine çeşitli yönetim seviyelerinin dahil edilmesi.
- Denetim tarafından belirlenen potansiyel sorunların düzeltilmesi için darboğazların ortadan kaldırılması.
- Süreç ve iş uygulamalarında sürekli iyileştirmenin sağlanması.

LPA, işletmelerde her seviyede ve tüm alanlarda süreçlerin ve spesifikasyonların uygulanmasını iyileştirmek ve böylelikle organizasyonun verimliliğini artırmak için başarılı bir yöntemdir. LPA'yı oluşturan kelimeleri (Seviyelendirilmiş Süreç Denetimi) aşağıda belirtilmiş olan anlamları taşımaktadır. Bunlar:

- **Seviyelendirilmiş (Layered):** LPA'nın uygulandığı süreçteki çeşitli yönetim düzeylerini ifade etmektedir.
- **Süreç denetimi (Process Audit):** Süreçlerin kararlaştırıldığı şekilde uygulanıp uygulanmadığını ve istenen sonuçlara ulaşılıp ulaşılmadığını belirlemek için denenmiş ve test edilmiş bir değerlendirme şeklidir.
- **Denetimler (Audits):** ISO 19011:2018'de denetim "*kanıt elde etmek için sistematik, bağımsız, belgelenmiş bir süreç ve üzerinde anlaşılan kriterlerin ne ölçüde karşılandığını belirlemek için nesnel bir değerlendirmedir*" şeklinde tanımlanmıştır (ISO, 2018). LPA projelerinde denetim; küçük bir denetçi ekibi tarafından yerine getirilmek ye-

rine, çeşitli yönetim seviyelerinde görevli olan personeller tarafından gerçekleştirilir.

LPA, üst yönetim seviyelerinden başlayarak operasyonda görevli personele kadar organizasyonun tüm seviyelerini içerir.

Denetimlerin gerçekleştirilmesinde iki kriter bulunmaktadır (Siarkiewicz, 2018):

- Birincisi: *Kimin ve hangi amaçla yürüttüğü*
- İkincisi: *Denetimlerin neyle ilgili olduğu:*

✓ Süreç
✓ Ürün"
✓ Sistem
✓ Prosedür ve
✓ Organizasyon

Denetimler birinci parti, ikinci parti ve üçüncü parti olmak üzere üç şekilde gerçekleştirilir. Bunlar (Wierzbic & Szewczyk, 2019):

- **Birinci Parti Denetim**: İç denetim olarak da adlandırılan birinci taraf denetimi, yönetiminin talebi üzerine kendi nitelikli denetçisi (kuruluşun bir çalışanı) tarafından veya yönetim sitemini veya sürecini incelemek ve değerlendirmek için işe alınan bir uzmanın yardımıyla kuruluşta gerçekleştirilir. İç denetimlerin amacı, mevcut yönetim sisteminin işleyişinde belirlenen hedeflere ulaşmanın mümkün olup olmadığını kontrol etmek ve değerlendirmektir. Denetim raporu, iyileştirilmesi gereken gelişmeye açık noktalar ve ayrıca sistem/süreç/ürünün işleyişindeki sorunlar hakkında yönetim için bir bilgi kaynağıdır. Bazı şirketlerde iç denetimler, sertifikayı sürdürmek için zorunlu önlemler olarak kabul edilir. Birçok yönetici; bu yöntemlerin çalışanların katılımını artırdığını, sorunların yaratıldıkları kaynağa daha yakın bir şekilde çözülmesini sağladığını ve toplu göstergelere bakarak elde edilemeyecek önemli bilgiler sağladığını belirtmektedirler (Wawak, 2013).
- **İkinci Parti Denetim**: Çoğunlukla taşeronun, tedarikçinin veya potansiyel tedarikçinin gereksinimleri karşılama kabiliyetini belirlemek için yönetim sistemi ile ilgili olarak gerçekleştirilir. Bu

tür denetimlerinin amacı tedarik zinciri boyunca herhangi bir darboğaza sebebiyet vermeksizin risklerin önceden tespitinin sağlanmasıdır. Böylece; firma aynı zamanda tedarikçisinin ve taşeronunun süreçlerini de izleyerek herhangi bir problemle karşılaşması halinde sürekli iyileştirme faaliyetlerinin buralarda da hayata geçmesini teşvik eder. Bunun bir sonucu olarak tüm tedarik zinciri boyunca süreçlerdeki olası problemleri erken yakalayarak, bertaraf edilmesi için proaktif bir yaklaşım sağlamış olur.

- **Üçüncü Parti ya da Belgelendirme Denetimi**: Denetlenen kuruluş tarafından bir sertifika almak için bağımsız, yetkili bir kuruluş tarafından yürütülen bir yönetim sisteminin analizini içerir. Denetim sonucunda; uygulanan sistemin ilgili standartla evrensel olarak tanınan bir uygunluk sertifikası verilir. Bu denetimler akredite olmuş firmalar tarafından gerçekleştirilen denetimleri ifade eder.

LPA'nın Kullanım Alanları

LPA, ilk zamanlar otomotiv endüstrisinde üretimde kullanılmak üzere ortaya çıkmış olsa da günümüzde İSG, yönetim, denetim, hizmet, eğitim, pazarlama, vb. birçok alanda çok sık kullanım örnekleriyle karşılaşılmaktadır. LPA'nın kökeni her ne kadar Yalın Yönetim felsefesine dayansa da ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi (ISO, 2015) ve IATF 16949 Otomotiv Kalite Yönetim Sistemi (IATF, 2016) standardında gerekliliği bir sistematiğe bağlanmıştır. Ayrıca; Otomotiv Endüstrisi Aksiyon Grubu (AIAG) CQI-8 Katmanlı Süreç Denetimi Kılavuzu (AIAG, 2005) ve Alman Otomobil Federasyonu (VDA), VDA 6.3 Süreç Denetimi Kılavuzu (VDA, 2016) gibi otomotiv endüstrisi standartlarında da LPA'nın uygulanması standardize edilmiştir. Genel olarak kullanım alan ve amaçlarından bazı örnekler aşağıda yer almaktadır.

- Uygun olmayan ürünlerin imalatını veya montajını engelleyen cihazların çalışmasının kontrol edilmesi.
- Bu prosedürün amacı doğrultusunda, uygun olmayan ürünün transferini tespit eden ve durduran cihazlar (Örneğin; %100 hat içi denetim ekipmanlarının kontrolünde ya da Poka Yoke çalışmaları).

- Mümkünse, hata önleme cihazının düzgün çalışıp çalışmadığı katmanlı denetim sırasında doğrulanmalıdır.

Günümüzde LPA, yüzlerce otomotiv tedarikçisi tarafından uygulamaktadır. LPA'nın kısa tarihçesinde bakıldığında; General Motors (GM) ilk olarak LPA'yı tedarikçilerine 2002 yılında tanıtmıştır. DaimlerChryler, 2004 yılında LPA'ları bir tedarikçi gerekliliği haline getirmiştir. Benzer şekilde Ford'ta tedarikçilerinden LPA çalışmalarını yapmalarını istemiştir. LPA'nın otomotiv endüstrisinde etkin bir şekilde kabul görmesi ve yayılması neticesinde; gereksinimlerin yorumlanmasındaki farklılıkları azaltmak için AIAG, Aralık 2015'te CQI-8 Katmanlı Süreç Denetim Kılavuzunu yayınlamıştır (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007) (Stoop, 2017). Böylece; LPA, evrensel bir dil haline getirilmiş ve bir sistematiğe bağlanmıştır. Yönetimin kaliteden sorumlu olmasını sağlayan ve riski azaltmaya yönelik proaktif bir yaklaşım olarak LPA'lar ayrıca ISO 9001 ve IATF 16949 gibi standartlara uygunluğun gösterilmesine yardımcı olmaktadır.

LPA Nedir? LPA Ne Değildir?

LPA sadece bir denetim olmayıp aynı zamanda denetimin, denetim planına uygun olarak gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğinin doğrulanması olduğu söylenebilir (Bosch, 2014). Bununla birlikte; 'Yönetim Sistemleri İç Denetçisi' ile 'LPA Denetçisi' arasında bir fark olduğunun altı çizilmelidir. LPA'da denetçi süreçle ilgili herhangi bir yönetim seviyesi olabilir. Spesifik olarak bunlar kilit süreçleri ve öğelerini kontrol eden vardiya yöneticileridir. LPA denetimlerini takiben; sürecin uygunluğuna ilişkin geri bildirim ve gerekli düzeltici eylemler hemen yapılır. Bir sonraki yönetim seviyesindeki kişiler aynı kontrolleri gerçekleştirir ve üst yönetimle denetim son bulur. Bu şekilde herkes bir LPA denetçisidir. Denetçinin, Kalite Yönetim Sistemi alanında eğitim almasına gerek yoktur. Çünkü; LPA'lar sistem denetimi değildir. LPA'lar, süreç denetimleri üzerine odaklanır (Wierzbic & Szewczyk, 2019). Tablo 4.2.1'de LPA'nın ne olup ne olmadığı özetlenmiştir (AIAG, 2005).

Tablo 4.2.1. LPA Nedir? Ne Değildir?

LPA Nedir?	LPA Ne Değildir?
Süreç ve prosedürlerin kontrol edildiğinin doğrulanması	Ürün özelliklerini denetleyen bir kalite denetimi
Denetimin gerçekleştirildiği operasyonel gruba ait görevler kapsamındaki faaliyet (*Örneğin: Üretim*)	Destek grubuna ait sorumluluklar kapsamındaki faaliyetler (*Örneğin: Kalite*)
Fabrikada birçok yönetim katmanı tarafından gerçekleştirilir	Sadece bir denetçi veya teknik personel tarafından gerçekleştirilir
Genellikle '*Evet/Hayır*' gibi hızlı sorulardan oluşan bir araç	Parçaların veya diğer ürün özelliklerinin ölçülmesini gerektiren bir araç
Önemli riskli süreç adımlarının ve prosedürlerinin kısa bir listesi	Müşteri memnuniyeti ile ilgili olmayan maddeleri içeren uzun bir soru listesi
Önceden belirlenmiş bir sıklıkta düzenli olarak gerçekleştirilir	Denetçinin zamanı olduğunda gerçekleştirilir
Kuruluştaki katmana uygun olarak belirli bir kişi tarafından gerçekleştirilen	Sorumlu bir kişi tarafından görevlendirilen bir işçi tarafından gerçekleştirilir
Faaliyetin yapıldığı alanda gerçekleştirilir	Denetçi ofisinde gerçekleştirilir
Doğrulama yöntemi: Düzeltici eylemlerin dayanıklılığını kontrol etme	Düzeltici eylemleri belirleme yöntemi
Kalite belgelerinin *(talimatlar, kontrol planları)* kullanılıp kullanılmadığını doğrulamak için kullanılan bir yöntem	Proses kontrol planına eklenebilecek bir kontrol yöntemi
Denetim sonuçlarının yönetim tarafından düzenli olarak gözden geçirildiği bir faaliyet	Sonuçları girilen ancak yönetim tarafından gözden geçirilmeyen bir faaliyet
Uygunsuzlukların derhal giderildiği bir faaliyet	Uygunsuzlukların kaydedildiği ve daha sonraki bir tarihte ele alındığı bir faaliyet

İnsan süreçleri ve prosedürleri için planlanmış faaliyetler	İşlemi/makineyi doğrulamak için kullanılan eylem
Operatör ve yönetim arasındaki iletişimi geliştiren bir yöntem	En kötü çalışanları belirleme yöntemi
Süreç ve prosedürlere uyumun önemini vurgulayan bir yöntem	Çalışana yönetim denetimini gösteren yöntem,
Seçilen süreç ve prosedür/süreç adımının denetimi	Seçilen süreç ve prosedür/süreç adımının denetimi

LPA'daki Sorumluluklar

Genel olarak LPA süreci işletmenin çeşitli yönetim liderliğindeki seviyelerin

- çalışma talimatlarına,
- kontrol planlarına,
- vb.

bağlılığı değerlendirmesine ve uygunsuzluğu gerçek zamanlı olarak düzeltmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Bu prosedürde listelenen gereksinimleri yerine getirmek için kaynakların mevcut olmasını sağlamak Genel Müdürün/Fabrika Müdürünün sorumluluğundadır.

Kalite müdürünün, bu denetimleri yapacak kişiye gereken şekilde iş başında eğitim vermesi önerilir (başlangıçta bir kılavuz olarak denetim kontrol listesini kullanarak süreci yürütülür).

Denetimlerin prosedürde belirtildiği şekilde yapılmasını ve eylemlerin uygulanmasını sağlamak Fabrika Müdürünün (GM'nin) sorumluluğundadır. Şirketin kültürüne ve faaliyet göstermiş olduğu endüstriye bağlı olarak LPA denetimlerindeki diğer görevler denetimi gerçekleştirecek olan seviyelerden görevlendirilmiş personel tarafından gerçekleştirilir. Bu personel, daha önceden hazırlanarak kendilerine beyan edilen '*LPA Kontrol Listesi*'ndeki soruları ilgili alanlarda görevli personele sorar. LPA denetimi esnasında; denetçiler yönlendirici bir şekilde değil mümkün olduğunca yansız bir şekilde soruları sormaları önemlidir.

LPA'nın Avantajları

LPA temel olarak aşağıda belirtilmiş olan temel kavramları içerir:

- Üretimdeki değişkenliğin azaltılması.
- Çalışma disiplininin geliştirilmesi ve korunması.
- Hurdaların azaltılması ve israfların ortadan kaldırılması.
- İletişimin geliştirilmesi.
- Çalışan katılımının artırılması.
- Genel kalite seviyesin artırılması.
- Maliyetlerin azaltılması.
- Gerçekleştirilen üretim ya da hizmetin müşteri tarafından ret edilme durumuna gelmesinin önlenmesi.

LPA, tanımlanan yöntemlerin ve çalışma talimatlarının kullanılmasını, sorun çözümlerinin yerinde gerçekleştirilmesini ve tüm süreç problemlerinin tanımlanıp hızla iyileştirilmesini sağlar. LPA, şirketlerdeki en büyük sorunlardan birini çözmek, yani; kurallara uymak ve uygulamak için mükemmel bir araçtır. LPA'lar etkili bir şekilde kullanıldığında; herhangi bir alanda yaygın olan değişkenlik kaynaklarını bulabilir ve bunları azaltabilir. Değişkenlikler azaldığında ise operasyonlar daha sorunsuz akmakta; müşteri memnuniyeti ve çalışanların moral düzeylerinde artış meydana gelmektedir. LPA'ların, yeniden işleme kayıplarının (re-work) maliyetlerini azaltma ve müşteri kalitesiyle ilgili endişeleri giderme konusunda önemli bir etkisi vardır. Daha yüksek verim oranları ve daha az aksama süresi ile üretim verimliliği ölçümleri de iyileştirilebilmektedir. LPA'lar herhangi ekstra efor gerektirmeksizin; önleyici faaliyet sistemine daha fazla güç verecektir. (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007). Bu durumda; firmalar, önemli ölçüde maliyetlerden tasarruf sağlayabilmektedir.

LPA'lar, geleneksel teftiş ve denetimlerle karşılaştırıldığında; kusurlara veya güvenlik problemlerine neden olmadan önce süreç değişkenliklerini tespit etmek için ek güvenlik katmanları sağlamaktadır. LPA'lar, büyük hacimlerde veri üreterek, kalitesizlik maliyetlerinin itici güçlerine ilişkin görünürlüğü de artırmaktadır. LPA'ların en büyük etkiye sahip olduğu metrikler şunları içermektedir (Stoop, 2017):

- **Hurda ve Yeniden İşleme:** LPA'ları uygulayan şirketler, birkaç ay içinde hurda maliyetlerini yarı yarıya düşürmeyi başarabilmektedir.
- **Müşteri İadeleri:** LPA uygulaması, bazı kuruluşlarda müşteriye ulaşan kusurlarda %50'den fazla azalmaya neden olmuştur. Diğer şirketler ise herhangi bir müşteri şikayeti olmaksızın aylarca veya daha uzun süreliğine işlerini sürdüğünü bildirmiştir.
- **Toplam Kalite Maliyeti:** Kalite maliyetlerinin düşürülmesi, gelir artışı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bunun bir nedeni; önlemeden tespite ve fiili arızaların düzeltilmesine geçerken kalite maliyetlerinin katlanarak artmasıdır.

Firmalarda LPA uygulamak aynı zamanda kalite kültürünün gelişmesi üzerinde de pozitif etkileri bulunmaktadır. Bu etkiler aşağıda belirtilmiş olduğu gibidir (Stoop, 2017):

- **Şirket Çapında Katılım**: LPA'lar; operasyonlar, insan kaynakları ve finans gibi departmanlardan insanları sürece dahil ederek kaliteyi idari silolarından ayırır.
- **Proaktif Risk Yönetimi**: LPA'lar, üretim noktasından ziyade müşteri memnuniyetini etkileyen sorunları belirler. Bununla birlikte; amacı riski kalıcı olarak azaltmak olan düzeltici faaliyetin ana hedefini de desteklerler.
- **Üst Düzey Önceliklendirme**: Yönetimin fabrika katında görünür bir varlık haline getirilmesi, kaliteye gerçek bir bağlılığın güçlü kanıtıdır. LPA'lar, herkesin kaliteye ve proaktif iyileştirmeye odaklanmasını sağlayan günlük bir faaliyettir.
- **Sürekli İletişim:** LPA'lar, operatörlere gözlemlerini ve önerileri doğrudan yönetimle paylaşma şansı verir. Çünkü; insanlar, yönetimin sorunları çözmeye yeterince önem verdiğini gördüklerinde konuşma olasılıkları daha yüksektir ve iyileştirme çalışmalarına katılmaya daha isteklidirler.
- **Hesap Verebilirlik:** LPA'lar, kimin katıldığını ve kimin sorumluluklarından geri kaldığının görülmesi için ihtiyaç duyulan somut verileri sağlar. Bununla birlikte; tanımlamayı da kolaylaştırır.

Otomotiv endüstrisi aksiyon grubu; '*CQI-8 Katmanlı Süreç Denetimi Klavuzu*'nda LPA'nın avantajları

- Süreç uyumluluğunu doğrulamak ve onaylamak,
- Potansiyel sapma alanlarını belirlemek ve
- Sürekli iyileştirme için fırsatlar sunmak

için yönetim tarafından etkili bir katman denetiminin kullanılması olarak ifade edilmiştir. Sonuçlar, müşteriye gönderilen ürünün kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Organizasyondaki değişiklikler, organizasyonun iş sonuçları üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Doğru uygulanmış bir katman denetim sistemi aşağıdaki faydaları sağlar (AIAG, 2005):

- Sürecin dokümantasyona uygunluğunu kontrol eder.
- İletişimi geliştirir.
- Disiplini aşılar.
- Tehlikeli durum riskini azaltır.
- İsrafı azaltır.
- Ürün kalitesini ve müşteri memnuniyetini artırır.
- Nakit akışını iyileştirir.
- Kalite problemlerinin olasılığını azaltır.
- Yönetim ve çalışanlar arasındaki etkileşimi artırır.
- Operatörlerden doğrudan elde edilebilen geri bildirime izin verir.
- Üretim süreçlerinin standardizasyonunu destekler.
- Güvenlik gerekliliklerini dikkate alarak sürecin kilit aşamalarını güçlendirir.
- Yönetim ve çalışanlarla birlikte sürecin kilit aşamalarının gözden geçirerek önemini gösterir.

LPA Uygulamasının Temel Adımlar ve Unsurlar

LPA uygulamalarındaki temel adımların anlaşılması son derece önem arz etmektedir. Bu adımlar kısaca aşağıdaki belirtilmiştir. Bunlar:

- LPA gereksinimlerinin doğru anlaşılması/tespit edilmesi.
- Çapraz fonksiyonel LPA ekibinin oluşturulması.
- Önemli ve kritik alanların kapsandığı denetim soru listesinin hazırlanması.
- Denetim planının oluşturulması (tüm seviyeler için uygun programlar).
- Süreklilik:
  - ✓ Denetim planına kesinlikle uyulması.
  - ✓ LPA'nın; ölçülmesi, gözden geçirilmesi, uygunsuzlukların kapanması ve diğer eylemlerin izlenmesi.

LPA projeleri bir sistematik çerçevesinde gerçekleştirilir. Bu nedenle; LPA çalışmalarında aşağıda belirtilmiş olan konulara dikkat edilmelidir. Bunlar:

- Hata önleme, algılama ve cihaz doğrulaması.
- İlk parça doğrulama (ilk numune doğrulama).
- Kontrol edilen son parçanın ölçüsü ve varlığı.
- İşlem ayarları ve /veya parametreleri.
- Müşteri ara yüz özellikleri.
- Doğru ürün tanımlama (etiketleme).
- Ürün boyutları veya görsel inceleme.
- Dokümantasyon / kayıt tamamlama.

Denetimcilerin (Auditors) Eğitilmesi

LPA denetimini gerçekleştirecek olan denetimcilerin aşağıda belirtilmiş olan konularda eğitim almaları LPA'nın verimliliği açısından son derece önemli bir konu olarak yer almaktadır. Bu konular:

- **LPA'nın önemi**: Öncelikli olarak denetimi gerçekleştirecek katmanda görevli personel LPA yapmadaki amacı doğru bir şekilde kavramalıdır. LPA, yönetimin alana inmesini sağlayarak öncelikle alt ve üst kademe arasındaki iletişimi güçlendirir. Firmadaki farkındalığı ve kalite kültürünü arttırır.

- **Denetimin kapsamı**: LPA'lar, süreçlerde meydana gelen darboğazları gidermede, kalite problemlerini iyileştirmede, vb. konularda kullanıldığından kapsam belirlenen bu alanla sınırlı olmalıdır. Hazırlanan LPA kontrol listesi bu belirlenen alanda/alanlarda sorulmalıdır.
- **Denetimde dikkat edilecek noktalar**: LPA denetçisi; denetim esnasında kibar ve saygılı olmalıdır. Denetleneni cesaretlendirerek ancak sıkıştırmadan katılımını sağlamalıdır. Unutmamak gerekir ki; LPA, kişileri değil süreçleri denetler. Bu nedenle; denetlenen alana gidildiğinde öncelikle bu faaliyetin bir süreç denetimi olduğunu ve amacın çalışan personeli denetlemek olmadığını aktarmak son derece önemlidir. Böylece; denetlenen kendini kapatmayacak ve iyileştirme çalışmalarına katılmaya istekli olacaktır.
- **Denetim periyodu**: Hiç kuşkusuz ki; belirlenen ve alanlara bildirilen denetim tarih ve zamanlarına uyum LPA'nın başarısı için son derece önemlidir. Eğer zamanlamaya dikkat edilmezse; çalışanlar, LPA denetimlerini ciddiye almayacak ve LPA'dan çalışmalarından çıkma olasılığı olan iyileştirme önerilerinde bulunmayacak ya da iyileştirme çalışmalarına katılmayacaktır. Buna ek olarak; denetçiler, yetki seviyelerine karşılık gelen bir sıklıkta LPA denetimlerine katılmaktadırlar. Bu denetim frekansı tamamen işin önemine ve kapsamına bağlı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

İşgücü ile İletişim Kurulması ve Eğitilmesi

LPA, operatörlere ince ama hak edilmiş bir tanınma sağlar. Üretim alanlarında elde edilen gözlemler, değerlendirmeler ve konuşmalar yoluyla gerçekleştirilen bu kontroller; temel iş adımlarının düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu etkileşimler aynı zamanda yöneticilerin ön saflardaki çalışanlara saygı göstermeleri için mükemmel bir yol ortam sağlamaktadır. Bununla birlikte; LPA'lar proje operatörlerinin yaralanmalara karşı korunmasına yardımcı olur, müşteriyi ve tesisleri uygun olmayan ürünlerin gönderilmesinden korur. Dolayısıyla daha az yaralanmaya ve ürünlerin ilk seferde doğru bir şekilde üretilme-

siyle maliyetleri azaltır. Süreç girdilerine odaklanan LPA kontrol listeleri ilk seferde kalitenin elde edilmesine yardımcı olacaktır. LPA'lar, operatörler ve ön saflardaki denetçiler için işlerin tasarlandığı gibi gittiğini doğrulamayı amaçlar. Eğer işler doğru gitmiyorsa; denetimler, bulguların (uygunsuzlukların) yerinde düzeltilmesine rehberlik eder. LPA'lar ayrıca üst yönetimlerin saha faaliyetlerine sistematik olarak daha aşina olmasını ve yönetim ile atölye personeli arasında bir ilişki kurmasını sağlar. İyi yürütülen bir LPA, yönetimin fabrika katındaki varlığını olağan hale getirir. Yönetim, operatörlerin endişelerini anlamak için rutin olarak zaman ayırdığında, operatörler iyileştirme için gönüllü önerilerde bulunmaya ve potansiyel olarak zararlı durumları sorgulamaya daha istekli hale gelir. Bu nedenle LPA'lar insanlar ve operasyonlar üzerinde bu kadar önemli bir etki yaratabilir. (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007). Bu nedenle; aşağıdaki konular hakkında denetlenenlerin bilgilendirilmesi ve eğitilmesi gerekir. Bunlar:

- LPA denetiminin yapılma amacı.
- LPA'nın önemi.
- LPA'nın çalışanlara getirdiği yararlar.
- LPA'nın firmaya getirdiği yararlar.

Denetim Sorularının Hazırlanması ve Denetimlerin Gerçekleştirilmesi

LPA soruları spesifik gereksinimleri karşılayacak şekilde hazırlanmalıdır. Denetimler, tamamlanması yaklaşık on dakika süren bir dizi '*Evet*' veya '*Hayır*' sorusuyla kısa ve hızlı olmalıdır. İlgilenilen prosesle ilgili hazırlanan soruların basit olmaları, diğer departmanlardan olanlar da dahil olmak üzere, süreç ayrıntılarına aşina olmayan kişiler tarafından erişilebilir olmalarını sağlar. İşlevler arası (çapraz fonksiyonel ekip) bir LPA ekibi, aşağıdakiler gibi öğelere dayalı olarak denetim sorularını tanımlar ve günceller (Stoop, 2017):

- Geçmişteki kalite sorunları veya kusurları ve bunun sonucunda ortaya çıkan düzeltici faaliyetler.
- Süreç hata türleri ve etki analiz (P-FMEA) çalışma raporları.

- Ürün kalitesi ve/veya müşteri memnuniyeti için kritik olan prosedürler.

Örnek bir denetim soru listesi Tablo 2.8.1'de gösterilmiştir (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007).

Tablo 2.8.1. Örnek LPA Soru Listesi

LPA Soruları	Evet	Hayır	Yorumlar
Uygun olmayan ürünler uygun ürünlerden ayrılmış mı?			
Tapa çıkarıldığında pres duruyor mu? (*Hata önleme doğrulması*)			
Makine ayarları, kurulum sayfasında belirtilenlerle tutarlı mı?			
Çalışanlar uygun kişisel koruyucu ekipman (*koruyucu gözlük, ayakkabı ve kulak tıkacı)* kullanıyor mu?			
Çalışma alanındaki tüm ürünler bir parça numarası ve üretim durumu ile tanımlanıyor mu?			
Parça geçer geçmez mastarı kullandığında spesifikasyonu karşılıyor mu?			

Denetim sorularının hazırlanmasını takiben; denetim seviyelerinin belirlenmelidir. Bunun için öncelikli olarak firmanın kurumsal yapısına ve kalite kültürüne bağlı olarak ilgili yönetim kademelerinden oluşan bir denetim planı oluşturulmalıdır. Bu plan tamamen firmanın kendine özgü bir şekilde yapılandırılmalıdır. Örnek bir denetim seviyelendirmeleri sırasıyla Tablo 2.8.2'de gösterilmiştir (Stoop, 2017).

Tablo 2.8.2. Örnek Denetim Kademe Listesi

Denetim Seviyesi	Sorumlu	Denetim Sıklığı
Seviye	Takım liderleri ve supervizörler	Günlük
Seviye	Orta kademe yönetim	Haftalık
Seviye	Saha liderleri ve yöneticileri	Aylık veya üç aylık

Bir başka örnek olarak Tablo 2.8.3'de DaimlerChrysler'in tedarikçileri tarafından sıklıkla kullanılan denetim seviyelerini ve frekanslarını gösteren örnek LPA denetim planı görülmektedir.

Tablo 2.8.3. DaimlerChryesler Tedarikçilerin Kullandığı Denetim Plan Örneği

Denetim Seviyesi	Örnek	Denetim Sıklığı
Seviye	Supervisor	Her gün vardiya başına bir defa
Seviye	Alan yöneticisi	Haftada iki defa
Seviye	Şube (Fabrika) Müdürü	Haftada bir defa

Denetim sıklığı ve katmanları kuruluşun büyüklüğüne bağlı olarak belirlenmelidir. Örneğin, otomotiv endüstrisinin büyük oyuncularından biri olan PSA Gropu; vardiya yöneticileri tarafından tüm vardiyalarda günlük denetimler yapılmasını önermekte ve taşeron ve tedarikçileri de dahil olmak üzere LPA denetimlerinin gerçekleştirilmesini talep etmektedir. Haftalık projeler, destek departmanları (kalite, bakım, mühendislik) tarafından ve belirlenen üretim alan yöneticileri tarafından yönetilmelidir. Denetimin amacı, diğer seviyelerin yanı sıra, aşağıdaki katmanın, yani vardiya yöneticilerinin faaliyetlerinin performansını doğrulamaktır. Aylık veya üç aylık LPA'lar, denetim sırasında düzeltici eylemleri dikkate alarak aşağıdaki katmandan elde edilen sonuçları gözden geçirmeye odaklanması gereken fabrika müdürü dahil fabrika yönetimi tarafından gerçekleştirilmelidir (PSA, 2013).

Firma çapında kapsamlı bir LPA denetimi gerçekleştirmeden önce; firmada dar boğaza ya da kalite problemine neden olan bir süreç belirlenmelidir. Öncelikle pilot bir alanda/süreçte LPA denetimi uygulanmalı ve sonuçlar değerlendirilmelidir. İhtiyaç duyulması durumunda; soru listesi güncellenmeli ve denetim seviyeleri gözden geçirilmelidir.

Denetimlerin gerçekleştirilmesi denetim takvimi çerçevesinde şeffaf bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Denetleyen ve denetlenen denetim takvimini görebilmesi bir LPA kültürünün oluşturulmasında önemlidir.

Denetim sonuçları kaydedilerek belirlenen periyot çerçevesinde ilgili bölüm, birim ya da şubede paylaşılması LPA'nın anlaşılması ve bir

firma kültürü olarak yerini almasını kolaylaştıracaktır. Sonuçların ilgili alanlarda paylaşılıyor olması firmanın diğer alanlarında yaygınlaştırılması açısından önem taşımaktadır.

LPA denetimi esnasında bir uygunsuzlukla karşılaşıldığında zaman kaybetmeksizin bu uygunsuzluğun giderilmesi gerekir.

LPA Uygulanın Önündeki Engeller ve Zorluklar

Birçok firma LPA uygulamalarının faydalarını yaşamaktadır. Ancak; çoğu kâğıt ya da elektronik tablo tabanlı izleme sistemlerinin verimsizliği dolayısıyla uygulamada birtakım engellerle karşılaşmaktadırlar. Karşılaşılan yaygın engellerden bazıları aşağıda belirtilmiştir. Bunlar (Stoop, 2017):

- **Yetersiz Planlama**: Belirli bir tesisin LPA gereksinimlerini karşılamak için yılda 1.000'den fazla denetim yapması gerekebilir. Şirketler genellikle denetimleri planlamak ve programlamak için tam zamanlı kaynaklar ayırmaya ihtiyaç duyarlar.
- **Düşük Denetim Tamamlama Oranları**: Kuruluşlar genellikle gerekli olan yoğun denetim sıklığına ayak uydurmak için mücadele eder. Bazı şirketler, planlanmış denetimlerin yalnızca %10'unu tamamladığını bildirmiştir.
- **Veri Bütünlüğü Sorunları**: Eğer denetimciler kontrol listelerinde yer alan sorulara seri bir şekilde '*Evet*' olarak işaretleyip geçiyorsa; bu LPA denetim sonuçlarından anlamlı veri elde etmek imkânsız hale gelmektedir. Bunun nedeni; özellikle matbu form ya da kağıt üzerine çıktısı alınmış denetim kontrol listelerinde denetimi kimin yaptığı ile ilgili bilgi noksanlığından kaynaklanmaktadır.
- **Analitik darboğazlar**: Denetimlerin gerçekleştirilmesi esnasında verilerin manuel olarak girilmesi ve bu verilerin analizi zaman alabilmesi LPA önündeki en önemli dar boğazlardan biri olarak durmaktadır. Bu durum; LPA verilerinin görüntülenmesinde haftalar veya daha uzun gecikmelere neden olabilir. Sorunların tespit edilememesi ya da geç teslim edilmesi sonucu; müşterile-

re büyük miktarlarda kusurlu ürün teslim edilebilmesine neden olabildiğinden, firmalar için risk teşkil etmektedir.

- **Eski kontrol listeleri**: Değişen riskleri ve öğrenilen dersleri hesaba katmak için kontrol listesi sorularında sürekli güncellemeler yapmak gerekmektedir. Bunun için değişiklik yönetimiyle kontrol edilen bir dokümantasyon sistemine sahip olmak ve güncel LPA soru listesinin kullanımda olmasını sağlamak önemlidir.

LPA projelerinin önündeki bir diğer problem; LPA'ların sadece bazı kutuları işaretlemek olarak algılamasıdır. Oysa ki; müşteriler için önemli olan, sürekli iyileştirme sağlamak için LPA'ları kullanılıp kullanmadığı ve bunu kanıtlayacak belgelere sahip olunup olunmadığıdır. Bu nedenle; bir müşteri denetiminde işlenmemiş veriler içeren bir yığın kontrol listesi ile karşılaşılması durumunda bu iyi görünmeyecektir. Bir başka problemde; denetçiler ve yöneticiler çok meşgul olduklarında ya da geri bildirim vermede ve işi doğrulamada dikkatleri dağıldığında potansiyel olarak bazı olumsuz sonuçlar doğurabilir. Bu sonuçlar maliyetlidir. Çünkü (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007):

- Herhangi bir düzeltme yapılmaksızın gerçekleştirilen işlerde hata ve eksiklikler meydana gelebilir.
- Kötü alışkanlıklar gelişerek fiili olarak standart haline gelebilir.
- Çalışanlar, performansları hakkında uzun süre geri bildirim almadıklarında hayal kırıklığına uğrayabilir ve motivasyonlarını kaybedebilirler.

Başarılı LPA Uygulamaları İçin Önemli Noktalar ve Otomasyon

Kâğıt tabanlı veya LPA takibi ile başlayan şirketler için yüksek sıklıkta denetimlere ayak uydurmak, otomatik bir sisteme geçişi gerektirebilir. Bunun için yazılım ya da otomatik sistemler kullanılabilir. Projelerde LPA yazılımı kullanmanın en büyük avantajlarından biri; her büyüklükteki şirketin sınırlı kaynaklarla bile hızlı sonuç üretmesine izin vermesidir.

Otomotiv Endüstrisi Aksiyon Grubu (AIAG) yayınlamış olduğu '*CQI-8 Katmanlı Süreç Denetimleri Kılavuzu*' etrafında oluşturulmuş oto-

matikleştirilmiş LPA yazılımı, kuruluşların şunları yapmasına olanak tanımaktadır (AIAG, 2005):

- **İdari Yükün Azaltılması:** Şirketler, insanların işten uzakta olduğu zamanları hesaba katarak 50 kişi için on dakikadan daha kısa sürede denetimler planlar. E-posta hatırlatıcıları, elektronik kontrol listelerine doğrudan bağlantılarla otomatik olarak çıkar. Büyük tesisler için bile bu durum LPA planlaması için idari genel giderlerde %85-90'lık bir azalma anlamına gelir.
- **Kaynak Verimliliğinin Arttırılması**: Tesisin büyüklüğüne bağlı olarak, iki tam zamanlı çalışanı stratejik değer yaratan katma değerli faaliyetlere yeniden tahsis edebilmek yaygın bir durumdur.
- **Verilere Anında Görünürlük Elde Edilmesi:** Akıllı telefonlar ya da tabletler aracılığıyla yapılan mobil denetimler, denetim verilerinin hemen kullanılabilir hale gelmesine olanak tanır. Bu da kusurları ve kalite maliyetlerini azaltmak için sorunların daha hızlı saptanmasına yardımcı olur. Bununla birlikte; tahmine dayalı kalite göstergelerini bilgilendirmeye yardımcı olur**.**
- **Denetim Tamamlama Oranlarının Arttırılması**: Gerçek zamanlı gösterge panoları, kuruluşların LPA sonuçlarını iletmesine olanak tanımaktadır. Departmanların denetimleri tamamlama oranları ve diğer metrikler üzerinde rekabet ettiğini ve kaliteyi artırmak için sağlıklı rekabeti serbest bıraktığını görmek yaygındır.
- **Veri Bütünlüğünün Korunması**: Soruların rastgele seçilmesi ve fotoğraf talep etme yeteneği, insanların denetimleri kurşun kalemle yapmasını zorlaştırıyor. Denetim süresini içeren zaman damgalı kayıtlar, bireylerin bu tür davranışlarda bulunup bulunmadığını belirlemeye de yardımcı olur.
- **Kontrol Listelerini Hassaslaştırılması**: Kontrol listelerinde yapılacak kolay güncellemeler; artık ihtiyaç duyulmayan soruların kaldırılmasına ve yeni soruların eklenmesine olanak tanır. LPA'lara yönelik bu çevik yaklaşım, sürekli iyileştirmenin önemli bir bileşenidir.

Şirketler, denetimleri kolaylaştırmanın yanı sıra otomatikleştirilmiş yazılımlarla daha hızlı ve daha basit bir LPA uygulaması hayata geçi-

rebilirler. Kağıt tabanlı sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması aylar alırken, kullanıma hazır yazılım tabanlı bir LPA programı birkaç hafta kadar kısa sürebilir.

LPA Sonuçlarının Paylaşılması ve Diğer Alanlara Yaygınlaştırılması

Denetim tamamlandıktan sonra, rapor edilen uygunsuzluklar otomatik olarak LPA denetimlerinin açık noktaları listesine girilir. Günlük (Örneğin; Sabah toplantılarında) yeni uygunsuzluklar gözden geçirilir ve düzeltici faaliyetler tanımlanır, sorumlu bir kişi seçilir ve eylemin termin tarihi belirlenir. Bir sonraki adım, önceden planlanmış olan eylemlerin zamanlamasını gözden geçirmektir. Bu sistem, katmanlı denetimin kağıt versiyonunda olabileceği gibi, rapor edilen uygunsuzlukların göz ardı edilmeyeceğini garanti eder (Wierzbic & Szewczyk, 2019).

LPA çalışmalarının yaygınlaştırılması pilot çalışmanın başarısına bağlıdır. Öncelikle pilot çalışmada sonuçlar analiz edilerek; varsa iyileştirilmesi gereken noktalar ya da gelişmeye açık noktalar üzerine odaklanmalı ve düzeltilmelidir. Başarılı sonuçların gelmesi ve doğrulanmasını takiben LPA'lar diğer alanlara da yaygınlaştırılabilir.

LPA, Yalın Yönetim felsefesinin bir aracı ve Kalite Yönetim Sistemlerince talep edilmesi nedeniyle firmalarca uygulanmalıdır. LPA firmada yaygınlaştırılmalıdır çünkü firma kültürünün bir parçası olarak kalite bilincinin artmasına ve Yalın Felsefesinin bir aracı olarak Yalın Düşüncenin firmada yerleşmesi için önemlidir.

LPA'ların firmada yaygınlaştırılması esasen her kesin işi olmakla birlikte yayılım çalışmalarında liderliği; Yalın Yönetim ve/veya Kalite bölümleri tarafından yürütülüyor olması başarı olasılığını arttıracaktır.

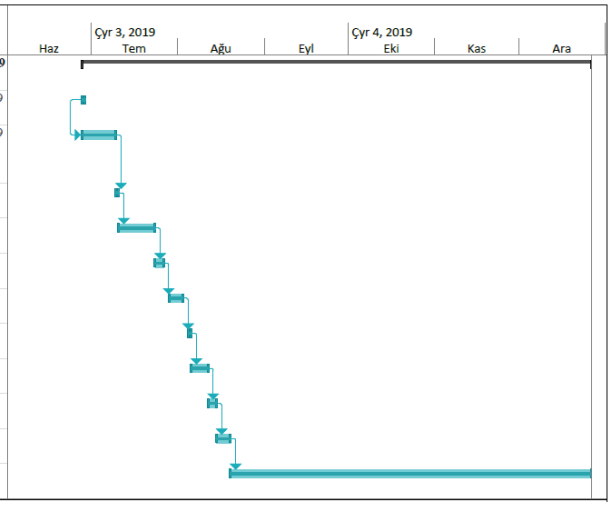
UYGULAMA

Uygulama çalışması havacılık endüstrisinde küresel ölçekte faaliyet göstermekte olan ve bu çalışmada ABC olarak adlandırılacak olan çok uluslu bir aktörde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle; bu çalışmada firma ve proje ile ilgili bazı bilgiler gösterilmemiştir.

LPA Sisteminin Kurulma Aşamaları

Tüm Yalın Dönüşüm projelerinde ve kalite çalışmalarında olduğu üzere öncelikle sistemin kurulması üzerine çalışılması gerekir. Bu çerçevede bir proje planının oluşturulması önemlidir. ABC firması öncelikli olarak Kalite Yönetim Sistemlerinin ve Yalın Yönetiminin bir gereği olarak öncelikle LPA sistemi kurmak üzere Microsoft Project yazılımı üzerinden bir proje planını Gant Şeması olarak hazırlanmıştır. Bu proje planı Şekil 3.1.1'de gösterilmiştir.

Kimlik	Task Name	Süre	Başlangıç
1	**LPA Denetim Sisteminin Kurulması**	**130 gü**	**Cum 28.06.19**
2	LPA Takımının oluşturulması	1 gün	Cum 28.06.19
3	LPA uygulamaya nereden başlanacağının belirlenmesi	8 gün	Cum 28.06.19
4	**Açılış toplantısı**	**1 gün**	**Çar 10.07.19**
5	Kritik sürecin belirlenmesi	9 gün	Per 11.07.19
6	Yüksek risk konularının belirlenmesi	3 gün	Çar 24.07.19
7	LPA kontrol listesinin oluşturulması	5 gün	Pzt 29.07.19
8	Denetimcilerin eğitilmesi	1 gün	Pzt 5.08.19
9	İş gücü ile iletişim kurulması ve eğitilmesi	5 gün	Sal 6.08.19
10	Denetimlerin başlaması	3 gün	Pzt 12.08.19
11	LPA sonuçlarının paylaşılması	3 gün	Per 15.08.19
12	LPA'nın diğer bölümlere yaygınlaştırılması	93 gün	Sal 20.08.19



Şekil 3.1.1. LPA'nın ABC Firmasında Tesis Edilme Proje Planı

ABC firması bu proje planı kapsamında LPA'nın şirket içinde tesisi için çalışmalarını yürüterek gerekli aksiyonları almaya başlamıştır. Bir aksiyon takip listesi hazırlayarak belirlenen faaliyetlerin takibini gerçekleştirmiştir.

LPA Takımının Kurulması

LPA proje planına istinaden ABC firması LPA çalışmalarını yürütecek ekibi oluşturmak için bir toplantı gerçekleştirmiştir. Bu toplantıda

- Takımda hangi fonksiyonlar yer almalı ve
- Takımda kimler görev almalı

sorularını görüşmüştür. Bu toplantının sonucunda takımın gönüllülük esasına dayalı olarak LPA projesinde yer almak isteyen çalışanlar arasından çapraz fonksiyonel olarak oluşturulmasına karar verilmiştir. Tablo 3.2.1'de takımda yer alan üyeler ve fonksiyonları gösterilmiştir.

Tablo 3.2.1. LPA Takım Üyeleri

Pozisyon	Name	Fonksiyon
LPA Lideri	AKL	Yalın Yönetim
Takım Üyesi	ML	Kalite Güvence
Takım Üyesi	TB	Kalite Kontrol
Takım Üyesi	AS	Üretim
Takım Üyesi	CM	Üretim
Takım Üyesi	YK	Teknik Hizmetler
Takım Üyesi	HM	Kalite Güvence
LPA Süreç Sahibi	ZL	Sürekli İyileştirme

LPA Çalışmasına Nereden Başlanılmalı ve Kritik Prosesin Belirlenmesi

Takımın oluşturulmasıyla birlikte; LPA ekibi projeye hangi noktadan başlanması gerektiği üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bunun için öncelikli olarak şirketteki darboğazların ve kalite problemlerinin belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen Pareto Analizi çalışmaları sonucunda en önemli problemleri ve üretim alanındaki dar boğazlar belirlenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda boru büküm sürecinde kısaca SR7 olarak adlandırılan boru büküm makinasındaki problemlerin Pareto Analizinde ön sıralarda yer aldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle; LPA projesinin bu makinadan başlanılması kararlaştırılmıştır.

LPA Soru Listesinin Oluşturulması

ABC firmasının LPA çalışmasına hangi alandan başlanılacağına karar verilmesine istinaden denetim sorularını hazırlamaya başlamıştır.

LPA'nın uygulandığı alanda amaç kişileri sınamak değil süreci optimize etme amacını taşıdığından; 12 sorudan oluşan ve mümkün olduğunca kısa, anlaşılır ve cevaplaması kolay sorular oluşturmuştur. Tablo 3.4.1'de denetim soruları yer almaktadır.

Tablo 3.4.1. LPA Denetim Soruları

Konu	Soru	Alana Özel Soru	N/A	Evet	Hayır	Tespitler
6S[2]	1	Alanda bir tehlike durumu olduğunda (iş kazası, yangın, deprem, vb.) operatör alınacak aksiyonlar konusunda gerekli bilgiye (toplanma alanı, ilk yardım ekibi, vb.) sahip mi?				
	2	Bölümünüzle ilgili 6S aksiyonlarını hakkında bilginiz var mı? Nereden takip ediyorsunuz?				
Çizim	3	İş emiri ve çizimdeki indeks kontrolü yapılıyor mu?				

2 Bir Yalın Yönetim aracı olan ve İngilizce; Sort (ayıklama), Set-in-order (düzenleme), Shine (temizleme), Standardize (standartlaştırma), Sustain (süreklilik) ve Safety (güvenlik) kelimelerinin baş harflerinden oluşan çalışma alanlarındaki tertip ve düzeni sağlamada kullanılan yönteme verilen addır.

Standart Operasyon Prosesleri	4	Kullanmakta olduğunuz standart veya iş talimatı nerede? Operatör, çalışma talimatlarının her bir adımını gösterebilir veya açıklayabilir mi?
	5	İşleminizi gerçekleştirmek için ihtiyacınız olan her şeye (takım, ölçü aleti, vb.) sahip misiniz?
Ürün Koruma	6	Prosesinizde hata önleyici faaliyetler (Poka Yoke, vb.) kullanılıyor mu?
	7	Operatör hatalı bir durumla karşılaştığında ve ya hata yaptığında uygulayacağı aksiyonları biliyor mu?
Süreç	8	Üretim sırasında kalite bazlı kontroller uygulanıyor mu?
Eğitim	9	Alanda düzenli eğitimler (tek nokta eğitimleri vb.) yapılmakta mıdır?

TPM[3]	10	Tüm alet ve ekipmanlar düzgün çalışıyor mu?
	11	Çalışma alanında otonom bakım faaliyetleri uygulanıyor mu?
Kalite	12	Operatörler güncel müşteri şikayetleri hakkında güncel bilgiye sahip mi?

LPA Denetim Planının Oluşturulması

Denetim sorularının hazırlanmasıyla birlikte ekip yönetim seviyelerine göre LPA denetim frekansını belirlemiştir. Tablo 3.5.1'de LPA denetim frekansı görülmektedir.

Tablo 3.5.1. LPA Denetim Frekansları

Pozisyon	Denetim Periyodu
Takım Lideri	Haftada 1
Usta Başı	İki haftada 1
Üretim Müdürü	Ayda 1
Üretim Koordinatörü	İki ayda 1
Fabrika Müdürü	Altı ayda 1

Ayrıca; LPA denetimlerinin başlamasıyla birlikte ABC firması yıl sonuna kadar yönetim seviyeleri bazında gerçekleştirilecek denetimleri de bir tablo haline getirerek tüm çalışanlarla paylaşmıştır. Bu detaylı denetim planı Tablo 3.5.2'de gösterilmiştir.

3 İngilizce; Total Productive Maintenance (Toplam Üretken/Verimli Bakım) kelimelerinin baş harflerinden oluşan Yalın Yönetim aracıdır.

Tablo 3.5.2. Yönetim Seviyeleri Bazında Yıllık Denetim Planı

Ay	LPA Denetim Planı (SR7)					
	Hafta	Takım Lideri	Usta Başı	Müdür	Direktör	Fabrika Müdürü
Eylül	CW 38	16.09.2019 2. Vardiya	18.09.2019 3.Vardiya			
	CW 39	23.09.2019 2. Vardiya		25.09.2019		
Ekim	CW 40	30.09.2019 2. Vardiya	02.10.2019 3.Vardiya			
	CW 41	07.10.2019 2. Vardiya			10.10.2019	
	CW 42	14.10.2019 2. Vardiya	16.10.2019 3.Vardiya			
	CW 43	21.10.2019 2. Vardiya		23.10.2019		
	CW 44	30.10.2019 2. Vardiya	31.10.2019 3.Vardiya			
Kasım	CW 45	04.11.2019 2. Vardiya				8.11.2019
	CW 46	11.11.2019 2. Vardiya	13.11.2019 3.Vardiya			
	CW 47	18.11.2019 2. Vardiya		20.11.2019		
	CW 48	25.11.2019 2. Vardiya	27.11.2019 3.Vardiya			
Aralık	CW 49	02.12.2019 2. Vardiya			5.12.2019	
	CW 50	09.12.2019 2. Vardiya	11.12.2019 3.Vardiya			
	CW 51	16.12.2019 2. Vardiya		18.12.2019		
	CW 52	23.12.2019 2. Vardiya	25.12.2019 3.Vardiya			

LPA Denetimcilerinin ve İş Gücünün Eğitilmesi

Denetim planının oluşturulmasını takiben denetim konusunda LPA ekip üyelerinin ve iş gücünün eğitilmesi aşamasına geçilmiştir. Öncelikle olarak LPA denetçileri aşağıda belirtilen konularda eğitilmişlerdir. Bunlar:

- LPA'nın amacı
- LPA'nın önemi
- Denetimin kapsamı
- Denetimde dikkat edilmesi gereken noktalar

- Denetimlerin gerçekleştirilme periyodu

LPA denetçilerin eğitilmesiyle birlikte öncelikle SR7 makinasında görev alan personelin eğitilmesi ve bilgilendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda iş gücü ile iletişim kurulması ve eğitilmesi aşağıdaki konular üzerinden yürütülmüştür. Bunlar:

- LPA denetiminin yapılma amacı
- LPA'nın önemi
- LPA'nın çalışanlara getirdiği yararlar
- LPA'nın firmaya getirdiği yararlar

Gerçekleştirilen tüm bu eğitimler; kayıt altına alınarak dijital ortama aktarılmıştır. Böylece; eğitim veriminin izlenebilirliği için bir alt yapı oluşturulmuştur.

LPA Denetimcilerinin Gerçekleştirilmesi

ABC firmasında denetimler yönetim seviyelerine göre Tablo 3.5.2'de belirtilmiş olduğu üzere gerçekleştirilmeye başlanmıştır. İlgili yönetim seviyesi SR7 makinasında görevli personele önceden hazırlanan LPA soru listesi ile denetimi gerçekleştirmektedir. Denetlenen personel 'Evet', 'Hayır' ve bu konuyla ilgili olarak fikri olmadığında 'N/A'a kısmını işaretlemektedir. On iki soru üzerinden verilen '*evet*' cevapları toplam soru sayısına bölünerek o günkü denetim puanı hesaplanmaktadır. Örneğin; 12 sorudan 9'una 'evet' cevabı alındıysa $Denetim\ Puanı = {}^{9}/_{12} * 100 = \%75$ olarak elde edilmektedir. Gerçekleştirilen bu denetimde 3 adet sorudan '*hayır*' yanıtı alındığından bu sorularla ilgili olarak acil aksiyon alınması gerekmektedir. Bu aksiyonları takip etmek için Tablo 3.7.1'de yer alan aksiyon listesine kaydedilmekte ve bu konularla ilgili olarak iyileştirilme çalışması yapılması talep edilmektedir.

Tablo 3.7.1. LPA Aksiyon Listesi

LPA Denetim Aksiyon Listesi

Proje Adı:	LPA
Firma:	ABC
Proje Lideri:	AKL
Proje Alanı:	SR7

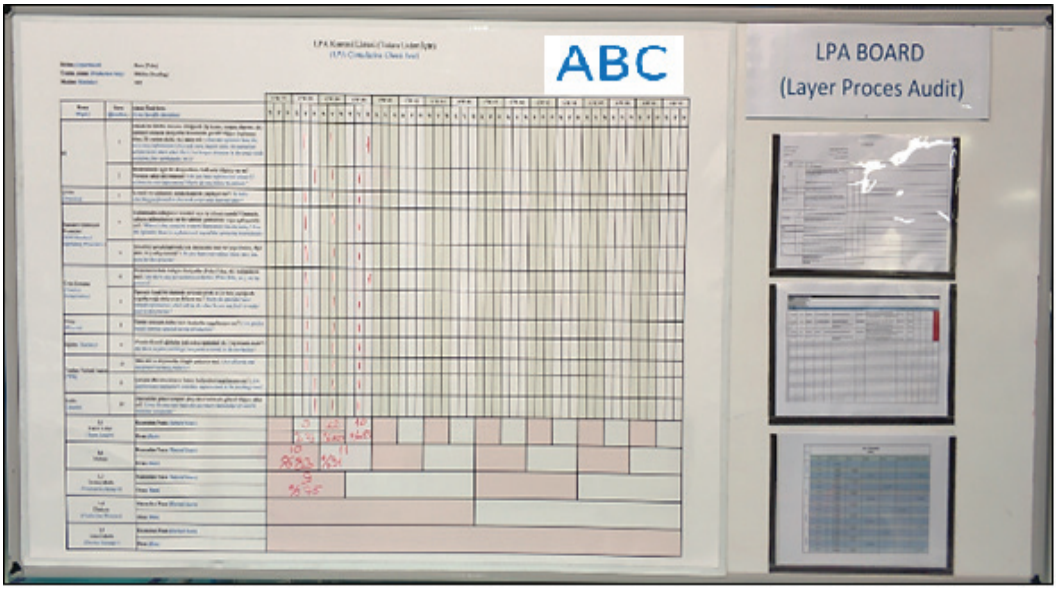
No	Denetim Tarihi	Bölüm	Alt Bölüm	Denetim Seviyesi	Denetçi	Tespit	Denetlenen	Aksiyon	Sorumlu	Termin	Eskelasyon	Eskelasyon Tarihi	Kapanma Tarihi	Durum
1	18.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L1 - Takım Lideri	BHK	Bölümle ilgili 6S aksiyonları bilinmiyor	HK	**19.09.2019:** 6S aksiyonları tüm şirket ile e-posta aracılığıyla gönderilmekte, KPI panolarında ve S-QDC panolarında asılmaktadır. Vardiya değişim toplantılarında takım liderleri ve meister'ler tarafından konuyla ilgili olarak bilgilendirme eğitimi düzenlenecektir.	EK	20.09.2019			27.09.2019	Closed
2	18.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L1 - Takım Lideri	BHK	Alanda otonom bakım talimatı yok	HK	**19.09.2019:** Otonom bakım talimatı oluşturularak, personele bilgilendirme eğitimi verilecek. 27.09.2019: Otonom talimatı ile ilgili olarak bilgilendirme eğitimi Maister tarafından 1589 nolu kayıt altında yapılmıştır.	BEU	30.09.2019			27.09.2019	Closed
3	18.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L1 - Takım Lideri	BHK	Operatörlerin güncel müşteri şikayetleriyle ilgili bilgisi bulunmuyor.	HK	**19.09.2019:** Meisterler ve takım liderleri tarafından S-QDC panolarında yer alan müşteri şikayet grafikleri ve diğer bilgileri S-QDC toplantılarında tek nokta eğitimi olarak anlatılacak. 27.09.2019: S-QDC Panolarındaki müşteri şikayetleri ile ilgili tüm büküm personeline tek nokta eğitimi verilmiştir. Eğitim no: 1587	EK	30.09.2019			27.09.2019	Closed
4	19.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L2 - Ustabaşı	VV	6S bilgilendirmeleri artırılması gerekiyor.	AA	**20.09.2019:** 6S aksiyonları tüm şirket ile e-posta aracılığıyla gönderilmekte, KPI panolarında ve S-QDC panolarında asılmaktadır. Vardiya değişim toplantılarında takım liderleri ve meister'ler tarafından konuyla ilgili olarak bilgilendirme eğitimi düzenlenecektir. 27.09.2019: 6S Aksiyonları ile ilgili bilgilendirme eğitimi 1588 nolu kod ile yapılmıştır.	EK	30.09.2019			27.09.2019	Closed
5	19.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L2 - Ustabaşı	VV	Operatörlerin güncel müşteri şikayetleriyle ilgili bilgisi bulunmuyor.	AA	**20.09.2019:** Meisterler ve takım liderleri tarafından S-QDC panolarında yer alan müşteri şikayet grafikleri ve diğer bilgileri S-QDC toplantılarında tek nokta eğitimi olarak anlatılacak. 27.09.2019: S-QDC Panolarındaki müşteri şikayetleri ile ilgili tüm büküm personeline tek nokta eğitimi verilmiştir. Eğitim no: 1587	EK	30.09.2019			27.09.2019	Closed
6	25.09.2019	Boru Üretim	SR7 bükme makinası	L3 - Üretim Müdürü	EK	Operatörlerin tehlike durumunda alınacak aksiyonlar hakkında bilgisi bulunmuyor.	Vİ	**25.09.2019:** İSG tarafından Alanda bir tehlike durumu olduğunda (iş kazası, yangın, deprem, vb.) operatör alınacak aksiyonlar konusunda bilgilendirme eğitimi verilmesi gerekiyor. 24.10.2019: Tek nokta eğitimleri verilerek tamamlandı.	EKA	28.10.2019				Closed

Firma eskalasyon sistemini uyguladığından; termin tarihinde sonuçlandırılmayan aksiyonlar bir üst amire eskale edilmekte ve işlemlerin takibi LPA ekibi tarafından yapılmaktadır.

LPA Denetim Sonuçlarının Paylaşılması ve LPA'nın Yaygınlaştırılması

İlgili yönetim seviyesi tarafından gerçekleştirilen denetimler aynı gün içinde ya da en geç bir iş günü içinde LPA Prosedüründe belirtilmiş olduğu üzere ilgili bölüm, alan ya a makine çalışanlarıyla paylaşılmak-

tadır. Ayrıca; Şekil 3.8.1'de görüldüğü üzere LPA'nın gerçekleştirilmiş olduğu alanda LPA panolarında paylaşılmaktadır.



Şekil 3.8.1. LPA Panosu

LPA panosunda tüm denetim seviyeleri ve bu seviyelerin gerçekleştirmiş oldukları denetim tespitleri, skorları yer almakla birlikte aynı zamanda yıllık denetim planı ve aksiyon listeleri de bulunmaktadır.

Süreçteki dar boğaz ya da kalite problemlerinin hedeflenen seviyeye gelmesiyle bu alanda gerçekleştirilen LPA çalışması sonuçlandırılmakta ve LPA ekibi tarafından bir proje sunumu hazırlanarak tüm şirkette sunulmaktadır. Ayrıca; proje sunumları tüm personele e-posta yoluyla iletilmekte ve kullanılan işletim sistemine yüklenerek dileyen herkesin projeyi ulaşmasına imkân vermektedir.

SONUÇ

LPA uygulamak isteyen firmalar; LPA'lar hakkında bilmesi gereken en önemli konulardan biri denetim verileri üzerindeki döngünün gerçekleştirilmesidir. Bunun anlamı:

- Küçük uygunsuzlukların yerinde ele alınması

- Daha büyük sorunları resmi bir düzeltici eylem sürecine taşıması (Kaizen, Altı Sigma, 8D, vb.)
- Kazancın doğrulanması ve denetim sorularının güncellenmesi

Çok fazla şirket; özellikle de LPA'ların ayrıntılarından bunalan firmalar yaşadıkları kalite sorunları nedeniyle maliyetleri artırmaya devam ederken; denetim verilerinin analiz edilmeden ve gerekli aksiyonlar alınmadan ortada kalmasına izin vermekteler. Sorunları göz ardı etmek yalnızca tüketici güvenliği risklerini artırmakla kalmaz aynı zamanda işin kendisini de tehlikeye atar. Bunu önlemek için otomasyonlar üzerinden LPA denetimlerin gerçekleştirilmesi firmaların ilerlemelerine yardımcı olacaktır. Böylece sorunlara daha az zaman ve kaynak ayırırlar ancak ufuktaki büyük, vizyoner hedeflere daha fazla odaklanabilirler (Stoop, 2017).

Özetlemek gerekirse; denetim hedefleri, sistemin inşa edildiği yönetim temelinde ve uygulanan sistemin unsurlarının referans standardın belirtilen gereksinimleriyle uyumluluğunun teyidi veya uygunsuzluğunun belirlenmesi olarak tanımlanır. Denetimlerin sonuçları ayrıca uygulanan sistemin kalite hedeflerine ulaşmadaki etkinliğini belirlemeye, kuruluştaki tehditlerin tespit edilmesine ve sonuç olarak sürecin veya tüm sistemin iyileştirilmesine yönelik talimatların belirlenmesine olanak tanır. Denetimlerin yapılmasının bir diğer nedeni de yürürlükteki yasal düzenlemelerin, sektör standartlarının, müşteri gereksinimlerinin, vb. gerekliliklerini yerine getirmek ve sertifikasyon için sistem hazırlık derecesini değerlendirmektir (Fedus, 2017) ve Yalın Felsefesinin şirkette özümsenmesine neden olur.

LPA, bir iş sürecini yönetmeye ve o sürecin rotadan çıkmasını engellemeye yardımcı olan bir araçtır. Tutarlı bir şekilde gerçekleştirilen bir süreç;

- İstikrarlı bir ürün oluşturur,
- Maliyeti düşürür ve
- Üretken çalışma süresini artırır.

LPA'ların düzgün bir şekilde uygulanmasından sonraki birkaç ay içinde

- Müşteri memnuniyetinde,
- Onarım ve yeniden işleme maliyetlerinde,
- Üretkenlikte,
- Güvenlikte ve
- Hatta çalışanların moral seviyelerinde

İyileştirmeler görülebilir (Sittsamer, Oxley, & O'Hara, 2007). Tüm bu avantajları dolayısıyla IATF 16949 Kalite Yönetim Sisteminde, ISO 9001 Kalite Yönetim sisteminde firmalarca uygulanması istenilmekte ve Yalın Yönetimin vazgeçilmez bir aracı olarak yer almaktadır. Bu nedenle; LPA, birçok endüstride ve firmada aktif bir şekilde kullanılmaktadır.

KAYNAKÇA

AIAG. (2005). *CQI-8 Layered Process Audit Guideline.* Southfield: Automite Industry Action Groups.

AIAG. (2014). *CQI-8 Layered Process Audit Guideline* (2 b.). Southfield: Automotive Industry Action Group.

Bosch. (2014). *CQI Assessment – LPA, materiały szkoleniowe CC/QMM.*

Burk, J. A., & Sprague, A. (2017). Layered Safety Process Audits. *ProfessionalSafety, 2017*(November), 18-19. www.asse.org adresinden alındı

Fedus, D. (2017). *Pełnomocnik ds. IATF 16949:2016.* Global: Bureau Veritas.

IATF. (2016). *IATF.* Global Oversight: International Automotive Task Force.

ISO. (2018). *ISO 19011 Guidelines for auditing management* (Cilt 2018). Geneva: International Standard Organization.

PSA. (2013). *Materiały szkoleniowe działu zakupów „LPA – Going from reactive to proactive", nr dokumentu 01601_13_00154.* Paris: PSA Groupe (Peugeot Société Anonyme).

Siarkiewicz, J. (2018). *Auditor wewnętrzny systemów ISO 14001, OHSAS 18001.* Dekra.

Sittsamer, M. J., Oxley, M. R., & O'Hara, W. (2007). Auditing Turbocharge Your Preventive Action System. *Quality Progress, Now 2007, 40*(11), 37-42. www.asq.org adresinden alındı

Stoop, E. (2017). Layered Process Audit Programs: A FastTrack Strategy for Reducing Cost Of Quality. *Quality, 2017*(November), 40-43.

VDA. (2016). *VDA 6.3 Process Audit(Quality Management in the Automotive Industry)* (3 b.). Pilsen: Verband der Automobilindustrie (VDA).

Wawak, S. (2013). Wybrane koncepcje klasyfikacji metod zarządzania jakością. *Zeszyty Naukowe, Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, 910*, 37-49.

Wierzbic, A., & Szewczyk, K. (2019). Dıgıtalızatıon of Audıt Actıons in the Industry 4.0 Era. *BUSINESS INFORMATICS, 4*(54), 74-87.

MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI, KULLANIM ALANLARI, KOROZYONU ve KOROZYONDAN KORUNMA YOLLARI

Canser GÜL[1], Sevda ALBAYRAK[2]

Öz: Magnezyum yeryüzünün Magnezyum alaşımları yüksek spesifik mukavemeti, hafifliği, insan kemik yapısına olan benzerliği ve sönümleme gibi özellikleri sayesinde akla gelen pek çok alanda tercih edilen bir alaşım haline gelmiştir. Magnezyum içerisinde barındırdığı alaşım elementine göre çok çeşitli özellikler sergileyebilen ve pek çok ticari alaşımı olan en hafif yapı malzemesidir. Çeşitli avantajlara sahip olmalarına rağmen Cl^- ve F^- iyonları içeren ortamlarda kolaylıkla korozyona uğramaları ise büyük bir dezavantajdır ve kullanımını kısıtlamaktadır. Kullanıldığı ortamda korozyona uğrayan malzeme mekanik bütünlüğünü kaybeder ve işlevini yerine getiremez. Durum böyle olunca korozyondan korunma yollarını geliştirme ihtiyacı magnezyum alaşımları için her zaman en önemli konu olmaktadır. Bu çalışmada magnezyum ve alaşımlarının genel özellikleri, kullanıldığı sektörler ve karşılaşılan problemler, korozyon türleri ve bunları önlemek için yapılan kaplama çalışmalardan bahsedilmektedir. Sonuç olarak magnezyum ve alaşımlarının göz ardı edilemeyen üstün özellikleri nedeniyle kullanımını arttırmak ve özelliklerini iyileştirmek için çalışmalar yapılmaya devam edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum ve Alaşımları, Korozyon, Koruyucu Kaplama

1 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye. canser.gul@cbu.edu.tr. 0000-0002-1339-936X (C. Gül*),

2 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. sevdatas@gazi.edu.tr. 0000-0002-1504-8061(S. Albayrak), *Sorumlu Yazar

GİRİŞ

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunlukları nedeni ile hafif metaller sınıfında yer alan ve yüksek özgül mukavemetleri nedeni ile yapısal uygulamalarda sıklıkla tercih edilen alaşımlardır. Son yıllarda biyobozunurluk özelliğinin geliştirilmesi ve insan vücudunda kullanım üzere çeşitli uygulama çalışmaları yapılması söz konusudur. Ayrıca kaplanarak bozunmanın tamamen engellenmesi ve kalıcı uygulamalarda kullanımın sağlanmasına yönelik de sürdürülen bazı çalışmalar mevcuttur.

Biyomalzeme ve yapısal uygulamalar dışında otomotiv ve havacılık uygulamalarında da kullanımı mevcut olan magnezyum alaşımları, geliştirilmeye açık ve yeni teknolojik kaplamaların uygulanması ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile gözde bir çalışma konusu haline gelen bir alaşım grubudur denilebilir.

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum alaşımları; mukavemetini arttıracak bazı alaşım elementlerini bünyesinde barındıran, uygulamalarda kullanılan diğer metallere göre daha düşük özgül ağırlıklara sahip alaşımlar olup, "hafif metaller" olarak ifade edilen gruptadır. Günümüzde başta alüminyum ve magnezyum olmak üzere hafif metallerin farklı uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmaktadır (Brandes ve Brook, 1998; Westengen, 2001; Tokunaga vd., 2020). Magnezyum elementi, ilk olarak 1808 yılında keşfedilmiş, dünyamızda fazlaca bulunan toprak alkali bir elementtir. Hekzagonal sıkı paket yapıya sahiptir ve oda sıcaklığındaki yoğunluğu 1,738 g/cm^{3}'tür (Westengen, 2001).

Magnezyumun özgül ağırlığı çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında alüminyumdan %33 ve çelikten %77 oranında daha düşüktür (Brandes ve Brook, 1998; Haghshenas, 2017; Tokunaga vd., 2020). Yoğunluğunun düşük olması magnezyuma gerçekten çok büyük bir avantaj sağlar ve yeterli mukavemete sahip olacak şekilde üretildiğinde uygulamalarda kullanılabilirlik açısından üstün olduğu görülür. Ayrıca düşük yoğunluk ve yüksek özgül dayanımının yanında magnezyum, yüksek termal iletkenliğe, iyi işlenebilirliğe sahiptir ve kolaylıkla geri dönüştürülebilir (Gray ve Luan, 2002; Kainer, 2003). Saf magnezyuma

ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Magnezyuma çeşitli ilave elementler eklenerek farklı özellik kombinasyonları elde edilebilir. Hatta çeşitli elementler ile alaşımlandırılarak kullanılması tercih edilir çünkü her element gibi magnezyum da tek başına saf bir metal olarak yeterince dayanıklı değildir. Çekme dayanımı 180 MPa ve Young modülü 45 GPa' dır. Alaşım elementleri ile birlikte kullanıldığında da mukavemette artış gözlemlenir ve yoğunluk çok da fazla değişmez. Bu durum ise Mg alaşımlarının özgül dayanımlarında da artış gözlemlenmesine ve uygulamalarda tercih edilmesine neden olur (Smith, 1994; Westengen, 2001).

Tablo 1. %99,9 Saflıkta Magnezyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Smith, 1994; Westengen, 2001)

Özellik	Mg
Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24,3 g/mol
Elektron konfigürasyonu	[Ne] $3s^2$
20 °C'deki özgül ağırlık	1,74 g/cm^3
Ergime noktası	650 °C
Kaynama gizli ısısı	46,5 cal /°C
20 °C'deki ısıl iletkenlik	0,038 cal/cm.s.°C
20 °C'deki elektriksel direnç	$4,5x10^{-6}$ μΩ.m
Elektrik iletkenliği	36,5 ohm.cm
Elastisite modülü	4570 kgf/mm^2
Çekme dayanımı	186 MPa
Young modülü	45 GPa
Kristal kafes yapısı	Hegzagonal sıkı paket
c/a oranı	1,624

Birçok element gibi magnezyum da saf halde uygulamalarda kullanım için yeterli mukavemete, korozyon ve aşınma dayanımına sahip değildir (Tokunaga vd., 2020). Uygulamalarda kullanım için bazı özel-

liklerinin geliştirilmesi gerekir. Bünyesine eklenen alaşım elementleri ile magnezyumun mekanik dayanımı arttırılabilir ve bu, magnezyumun dayanımını arttırmak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştiren ana mekanizmalar katı eriyik sertleşmesi ve çökelme sertleşmesi şeklindedir. Katı eriyik sertleşmesinde alaşım elementlerinin atom çaplarının farklılığından kaynaklı, kafes gerilmeleri ve dislokasyon hareketinin engellenmesi etkili olmaktadır. Çökelme sertleşmesinde ise alaşım elementinin düşük sıcaklıklarda magnezyum içindeki çözünürlüğü ile alakalıdır ve aşırı doymuş katı çözelti fazından zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak intermetalik bir fazın çok küçük boyutlarda ve homojen çökelmesi sonucunda malzemenin sertlik ve mukavemeti artar. Bu uygulama en yaygın Al, Mg ve Ti alaşımlarında kullanılır (Nie and Wang, 2019). Mevcut intermetalik fazın Mg içeriği ve uygulama sıcaklığındaki kararlılığı önemlidir (Kainer, 2003).

Günümüzde, magnezyum ve alaşımları çeşitli avantajlara sahiptir. Yerkabuğunda oldukça fazla bulunuyor olması, kolay dökülebilir ve yüksek hızlarda işlenebilir olmaları, ses ve darbe sönümleme özelliklerinin iyi olması ve kontrollü atmosfer altında iyi kaynak edilebilirliklerinin olması magnezyum ve alaşımlarının avantajları olarak sıralanabilir (Gray ve Luan, 2002; Pan vd., 2016; Staiger vd., 2006). Fakat bu avantajların yanında bazı dezavantajları da elbette mevcuttur. Hegzagonal sıkı paket yapıda olmaları soğuk şekillendirilebilirliklerini sınırlandırır. Yorulma ve sürünme dayanımları düşüktür (Gray ve Luan, 2002). Ayrıca Mg ve alaşımları özellikle flor, klor gibi iyonların bulunduğu ortamlarda çok düşük korozyon dayanımına sahiptir (Song vd., 2017).

Döküm, toz metalürjisi ve ekstrüzyon yöntemleri Mg alaşımları için sıklıkla kullanılan üretim yöntemlerindendir (Kainer, 2003). Magnezyum ve alaşımları ASTM A275 standardına göre harf kodları ile isimlendirilir. Bu harf kodları içerdikleri alaşım elementlerini temsil eder. Örneğin sıklıkla kullanılan "A" Harf kodu alüminyum alaşım elementine, "Z" harf kodu Çinko elementine, "K" harf kodu zirkonyum elementine, "W" harfi itriyum elementine aittir. Nadir toprak elementleri ise "E" harf kodu ile temsil edilir. Alaşımın içerdiği bu alaşım elementlerinin miktarları ise harf kodlarından sonra rakam ile bu elementlerin yüzde-

lerini gösterecek şekilde yazılır. Yani ZK60 alaşımı için Z, Çinko elementinin varlığını ve K, Zirkonyum elementinin varlığını gösterir. Çinko ve zirkonyum alaşım içinde en fazla miktarda bulunan iki elementi ifade eder ve bu miktarlar ise devamındaki rakamlar ile belirtilmiştir. ZK60 alaşımı %5-6 Zn ve %0,3-0,9 Zr içerir. WE43 alaşımından bahsedildiğinde W, itriyum elementinin varlığını ve E, nadir toprak elementleri içerdiğini gösterir. Harf kodlamasından sonra kullanılan sayılar ise WE43 alaşımının yaklaşık %4 oranında itriyum ve yaklaşık %3 oranında nadir toprak elementi ihtiva ettiğinin bir göstergesidir.

Bünyeye ilave edilen alaşım elementleri magnezyuma farklı özellikler kazandırır. Al ve Mn içeren AM serisi alaşımlar, yüksek darbe dayanımları ve toklukları nedeni ile kullanılır. Al ve Si elementlerini içeren AS serisi alaşımların aşınma dayanımları diğer alaşım gruplarına göre daha yüksektir. AZ serisi Al ve Zn alaşım elementlerini içeren alaşımlar ise magnezyum alaşımları arasında en yüksek korozyon dayanımına sahip olan alaşım serisidir. Her alaşım grubu özelliklerine göre, aktarım yapan parçalarda, otomotiv ve havacılık uygulamalarında, farklı alanlarda kullanılabilir (Baker ve Williams, 1955; Gupta ve Sharon, 2010; Song vd., 2011; Song ve Atrens, 1999).

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ GÜNCEL KULLANIM ALANLARI

İçerdiği alaşım elementine göre çok farklı özellikler sergileyebilen magnezyum alaşımları otomotiv, havacılık, elektronik, savunma, enerji ve biyomalzeme gibi pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanımı tercih edilmektedir. Ancak yüksek kimyasal reaktivitesi, diğer metallerde de olduğu gibi agresif ortamlarda uygulanabilirliğini son derece sınırlamakta olup korozyondan koruyacak yüzey işlemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır (Predko vd., 2021; Čermák vd., 2008; Tokunaga vd., 2020; Li vd., 2020; Zheng vd., 2021; Merachtsaki vd., 2021; Jia vd., 2021; Duran vd., 2021; Zhai vd., 2021).

Otomotiv sektöründe özellikle hafifliği ve titreşim sönümlemesi yüksek gerinim sertleştirme oranları ve plastik gerinim oranları nedeniyle magnezyum alaşımları, bilinen diğer birçok hafif metale tercih edi-

len bir hafif alaşımdır (Balaji vd., 2021; Predko vd., 2021; Lloyd vd., 2021). Bu gibi alanlarda kullanılan malzeme ne kadar yüksek özgül dayanıma sahip olursa o denli az yakıt tüketimi ve buna bağlı olarak da daha az CO_2 ve NO_X gaz yayılımına sebep olurlar. Hafif alaşımlar içerisinde Mg, Al 'ye kıyasla üretim süreçlerinde daha az CO_2 emisyonuna sebep olduğundan daha çevre dostu bir alaşım olarak kabul edilmektedir ve bu sebeple üzerinde daha çok çalışmalar yapılmaktadır (Predko vd., 2021).

Hafifliği nedeniyle otomotiv sektöründe ilgi odağı olan Mg alaşımları yine bu sektörle bağlantılı olan enerji depolama konusunda da odak noktası haline gelmiştir. Alternatif enerji arayışı sonucu hidrojene olan ilgi gittikçe artmış ve yakıt olarak kullanılması ve bunun depolanabilmesi üzerine çalışmalar yön bulmuştur. Mg ve bazı Mg alaşımları hidrojen depolama konusunda uygun malzemeler olarak görülmeye başlamıştır. Mg'nin yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biri olması da ekstra avantaj anlamına gelir. (Čermák vd., 2008). Mg alaşımları, Al ve çeliğe kıyasla daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir (Predko vd., 2021; Lloyd vd., 2021). Balcerzak vd. (2017) La–Mg–Ni elementleri ile denedikleri üçlü sistemlerde Mg oranındaki artış sonucu hidrojen depolama ve elektrokimyasal deşarj kapasitesinin arttığını vurgulamışlardır (Balcerzak vd., 2017).

Magnezyum alaşımlarının en önemli özelliklerinden biri de yüksek sönümleme kapasitesine sahip olmasıdır. Son yıllarda önemli çevre sorunlarından biri haline gelen gürültü kirliliğinin azaltılabilmesi açısından yapısal malzemelerde Mg alaşımlarının kullanımı, bu problemle başa çıkılabilmesi adına önemli bir adımdır. Mg-Zr, Mg-Si ve Mg-Ni alaşımları yüksek sönümleme kapasitesine sahip Mg alaşımlarındandır. Yapılan çalışmalara göre çözünen element miktarı çok düşük olduğunda sönümleme kapasitesi daha iyi hale gelmektedir (Diqing vd., 2009).

Literatürde özellikle biyobozunurluk çalışmaları uzun zamandır yapılmakta olan Mg ve alaşımları kemik ile yakın benzerliği nedeniyle son yıllarda kalıcı implantların geliştirilebilmesi adına da üzerinde çalışılan bir konu haline gelmiştir. Genellikle biyobozunurluk çalışmalarında kırıkların onarılmasında kullanılan fiksasyon amaçlı vidaların Mg içerikli yapılarak iyileşme sürecini tamamlayana kadar vücutta kalıp, iyileşme tamamlandıktan sonra çözünerek vücuttan boşaltım yoluyla atılması ve

ikincil bir operasyon ile yerleştirilen destek materyalinin alınması ihtiyacını ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Kalıcı implant olarak kullanılmasında ise özellikle korozyon özelliklerinin iyileştirilerek vücutta kalmaya uygun hale getirilmesi ilk hedeftir. Her iki durumda da odak noktası korozyonun kontrol altında tutulmasıdır (Razavi, vd., 2015; Kumar, vd., 2016; Kayhan, vd., 2016; Al-Sherify vd., 2021). Magnezyum ve alaşımlarının vücut içinde kalıcı implant uygulamalarında kullanılmasına yönelik de geliştirilen çalışmalar sürdürülmektedir (Razik Mohammed, 2021; Kuang vd., 2021; Rendenbach vd., 2021).

Çeşitli özelliklerine göre pek çok alanda tercih edilen bir malzeme olmasına rağmen korozyon özellikleri Mg alaşımlarının kullanımını sınırlayan bir faktördür. Böyle hafif ve üstün özellikli malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle de Mg alaşımlarının korozyon dayanımını arttıracak, korozyondan koruyacak çalışmalar elzem hale gelmiştir. Şu an için düşünüldüğünde Mg ve alaşımlarının Avrupa'da ulaşım (otomotiv) alanında %44, paketlemede %19, yapı malzemesi olarak %12, kükürt giderme amacıyla %11 ve diğer alanlarda ise %10 oranında kullanıldığı bilinmektedir (Predko vd., 2021). Korozyon özellikleri iyileştirildiği takdirde her alanda kullanımının daha da artacağı aşikârdır. Bu amaç doğrultusunda korozyondan korunma adına pek çok yönteme başvurulmaktadır. Önemli çalışmalardan bazıları yeni Mg alaşımları geliştirmek üzerine iken, bazıları da dışarıdan alaşım elementi ilavesi ve yüzeye koruyucu ince film tabakalarının tatbik edilmesi veya yüzey işlemleri üzerinedir. Yüzey işlemlerinin umut vadeden performans iyileşmeleri sağladığı literatürde mevcuttur (Zhu vd., 2021; Yan vd., 2021).

Korozyon, mekanik ve aşınma dayanımını geliştirmek amacıyla SiC (Wang vd., 2017), Al_2O_3 (Ahmadkhaniha vd., 2016), TiC (Sahoo ve Panigrahi, 2016), TiB_2, HA (Chen vd., 2016), nano TiC, B_4C ve hexa boron nitrit (HBN) (Lingaraju vd., 2021) partikülleri ile Mg alaşımlarının takviye edildiği uygulamalar mevcuttur. Biyolojik uygulamalarda takviyeli yapılar, özellikle kemik iskelesi olarak kullanılmakta olup, bir yandan iskelenin boşlukları arasında hücre büyümesi teşvik edilirken, bir yandan da takviye partikülleri ile korozyon hızını yavaşlatarak iyileşme ve vücuttan atılma süreçlerinin dengelenmesi sağlanmaktadır (Chen vd.,

2016). Bu tip işlemlerden ziyade, yüzey işlemlerinin yapılması korozyon hızını yavaşlatma açısından daha etkilidir.

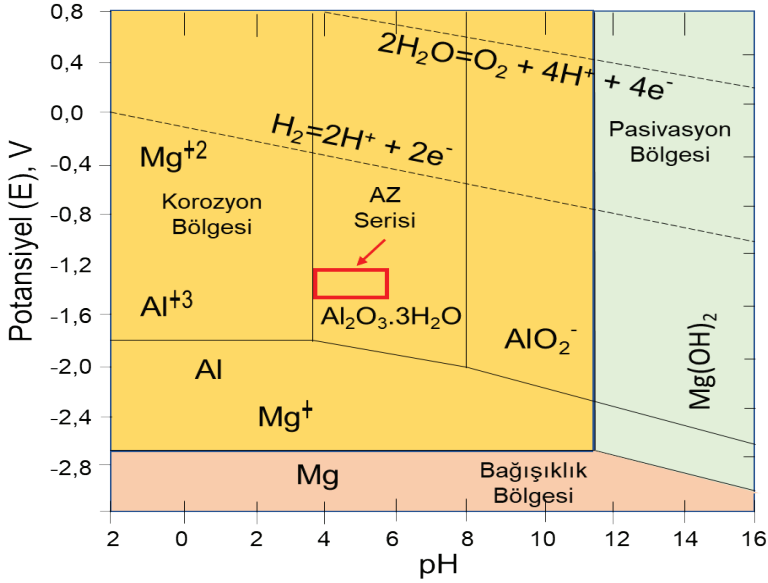
Mg alaşımları üzerine korozyonu önlemek amacı ile yapılan oksidasyon, elektroforetik depolama, biyomimetik çöktürme, sıçratma, döndürerek (spinning) kaplama, sol-jel, PVD ve CVD gibi kaplama tekniklerinin kullanımı son derece yaygındır (Majumdar vd., 2008; Wang vd., 2010; Liu vd., 2011; Gu vd., 2011; Rojaee vd., 2014). Yapılan yüzey işlemleri ise yalnızca iyon salınımının önlenmesi amacıyla değil, malzemeye antibiyotik salınımı, biyoaktiflik ve antibakteriyel gibi çeşitli özelliklerin kazandırılması, biyouyumluluk, aşınma, kopma ve sürünme dayanımının arttırılması gibi özellikler sağlamak için de yapılmaktadır (Cheng vd., 2006; Xu vd., 2009; Arnould vd., 2010; Zhou vd., 2013; Chang vd., 2014; Hiromoto vd., 2015; Ren vd., 2015; Surmeneva vd., 2015; Huang vd., 2016; Xu vd., 2016; Kan vd., 2021).

MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KOROZYON MEKANİZMALARI

Magnezyum ve alaşımları flor, klor ve fosfat iyonlarının ve sodyum ve potasyum katyonlarının yoğun olduğu, "saldırgan" olarak nitelendirilen ortamlarda korozyona uğrar ve mekanik bütünlüklerini uzun süre koruyamazlar.

Şekil 1'de Mg-Al alaşımlarının 25 °C'deki potansiyel-pH diyagramı bir arada verilmiştir. Kırmızı ile gösterilen kısım magnezyumun korozyon bölgesini göstermektedir. Alüminyumun korozyon bölgesi bu bölgeden daha dardır. Mavi ile gösterilen pasivasyon bölgesi ortak pasivasyon bölgesidir. Bu bölgede yüzeyde bir oksit filmi oluşur. Pembe ile gösterilen bağışıklık bölgesi ise yine ortak bağışıklık bölgesi olarak nitelendirilebilir. Pembe bölgede alaşım, korozyona karşı dayanıklıdır. AZ serisi alaşımlar içerdikleri Al ve Zn elementleri ve sahip oldukları fazlar ve çökeltiler sayesinde magnezyum alaşımları arasında en fazla korozyon dayanımına sahip alaşımlar olarak bilinmelerine ve sınıflandırılmalarına rağmen, yine de ortamın saldırganlığını büyük ölçüde arttıran, F^- ve Cl^- iyonlarının ortamda bulunduğu saldırgan olarak nitelendirilen ortamlarda bağışıklık bölgesinde bulunamaz veya uzun süre

dayanabilecek bir pasivasyon tabakası oluşturamazlar. Magnezyum ve alaşımlarının tamamı bu tür ortamlarda korozyon bölgesi olarak nitelendirilen alanda görülür. Bu ortamlarda Mg elementi Mg^{+} ve Mg^{+2}, iyonlarını oluşturur. Magnezyum alaşımı içindeki alüminyum bu bölgede bazen Al elementi olarak kalabilir. Bazen ise potansiyel ve pH değerlerinin düştüğü ortamlarda Al^{-3} iyonunu oluşturabilir. Bu durumlar elementleri içeren alaşımın bu ortamlarda çözünme ve korozyona uğrama eğiliminde olduğunu gösterebilir. Bunun sebebi, magnezyum ve alaşımlarının maruz kaldığı korozyon türleri de tartışılarak açıklanabilir (Manivasagam vd., 2010).



Şekil 1. Mg-Al Alaşımlarının 25 °C'deki Potansiyel-pH Diyagramı (Ashby ve Jones, 2012; Predko vd., 2021).

Magnezyum ve alaşımlarında saldırgan ortamlarda görülen korozyon türleri; homojen korozyon, galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu, gerilimli ve yorulmalı korozyondur (Song, 2011; Xin vd., 2011). Bu korozyon türleri özellikle farklı iyon konsantrasyonlarındaki sıvılar içinde ve hatta oksijen seviyesinin nispeten az olduğu durumlarda malzemenin yüzeyinden başlayarak hızlıca çekirdeğe kadar ilerleyebilir.

Magnezyum Alaşımlarında Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, elektrolit görevi gören bir sıvı içerisinde aynı elektrokimyasal potansiyelde olmayan iki metalin bir arada kullanılması sonucu meydana gelir (Ahmad, 2006; Yang vd., 2021). Potansiyel değeri daha negatif olan harcanan (anot), daha pozitife yakın olan ise korunan ya da kaplanan (katot) olarak işlev görür. Magnezyum elementinin elektrot potansiyeli diğer metallere göre daha düşüktür. Yani 25°C sıcaklıkta diğer metaller ile kıyaslandığında daha aktiftir. Bu nedenle galvanik korozyona son derece duyarlıdır (Fontana, 1986; Gray ve Luan, 2002; Schweitzer, 2010). Galvanik korozyonun şiddeti çeşitli faktörler ile artabilir. Ortam iletkenliğinin ve/veya potansiyel farkın artması, katot yüzey alanının anota göre fazla büyük olması ya da katot ile anot arasındaki mesafenin çok yakın olması galvanik korozyonun hızını ve şiddetini arttırır (Atrens vd., 2011; Esmaily vd., 2017; Schweitzer, 2010). Mg alaşımları korozyona o kadar duyarlıdır ki kendi içerisinde bulunan fazların da anot, katot gibi davranması söz konususur. İkincil faz çökeltileri ile ana matris arasında potansiyel fark oluşması sonucu yerel olarak mikro galvanik korozyon hücreleri oluşur ve korozyon bu şekilde ilerler (Agarwal vd., 2016; Atrens vd., 2011; Jamesh vd., 2015; Song ve Atrens, 1999; Yang vd., 2021).

Magnezyum Alaşımlarında Çukurcuk Korozyonu

Malzemelerin yüzeyinde bulunan çok küçük bir oyuk veya çukurcuktan başlayan ve çok dar bölgeler üzerinde yoğunlaşarak malzeme yüzeyinin altından sinsice ilerleyen bir korozyon türü olan çukurcuk korozyonu gözle görülemeyecek şekilde ilerlediği için çok tehlikeli olarak bilinir.

Bu korozyon türünde zarar gören kısım çukurcuk diye adlandırılan ufak deliklerdir. Çukurların çap/derinlik oranı çok küçük olduğu için tespit edilmesi zordur ve magnezyumun oksitleyici olmayan nötr bir ortamda dahi serbest kalan iyonlara maruz kalması durumunda bu korozyon gerçekleşebilir (Perez, 2004). Yüzeyde bulunan herhangi bir süreksizlik bu korozyonun oluşmasına sebep olabilir ve $Mg(OH)_2$ ve MgO tabakalarının parçalanmasına sebep olabilir (Schweitzer, 2010; Song vd.,

2011). Sonuç olarak, korozyon derinlik yönüne doğru yayılarak ilerler ve geleneksel çukur korozyonu mekanizması, katotta oksijen indirgeme reaksiyonunun meydana gelmesine dayanır (Song vd., 2017).

Magnezyum Alaşımlarında Gerilmeli ve Yorulmalı Korozyon

Klorür iyonları içeren ortamlar ile temas içinde olan aynı zamanda da mekanik gerilmelere maruz kalan malzemelerde sıklıkla görülen korozyon türü gerilmeli korozyondur. Duyarlı bir malzeme, saldırgan bir ortam, çekme gerilimi ve yeterli zaman olması halinde bozunma parça yüzeyinde çukurcuk korozyonlarının dibinden veya mekanik gerilmelerin yüksek olduğu noktalardan başlayıp hızlı bir şekilde ilerleyebilir (Ahmad, 2006). Özellikle yapay vücut sıvısı (YVS) gibi saldırgan ortam içinde bu daha da hızlı olmaktadır. Magnezyum alaşımlarındaki gerilmeli korozyon çatlağı, iki mekanizma grubundan birine atfedilmiştir; oluşan çatlağın uç kısmı anot olarak davrandığından sürekli bir çözünme söz konusudur ve bu da çatlağın ilerlemesi ile sonuçlanır. Korozif ortamlarda döngüsel yüklemelere maruz kalan malzemeler için de benzer şekilde yorulmalı korozyon oluşabilir (Singh Raman vd., 2015; Song vd., 2011; Ahmad, 2006).

Korozyondan korunma, tepkimeye müdahale edilmesi ile veya koruyucu tabakalar yardımıyla reaksiyonun gerçekleşeceği bölgeleri ayırma yoluyla azaltılması veya tamamen engellenmesi yöntemleriyle sağlanabilir. Günümüzde korozyon özelliklerini geliştirmek için çeşitli alaşımlama, kaplama ve yüzey oksidasyon işlemleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Agarwal vd., 2016).

Magnezyum Alaşımlarında Korozyondan Korunmaya Yönelik Yapılan Kaplama Uygulamaları

Mg ve alaşımlarını kaplamak için çok çeşitli materyal ve yöntemler literatürde mevcuttur. Son yıllarda özellikle tıbbi implant uygulamalarında, korozyona karşı malzemeyi çevreleyen ortamdan izole eden kaplamalar oluşturmak için yüzey modifikasyonları, bozulma oranını kontrol etmede etkili bir yöntemdir. Yine kullanıldığı diğer alanlarda da

aşınma ve korozyon dayanımının geliştirilme ihtiyacı sebebiyle kaplamalar sıkça başvurulan bir çözüm haline gelmiştir.

Krom kaplama; magnezyum, alüminyum ve çinko gibi reaktif metalleri korumanın en etkili yollarından biridir. Asidik tampon çözeltiler ve metal arasında gerçekleştirilen kimyasal tepkimeler yardımı ile kaplama gerçekleştirilebilir. Temelde metalin oksitlenmesi ve devamında kromun indirgenmesi şeklinde devam eder bu durumda krom çökelir. Kendini iyileştirme özelliğine de sahip olabilen bu kaplama "aktif" olarak sınıflandırılan metallerde korozyona karşı dayanım için kullanılan yaygın kaplama türlerinden biridir (Chen vd., 2013).

Fosfat kaplama da magnezyum ve alaşımlarının korozyon dayanımı için sıklıkla uygulanır (Chen vd., 2011; Chen vd., 2012). Temelde metalik olarak uygulamaları mevcut olsa da son zamanlarda fosfat kaplamalar özellikle magnezyum alaşımlarının biyomalzeme olarak kullanılabilirliği araştırmalarında yoğunlaşmış bir şekilde çalışılmaktadır. Kalsiyum ve fosfat içerikli kaplamalar hem fazlasıyla aktif olan magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımlarını geliştirir hem de vücut ile uyum sağlayabilecek biyoaktif özellikte bir yapı oluşmasını sağlayabilirler. Bu da Mg alaşımlarını doku mühendisliği için umut verici implant adayları haline getirir (Chen vd., 2011, 2012; Rahman vd., 2020).

Hidroksiapatit (HA), Mg alaşımları üzerine uygulanan en yaygın kaplama malzemesidir ve elektrokimyasal biriktirme yöntemi, sol-jel işleme, püskürtme teknikleri, lazer teknikleri ve Mg alaşımları üzerinde çok aşamalı kaplamalar gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Mg alaşımlarında HA oluşum mekanizması, kaplama kalınlığını, kaplama homojenliğini, kristal yapısını ve morfolojiyi etkileyen kaplama prosesleri ve işleme parametreleri açısından şu anda tam olarak araştırılmamış olmasına rağmen, elektrokimyasal biriktirme, Mg alaşımlarının korozyon direncini arttırmanın en etkili yöntemlerinden biridir. Elektrokimyasal biriktirme sırasında elektrolitlerin bileşimi ve konsantrasyonu, HA kaplamanın kalınlığı, gözenekliliği, morfolojik yapıları, mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Mg bazlı alaşımlar üzerinde biyouyumlu kaplamalar için uygun tekniklerin geliştirilmesi, klinik uygulamalar için biyobozunur implant malzemelerinin geliştirilmesi için büyük potansiyel görmektedir (Rahman vd., 2020).

AZ31B alaşımı üzerine Yao vd. (2021) Mg/MgO tozlarını Mg, mikron ve MgO, nano boyuttta olacak şekilde yüksek hızlı süspansiyon alev püskürtme tekniği ile yüzeyde kompozit kaplama elde etmişlerdir. Elde edilen kaplama sonucu Polarizasyon ve EIS sonuçlarında, Mg/MgO kompozit kaplamaların, SBF'de Mg alaşımlı substrat için yalnızca sınırlı bir korozyon koruması sunduğunu gösterdiler (Yao vd., 2021). Li vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada AZ31 alaşımı üzerine alkali ön işlemi ve ardından vanilik asit işlemi uygulanarak korozyona karşı yenilikçi bir koruyucu tabaka hazırlanmıştır. Bu çalışmada alaşım yüzeyinin alkali ön işleme tabi tutulması vanilik asit ile alaşım yüzeyinin reaksiyona girmesi için –OH sağlamıştır. Vanillik asit işlemi, Mg alaşımını saldırgan ortamdan etkin bir şekilde izole eden bir bariyer görevi görmüş ve sulu çözelti penetrasyonunu geciktirerek korozyon direncinin arttırılmasını sağlamıştır. Alkali ve vanilik asitle muamele edilmiş Mg alaşımının, işlem görmeyen alaşıma kıyasla neredeyse iki kat daha düşük korozyon akım değerlerine sahip olduğu görülmüştür (Li vd., 2020). Yine yapılan bir diğer çalışmada AZ31 alaşımı üzerine kimyasal dönüşümle antimon katkılı stannat kaplama hazırlanmıştır. Kaplama işlemi sonucu korozyon potansiyeli 214 mV artarken korozyon akım yoğunluğunun büyük oranda azaldığı ifade edilmiştir (Cai vd., 2020).

Biyomedikal uygulamalarda korozyonu önlemek amacıyla yapılan bir kaplama türü de uygun maliyetli olan hidrotermal işlemdir. Örneğin Mg-Ca alaşım yüzeyine 2, 4 ve 6 saat süreler ile yapılan hidrotermal işlem sonucu, bozunma özellikleri, işlenmiş ve işlenmemiş numuneler üzerinde elektrokimyasal testler yapılarak incelenmiştir. Muamele edilmiş numunelerin yüzeyinde stabil $Mg(OH)_2$ tabakasının oluşmasına bağlı olarak, muamele edilmemiş numunelere kıyasla daha düşük bozunma oranları gösterdiği tespit edilmiştir (Dilshad vd., 2020). Yine yerinde hidrotermal olarak Chu vd. (2021) Mg alaşımı üzerine korozyon ve aşınma dayanımını geliştirmek amacıyla 3-aminopropil trietoksisilan (APTES) modifiye $Mg(OH)_2$/indirgenmiş grafen oksit (RGO) hibrit kompozit kaplama uygulamışlardır. Kaplama yapısı üstte 250 nm'lik ultra ince $Mg(OH)_2$/RGO katmanı ile altta $Mg(OH)_2$ katmanından oluşan ve daha sonra hidrojen bağı yoluyla $Mg(OH)_2$ ile RGO levhalarının hibritlendiği ikili bir yapıdan oluşur. Kaplamada, APTES tabakası Si-O-

Mg ve amid bağı yoluyla $Mg(OH)_2$/RGO yüzeyinde oluşan gözenekleri ve kusurları etkili bir şekilde doldurur ve kendi kendine çapraz bağlanma yoluyla Si-O-Si bağı ile zenginleştirilmiş bir bariyer film oluşturur. Böylece yapılan çalışma ile hem korozyon hem de aşınma dayanımının arttırıldığı vurgulanmıştır (Chu vd., 2021).

Biyolojik kullanım amacıyla Mg-xZn (x=1,5) alaşım yüzeyine B-tipi karbonat apatit (CAp) kaplamalar kimyasal çözelti biriktirme yöntemi ile uygulanmış ve CAp kaplamanın korozyon davranışı ve biyouyumluluk üzerindeki etkisi, sırasıyla Hank's çözeltisine daldırma ve empedans testleri ve osteoblastik hücrelerin hücre kültürü testi ile incelenmiştir. Sonuç olarak B-tipi karbonat apatit kaplamanın, ilk 3-5 günü içinde alaşımların Mg^{2+}-iyon salınım oranını geciktirdiği fakat kaplamaları kısmen kırıldıktan sonra, alt tabaka alaşımının korozyon direncininin baskın olduğu ve çinkoca zengin fazın hacim fraksiyonunun artmasıyla korozyon direncinin giderek azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, B-tipi karbonat apatit kaplamanın kaplanmamış alaşımlara kıyasla Mg^{2+}-iyon salım hızının %40-60 oranında ve hidroksiapatit kaplamaya göre ise %25–45 oranında azalttığı görülmüştür. Yine çalışma sonucunda B-tipi karbonat apatit kaplama alaşımları üzerindeki MC3T3-E1 hücrelerinin canlılığını etkin bir şekilde geliştirdiği ve hidroksiapatit kaplamaya kıyasla biyouyumluluğunun daha iyi olduğu da kaydedilmiştir (Pham vd., 2021).

Bozunmasını geciktirmek adına organik polimer kaplama olarak ipek fibroin, 3-amino-propiltrietoksisilan (APTES) ön işleme tabi tutulmuş Mg-Zn-Ca yüzeyi, kararlı ve korozyona dayanıklı ipek fibroin kaplamalarla bağ oluşturabilen amino gruplarıyla kaplanmıştır. Yapay vücut sıvısı içindekideki in vitro bozunma testlerine dayanarak, ipek fibroin nanogözenekli kaplamanın, yapay vücut sıvısı içindekideki kaplanmamış Mg-Zn-Ca alaşımına kıyasla magnezyum alaşımlı substratların uzun vadeli etkili korumasını sağlayabildiği ve korozyon direncini iyileştirdiği kaydedilmiştir (Wang vd., 2020).

Klasik alışıldık yöntemlerin dışında, bir çalışmada Mg alaşımlı substrat (AZ80 kütük) üzerine döküm ve toz metalürji yöntemi ile üretilmiş Al-Si alaşım plakaları ayrı ayrı yerleştirilerek altlık ve plaka beraber olacak şekilde sıcak ekstrüze edilerek yüzeyde Al-Si alaşım kaplaması elde edilmiştir. Elde edilen kaplanmış numunenin 1.0 mol/L'lik HCl sulu

çözeltisinde yüksek korozyon direnci gösterdiği kaydedilmiştir. Ayrıca, Mg alaşımının aşınma direncinin de Al-Si alaşım kaplama katmanları ile önemli ölçüde iyileştirildiği görülmüştür (Tokunaga vd., 2020).

AZ31 Magnezyum alaşım yüzeyleri üzerine biyouyumluluğu ve korozyon direncini artırmak için doğrudan mikro ark oksidasyonu (MAO) ile Ca-eksik hidroksiapatit (Ca-eksik HA) kaplamaları hazırlanmıştır. Çalışmada bu ve bunun gibi kaplamaların kalınlığının artması ile doğrudan korozyondan korumanın daha etkin hale gelebileceği vurgulanmıştır (Liao vd., 2021).

Tek adımda ve çevre dostu bir şekilde Mg-7Li-3Al-1Si alaşımının yüzeyine korozyon direncini arttıracak demir tetradekanoat ($Fe(CH_3(-CH_2)_{12}COO)_3$) kaplama yapılmıştır. Sonuçlar, hazırlanan kaplamanın ideal bir korozyon direncine ve iyi bir koruma performansına sahip olduğunu göstermiştir (Zheng vd., 2021).

Mg alaşımları otomotiv alanında, araçların iç ve dış aksamlarında, şasi, gövde ve güç aktarma organlarında kullanılmaktadır. Tercih edilmesinin en önemli sebebi hafifliğinden kaynaklı yakıt verimliliği ve dolayısıyla araçların gaz emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilme potansiyeline sahip olmasıdır. Ancak, SAE USCAR 2006 standartlarına göre laboratuvar testleri yoluyla şasi, iç mekân, gövde ve güç aktarma sistemlerinde kullanım için yaklaşık 157 kg Mg parçasının kabul edilebilir olduğu onaylanmasına rağmen Kuzey'de halen sadece yaklaşık 5-7 kg Mg alaşımları kullanılmaktadır. Dolayısı ile otomotiv uygulamalarında Mg alaşımlarının entegrasyonu tam anlamıyla başarı elde edememiştir. Bunun en büyük nedeni ise Mg alaşımlarının korozyon ortamlarına karşı oldukça hassas olması ve Al alaşımlarından farklı olarak alaşımlar üzerinde oluşan yüzey filmlerinin koruyuculuğunun çok sınırlı olmasıdır. Özellikle galvanik korozyon, otomotiv endüstrisinde Mg alaşımlarının kapsamlı olarak gelişmesinin önüne geçen en önemli faktördür. Ayrıca buna ek olarak Mg alaşımlarının korozyon yorgunluğu da önemli bir diğer sınırlayıcı etmendir.

Mg alaşımlarının otomotiv bileşenlerindeki uygulamalarının hizmet koşullarında kaçınılmaz olarak korozyon saldırısına maruz kaldığı düşünüldüğünde, bu sektör bazında da Mg'nin korozyon direncini iyi-

leştirmeye yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Alaşımlar geliştirilmesi, uygun yapısal tasarım ve yüzey kaplamaları dahil olmak üzere pek çok çözüm yolu aranmıştır. Bunlar arasından en etkili ve ekonomik yöntem biyomedikal alanda da olduğu gibi yüzey kaplama olarak kabul edilir. Korozyon yorulma mukavemetini arttırmak için matrise güçlü bir yapışma sağlayacak homojen, hatasız, korozyona dayanıklı bir kaplama geliştirilmesi bu durumu çözüme kavuşturabilir.

Kaplamalar, Mg alaşım malzemesini çevreleyen ortamla ilişkisini keser ve Mg alaşımlı alt tabaka arasında fiziksel bir bariyer sağlar. Böylece alttaki alaşım malzemesinin polarizasyon direncini önemli ölçüde artırarak korozyon direncini geciktirebilir. Uygulamada çok sayıda kaplama yöntemleri geliştirilmiştir ve hepsinin kullanıldığı yere göre veya uygulama şekline göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bunlardan bazıları biyomalzemelere de uygulanan kimyasal dönüşümlü kaplama, anotlama, akımsız/elektro kaplama, organik kaplama, lazer yüzey işleme, buhar (fiziksel buhar ve kimyasal buhar) bazlı biriktirme ve termal/soğuk sprey kaplamalardır (Wang vd., 2019).

Süper hafif bir metalik mühendislik malzemesi olarak Mg-Li alaşımı, yüksek özgül gücü, daha iyi şekillendirilebilirliği ve mükemmel elektromanyetik görüntüleme performansı nedeniyle havacılık ve askeri alanlarda büyük potansiyele sahiptir. Yine bu alaşımın da en büyük sınırlayıcısı zayıf korozyon direncidir. Elektrokaplama, akımsız kaplama, plazma püskürtme, erimiş tuz değiştirme, dönüşüm kaplama, anotlama, mikro ark oksidasyonu, organik kaplama ve organik-inorganik hibrit kaplama, yüzey işleme teknolojileri dahil pek çok yöntemle bu alaşımın korozyon direncinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Sun vd., 2017). Bu çeşitli yüzey teknikleri arasında, kimyasal dönüştürme işlemi, nispeten düşük maliyetli ve uygulama açısından daha kolay bir yöntemdir. Korozyon dayanımını geliştirmek için özellikle Lantan ve Seryum gibi nadir toprak elementleri (Yang vd., 2008; Yang vd., 2009), hidrotalsit (Wang vd., 2010), karbonik asit (Yu vd., 2010), stannat (Yang vd., 2009), molibdat/permanganat (Wang vd., 2012), fitik asit (Gao vd., 2009) gibi kimyasallarla, kimyasal dönüştürme tekniği kullanılarak uygulanan korozyon dayanımını arttırıcı yüzey işlemleri literatürde mevcuttur.

SONUÇ

Hafifliği başta olmak üzere yüksek spesifik mukavemeti ve sönümleme özellikleri sayesinde akaryakıt tasarrufu ve düşük gaz emisyonu sağlama potansiyelinden dolayı otomotiv, havacılık ve enerji sektöründe kullanım alanı bulmuş olan magnezyum alaşımları; insan kemik yapısına fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından benzerliği nedeniyle de biyomedikal alanda implant sektöründe de kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak hangi sektörde olursa olsun karşılaştığı en önemli problem hepsinde de aynıdır: Zayıf korozyon ve aşınma dayanımı. Dolayısıyla yatırımlar ve deneysel çalışmalar bu ortak probleme çözüm aramakla meşguldür. Yapılan çalışmalar alaşım ilavesi, ısıl işlem, kompozit malzemeler gibi çeşitli malzemeyi geliştirmenin yanında özellikle kaplama alanında daha çok ilerlemektedir. Literatür gösteriyor ki potansiyel olarak en umut vadeden çözüm koruyucu bir kaplama tabakasından faydalanmaktır. Elektrokaplama, akımsız kaplama, plazma püskürtme, erimiş tuz değiştirme, dönüşüm kaplama, anotlama, mikro ark oksidasyonu, organik kaplama ve organik-inorganik hibrit kaplama, yüzey işleme teknolojileri dahil pek çok kaplama ve yüzey modifikasyon işlemleri üzerine çalışmalar Mg ve alaşımlarının kullanım alanını daha da genişletebilmek adına devam etmektedir. Hedefe ulaşıldığı takdirde özellikle otomotiv, uzay ve havacılık ve bunun yanında biyomalzeme sektöründe de kullanımının artacağı aşikardır.

KAYNAKÇA

Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., and Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering C*, 68, 948–963.

Ahmad, Z. (2006). *Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control.* Butterworth-Heinemann.

Ahmadkhaniha, D., Sohi, M. H., Salehi, A., and Tahavvori, R. (2016). Formations of AZ91/Al2O3 nano-composite layer by friction stir processing. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, 314-318.

Al-Sherify, Z.F., Dawood, N.M., Khulief, Z.T. (2021). Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloys coated with PMMA/HA as biodegradable implants. *MaterialsToday Proceedings,* 2021.

Arnould, C., Denayer, J., Planckaert, M., Delhalle, J., and Mekhalif, Z. (2010). Bilayers coating on titanium surface: The impact on the hydroxyapatite initation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 341, 75-82.

Ashby, M. F. and Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design*. (Fourth Edition). London: Butterworth-Heinemann.

Atrens, A., Liu, M., and Zainal Abidin, N. I. (2011). Corrosion mechanism applicable to biodegradable magnesium implants. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 176(20), 1609–1636.

Baker, T. W. and Williams, J. (1955). The intermetallic compounds $MgBe_{13}$ and $CaBe_{13}$. *Acta Cristallographica*, 8(8), 519.

Balaji, V., Bupesh Raja, V. K., Palanikumar, K., Ponshanmugakumar, Aditya, N. and Rohit, V. (2021). Effect of heat treatment on magnesium alloys used in automotive industry: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3769-3771.

Balcerzak, M., Nowak, M., and Jurczyk, M. (2017). Hydrogenation and electrochemical studies of La–Mg–Ni alloys, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (2), 1436-1443.

Brandes, E. A., and Brook, G. B. (Ed.). (1998). *Smithells Light Metals Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Cai, Y.R., Wang, X.D., Wan, L.L., Yang, J.X., and Gao, Y.F. (2020). Preparation of Antimony-doped Stannate Chemical Conversion Coating on AZ31B Mg Alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(7), 1891-1898.

Čermák, J. and Král, L. (2008). Hydrogenation of Mg and two chosen Mg–Ni alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (24), 7464-7470.

Chang, Y. Y., Huang, H. L., Chen, H. J., Lai, C. H., and Wen, C. Y. (2014). Antibacterial properties and cytocompatibility of tantalum oxide coatings. *Surface & Coatings Technology*, 259, 193-198.

Chen, B., Yin, K. Y., Lu, T. F., Sun, B. Y., Dong, Q., Zheng, J. X., and Li, Z. C. (2016). AZ91 magnesium alloy/porous hydroxyapatite composite for potential application in bone repair. *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 858-864.

Chen, X.-B., Easton, M.A., Birbillis, N., Yang, H.Y., and Abbott, T.B. (2013). *Corrosion-resistant coatings for magnesium (Mg) alloys*. Woodhead Publishing Limited.

Chen , X. -B., Birbilis , N. and Abbott , T. B. (2011). A review of corrosion resistant conversion coatings for magnesium and its alloys. *Corrosion*, 67, 035005.

Chen , X.-B. , Yang , H. -Y., Abbott , T. B. , Easton , M. A. and Birbilis , N. (2012). Magnesium: engineering the surface. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 64, 650–656.

Cheng, Y., Cai, W., Li, H. T., and Zheng, Y. F. (2006). Surface modification of NiTi alloy with tantalum to improve its biocompatibility and radiopacity. *Journal of Material Science*, 41, 4961-4964.

Chu, J.H., Tong, L.B., Jiang, Z.H., Sun, G.X., Zou, D.N. Zhang, C.H. and Zhang, H.J. (2021). Simultaneously improved corrosion/wear resistances of Mg alloy through an ultra-thin $Mg(OH)_2$/graphene-APTES coating. *Diamond and Related Materials*, 112, 108251.

Dilshad, T.T., Rahim, S.A., and Hanas, T. (2020). Tailoring Biodegradation of Mg-Ca Alloys By Hydro-Thermal Treatment. *Materials Today-Proceedings*, 22, 2118-2123.

Diqing, W., Jincheng, W., Gaifang, W., and Gencang, Y. (2009). High damping properties of Mg–Si binary hypoeutectic alloys. *Materials Letters*, 63, 391-393.

Duran, K.S., Henandez-Barrios, C.A., Coy, A.E., Viejo, F. (2021). Effect of fluoride conversion pretreatment time and the microstructure on the corrosion performance of TEOS-GPTMS sol–gel coatings deposited on the WE54 magnesium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4220-4242.

Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Birbilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Arrabal, R., Thomas, S., and Johansson, L. G. (2017). Funda-

mentals and advances in magnesium alloy corrosion. *Progress in Materials Science*, 89, 92–193.

Fontana, M. (1986). *Corrosion Engineering*. (M. B. Bever, S. M. Copley, M. E. Shank, C. A. Wert, ve G. L. Wilkes, Ed.). Singapore: McGraw-Hill.

Gao, L.L., Zhang, C.H., Zhang, M.L., Huang, X.M. and Jiang, X. (2009). Phytic acid conversion coating on Mg-Li alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 485(1-2), 789-793.

Gray, J. E. and Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336, 88–113.

Gu, X. N., Li, N., Zhou, W. R., Zheng, Y. F., Zhao, X., Cai, Q. Z., and Ruan, L. (2011). Corrosion resistance and surface biocompatibility of a microarc oxidation coating on a Mg-Ca alloy. *Acta Biomaterialia*, 7, 1880-1889.

Gupta, M., and Sharon, N. M. L. (2010). *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. Canada: Wiley.

Haghshenas, M. (2017). Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(2), 189–201.

Hiromoto, S., Inoue, M., Taguchi, T., Yamane, M., and Ohtsu, N. (2015). In vitro and in vivo biocompatibility and corrosion behaviour of a bioabsorbable magnesium alloy coated with octacalcium phosphate and hydroxyapatite. *Acta Biomaterialia*, 11, 520-530.

Huang, Y., Qiao, H., Nian, X., Zhang, X., Zhang, X., Song , G., and Han, S. (2016). Improving the bioactivity and corrosion resistance properties of electrodeposited hydroxyapatite coating by dual doping of bivalent strontium and manganese ion. *Surface & Coatings Technology*, 291, 205-215.

Jia, X., Song, J., Xiao, B., Liu, Q., Zhao, H., Yang, J., Wu, L., Jiang, B., Atrens, A., Pan, F. (2021). Influence of indentation size on the corrosion behaviour of a phosphate conversion coated AZ80 magnesium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1739-1753.

Jamesh, M. I., Wu, G., Zhao, Y., McKenzie, D. R., Bilek, M. M. M., and Chu, P. K. (2015). Electrochemical corrosion behavior of biodegradable Mg-Y-RE and Mg-Zn-Zr alloys in Ringer's solution and simulated body fluid. *Corrosion Science*, 91, 160–184.

Kainer, K. U. (Ed.). (2003). *Magnesium : Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications*. Germany: Wiley.

Kan, Y., Zheng, F., Li, B., Zhang, R., Wei, Y., Yu, Y., Zhang, Y., Ouyang, Y., and Qiu, R. (2021). Self-healing dual biomimetic liquid-infused slippery surface in a partition matrix: Fabrication and anti-corrosion capability for magnesium alloy, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127585.

Kayhan, S. M., Tahmasebifar, A., Koç, M., Usta, Y., Tezcaner, A., and Evis, Z. (2016). Experimental and numerical investigations for mechanical and microstructural characterization of micro-manufactured AZ91D magnesium alloy disks for biomedical applications. *Materials and Design*, 93, 397-408.

Kuang, X., Chiou, J., Lo, K., Wen, C. (2021). Magnesium in joint health and osteoarthritis: A review. *Nutrition Research*, 90, 24-35.

Kumar, R. M., Kuntal, K. K., Singh, S., Gupta, P., Bhushan, B., Gopinath, P., and Lahiri, D. (2016). Electrophoretic deposition of hydroxyapatite coating on Mg–3Zn alloy for orthopaedic application. *Surface & Coatings Technology*, 287, 82-92.

Li, S., Yi, L.H., Liu, T.F., Deng, H., Ji, B., Zhang, K., and Zhou, L.H. (2020). Formation of a protective layer against corrosion on Mg alloy via alkali pretreatment followed by vanillic acid treatment. *Materials and Corrosion*, 71(8), 1330-1338.

Liao, T.H., Pu, Y., Zhang, X.L., Zhu, B. and Tang, H. (2021). Structure and Properties of Hydroxyapatite-Containing Ceramic Coatings on AZ31 Mg Alloy Treated with Different Applied Frequencies. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 57(5), 1051-1059.

Lingaraju, S.V., Malikarjuna, C., Annapa, A.R. and Venkatesha, B.K., Processing, and Characterization of AZ91D Magnesium Alloy Reinforced Nano TiC, B4C, and HBN Composites, *MaterialsToday: Proceedings*, 2021.

Liu, G. Y., Hu, J., Ding, Z. K., and Wang, C. (2011). Bioactive calcium phosphate coating formed on micro-arc oxidized magnesium by chemical deposition. *Applied Surface Science*, 257, 2051-2057.

Lloyd, J.T, Jannotti, P.A., Jones, T.L. (2021). An overview of penetration behavior in magnesium alloys. *Mechanics of Materials*, 162, 104038.

Majumdar, J. D., Bhattacharyya, U., Biswas, A., and Manna, I. (2008). Studies on thermal oxidation of Mg-alloy (AZ91) for improving corrosion and wear resistance. *Surface & Coatings Technology*, 202, 3638-3642.

Manivasagam, G., Dhinasekaran, D., and Rajamanickam, A. (2010). Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review. *Recent Patents on Corrosion Science*, 2(1), 40–54.

Merachtsaki, D., Tsardaka, E.-C., Anastasiou, E., Zouboulis, A. (2021). Anti-corrosion properties of magnesium oxide/magnesium hydroxide coatings for application on concrete surfaces (sewerage network pipes), *Construction and Building Materials*, 312, 125441.

Nie, J. F. and Wang, Y. (2019). Microstructural design for advanced light metals. *MRS Bulletin,* 44, 281-286.

Pan, F., Yang, M., and Chen, X. (2016). A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys. *Journal of Materials Science and Technology*, 32(12), 1211–1221.

Pham, D.N., Hiromoto, S., Yamazaki, T., Minho, O., and Kobayashi, E. (2021). Enhanced Corrosion Resistance and In Vitro Biocompatibility of Mg-Zn Alloys by Carbonate *Apatite Coating*. *Applied Bio Materials*, 4(9), 6881-6892.

Predko, P., Rajnovic, D., Grilli, M.L., Postolnyi, B.O., Zemcenkovs, V., Rijkuris, G., Pole, E. and Lisnanskis, M. (2021). Promising Methods for Corrosion Protection of Magnesium Alloys in the Case of Mg-Al, Mg-Mn-Ce and Mg-Zn-Zr: A Recent Progress Review. *Metals*,11, 1133.

Rahman, M., Li, Y.C., and Wen, C.E. (2020). HA coating on Mg alloys for biomedical applications: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(3), 929-943.

Razavi, M., Fathi, M., Savabi, O., Vashaee, D., and Tayebi, L. (2015). Razavi, M., Fathi, M., Savabi, O., VasIn vivo assessments of bioabsorbab-

le AZ91 magnesium implants coated with nanostructured fluoridated hydroxyapatite by MAO/EPD technique for biomedical applications. *Materials Science and Engineering C*, 48, 21-27.

Razik Mohammed, A.A.A. (2021). Biomechanical evaluation of magnesium plates for management of mandibular angle fracture. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*.

Ren, Y., Zhou, H., Nabiyouni, M., and Bhaduri, S. B. (2015). Rapid coating of AZ31 magnesium alloy with calcium deficient hydroxyapatite using microwave energy. *Materials Science and Engineering C*, 49, 364-372.

Rendenbach, C., Fischer, H., Kopp, A., Schmidt-Bleek, K., Kreiker, H., Stumpp, S., Thiele, M., Duda, G., Hanken, H., Beck-Broichsitter, B., Jung, O., Kröger, N., Smeets, R., Heiland, M. (2021). Improved in vivo osseointegration and degradation behavior of PEO surface-modified WE43 magnesium plates and screws after 6 and 12 months. *Materials Science and Engineering: C*, 129, 112380.

Sahoo, B. N., and Panigrahi, S. K. (2016). Synthesis, characterization and mechanical properties of in-situ (TiC-TiB2) reinforced magnesium matrix composite. *Materials and Design*, 109, 300-313.

Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of Corrosion Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. London: CRC Press.

Smith, W. F. (1994). *Structure and Properties of Engineering Alloys* (Second Edition). Florida: McGraw-Hill.

Song, G.-L. (Ed.). (2011). *Corrosion of magnesium alloys*. Oxford: Woodhead Publishing.

Song, G. L., and Atrens, A. (1999). Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 1(1), 11–33.

Song, Y., Shan, D., and Han, E.-H. (2017). Pitting corrosion of a Rare Earth Mg alloy GW93. Journal of Materials Science & Technology, 33(9), 954-960.

Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., and Dias, G. (2006). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*, 27(9), 1728–1734.

Sun, Y.H., Wang, R.C., Peng, C.Q., Feng, Y. and Yang, M. (2017). Corrosion behavior and surface treatment of superlight Mg-Li alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Sociuety of China*, 27(7), 1455-1475.

Surmeneva, M. A., Tyurin, A. I., Mukhametkaliyev, T. M., Pirozhkova, T. S., Shuvarin, I. A., Syrtanov, M. S., and Surmenev, R. A. (2015). Enhancement of the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy via nanostructured hydroxyapatite thin films fabricated via radio-frequency magnetron sputtering. *Journel of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 46, 127-136.

Tokunaga, T., Sotomoto, K., Ohno, M. and Matsuura, K. (2020). Development of High Corrosion- and Wear-Resistant Al-Si Alloy Coating on AZ80 Mg Alloy by Hot Extrusion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 6355–6362.

Wang, C.X., Fang, H., Hang, C.J., Sun, Y.R., Peng, Z.B., Wei, W. and Wang, Y.S. (2020). Fabrication and characterization of silk fibroin coating on APTES pretreated Mg-Zn-Ca alloy. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*, 110, 110742.

Wang, G.X., Zhang, M.L. and Wu, R.Z. (2012). Molybdate and molybdate/permanganate conversion coatings on Mg-8.5Li alloy. *Applied Surface Science*, 258(7), 2648-2654.

Wang, J., Li, D.D., Yu, X., Jing, X.Y., Zhang, M.L. and Jiang, Z.H. (2010). Hydrotalcite conversion coating on Mg alloy and its corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 494(1-2), 271-274.

Wang, J., Pang, X. and Jahed, H. (2019). Surface protection of Mg alloys in automotive applications: A review. *Aims Materials Science*, 6(4), 567-600.

Wang, X. J., Hu, X. S., Liu, W. Q., Du, J. F., Wu, K., Huang, Y. D., and Zheng, M. Y. (2017). Ageing behavior of as-cast SiCp/AZ91 Mg matrix composites. *Materials Science & Engineering A*, 682, 491-500.

Westengen, H. (2001). Magnesium Alloys: Properties and Applications. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 4746–4753.

Xin, Y., Hu, T., and Chu, P. K. (2011). Degradation behaviour of pure magnesium in simulated body fluids with different concentrations of HCO^{3-}. *Corrosion Science*, 53(4), 1522–1528.

Xu, L., Pan, F., Yu, G., Yang, L., Zhang, E., and Yang, K. (2009). In vitro and in vivo evaluation of the surface bioactivity of a calcium phosphate coated magnesium alloy. *Biomaterials*, 30, 1512-1523.

Xu, J., Hu, W., Xie, Z. H., and Munroe, P. (2016). Reactive-sputter-deposited ß-Ta2O5 and TaON nanoceramic coatings on Ti-6Al-4V alloy against wear and corrosion damage. *Surface & Coatings Technology*, 296, 171-184.

Yan, F., Chen, B., Yao, J., Zhang, D., Yan, M.F., Zhang, Y. (2021). Characterization of microstructure and corrosion properties of AZ91D magnesium alloy surface-treated by coating-nitriding. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1559-1568.

Yang, L.H., Li, J.Q., Yu, X., Zhang, M.L. and Huang, X.M. (2008). Lanthanum-based conversion coating on Mg-8Li alloy. *Applied Surface Science*, 255(5), 2338-2341.

Yang, L.H., Zhang, M.L., Li, J.Q., Yu, X. and Niu, Z.Y. (2009). Stannate conversion coatings on Mg-8Li alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1-2), 197-200.

Yang, X.W., Wang, G.X., Dong, G.J., Gong, F. and Zhang, M.L. (2009). Rare earth conversion coating on Mg-8.5Li alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 487(2), 64-68.

Yang, W., Liu, Z., Huang, H. (2021). Galvanic corrosion behavior between AZ91D magnesium alloy and copper in distilled water. *Corrosion Science*, 188, 109562.

Yao, H.L., Xia, J., Yi, D.L., Yang, C., Zhang, M.X., Bai, X.B., Chen, Q.Y., Wang, H.T., and Li, S.B. (2021) Microstructure and Corrosion Properties of Biodegradable Mg/MgO Composite Coating on Mg Alloy Prepared by High Velocity Suspension Flame Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 1544–1556.

Yu, B.L., Lin, J.K. and Uan, J.Y. (2010). Applications of carbonic acid solution for developing conversion coatings on Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(7), 1331-1339.

Zhai, H., Yuan, H., Li, W., Zhang, X., Li, X., and Cai, A. (2021). Corrosion resistance mechanisms of detonation sprayed Fe-based amorphous coating on AZ31B magnesium alloy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 121276.

Zheng, X.Y., Lai, H.S. and Zhao, Z.L. (2021). Preparation of Iron Tetradecanoate Coating on the Surface of Mg-Li Alloy and Its Corrosion Resistance. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(1), 150914.

Zhou, Y., Li, M., Cheng, Y., Zheng, Y. F., Xi, T. F., and Wei, S. C. (2013). Tantalum coated NiTi alloy by PIIID for biomedical application. *Surface & Coatings Technology*, 228, 2-6.

Zhu, J., Jia, H., Liao, K., and Li, X. (2021). Improvement on corrosion resistance of micro-arc oxidized AZ91D magnesium alloy by a pore-sealing coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 889, 161460.

BULANIK MANTIK VE GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE HATA TÜRLERİ ve ETKİLERİ ANALİZİ: ISI REZİSTANSI İMALATI UYGULAMASI

Bilgenur ÖZGAN[1], *Tülay KOKUSUZ POLAT*[2]

Öz: İşletmeler faaliyetlerini gerçekleştirirken ileriki süreçlerde onlar için birçok soruna sebep olabilecek hatalarla karşılaşabilmektedirler. Bu sebeple gerçekleşebilecek hataların önceden belirlenmesi, bu hatalar ve risklerin önüne geçilebilmesi için işletmeler açısından oldukça önemlidir. Bu amacı gerçekleştirmek için kullanılan pek çok hata/risk değerlendirme yöntemi bulunmaktadır. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA)'de başarılı sonuçlar verdiğinden hata ve/veya risklerin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. HTEA'nin belirsiz durumlarda bazı sonuçları yetersiz vermesi eleştirilerine karşılık olarak Bulanık Mantık teknolojisi ile birlikte kullanılan yöntem, bu sayede güvenilirliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada ısı rezistansı imalatında hata türleri belirlenerek bu hataların önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Klasik HTEA yaklaşımdan farklı olarak hataların ortaya çıkma sıklıkları, şiddet ve keşfedilebilirlik kriterlerinin belirlenmesinde bulanık mantık kullanılarak daha doğru sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda bulanık mantık ve HTEA yöntemi bir araya getirilip hata türleri değerlendirilerek, sezgisel durumların ortaya kaldırılması için gri ilişkisel analiz kullanılıp hataların önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Hatalar işletme uzmanlarından oluşan dört adet karar verici tarafından bulanık dilsel ifadelere dayanarak değerlendirilmiştir. Hata türleri ortaya çıkma sıklığı, şiddet ve keşfedilebilirlik faktörlerinin değerlendirmelerine göre analiz edilip, önem derecelerine göre sıralanmıştır. Çalışmanın sonunda, yapılan uygulama için Anova ve Korelasyon testi de uygulanmıştır.

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya / Türkiye, bilgenur.ozgan@ogr.sakarya.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4539-291X

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya / Türkiye, korkusuz@sakarya.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6693-7873

Anahtar Kelimeler: Hata Türleri, Bulanık Hata Türü ve Etkileri Analizi, Gri İlişkisel Analiz, Anova, Korelasyon

GİRİŞ

Müşterinin benzeri ürünleri rahat bulabilmesi, ürünlere her geçen gün daha kolay ulaşabilmesi gibi sebepler pazarlarda yaşanan rekabeti arttırmaktadır. İşletmelerin bu yoğun rekabet ortamında ayakta kalabilmeleri ve rakiplerinden farklılaşmalarında kaliteli ürün üretmek belki de en önemli faktörlerdendir. İşletmeler sürdürülebilir müşteri memnuniyeti ve dolayısıyla sürdürülebilir Pazar payı için kaliteli ürün üretmek ve hataları önceden tespit ederek sürekli iyileştirme yapmak zorundadırlar.

İşletmelerde riskleri ve hataları önceden tespit ederek önlem alabilmek için kullanılan pek çok yöntem vardır (Özfırat, 2014). Hata Türü ve Etkileri Analizi de (HTEA) bu yöntemlerden birisidir. HTEA'yı ürün yada süreçlerdeki potansiyel hataların tespitinde kullanılan bir kalite yönetim sistemi metodu olarak tanımlamakta mümkündür (Toptancı ve Erginel, 2017). Ayrıca teknik, sistem ve ürün tasarımı, süreç ve bakım faaliyetleri tasarımında kullanıldığında işletmelere büyük fayda sağlamaktadır (Eryürek ve Tanyaş, 2003).

Etkili ve faydalı bir değerlendirme yöntemi olan HTEA yöntemi literatürde pek çok farklı sektörde uygulanmıştır. Aşkın ve Birgün (2010) savaş uçaklarının irtifa kumanda sistemlerindeki arızaları incelemek için HTEA kullanmışlardır. Sabır ve Bebekli (2015) çalışmalarında tekstil boya terbiye işletmesindeki hataları analiz etmek için HTEA yöntemini kullanmışlardır. Efe ve arkadaşları (2016) iş güvenliği risklerini değerlendirmek için HTEA kullanmışlardır. Sırakaya ve Kasap (2019) yine iş güvenliği risklerini çalışmışlardır. Araştırmacılar bir mermer işletmesindeki tehlikeleri HTEA ile değerlendirmişlerdir. Türedi ve Bircan (2016) robot uygulamaları kullanan bir işletmede uygulama esnasında yaşanan teknik hataları analiz etmek için HTEA yöntemini kullanmışlardır. KorkusuzPolat ve Gürdrama (2019) otobüs imalatı yapan bir işletmede kullanılan dijital kalite sistemlerindeki kalite hatalarını değerlendirmek için HTEA kullanmışlardır.

Klasik HTEA yöntemi ile ilgili en önemli eksikliklerden birisi risk faktörlerinin ağırlıklarını eşit kabul etmesidir. Bu durum bazı uygulamalarda hatalı sonuçlar çıkarabilir. Bu eksikliğin giderilmesi için HTEA yöntemi bulanık mantık teknolojisi ve/veya çok kriterli karar verme teknikleri ile entegre şekilde kullanılmaktadır. Örneğin Sabuncu ve ark. (2019) hafif raylı ulaşım sistemleri için arıza kayıtlarını bulanık HTEA yöntemi ile inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Tekez (2018) çalışmasında HTEA ve bulanık TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanarak örme sürecindeki hataları analiz etmiştir. Ribas ve ark. (2021) hidroelektrik toprak baraj arıza türlerinin analizini bulanık HTEA yöntemi kullanarak yapmıştır. Dağsuyu ve ark. (2016) bir sterilizasyon ünitesi için risk analizini hem klasik HTEA ile hem de bulanık HTEA ile yapmışlardır.

Gri İlişkisel Analiz yöntemi de, belirsizliklerin söz konusu olduğu problemlerde belirsizlikleri analiz etmek amacı ile kullanılan çok kriterli bir karar verme tekniğidir. Yöntemin literatürde kullanımı son yıllarda artmıştır ve pek çok farklı sektörde uygulaması bulunmaktadır. Peker ve Baki (2011), Türk sigortacılık sektörünün performans ölçümünü yaptıkları çalışmalarında metot olarak gri ilişkisel analiz yöntemini kullanmışlardır. Tayyar ve ark. (2014) çalışmalarında bilişim ve teknoloji alanında faaliyet gösteren işletmeler için finansal performans ölçümünü gri ilişkisel analiz yöntemi ile yapmışlardır. Özdemir ve Deste (2009) çalışmalarında otomotiv sektöründe tedarik seçimi yapabilmek için gri ilişkisel analiz kullanmışlardır. Feng ve ark. (2021) çalışmalarında elektrikli araç şarj dolum istasyonları için tahmin problemini gri ilişkisel analiz ve yapay sinir ağlarını entegre kullanarak çözmüşlerdir.

Bu çalışmada da bulanık HTEA ve Gri İlişkisel Analiz yöntemleri bir arada kullanılarak ısı rezistansı üreten bir işletmenin borulu rezistans ürününe ait hataların önceliklendirilmesi yapılmıştır. Risk faktörleri bulanık ifadeler ile değerlendirilmiş ve risk faktörleri ağırlıkları belirlenmiştir. Risk faktörlerinin değerleri ve ağırlıkları arasında gri ilişki hesaplanmış ve hatalar önceliklendirilmiştir.

BULANIK HATA TÜRÜ ve ETKİLERİ ANALİZİ

Hataların Değerlendirilmesi

Bulanık HTEA çalışmasında hataların değerlendirilmesi için klasik HTEA yönteminde ortaya çıkma sıklığı, şiddet ve keşfedilebilirlik olmak üzere 3 risk faktörü kullanılmaktadır. Ortaya çıkma sıklığı: hatanın oluşabilme potansiyeli, şiddet: hatanın maruz kalan kişiye/sürece/departmana olan etkisinin derecesi ve keşfedilebilirlik: üründeki ilgili hatanın ürünün müşteriye ulaşana kadarki sürecinde saptanabilirliğini göstermektedir.

Uygulama yapılmasına karar verilen prosesin potansiyel hata türleri belirlenmekte ve bu hatalar oluşturulan uzman karar vericiler tarafından esnek bir şekilde değerlendirilmektedir. Karar vericiler de bilgi ve tecrübe seviyelerine göre ağırlıklandırılmaktadır ki daha objektif bir değerlendirme yapılabilsin.

Tablo 1'de risk faktörlerinin değerlendirilmesinde kullanılan bulanık değerlendirme dereceleri verilmiştir (Liu ve ark., 2011).

Tablo 1. Bulanık Değerlendirme Dereceleri

Dilsel İfade	Bulanık Sayı
Çok düşük (H_{11})	(0,0,1,2)
Düşük (H_{22})	(1,2,3,4)
Orta (H_{33})	(3,4,6,7)
Yüksek (H_{44})	(6,7,8,9)
Çok yüksek (H_{55})	(8,9,10,10)

Bu dereceleri daha esnek hale getirilmek için H_{ij} şeklinde değerlendirme yapılmaktadır (i=1,…5; j=1,…5). Örneğin "Yüksek" değerlendirmesi {H_{44}, (1,0)} şeklinde ifade edilmektedir. Fakat değerlendirme iki derece arasında da yapılabilmektedir. Düşük ve orta arasında bir değerlendirme yapılacaksa; iki derecenin ağırlık toplamı 1,0 olacak şekilde {(H_{22}, 0,2), {(H_{33}, 0,8)} şeklinde karar vericinin belirlediği ağırlıkla değerlendirme yapılmaktadır (Liu ve ark., 2011).

İki derecenin tam ortasında bir değerlendirme yapılırsa bu H_{45} (yüksek ve çok yüksek arasında) olarak ifade edilmektedir. Eğer karar verici belli bir hatanın risk faktörü için değerlendirme yapamıyorsa boş geçilerek, hesaplamada bunun yerine {H_{15}, (1,0)} şeklinde tüm dereceleri kapsayan genel bir derece verilmektedir.

Her hatanın risk faktörleri için 'n' adet karar vericinin değerlendirmesi birleştirilirken eşitlik (1) de verilen formül kullanılmaktadır (Turgut, 2013):

$$Hata_x(\text{Risk faktörü}) = \{H_{ij}(a_n{}^*b_n)\} \qquad (1)$$

(i=1,…5; j=1,…5, n=1,…4) (a: j.değerlendirme ağırlığı, b: karar verici ağırlığı)

Örnek:

{H_{44}(0,35+0,8*0,20), H_{34}(0,25+0,20), H_{55}(0,2*0,20)}= {H_{44}(0,51), H_{34}(0,45), H_{55}(0,04)}

Değerlendirmelerin Durulaştırılması

Birleştirilmiş bulanık değerlendirmeler sayısal değerlere çevrilmek için değerlendirmelerin bulanık sayı karşılıkları durulaştırılmakta ve rasyonel sayı elde edilmektedir. Durulaştırma işlemi için eşitlik (2) de verilen formül kullanılmaktadır (Turgut, 2013):

$$H_{ij}=\frac{\sum_{i=0}^{n}(b_i-\mathrm{c})}{\sum_{i=0}^{n}(b_i-\mathrm{c})-\sum_{i=0}^{n}(a_i-\mathrm{d})} \quad (2)$$

(a_0, b_0, a_1, b_1= dilsel ifadelerin uç değerleri; c,d= tüm bulanık ifadelerin uç değerleri)

Örneğin 'orta' değerlendirmesinin a_0 değeri 3, a_1 değeri 4; b_0 değeri 6 ve b_1 değeri 7'dir. c ve d değerleri tüm ifadelerin en uç 2 noktası olan 0 ve 10 a karşılık gelmektedir.

Durulaştıran değerler birleştirilmiş değerlendirmelerde yerlerine konularak her hata için risk faktörü değerleri hesaplanmaktadır.

Örneğin ortaya çıkma sıklığının birleştirilmiş değerlendirmesi

{H_{44}(0,51), H_{34}(0,45), H_{55}(0,04)} şeklinde olan bir hatada hesaplanan H_{ij} değerleri yerine konulur ve

(0,708*0,51)+(0,567*0,45)+(0,870*0,04)= 0,651 olarak hesaplanır.

Risk Faktörlerinin Ağırlıklandırılması

Karar vericiler hatalarda olduğu gibi risk faktörleri için de bulanık değerlendirmede bulunmaktadır.

Tablo 2'de risk faktörlerinin ağırlıklandırılmasında kullanılan dilsel ifadeler ve onlara karşılık gelen bulanık sayılar verilmiştir (Wang ve ark., 2019).

Tablo 2. Risk Faktörlerinin Ağırlıklandırılması İçin Dilsel İfadeler ve Bulanık Sayılar

Dilsel İfade	Bulanık Sayı
Çok düşük	(0,0,0.25)
Düşük	(0,0.25,0.5)
Orta	(0.25,0.5,0.75)
Yüksek	(0.5,0.75,1)
Çok yüksek	(0.75,1,1)

Değerlendirmelerin grup ağırlıkları hesaplanırken kullanılan formül eşitlik (3) de verilmiştir (Turgut, 2013).

Risk Faktörü Grup Ağırlığı

$(b_1{*}d_{11}+\ b_2{*}d_{21}+..+\ b_n{*}d_{n1},\ b_1{*}d_{12}+\ b_2{*}d_{22}+..+\ b_n{*}d_{n2},\ b_1{*}d_{31}+\ b_2{*}d_{32}+..+\ b_n{*}d_{n3}\ )$ (3)

(b_n: Karar verici ağırlığı, d_{ny}: n karar veicisinin değerlendirmesinin y. bulanık sayısı)

Örneğin bir risk faktörü için ağırlıkları 0,3 ve 0,7 olan iki karar verici sırasıyla düşük ve orta ifadelerini kullandıysa bu ifadelerin grup ağırlığı:

(0.3*0+0,7*025, 0.3*0.25+0.7*0.5, 0.3*0.5+0.7*0.75)

şeklinde hesaplanır.

Grup ağırlıkları durulaştırılıp risk faktörlerinin ağırlıkları bulunmaktadır. Bunun için eşitlik (4) deki formül kullanılmaktadır (Turgut, 2013):

Risk ağırlığı= $\frac{g_{n2}}{(g_{n1}+g_{n2}+g_{n3})}$ (g: grup ağırlığı) (4)

Gri İlişkisel Analiz

Gri ilişkisel analiz ile hatalar önceliklendirilmektedir. Gri teoride durulaştırılmış değerlendirmeler matris haline getirilmektedir. Buna karşılaştırmalı seri denilmektedir. Bu matrisle eş büyüklükte bir standart seri matrisi oluşturulmaktadır. Standart seri matrisi, dilsel terimlerin durulaştırılmış en küçük değerinden oluşmaktadır. Bu iki matrisin fark matrisi ile gri ilişkisel katsayılar matrisi oluşturulur (Turgut, 2013). Gri ilişkisel katsayı; hata ve risk faktörü arasındaki ilişkidir.

Gri ilişkisel katsayı hesabında kullanılan formül eşitlik (5) de verilmiştir (Wang ve ark., 2019):

Gri İlişkisel Katsayı= $\frac{Min\ duru\ sayı+0{,}5*Max\ duru\ sayı}{c+0{,}5*Max\ duru\ sayı}$ (c: fark matrisindeki değer) (5)

Her hatanın risk faktörleri ile arasındaki gri ilişkisel katsayısı ile risk faktör ağırlıkları çarpılarak hataların ilişkisel dereceleri (öncelik değerleri) bulunmaktadır. Bunun için kullanılan formül eşitlik (6) da verilmiştir (Turgut, 2013):

İlişkisel derece=$\sum$ Hata ve risk faktörü gri ilişkisel katsayısı $*$ Risk faktörü ağırlığı (6)

Hesaplanan ilişkisel dereceler ile hataların öncelik sıralaması belirlenmektedir. En düşük ilişkisel dereceye sahip olan hata en yüksek riske sahiptir.

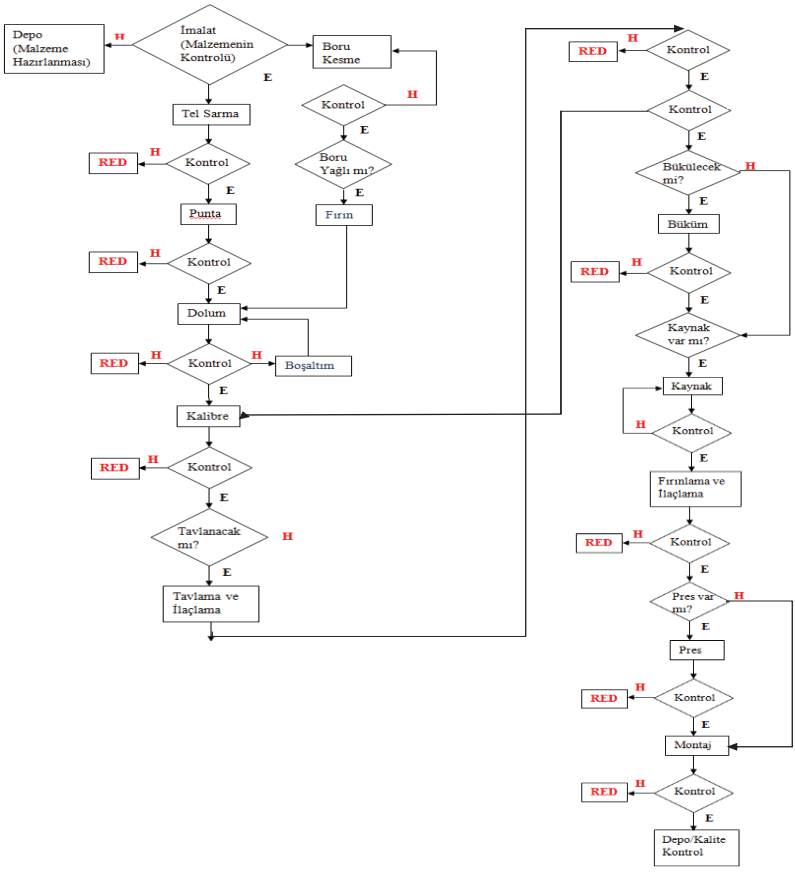
UYGULAMA

Isı rezistansı imalatı yapan bir işletmede artan hurda maliyetleri ve hatalı ürünlerden dolayı müşteri şikâyetlerinin artması problemleri ya-

şanmaktadır. İşletme potansiyel hataları belirleyip önlemek istemektedir. Hatalı ürünleri hatasız ürünlerden üretim sürecinin sonunda ayırmanın hem ekonomik hem de zaman açısından zararlarını fark eden işletme, kaliteyi üretim süreçlerinin sonunda değil, öncesinde kontrol etmek gerektiğine karar vermiştir. Uygulamanın amacı; potansiyel hataların analizi ile önleyici faaliyetlerin gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktır. İşletmenin hem gereksiz hurda maliyetlerini azaltarak kalitesini arttırmasına hem de müşteri memnuniyetinin arttırılmasına destek olmak istenmektedir.

Mevcut Sistemin İncelenmesi

İşletmedeki tüm rezistans çeşitlerine ait imalat süreçleri incelendikten sonra uygulama yapmak için hata potansiyeli en yüksek olan borulu rezistans imalatı seçilmiştir. Şekil 1'de borulu rezistans imalatının süreç akış şeması verilmektedir.



Şekil 1. Borulu Rezistans Üretim Süreç Akış Şeması

Borulu rezistans üretimi esnasında, sürecin her aşaması sonrasında kontrol gerçekleşmekte ve hata tespit edilen ürünler reddedilmektedir. Hatalı ürünlerin çoğu için tekrar üretim yapılmaktadır.

Potansiyel Hata Türlerinin Belirlenmesi

Borulu rezistans ürünü için HTEA tekniğinin uygulanırken öncelikle üretim sürecinin aşamaları incelenmiş ve daha önce de gerçekleşmiş olan hatalar da dikkate alınarak potansiyel hata türleri belirlenmiştir. Hata et-

kisi olarak hataların yıllık olarak firmayı uğrattığı zarar miktarı TL cinsinden ele alınmıştır. 20 adet hata türü belirlenmiştir. Belirlenen hata türleri ve etkileri tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Borulu Rezistans İçin Potansiyel Hata Türleri ve Etkileri

Hata Numarası	Proses	Hata türü	Etki (TL/Yıllık)
1	Bükme	Bükümde kırılma	11.599,72
2	Bükme	Daraltmada kırılma	1.240,65
3	Bükme	Hatalı büküm (Yanlış şekilde)	875,44
4	Bükme	Merkezleme hatası	827,25
5	Bükme	Bükümde deformasyon	792,47
6	Bükme	Daraltma- Preste ezilme	725,83
7	CNC Bükme	CNC makinede kırılma	3.214,46
8	Puntalama	Puntasız tel	2.762,10
9	Puntalama	Tel kopması	139,83
10	Puntalama	Hatalı saplama	102,71
11	Tel Sarma	Omaj hatası	234,70
12	Tel Sarma	Homojensizlik	204,63
13	Tavlama	Yanlış şekilde indüksiyon tavlama	7.013,98
14	Tavlama	İndüksiyonda delinme	2.055,97
15	Dolum	Toz boşalması	432,17
16	Dolum	Toz boşalmasında ezilme	59,28
17	Kaynak	Kaynaklama hatası	124,80
18	Boru Kesme	Hatalı boru boyu	67,66
19	Pres	Preste ezilme	28,06
20	Montaj	Montaj hatası	161,08

Hataların Değerlendirilmesi ve Risk Faktörlerinin Ağırlıklandırılması

Hataların risk faktörlerinin değerlendirilmesinde objektifliği elde edebilmek için işletmenin üretim bölümünden bir, planlama bölümünden bir ve kalite bölümünden iki kişi olmak üzere toplam dört farklı karar verici (KV) belirlenmiştir. Karar vericilerin tecrübe, bilgi ve deneyimlerinin farklı olduğu dikkate alınarak her bir karar vericiye değerlendirme için ağırlık atanmıştır (KV_1 için 0,35; KV_2 için 0,25; KV_3 için 0,20, KV_4 için 0,20).

Hataların şiddet değerleri etki aralıklarına göre belirlenmiştir. Etki aralıkları ve bu aralıklara karşılık gelen şiddet ifadesi tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Etki-Şiddet Aralıkları

Şiddet ifadesi	Etki aralığı (TL cinsinden)
Çok düşük	≤ 2.320
Düşük	2.321-4.640
Orta	4.641-6.960
Yüksek	6.961-9.280
Çok yüksek	≥ 9.281

Dört karar verici, belirlenen 20 hata türünü HTEA yönteminin risk faktörleri (ortaya çıkma sıklığı (S), şiddeti (Ş) ve fark edilebilirliği (F)) açısından değerlendirmiştir. Değerlendirme tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5. Karar Vericilerin Hata Türleri İçin Değerlendirmeleri

Hata türü		Risk Faktörleri		
		S	Ş	F
Bükümde kırılma (1)	KV_1	H_{44}	H_{55}	H_{55}
	KV_2	H_{34}	H_{55}	H_{33} (0,3), H_{44} (0,7)
	KV_3	H_{34}	H_{55}	H_{45}
	KV_4	H_{44} (0,8), H_{55} (0,2)	H_{55}	H_{45}
Daraltmada kırılma (2)	KV_1	H_{23}	H_{11}	H_{33}
	KV_2	H_{33}	H_{11}	H_{23}
	KV_3	H_{11} (0,2), H_{22} (0,8)	H_{11}	H_{23}
	KV_4	H_{23} (0,5), H_{33} (0,5)	H_{11}	H_{34}
Hatalı büküm (Yanlış şekilde) (3)	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{33}
	KV_2	H_{11} (0,2), H_{22} (0,8)	H_{11}	H_{33} (0,4), H_{44} (0,6)
	KV_3	H_{22}	H_{11}	H_{23}
	KV_4	H_{23}	H_{11}	H_{44}
Merkezleme hatası (4)	KV_1	H_{44}	H_{11}	H_{33}
	KV_2	H_{23} (0,3), H_{33} (0,7)	H_{11}	H_{12}
	KV_3	H_{33}	H_{11}	H_{22}
	KV_4	H_{23}	H_{11}	H_{22} (0,7), H_{33} (0,3)
Bükümde deformasyon (5)	KV_1	H_{22} (0,2), H_{33} (0,8)	H_{11}	H_{12}
	KV_2	-	H_{11}	H_{23}
	KV_3	H_{22}	H_{11}	H_{12}
	KV_4	H_{33}	H_{11}	H_{22}
	KV_1	H_{11}	H_{11}	H_{22}

Daraltma-Preste ezilme (6)	KV_2	H_{11} (0,4), H_{22} (0,6)	H_{11}	H_{23}
	KV_3	H_{11} (0,5), H_{22} (0,5)	H_{11}	H_{23}
	KV_4	H_{11}	H_{11}	-
CNC makinede kırılma (7)	KV_1	H_{23}	H_{22}	H_{22}
	KV_2	H_{33}	H_{22}	H_{23}
	KV_3	H_{22} (0,3), H_{33} (0,7)	H_{22}	H_{23} (0,7), H_{33} (0,3)
	KV_4	H_{22}	H_{22}	H_{22}
Puntasız tel (8)	KV_1	H_{23}	H_{22}	H_{44}
	KV_2	-	H_{22}	H_{34}
	KV_3	H_{33}	H_{22}	H_{33} (0,6), H_{44} (0,4)
	KV_4	H_{44}	H_{22}	H_{34}
Tel kopması (9)	KV_1	H_{33}	H_{11}	H_{44}
	KV_2	H_{23}	H_{11}	H_{45}
	KV_3	H_{22}	H_{11}	H_{34}
	KV_4	H_{22}	H_{11}	-
Hatalı saplama (10)	KV_1	H_{11}	H_{11}	H_{34}
	KV_2	H_{11} (0,8), H_{22} (0,2)	H_{11}	H_{44}
	KV_3	H_{11}	H_{11}	H_{34}
	KV_4	H_{22}	H_{11}	H_{33}
Omaj hatası (11)	KV_1	H_{22}	H_{11}	H_{34}
	KV_2	H_{11}	H_{11}	H_{23}
	KV_3	H_{11} (0,4), H_{22} (0,6)	H_{11}	H_{33}
	KV_4	H_{23}	H_{11}	H_{34}
Homojensizlik (12)	KV_1	H_{22}	H_{11}	H_{12}
	KV_2	H_{11}	H_{11}	H_{12}

	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{23}
	KV_4	H_{12}	H_{11}	H_{33}
Yanlış şekilde indüksiyon tavlama (13)	KV_1	H_{22} (0,5), H_{33} (0,5)	H_{44}	H_{44}
	KV_2	H_{33}	H_{44}	H_{45}
	KV_3	-	H_{44}	H_{55}
	KV_4	H_{22}	H_{44}	H_{44}
İndüksiyonda delinme (14)	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{23}
	KV_2	H_{11}	H_{11}	H_{44}
	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{34}
	KV_4	H_{12} (0,8), H_{22} (0,2)	H_{11}	H_{23}
Toz boşalması (15)	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{45}
	KV_2	H_{22}	H_{11}	H_{45} (0,7), H_{55} (0,3)
	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{33}
	KV_4	H_{11}	H_{11}	H_{33}
Toz boşalmasında ezilme (16)	KV_1	H_{22}	H_{11}	H_{34}
	KV_2	H_{33}	H_{11}	H_{22}
	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{33}
	KV_4	H_{22}	H_{11}	H_{33}
Kaynaklama hatası (17)	KV_1	H_{12} (0,7), H_{22} (0,3)	H_{11}	H_{45}
	KV_2	-	H_{11}	H_{44}
	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{45}
	KV_4	H_{22}	H_{11}	H_{33}
Hatalı boru boyu (18)	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{34}
	KV_2	H_{12}	H_{11}	H_{44}
	KV_3	H_{12} (0,4), H_{23} (0,6)	H_{11}	H_{22}
	KV_4	H_{23}	H_{11}	H_{34}
	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{44}

Preste ezilme (19)	KV_2	H_{11}	H_{11}	H_{33}
	KV_3	H_{12}	H_{11}	H_{33}
	KV_4	H_{33}	H_{11}	-
Montaj hatası (20)	KV_1	H_{12}	H_{11}	H_{22}
	KV_2	H_{23}	H_{11}	H_{22}
	KV_3	H_{23}	H_{11}	H_{11} (0,2), H_{22} (0,8)
	KV_4	H_{12}	H_{11}	H_{33}

Dört karar vericinin ağırlıkları dikkate alınarak yapılan hesaplamalar ile her hata türü için birleştirilmiş değerler belirlenmiştir. Tablo 6'da hata türlerinin birleştirilmiş değerlendirmeleri gösterilmektedir.

Tablo 6. Birleştirilmiş Değerlendirmeler

Hata	Ortaya çıkma sıklığı	Şiddet	Fark edilebilirlik
1	H_{44}(0,51), H_{34}(0,45), H_{55}(0,04)	H_{55}(1,0)	H_{55}(0,35), H_{33}(0,075), H_{44}(0,175), H_{45}(0,40)
2	H_{23}(0,45), H_{33}(0,35), H_{11}(0,04), H_{22}(0,16)	H_{11}(1,0)	H_{33}(0,35), H_{23}(0,45), H_{34}(0,20)
3	H_{12}(0,35), H_{11}(0,05), H_{22}(0,40), H_{23}(0,20)	H_{11}(1,0)	H_{33}(0,45), H_{44}(0,35), H_{23}(0,20)
4	H_{44}(0,35), H_{23}(0,275), H_{33}(0,375)	H_{11}(1,0)	H_{33}(0,41), H_{12}(0,25), H_{22}(0,34)
5	H_{22}(0,27), H_{33}(0,48), H_{15}(0,25)	H_{11}(1,0)	H_{12}(0,55), H_{23}(0,25), H_{22}(0,2)
6	H_{11}(0,75), H_{22}(0,25)	H_{11}(1,0)	H_{22}(0,35), H_{23}(0,45), H_{15}(0,2)

7	H_{23}(0,35), H_{33}(0,39), H_{22} (0,26)	H_{22}(1,0)	H_{22}(0,55), H_{23}(0,39), H_{33} (0,06)
8	H_{23}(0,35), H_{15}(0,25), H_{33} (0,2), H_{44}(0,2)	H_{22}(1,0)	H_{44}(0,43), H_{34}(0,45), H_{33} (0,12)
9	H_{33}(0,35), H_{23}(0,25), H_{22} (0,40)	H_{11}(1,0)	H_{44}(0,35), H_{45}(0,25), H_{34} (0,20), H_{15}(0,20)
10	H_{11}(0,75), H_{22}(0,25)	H_{11}(1,0)	H_{34}(0,55), H_{44}(0,25), H_{33} (0,20)
11	H_{22}(0,47), H_{11}(0,33), H_{23} (0,20)	H_{11}(1,0)	H_{34}(0,55), H_{23}(0,25), H_{33} (0,20)
12	H_{22}(0,35), H_{11}(0,25), H_{12} (0,40)	H_{11}(1,0)	H_{12}(0,60), H_{23}(0,20), H_{33} (0,20)
13	H_{22}(0,375), H_{33}(0,425), H_{15}(0,2)	H_{44}(1,0)	H_{44}(0,55), H_{45}(0,25), H_{55} (0,20)
14	H_{12}(0,71), H_{11}(0,25), H_{22} (0,04)	H_{11}(1,0)	H_{23}(0,55), H_{44}(0,25), H_{34} (0,20)
15	H_{12}(0,55), H_{22}(0,25), H_{11} (0,20)	H_{11}(1,0)	H_{45}(0,525), H_{55}0,075), H_{33}(0,40)
16	H_{22}(0,55), H_{33}(0,25), H_{12}(0,20)	H_{11}(1,0)	H_{34}(0,35), H_{22}(0,25), H_{33} (0,40)
17	H_{12}(0,445), H_{22}(0,305), H_{15}(0,25)	H_{11}(1,0)	H_{45}(0,55), H_{44}(0,25), H_{33} (0,20)
18	H_{12}(0,68), H_{23}(0,32)	H_{11}(1,0)	H_{34}(0,55), H_{44}(0,25), H_{22} (0,20)
19	H_{12}(0,55), H_{11}(0,25), H_{33} (0,20)	H_{11}(1,0)	H_{44}(0,35), H_{33}(0,45), H_{15} (0,20)
20	H_{12}(0,55), H_{23}(0,45)	H_{11}(1,0)	H_{22}(0,76), H_{11}(0,04), H_{33} (0,20)

Tablo 6'da hata türü değerlendirmesinde kullanılacak dilsel ifadelerin bulanık sayı karşılıkları ve değerlendirme derecelerinin durulaştırılmış sayı karşılıkları verilmektedir.

Tablo 7. Dilsel Değerlendirme İfadelerinin Durulaştırması

Değerlendirme İfadesi	Bulanık Sayı Karşılığı	Değerlendirme Derecesi	Durulaştırılmış Sayı Karşılığı
Çok düşük	(0,0,1,2)	H_{11}	0,13
		H_{12}	0,259
		H_{13}	0,394
		H_{14}	0,459
		H_{15}	0,5
Düşük	(1,2,3,4)	H_{22}	0,292
		H_{23}	0,433
		H_{24}	0,5
		H_{25}	0,541
Orta	(3,4,6,7)	H_{33}	0,5
		H_{34}	0,567
		H_{35}	0,606
Yüksek	(6,7,8,9)	H_{44}	0,708
		H_{45}	0,741
Çok yüksek	(8,9,10,10)	H_{55}	0,870

$$H_{11}=\frac{(2-0)+(1-0)}{\{(2-0)+(1-0)\}-\{(0-10)+(0-10)\}}=0{,}13$$

$$H_{12}=\frac{(3-0)+(4-0)}{\{(3-0)+(4-0)\}-\{(0-10)+(0-10)\}}=0{,}259$$

$$H_{13}=\frac{(6-0)+(7-0)}{\{(6-0)+(7-0)\}-\{(0-10)+(0-10)\}}=0{,}394$$

Tablo 8'de hataların birleştirilmiş değerlendirmeleri için yapılan durulaştırma işleminin sonucu gösterilmektedir.

Tablo 8. Birleştirilmiş Değerlendirmelerin Durulaştırılmış Sonuçları

Hata numarası	Ortaya çıkma sıklığı	Şiddet	Fark edilebilirlik
1	0,651	0,870	0,762
2	0,421	0,13	0,483
3	0,300	0,13	0,559
4	0,554	0,13	0,369
5	0,443	0,13	0,309
6	0,162	0,13	0,397
7	0,422	0,292	0,359
8	0,518	0,292	0,620
9	0,400	0,13	0,646
10	0,170	0,13	0,588
11	0,266	0,13	0,520
12	0,238	0,13	0,342
13	0,419	0,708	0,748
14	0,228	0,13	0,528
15	0,241	0,13	0,654
16	0,337	0,13	0,471
17	0,329	0,13	0,684
18	0,314	0,13	0,547
19	0,275	0,13	0,572
20	0,337	0,13	0,327

Tablo 8'de gösterilen durulaştırılmış sonuçlar eşitlik (2) ile hesaplanmıştır. Örneğin hata-1 için;

Ortaya çıkma sıklığı:

Hata 1= (0,708*0,51)+(0,567*0,45)+(0,870*0,04)= 0,651

Şiddet

Hata 1= (0,870*1,0)= 0,870

Fark Edilebilirlik

Hata 1= (0,870*0,35)+ (0,5*0,075)+ (0,708*0,175)+ (0,741*0,40)= 0,762

Tablo 9'da karar vericilerin risk faktörlerini önceliklendirmek için yaptıkları değerlendirmeler ve bu değerlendirmelere göre durulaştırılmış risk faktörü ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 9. Risk Faktörlerinin Ağırlıklandırması

		Değerlendirmeler		
		Ortaya çıkma sıklığı	**Şiddet**	**Fark edilebilirlik**
Karar Verici	KV_1	Çok yüksek	Yüksek	Orta
	KV_2	Yüksek	Çok Yüksek	Orta
	KV_3	Yüksek	Orta	Düşük
	KV_4	Orta	Yüksek	Orta
Bulanık grup ağırlıkları		(0.537, 0.787, 0.95)	(0.512, 0.762, 0.95)	(0.2, 0.5, 0.7)
Durulaştırılmış risk faktörü ağırlıkları		0,39	0,37	0,24

Ortaya Çıkma Sıklığı Grup Ağırlıkları

{(0,35*0,75+0,25*0,5+0,20*0,5+0,20*0,25),(0,35*1+0,25*0,75+0,20*0,75 +0,20*0,5),

(0,35*1+0,25*1+0,20*1+0,20*0,75)}= (0.537, 0.787, 0.95)

şeklindedir ve

Ortaya çıkma sıklığı ağırlığı= $\frac{0,787}{(0,787+0,762+0,5)}$ = 0,39 dur.

Gri İlişkisel Katsayı Hesaplanması ve Hataların Önceliklendirilmesi

Değerlendirme (karşılaştırmalı seri) matrisi, standart seri matrisi ve farkları aşağıda verilmiştir. Standart seri matrisinde, değerlendirme ifadelerinin durulaştırılmış değerlerinin en küçüğü olan 0,13≅0 olduğu için değerler 0 alınmıştır.

	0,651	0,87	0,762		0	0	0		0,651	0,87	0,762
	0,421	0,13	0,483		0	0	0		0,421	0,13	0,483
	0,3	0,13	0,559		0	0	0		0,3	0,13	0,559
	0,554	0,13	0,369		0	0	0		0,554	0,13	0,369
	0,443	0,13	0,309		0	0	0		0,443	0,13	0,309
	0,162	0,13	0,397		0	0	0		0,162	0,13	0,397
	0,422	0,292	0,359		0	0	0		0,422	0,292	0,359
	0,518	0,292	0,62		0	0	0		0,518	0,292	0,62
	0,4	0,13	0,646		0	0	0		0,4	0,13	0,646
	0,17	0,13	0,588		0	0	0	X'-	0,17	0,13	0,588
X'=				X_0=				X_0=			
	0,266	0,13	0,52		0	0	0		0,266	0,13	0,52
	0,238	0,13	0,342		0	0	0		0,238	0,13	0,342
	0,419	0,708	0,748		0	0	0		0,419	0,708	0,748
	0,228	0,13	0,528		0	0	0		0,228	0,13	0,528
	0,241	0,13	0,654		0	0	0		0,241	0,13	0,654
	0,337	0,13	0,471		0	0	0		0,337	0,13	0,471
	0,329	0,13	0,684		0	0	0		0,329	0,13	0,684
	0,314	0,13	0,547		0	0	0		0,314	0,13	0,547
	0,275	0,13	0,572		0	0	0		0,275	0,13	0,572
	0,337	0,13	0,327		0	0	0		0,337	0,13	0,327

Hata türleri ve risk faktörleri arasındaki gri ilişkisel katsayı matrisi aşağıda verilmiştir.

$$ג(1,1)=\frac{0,13+0,5*0,87}{0,651+0,5*0,87}=0,52$$

$$ג(1,2)=\frac{0,13+0,5*0,87}{0,87+0,5*0,87}=0,432$$

$$ג(1,3)=\frac{0,13+0,5*0,87}{0,762+0,5*0,87}=0,472$$

$$\gamma(X', X_0)= \begin{vmatrix} 0,52 & 0,432 & 0,472 \\ 0,66 & 1 & 0,647 \\ 0,768 & 1 & 0,568 \\ 0,571 & 1 & 0,702 \\ 0,643 & 1 & 0,759 \\ 0,946 & 1 & 0,679 \\ 0,659 & 0,777 & 0,711 \\ 0,592 & 0,777 & 0,535 \\ 0,676 & 1 & 0,522 \\ 0,933 & 1 & 0,552 \\ 0,805 & 1 & 0,591 \\ 0,839 & 1 & 0,727 \\ 0,661 & 0,494 & 0,477 \\ 0,852 & 1 & 0,586 \\ 0,835 & 1 & 0,518 \\ 0,731 & 1 & 0,623 \\ 0,739 & 1 & 0,504 \\ 0,754 & 1 & 0,575 \\ 0,795 & 1 & 0,561 \\ 0,731 & 1 & 0,741 \end{vmatrix}$$

Tablo 10'da gri ilişkisel katsayılara ve risk faktörü ağırlıklarına göre ilişkisel dereceler verilmiştir.

Tablo 10. İlişkisel Dereceler

Hata Numarası	İlişkisel Derece	Hata Numarası	İlişkisel Derece
1	0,475	**11**	0,825
2	0,782	**12**	0,871
3	0,805	**13**	0,555
4	0,761	**14**	0,842
5	0,802	**15**	0,819
6	0,901	**16**	0,804
7	0,715	**17**	0,779
8	0,646	**18**	0,802
9	0,758	**19**	0,814
10	0,866	**20**	0,832

Tablo 10' da verilen ilişkisel derecelerin hesaplanmasında örneğin;

Hata-1 İçin İlişkisel Derece

(0,39*0,52) + (0,37*0,432) + (0,24*0,472)= 0,475

Hata-2 İçin İlişkisel Derece

(0,39*0,66) + (0,37*1) + (0,24*0,647)= 0,782

Benzer şekilde tüm 20 ayrı hata türü için ilişkisel dereceler hesaplanmıştır ve bu derecelere göre en küçük ilişkisel dereceye sahip olan hata en önemli risktir.

Sonuç olarak hataların risk büyüklüklerine göre sıralaması:

Hata-1>Hata-13>Hata-8>Hata-7>Hata-9>Hata-4>Hata-17>Hata-2>Hata-5>Hata-18>Hata-16>Hata-3>Hata-19>Hata-15>Hata-11>Hata-20>Hata-14>Hata-10>Hata-12>Hata-6 şeklindedir.

Buna göre en riskli ilk beş hata türü: bükümde kırılma, yanlış şekilde indüksiyon tavlama, puntasız tel, CNC makinede kırılma ve puntalamada tel kopması olarak belirlenmiştir.

İSTATİSTİKSEL ANALİZ

ANOVA Testi

Bulanık HTEA ve gri ilişkisel analiz sonucu elde edilen öncelik değerlerine göre hatalar, belirlenen sınır değere göre çok riskli ve düşük riskli olarak 2 gruba ayrılmıştır. Risk grupları arasında; ortaya çıkma sıklığı, şiddet ve keşfedilebilirlik faktörlerine göre anlamlı bir fark olup olmadığı ANOVA ile %95 güven seviyesinde test edilmiştir. Tablo 11'de testin sonuç ekran görüntüsü verilmiştir.

Tablo 11. Anova Testi Sonuç Ekranı

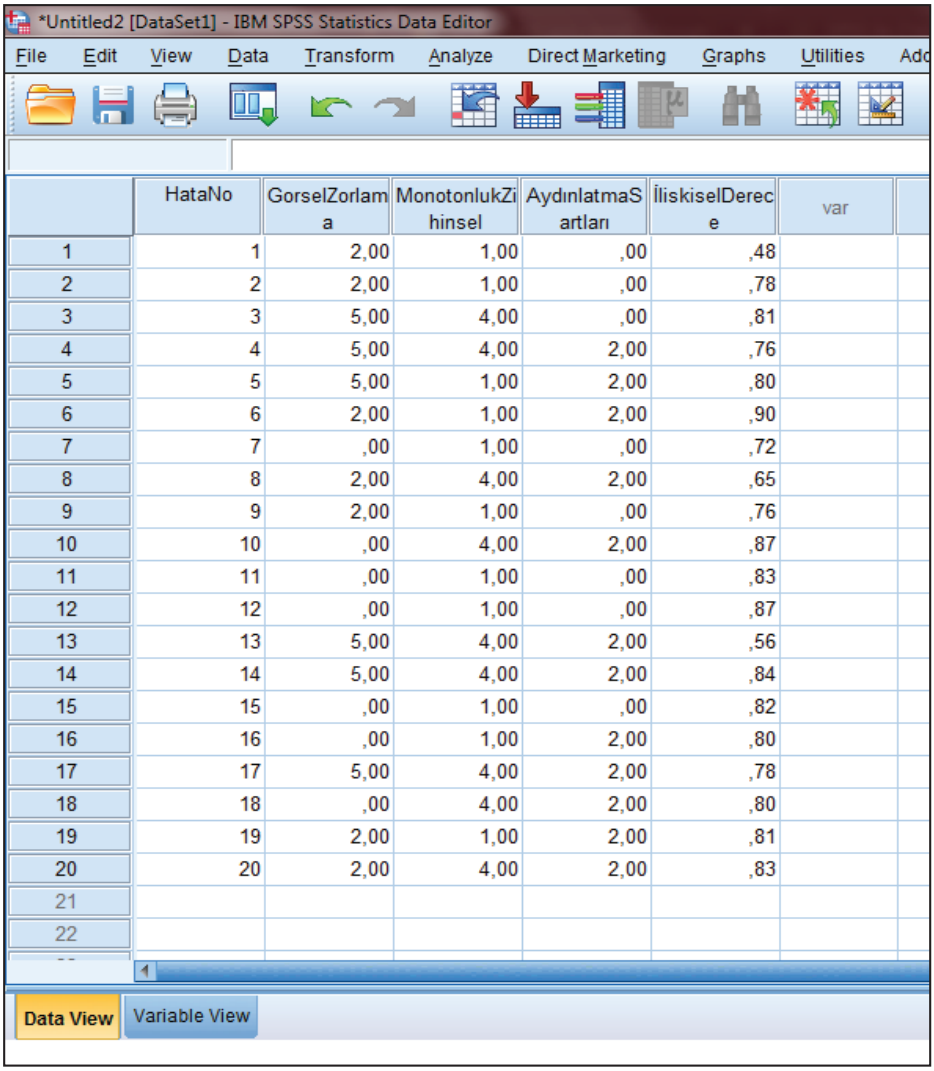
ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
OrtayaCıkmaSıklıgı	Between Groups	,114	1	,114	10,479	,005
	Within Groups	,196	18	,011		
	Total	,311	19			
Siddet	Between Groups	,539	1	,539	37,313	,000
	Within Groups	,260	18	,014		
	Total	,799	19			
Kesfedilebilirlik	Between Groups	,048	1	,048	2,671	,120
	Within Groups	,324	18	,018		
	Total	,372	19			

Tablo 11' de verilen sonuç ekranına göre Sig değerlerinin 0,05 ve altında olması; düşük riskli ve yüksek riskli hatalar arasında anlamlı bir fark oluşturduğunu göstermektedir. Ortaya çıkma sıklığı ve şiddet faktörü 2 grup arasında anlamlı bir fark oluşturmuştur. Özellikle şiddet faktörü 0,00 Sig değeri ile yüksek risk grubundaki hataların tamamında fark oluşturduğunu göstermektedir. Fakat keşfedilebilirliğin Sig değeri 0,05'in üzerindedir. Bu durum 2 grup arasında keşfedilebilirlik faktörü açısından anlamlı bir farklılık olmadığını göstermektedir.

Korelasyon Testi

Hataların öncelik değerlerinin, yapılan işin çalışma koşulları ile ilişkisi olup olmadığının tespiti için SPSS programı ile korelasyon testi yapılmıştır. Her hata üç ayrı koşul üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlar görsel zorlama, monotonluk (zihinsel) ve aydınlatma şiddetidir. Yapılan değerlendirmelerin ve ilişkisel derecelerin SPSS'e girilmiş hali şekil 2'de verilmiştir.



	HataNo	GorselZorlama	MonotonlukZihinsel	AydınlatmaSartları	İliskiselDerece	var
1	1	2,00	1,00	,00	,48	
2	2	2,00	1,00	,00	,78	
3	3	5,00	4,00	,00	,81	
4	4	5,00	4,00	2,00	,76	
5	5	5,00	1,00	2,00	,80	
6	6	2,00	1,00	2,00	,90	
7	7	,00	1,00	,00	,72	
8	8	2,00	4,00	2,00	,65	
9	9	2,00	1,00	,00	,76	
10	10	,00	4,00	2,00	,87	
11	11	,00	1,00	,00	,83	
12	12	,00	1,00	,00	,87	
13	13	5,00	4,00	2,00	,56	
14	14	5,00	4,00	2,00	,84	
15	15	,00	1,00	,00	,82	
16	16	,00	1,00	2,00	,80	
17	17	5,00	4,00	2,00	,78	
18	18	,00	4,00	2,00	,80	
19	19	2,00	1,00	2,00	,81	
20	20	2,00	4,00	2,00	,83	
21						
22						

Şekil 2. Korelasyon Testi SPSS Girdi Ekranı

Görsel Zorlama İçin

Dikkat gerektiren iş 0, İnce iş 2, Çok ince iş 5

Monotonluk (Zihinsel) İçin

Düşük 0, Orta 1, Yüksek 4

Aydınlatma Şartları İçin

Öngörülen değerin az altında 0, Çok altında 2, Tamamen yetersiz 5

Her koşul ile ilişkisel dereceler arasında korelasyon testi yapılmıştır. Tablo 12'de görsel zorlama ve ilişkisel derece arasındaki ilişki için çıkan sonuç ekranı verilmiştir.

Tablo 12. Görsel Zorlama ve İlişkisel Derece İçin SPSS Sonuç Ekranı

Correlations

		GorselZorlama	İliskiselDerece
GorselZorlama	Pearson Correlation	1	-,209
	Sig. (2-tailed)		,376
	N	20	20
İliskiselDerece	Pearson Correlation	-,209	1
	Sig. (2-tailed)	,376	
	N	20	20

Tablo 13'de monotonluk (zihinsel) ve ilişkisel derece arasındaki ilişki için çıkan sonuç ekranı verilmiştir.

Tablo 13. Monotonluk (Zihinsel) ve İlişkisel Derece İçin SPSS Sonuç Ekranı

Correlations

		MonotonlukZihinsel	İliskiselDerece
MonotonlukZihinsel	Pearson Correlation	1	-,065
	Sig. (2-tailed)		,785
	N	20	20
İliskiselDerece	Pearson Correlation	-,065	1
	Sig. (2-tailed)	,785	
	N	20	20

Tablo 14'de aydınlatma şartları ve ilişkisel derece arasındaki ilişki için çıkan sonuç ekranı verilmiştir.

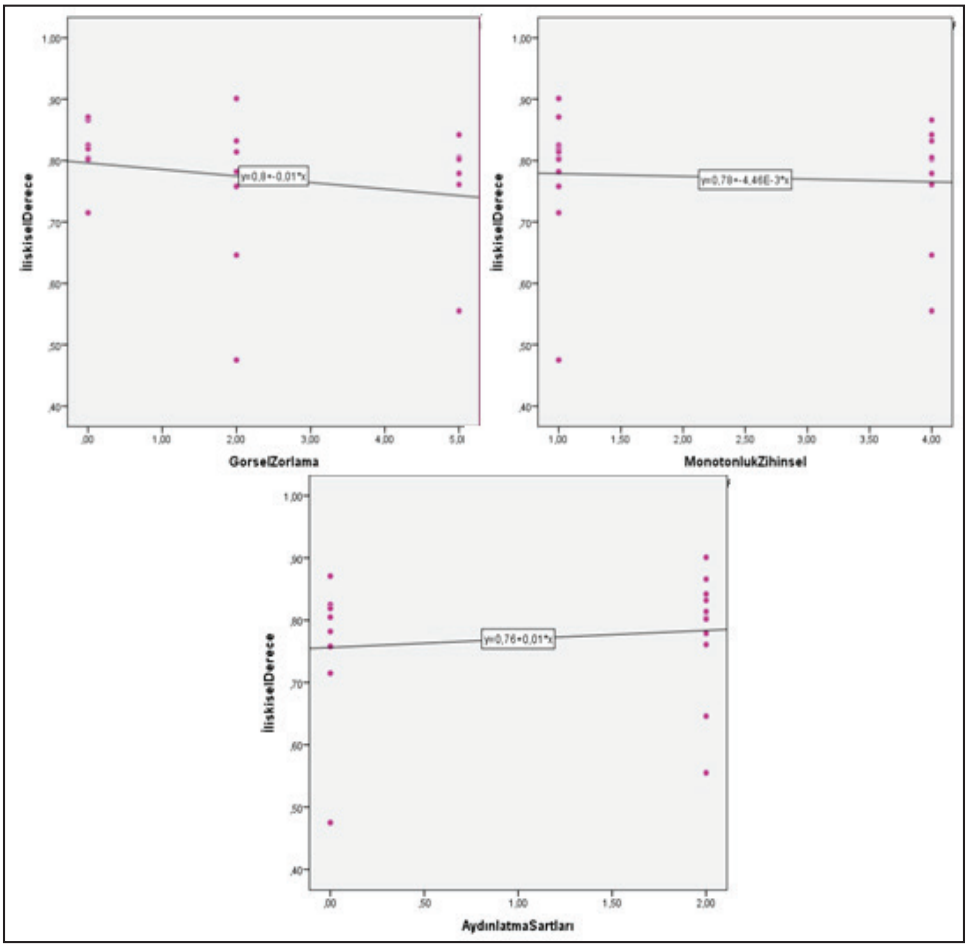
Tablo 14. Aydınlatma Şartları ve İlişkisel Derece İçin SPSS Sonuç Ekranı

Correlations

		AydınlatmaSartları	İliskiselDerece
AydınlatmaSartları	Pearson Correlation	1	,131
	Sig. (2-tailed)		,581
	N	20	20
İliskiselDerece	Pearson Correlation	,131	1
	Sig. (2-tailed)	,581	
	N	20	20

İlişkisel değerin küçük olması hatanın daha riskli olduğu anlamına gelmektedir. Bu yüzden koşullar ile arasında negatif bir ilişki olması, hataların oluşmasında etkili olduğu anlamına gelmektedir. Sonuçlara baktığımızda görsel zorlamanın korelasyon katsayısı -0,209, monotonluğun -0,065 ve aydınlatma şartlarının 0,131'dir. Yani aydınlatma şartları hata-

ların ortaya çıkmasında bir sebep olarak görünmemektedir. Görsel zorlama ve monotonluk zayıf da olsa bir etkiye sahiptir. Yapılan korelasyon çalışmalarına ait grafikler şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Korelasyon Grafikleri

Görsel zorlama ve monotonlukta zayıf bir negatif korelasyon eğrisi görülmekle beraber aydınlatma şartlarında bu etki görülmemektedir.

SONUÇ

Çalışmada ısı rezistansı üretimi yapan bir işletme için potansiyel hataları azaltmak üzere bulanık HTEA ve gri ilişkisel analiz yöntemleri entegre şekilde kullanılarak borulu rezistans ürünü için bir uygulama yapılmıştır. Bu kapsamda potansiyel hata türleri belirlenmiş, hataların değerlendirilmesi için bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda farklı ağırlıklara sahip dört adet uzman karar verici belirlenmiştir. Hatalar bulanık ifadelerle değerlendirilmiş, durulaştırılmış, risk faktörleri değerlendirip ağırlıklandırılmış, bu değerlendirmeler ile gri ilişkisel analiz yapılarak hatalar önem derecelerine göre sıralanmıştır.

Risk faktörlerinin önem ağırlıklarına bakıldığında en önemli olanın ortaya çıkma sıklığı, daha sonra şiddet ve keşfedilebilirlik olduğu görülmektedir.

HTEA yönteminin bulanık olarak kullanılması dilsel ifadelerin de hesaplamaya katılabilmesini sağlamıştır. Dilsel ifadelerin de hesaplamaya katılabilmesi ile daha doğru sonuçlar ve daha etkin önlemler alınması beklenmektedir.

Belirlenen 20 adet hata türünün değerlendirilmesi sonucunda önem dereceleri sıralaması:

Hata-1>Hata-13>Hata-8>Hata-7>Hata-9>Hata-4>Hata-17>Hata-2>Hata-5>Hata-18>Hata-16>Hata-3>Hata-19>Hata-15>Hata-11>Hata-20>Hata-14>Hata-10>Hata-12>Hata-6

şeklindedir.

En riskli ilk beş hata türü bükümde kırılma, yanlış şekilde indüksiyon tavlama, puntasız tel, CNC makinede kırılma ve puntalamada tel kopması olarak belirlenmiştir.

Hatalar önem sıralarına göre çok riskli ve düşük riskli olarak 2 gruba ayrılmıştır. Bu gruplar ANOVA testi ile analiz edilerek 2 grup arasında risk faktörleri açısından anlamlı bir fark olup olmadığına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çok riskli grubu düşük riskli gruptan, şiddet faktörü açısından tamamen ayrılmıştır. Ortaya çıkma sıklığı faktörü de

büyük ölçüde 2 grubu birbirinden ayırmıştır fakat keşfedilebilirlik açısından gruplar arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Bu sonuçlar risk faktörlerinin önem ağırlıklarını da doğrular niteliktedir.

İşletme ekonomik, zamansal ve müşteri memnuniyeti açısından oluşabilecek zararların; elde edilen önceliklendirme sırasına göre en yüksek hata türünden başlayıp iyileştirmeler yaparak önüne geçebilecektir. Hataların nedenlerine inilerek, hatalar oluştuktan sonra değil oluşmadan önce engellenecek ve bu sayede işletme iyileştirme faaliyetlerini sürekli hale getirerek ikinci kalite ürünlerin ve hurdaların azaltılmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla bu çalışma ile işletme verimliliğine ve karlılığına önemli katkıda bulunulması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Aşkın G., Birgün S. (2010). Savaş uçaklarının bakım faaliyetlerinin hata türü ve etkileri analizi. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, cilt: 4, sayı: 4, 1-10

Dağsuyu C., Göçmen E., Narlı M., Kokangül A. (2016). Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit. Computers&Industrial Engineering, 101, 286-294

Efe B., Yerlikaya M.A., Efe Ö.F. (2016). İş güvenliğinde bulanık promethee yöntemiyle hata türleri ve etkilerinin analizi: bir inşaat firmasında uygulama. GÜFBED-Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 126-137

Eryürek Ö.F., Tanyaş M. (2003). Hata türü ve etkileri analizi yönteminde maliyet odaklı yeni bir karar verme yaklaşımı. İTÜ Mühendislik Dergisi, cilt: 2, sayı: 6, 31-40

Feng J., Yang J., Li Y., Wang H., Ji H., Yang W., Wang K. (2021). Load forecasting of electric vehicle charging station based on grey theory and neural network. The 4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy – CEEGE, 10-13 June, Munich, Germany

KorkusuzPolat T., Gürdrama M.E. (2019). Dijital kalite sistemlerinde belirlenen kalite risklerinin hata türü ve etkileri analizi ile önceliklendi-

rilmesi: otobüs imalatı örneği. 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, November 22-24, Samsun, Turkey

Liu H.-C., Liu L., Bian Q.-H., Lin Q.-L., Dong N., Xu P.-C. (2011). Failure mode and effect analysis using fuzzy evidental reasoning approach and grey theory. Expert Systems with Applications, 38, 4403-4415

Özdemir A.İ., Deste M. (2009). Gri ilişkisel analiz ile çok kriterli tedarikçi seçimi: otomotiv sektöründe bir uygulama. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, cilt: 38, sayı: 2, 147-156

Özfırat P. M. (2014). Bulanık Önceliklendirme Metodu ve Hata Türü ve Etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(4), 755-768

Peker İ., Baki B. (2011). Gri ilişkisel analiz yöntemiyle Türk sigortacılık sektöründe performans ölçümü. International Journal of Economic and Administrative Studies, year: 4, number 7, summer

Ribas J.R., Severo J.C.R., Guimaraes L.F. (2021). A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil. Energy Reports, 7, 4412-4424

Sabır E.C., Bebekli M. (2015). Hata türleri ve etkileri analizinin, HTEA, tekstil boya-terbiye işletmelerinde kullanımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(1), 157-162

Sabuncu S., Yıldırak E., Topal C., Bıyık B., Ceylan Z. (2019). Bir hafif raylı ulaşım sisteminde bulanık hata türü ve etkileri analizi uygulaması. International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications – HORA, july 5-7, Nevşehir, Turkey

Sırakaya L., Kasap Y. (2019). Bir mermer işletmesinde hata türü ve etkileri analizi uygulaması. MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, sayı: 28, cilt: 1, 34-46

Tayyar N., Akcanlı F., Genç E., Erem I. (2014). BIST'e kayıtlı bilişim ve teknoloji alanında faaliyet gösteren işletmelerin finansal performanslarının analitik hiyerarşi prosesi (AHP) ve gri ilişkisel analiz (GİA) yöntemiyle değerlendirilmesi. Muhasebe ve Finansman Dergisi, Ocak

Tekez E.K. (2018). Failure modes and effects analysis using fuzzy topsis in knitting process. Tekstil ve Konfeksiyon, 28(1), 21-26

Toptancı Ş., Erginel N. (2017). Hata türü ve etkileri analizi ve kalite fonksiyon yayılımı ile bir inşaat firması için risk değerlendirmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Ergonomi Özel Sayısı, 189-199

Turgut M. (2013). Bulanık Mantık ve Gri Teori Esaslı HTEA ile Otomotiv Endüstrisi İmalatında Hata Önceliklendirme. İstanbul Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Türedi, A. T., Bircan, D. A. (2016). Endüstriyel Robotik Otomasyon Sistemlerinde Görülen Hataların ve Sistem Güvenilirliğinin Hata Türleri ve Etkileri Yöntemi ile Analizi. Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 672, s. 56-61

Wang H., Zhang Y.-M., Yang Z. (2019). A risk evaluation method to prioritize failure modes based on failure data and a combination of fuzzy sets theory and grey theory. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 82, 216-225



9 786057 594983

GÜVEN PLUS GRUP A.Ş.

GPGD

ORP