İŞ MAKİNELERİ KAYNAKLI BAĞLANTILARINDA OLUŞAN HASARLAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

Sena YAŞAR

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Besevler Campus

Email: sena.yasar@gazi.edu.tr

ORCID: 0009-0002-2073-4573

Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Besevler Campus

Email: ozcatalbas@gazi.edu.tr

ORCID: 0000-0002-4256-8492

ÖZET

Bu derleme çalışmasında, literatürde yer alan bilimsel çalışmalardaki veriler ve öneriler çerçevesinde iş makinelerinde işletme şartlarında karşılaşılan başlıca hasar türleri, hasarların oluşum mekanizmaları ve öneriler değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar, iş makinelerinde meydana gelen arızaların önemli bir kısmının kaynaklı bağlantılardan kaynaklandığını göstermektedir. Özellikle ekskavatör tipi iş makinaları, yoğun dinamik yükler, darbeli zorlanmalar ve zorlu çevresel koşullar altında çalışan kritik yapısal elemanlardır. Bu sistemlerin en kritik elemanlarından biri olan kaynaklı bağlantılar, yük aktarımında ve yapısal bütünlüğün korunmasında belirleyici bir rol oynayan kepçe gövdesini oluşturan çelik saclar arasındaki kaynaklı bağlantılarda yüksek gerilim yığılmalarına yol açmakta ve zamanla servis şartlarındaki yüklemelere rağmen hasar oluşturabilmektedir. Bununla birlikte kaynaklı birleştirmeler için uygun olmayan Kaynak Prosedür Şartnameleri (WPS'ler) veya kaynak prosesleri sürecinde yapılan işlem hataları, Tahribatsız Muayenenin (NDT) tam veya doğru uygulanmaması gibi faktörler hasarların önemli sebepleridir. Ayrıca, ürünün tasarımı sürecinde, yanlış malzeme seçimi veya şekillendirme sürecinde yapılan hatalar da iş makinalarında meydana gelen hasarların nedenlerindendir. Literatür verileri, ekskavatör bomları, bağlantı noktaları ve benzeri konstrüksiyon parçalarında görülen hasarların çoğunlukla kaynak kökenli yorulma çatlakları ile malzeme uyumsuzluklarından kaynaklandığını ve bu tür hasarların toplam arıza türleri içerisinde önemli bir paya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma ile iş makinelerindeki kaynaklı bağlantı güvenliğini artırmak amacıyla mevcut araştırmaların bütüncül bir bakış açısıyla derlenerek bilimsel bir veri kaynağının oluşturulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İş Makineleri, Kaynaklı Bağlantılar, Hasar Analizi, Hasar Mekanizmaları.

FAILURES AND PREVENTION METHODS IN WELDED JOINTS OF CONSTRUCTION MACHINERY

ABSTRACT

In this research study, the main types of failures encountered in construction machinery under operating conditions, the mechanisms of failure formation, and recommendations were evaluated within the framework of scientific studies and data found in the literature. The research conducted shows that a significant percentage of failures occurring in construction machinery are caused by welded joints. Especially excavator-type construction machinery are critical structural elements operating under intense dynamic loads, impact stresses, and harsh environmental conditions. Welded joints, one of the most critical elements of these systems, cause high stress loads in the welded joints between the steel plates that form the bucket body, which plays a decisive role in load transfer and maintaining structural integrity, and can cause damage over time despite the loads under service conditions. However, factors such as Welding Procedure Specifications (WPS) that are not suitable for welded joints or faults in the welding process, such as the incomplete or incorrect application of Non-Destructive Testing (NDT) procedures, are significant causes of failures. Furthermore, wrong material selection during the product design process or faults made during the forming process are also causes of failures in construction machinery. Literature shows that failures in excavator booms, connection parts, and similar construction components are mostly caused by fatigue cracks originating from welding and material incompatibilities, and that such failures account for a significant percentage of total failure types. This study aims to create a scientific knowledge base by reviewing existing research from a comprehensive perspective in order to improve the safety of welded connections in construction machinery.

Keywords: Construction Machinery, Welded Joints, Failure Analysis, Failure Mechanisms.

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojinin gelişimi, insanoğlunun hem ihtiyaçlarını karşılamak hem de daha iyi yaşam koşulları oluşturmak için sürdürdüğü çabaların doğal bir sonucudur. Bu çabanın önemli bir parçası da, işlerin tehlikeli olduğu veya insan yeteneğinin gerekliliğinin azaldığı durumlarda üretim süreçlerini otomatikleştirme isteğidir. Geçmişten bu yana makinelerin ve tezgâhların insan müdahalesi olmadan çalışabilmesi hedeflenmiş olsa da, bu hedefi gerçekleştirmek uzun süre mümkün olmamıştır. Çünkü insanın yeni durumlara uyum sağlama, beklenmeyen koşulları algılama, analiz etme ve makul sonuçlara ulaşma konusundaki üstün yetenekleri, günümüz teknolojisinin dahi tam anlamıyla taklit edemediği özelliklerdir. Bununla birlikte, günümüzde insan tarafından yapılabilen birçok görev, artık elektromekanik ve hidromekanik sistemler tarafından başarıyla yerine getirilebilmektedir. Robotlar ve iş makineleri pek çok imalat faaliyetinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiş, üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [1].

Ancak piyasa koşullarındaki dışa bağımlılık ve özellikle döviz kurlarındaki dalgalanmaların artması, iş makineleri kullanıcılarını ve yedek parça tedarikçilerini olumsuz etkilemektedir. Bu ekonomik koşullar altında en rasyonel yaklaşım, mevcut iş makinelerinin ve parçalarının kullanım ömrünü uzatmak, oluşabilecek hasarları erken aşamada tespit ederek büyümeden önlem almaktır [2]. Çünkü hasar, bir yapı ya da elemanın kendisinden beklenen işlevi yerine getiremeyecek hâle gelmesi olarak tanımlanır ve temelde elemanın aşırı zorlanması sonucunda ortaya çıkar. Bu zorlanma iki temel nedenden kaynaklanır: Elemanın dayanımının gerekli düzeyin altında olması veya elemana etki eden yüklerin, elemanın taşıyabileceği sınırları aşması. Dolayısıyla, hasarın doğru analiz edilmesi ve önleyici yaklaşımların benimsenmesi, hem makine verimliliğinin korunması hem de ekonomik kayıpların en aza indirilmesi açısından kritik öneme sahiptir [2,3].

1.1. Hasar ve Hasar Analizi

Hasar, bir yapının veya yapı elemanının kendisinden beklenen performans kriterlerini karşılayamaz hâle gelmesi olarak tanımlanır ve genellikle yapının tasarım, imalat, montaj ya da işletme aşamalarından herhangi birinde ortaya çıkan teknolojik hataların bir sonucudur. Tasarım aşamasında hatalar; hesaplama yetersizlikleri, yanlış mühendislik varsayımları ve uygun olmayan malzeme seçimi gibi unsurları içerir ve bu aşamadaki sorumluluk tasarımcıya aittir. İmalat sürecinde görülen teknolojik kusurlar ise üretim parametrelerindeki uygunsuzluklar ile malzemenin içsel yapısında bulunan hataları kapsar; bu kapsamda sorumluluk üreticiye aittir. Yapının veya sistemin birleştirilmesi sırasında meydana gelen yanlış uygulamalar montaj hatası olarak adlandırılır ve bundan montajı yapanlar sorumludur. İşletme safhasında karşılaşılan hatalar ise çoğunlukla aşırı zorlanma, yanlış kullanım veya yetersiz bakım faaliyetlerinden kaynaklanır ve bu durumun sorumluluğu işletmeciye aittir. Bu aşamaların herhangi birinde yapılan hatalar, zamanla ilerleyerek yapısal bütünlüğün bozulmasına ve nihai olarak elemanın işlev kaybına neden olabilmektedir [5].

Parçalarda oluşan hasarların tamamen önlenmesi ise mümkün değildir [5].

- Hasar Türleri

Hasarın sınıflandırılması farklı yaklaşımlara göre değişiklik gösterebilmekte olup, kullanılan sınıflandırma sistemine bağlı olarak malzemelerde ortaya çıkan fiziksel hasarlar çeşitli kategoriler altında incelenmektedir. Hasarın tanımlanması, nedenlerinin ortaya çıkarılması ve buna bağlı olarak uygun önleyici tedbirlerin belirlenmesi amacıyla hasar türleri genel olarak şu biçimde gruplandırılabilir: distorsiyon ve deformasyonlar, korozyon, sürünmeye bağlı hasarlar, aşınma, yorulma, imalat aşamasından kaynaklanan hatalar (döküm, metal dışı kalınlı, ısıl işlem,

hadde, montaj). Bu tür hasarlar, farklı temel hasar mekanizmalarını içermekte olup, pek çok durumda iki veya daha fazla mekanizmanın aynı hasar üzerinde eşzamanlı olarak etkili olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır [5].

- Hasar Analizi ve Aşamaları

Hasar analizi, bir bileşen ya da sistemde meydana gelen hasarın nedenlerini ortaya koymak amacıyla hasara ilişkin bulguların sistematik biçimde toplanması, değerlendirilmesi ve yorumlanmasının yanı sıra sonuçların raporlanmasını içeren kapsamlı bir inceleme sürecidir. Bu süreç sayesinde hasarın oluşum mekanizmaları ayrıntılı olarak anlaşılır ve benzer türdeki arızaların gelecekte ortaya çıkmasını engellemek için gerekli mühendislik önlemlerinin belirlenmesi mümkün olur. Ayrıca yürütülen hasar analizi çalışmaları ile sistemlerin ve ürünlerin kalite düzeyindeki gelişmeler izlenebilir ve üretim süreçlerine yönelik iyileştirmeler takip edilebilir [6].

Hasar analizi ile elde edilen bulgular doğrultusunda, benzer yapılar veya sistemler için gelecekte yürütülecek tasarım, imalat ve kalite kontrol faaliyetlerinde aynı tür hasarların tekrar oluşmasını engelleyecek mühendislik tedbirlerinin geliştirilmesi amaçlanır. Bu yönüyle hasar analizi, yalnızca mevcut bir arızanın nedenlerini ortaya çıkarmakla kalmayıp aynı zamanda üretim süreçlerinin ve tasarım yaklaşımlarının iyileştirilmesine katkı sağlayan önemli bir geri bildirim mekanizması işlevi görür [4].

Her ne kadar uygulanacak inceleme basamakları hasarın niteliğine, yayılma biçimine ve meydana geldiği çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilse de hasar analizi genel olarak Şekil 1'de de özetlenebileceği belirli temel aşamalar çerçevesinde yürütülür. Bu temel adımlar şu şekilde özetlenebilir [7]:

1. **Hasarın net biçimde tanımlanması:** Hasarın kapsamı, şiddeti, oluşan deformasyon türü ve etkilediği bileşenlerin net olarak ortaya konulması.

2. **Geçmişe yönelik bilgi toplanması ve uygun numunelerin seçilmesi:** Üretim kayıtları, kullanım koşulları, bakım geçmişi gibi verilere ulaşılması ve incelemeye esas teşkil edecek örneklerin belirlenmesi.

3. **Hasarlı elemanın ön incelemesi:** Parçanın makro düzeyde gözlemlenmesi, yüzeydeki bozulmaların değerlendirilmesi ve sonraki analizler için gerekli hazırlıkların yapılması.

4. **Hasarlı parçaların ayrıntılı analizi:** Mikroskobik incelemeler, mekanik testler, kimyasal analizler ve gerekli diğer mühendislik yöntemleri aracılığıyla hasarın mekanizmalarının belirlenmesi.

5. **Elde edilen bulguların değerlendirilmesi, yorumlanması ve nihai hasar raporunun oluşturulması:** Analiz sonuçlarının bütüncül bir yaklaşımla yorumlanarak hasarın asli nedeninin ortaya konulması ve çözüm önerilerinin raporlanması.



Şekil 1. Hasar Yolu ve Hasar Analizi Yolu [4]

1.2. Kaynaklı Bağlantılarda Hasar Analizi

Literatürde gerçekleştirilen incelemelerin önemli bir bölümünde, kaynaklı birleştirmelerde ortaya çıkan hasarların temel nedeninin, çoğunlukla uygulanan kaynak işlemi sırasında yapılan hatalar ile ana malzeme ve kaynak metali arasındaki uyumsuzluklardan kaynaklandığı ifade edilmektedir. Kaynak bölgesinde meydana gelen bu tür uyumsuzluklar; metalurjik yapı farklılıkları, ısı girdisinin uygun kontrol edilememesi, soğuma hızındaki dengesizlikler ve kaynak metali ile esas malzemenin mekanik veya kimyasal özelliklerinin birbiriyle örtüşmemesi gibi çeşitli faktörlerin birleşimiyle ortaya çıkmaktadır. Bu durumun en belirgin sebeplerinden biri ise kaynağın geometrik tasarımına ilişkin değişkenlerin çok geniş bir aralıkta bulunması ve uygulamada bu parametrelerin gereksinimlere uygun şekilde seçilememesidir. Kaynak dikişinin şekli, kaynak hazırlığı, alın veya köşe birleşim geometrileri, nüfuziyet derinliği ve ısı girdisi gibi tasarımsal unsurlardaki yanlış seçimler; birleştirme bölgesinde gerilme yığılmalarına, düzensiz mikro yapıya ve nihayetinde hasara zemin hazırlayan zayıf bölgelerin oluşmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla, kaynak parametrelerinin doğru belirlenememesi yalnızca uygulama hatalarına yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda kaynak bölgesinin bütünlüğünü ve uzun dönem performansını olumsuz etkileyen kritik bir unsur hâline gelmektedir [8,9].

Kaynaklı birleştirmelerde gerçekleştirilen hasar analizi genel olarak iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, hasarın kaynağını belirlemeye yönelik olarak hasarlı bölgenin ayrıntılı biçimde incelenmesini ve parçanın karakteristik özelliklerinin ortaya konulmasını içerir. Bu aşamada amaç, hasara yol açan hatanın doğru bir şekilde tanımlanması ve söz konusu hatanın kaynaklı bağlantı bölgesinde hangi mekanizmalar sonucu ortaya çıktığının anlaşılmasıdır. Kaynaklı bağlantılarda hata nedenini belirlemek için öncelikle görsel muayene, ışık mikroskopisi, tahribatsız muayene yöntemleri ve diğer malzeme testleri dâhil olmak üzere hasar analiz tekniklerinden yararlanılır. Bunlara ek olarak, bağlantı noktasında oluşan gerilmelerin analitik olarak değerlendirilmesi ve gerekli durumlarda uygun numuneler üzerinden detaylı incelemelerin yapılması önem taşır [8].

İlk bulguların ardından, daha detaylı incelemeler için ışık mikroskobunun yanı sıra taramalı veya geçirimli elektron mikroskobu gibi ileri mikroskobik teknikler de kullanılabilir. Elektron mikroskobu, mikro yapıdaki ince detayların görünür hâle getirilmesi sayesinde çatlak başlangıç bölgeleri, tane sınırı davranışları, faz dağılımı ve malzeme homojenliği gibi kritik parametrelerin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar. Mikroskobik analizlere ek olarak yapılan kimyasal kompozisyon incelemeleri, kaynak metali ile esas malzeme arasındaki farklılıkların belirlenmesinde ve hasarın oluşum mekanizmasının doğru

yorumlanmasında önemli rol oynar. Bu kapsamlı değerlendirmeler sayesinde hasar bölgesinin tam anlamıyla anlaşılması mümkün olmakta ve hasarın altında yatan temel sebepler bilimsel olarak güvenilir biçimde ortaya konulmaktadır [8,10].

Hasar analizi sürecinin ikinci aşaması, benzer hasarların gelecekte tekrar ortaya çıkmasını engellemek amacıyla yapılan değerlendirmeleri, elde edilen sonuçların bütüncül biçimde analiz edilmesini ve nihai hasar raporunun hazırlanmasını kapsamaktadır. Bu aşamada öncelikle hasarın açık, anlaşılır ve teknik olarak doğru bir tanımının yapılması gerekir. Hasar göstergeleri, hasarın temel nedeni ve hasarın gelişiminde rol oynayan mekanizma arasındaki ayrımlar net bir biçimde ortaya konulmalıdır [10]. Bu nedenle mevcut durumun tüm bileşenleri dikkatle değerlendirilerek olası hasar göstergeleri ile hasar mekanizmaları doğru şekilde tanımlanmalıdır.

Kaynaklı bağlantılarda bu aşamanın sağlıklı yürütülebilmesi için, birleştirmede hasara yol açabilecek kusurların kapsamlı biçimde bilinmesi gereklidir. Kaynaklı yapılarda hasar çoğu zaman aşırı yüklenme ile teknolojik hataların birlikte etkimesi sonucu oluşsa da, temel belirleyici etkenin teknolojik hatalar olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, hasarın kökenini açıklığa kavuşturabilmek için parçada ortaya çıkan bozulmanın hangi teknolojik hata türüyle ilişkili olduğunun doğru biçimde tespit edilmesi zorunludur. Nitekim kaynaklı birleştirmelerde hasar, tek bir hatadan kaynaklanabileceği gibi birden fazla teknolojik hatanın eşzamanlı etkisiyle de meydana gelebilir [4,11].

Teknolojik hatalar genel olarak üç ana kategori altında incelenmektedir [12]:

1. **Tasarım kaynaklı hatalar** (tasarım kusurları ve yanlış malzeme seçimi),
2. **Üretim ve tesis aşamasında ortaya çıkan hatalar** (imalat ve montaj hataları),
3. **Uygun olmayan servis ve çalışma koşullarına bağlı hatalar**.

Bu hatalar, hasar türlerinden biriyle ya da birkaçıyla ilişkili olarak hasarın ortaya çıkmasına neden olabilir. Aşırı zorlanma dışında kalan tüm nedenler teknolojik hata kapsamında değerlendirilir. Dolayısıyla teknolojik hatanın doğru şekilde tanımlanabilmesi için, öncelikle hasarın başladığı bölgenin, yani hasarı başlatan kritik noktanın tespit edilmesi gerekmektedir [11].

1.3. İş Makinelerinde Kaynaklı Bağlantının Önemi

İş makineleri, yol, liman, baraj, kanal vb. Alt yapıların hazırlanması, her çeşit kazı, yükleme, kırma işlemlerinin yapılması gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çalışma alanları ve yaptıkları işe, performanslarına göre çok farklı modellere ayrılmaktadır [13].

İş makineleri çalışma koşulları gereği uzun süreli ve döngüsel yüklemelere maruz kalan ekipmanlardır. Bu tür makinelerde, nominal gerilme seviyelerini artırarak gerilme yığılmasına neden olabilen bağlantı detayları kullanılmaktadır. Özellikle yaygın bir şekilde tercih edilen köşe ve punta kaynakları, bu bağlantıların başında gelir. Ağır ve sürekli yüklemelere maruz kalan iş makinelerinde, söz konusu kaynak bölgelerinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi olağan bir durumdur. Bu nedenle, bu tür makinelerin tasarım sürecinde kaynaklı birleştirme noktalarında ortaya çıkabilecek yorulma ve kırılma mekanizmalarının dikkatle değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Derleme niteliğindeki bu çalışmada iş makinelerinde meydana gelen genel hasar türleri, hasar mekanizmaları, literatürde belirtilen örnek vakalar ve bu hasarların önlenmesine yönelik öneriler detaylı biçimde ele alınmıştır.

2. ESKAVATÖRLERDE GENEL HASAR TÜRLERİ VE NEDENLERİ

Ekskavatör tipi iş makinelerinde karşılaşılan hasarlar; tasarım, üretim, servis koşulları, kaynak bağlantı kalitesi ve kusurlarının etkisiyle ortaya çıkar. Bilindiği gibi, uygulanan yük birçok faktöre bağlı olarak değişkendir ve bu durum, kritik noktalarda tespit edilen yüksek gerilim yoğunlaşmasıyla birlikte, yapı yıkım sürecini anlamanın anahtarı haline gelir. Kırılma meydana geldiğinden, çatlak başlangıcının bir çentiğe nasıl aktarıldığı çok önemlidir; bu da ekskavatörün yapısındaki yük aktarımının kötü bir tasarıma sahip olduğunu gösterir. Böylece, uygulanan yük ve gerilim dağılımının kırılma mekanizması üzerindeki etkileri büyük önem taşımaktadır [14].

Ekskavatör tasarımının önemli bir yönü, kaynaklı çelik yapıların yorulma ve kırılma davranışıdır [15,16,17]. Üretimden kaynaklanan kusurlar ve heterojen mikro yapı (ana metal, kaynak metali, ısının tesiri altındaki bölge- ITAB) nedeniyle kaynaklı bağlantılar, çatlak başlangıcı ve büyümesi açısından en kritik parçalardır ve iş makinelerinde olduğu gibi değişken yükleme ve yorulmaya maruz kaldıklarında özel dikkat gerektirir [14].

Gerçekten de yorulma hasarının, bir makinenin hizmet ömrü boyunca meydana gelen arızaların yaklaşık yüzde seksenini (%80) oluşturduğu tahmin edilmektedir.

2.1. Yorulma

Yorulma hasar türü, tekrarlı yüklemelere maruz kaynaklı makine parçalarında ve/veya yapılarda oluşan hasarların birincil nedenidir. Hasar analizleri sonuçlarından, imal edilen çelik yapılarda yorulma çatlağının çoğu kez gerilim yığılmasının yüksek olduğu çentik etkisine sahip kaynak geometrilerinden başladığı anlaşılmıştır. Ayrıca gerilim yığılmasının oluştuğu noktaların dışında, bağlantının yorulma özelliklerine etkileyen çok sayıda faktör bulunduğundan kaynak bağlantısı ana metale göre daha düşük yorulma dayanımına sahiptir. Kalıntı çekme gerilmesinin büyüklüğü, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro-yapısal etkisi diğer önemli parametreleri oluşturmaktadır. Kaynak bağlantısının yorulma özelliklerinin iyileştirilmesi, ITAB 'ın dayanımının toklukta düşüşe yol açmadan arttırılması, bağlantıdaki çekme kalıntı gerilmesinin ve çentik etkisinin azaltılmasıyla ilgili olduğu söylenebilir [18].

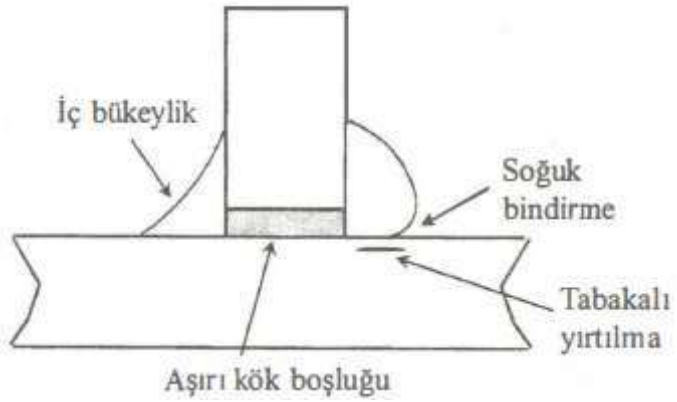
2.2. Aşırı Yükleme

Aşırı yükleme hasar türü genellikle parçanın çalışma şekli darbeli ve ani yüklemelere maruz olduğu şartlarda meydana gelmektedir. Hasar türünün isminden de anlaşılacağı üzere yapının aşırı yükleme şartlarında çalışma nedeniyle meydana gelir. Bu yükleme ve saha koşullarında çalışan parçalarda, malzemenin dayanımı tasarım aşamasında yeterince yüksek seçilmektedir. Diğer bir deyişle seçilen malzemenin darbe enerjisi ve eğme dayanımı yüksektir [6].

Malzemenin hesaplanan dayanım değerinin üzerinde bir gerilmenin oluştuğunda meydana gelen aşırı yükleme şartları ile zorunlu kırılma meydana gelmektedir. Bu tip kırılmalarda kırık yüzey incelemesinde gevrek kırılmadan ziyade ayrılma kırılması (zorunlu kırılma) türü, kırık yüzeyi tanecikli bir görünüş gösterir. Ayrılma veya zorunlu kırılma; plastik deformasyon oluşumu yerine atomlar arası bağların kopması şeklinde ortaya çıkmaktadır [6].

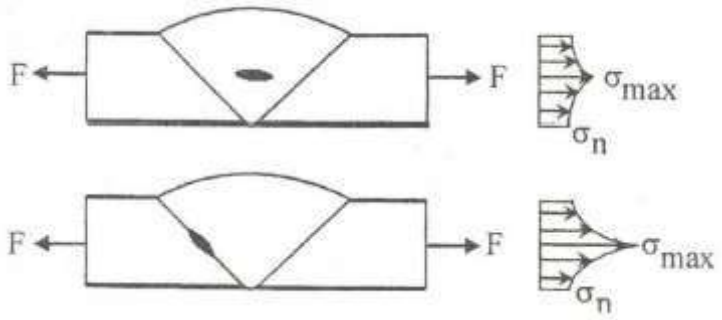
2.3. Kaynak Hataları

Kaynak hataları yerel gerilim yığılmasına ve kalıntı gerilmelere yol açabilmektedir. Genellikle bütün kaynaklı birleştirmeler farklı büyüklüklerde de olsa hata içermektedir. Kaynak prosesine ait değişkenlerin uygun seçilmemesi doğrudan ya da dolaylı olarak bağlantıda kaynak hatalarına neden olmaktadır [18]. Bu hatalar tek boyutlu ve düzlemsel olabildiği gibi farklı geometride hacimsel süreksizliklerden de oluşabilmektedir. Şekil 2 'de şematik olarak kaynak dikişi ve etrafında başlıca oluşabilecek kaynak hataları şematik olarak verilmiştir [19].



Şekil 2. Kaynak hataları ve gerilme yığılmasına yol açan diğer süreksizlikler [19].

Düzlemsel hata olarak göz önüne alabileceğimiz, hidrojen çatlağı, tabakalı yırtılma, nüfuziyet eksikliği ve katılaşma çatlağı, çatlak başlangıç noktalarını oluşturabilmektedirler. Hatanın konumu, büyüklüğü ve zorlanma altındaki kuvvet akış çizgilerinin yönlenmesi bağlantıda doğacak çentik etkisinin büyüklüğünü belirleyecektir (Şekil 3) [3].



Şekil 3. Kuvvet doğrultusunda ve çapraz konumdaki hatanın neden olduğu gerilme yığılması (şematik) [3].

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, kaynaklı birleştirmelerde görülen hasar mekanizmaları ve bu hasarların analizi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatür taraması, mevcut araştırmaların kapsamını, yöntemlerini ve elde edilen bulgularını ortaya koyarak bu çalışmanın bilimsel temelini oluşturmayı amaçlamaktadır.

Maury ve ekibi, hidrolik bir ekskavatör bomunda meydana gelen katastrofik kırılmanın nedenlerini araştırmak üzere kapsamlı bir hasar analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, saha incelemeleri, tahribatsız muayeneler, makro ve mikro metalografik incelemeler, kimyasal analizler, sertlik ölçümleri ve sonlu elemanlar analizi gibi çok yönlü yöntemler kullanılmıştır. İnceleme sonucunda çatlağın, bom levhası ile man-hole plakasının birleştirildiği kaynak dikişi bölgesinde başladığı tespit edilmiştir. Kırık yüzeyindeki yorulma izleri (beach marks/ kumsal izleri) hasarın zaman içerisinde tekrarlı yükler altında geliştiğini göstermektedir [20].

Çalışmanın önemli bulgularından biri, bakım sürecinde sonradan eklenen man-hole plakasının malzeme özelliklerinin, ana taşıyıcı bom malzemesi ile tam olarak uyuşmadığıdır. Bu uyumsuzluk, bileşimin ve mikro yapının farklı olması nedeniyle bölgesel mekanik dayanımı düşürerek çatlak oluşumuna zemin hazırlamıştır. Bunun yanında, termal kesme sırasında plaka üzerinde oluştuğu düşünülen yüzey olukları ve düzensizliklerin giderilmeden kaynak işlemine

geçilmesi, bu bölgelerde belirgin gerilme yığılmalarına sebep olmuştur. İncelemelerde kaynak metalinde oksit ve cüruf kalıntısı bulunması, elektrot hazırlığı ve ön ısıtma/ara paso sıcaklığı kontrolünün yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, kaynak bölgesinde martensitik ve gevrek bir yapının oluşmasına ve tokluğun önemli ölçüde azalmasına yol açmıştır [20].

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, teorik olarak en yüksek gerilme bölgelerinin yapının başka noktalarında bulunmasına rağmen, gerçek kırılmanın düşük kaliteli kaynak bölgesindeki yerel kusurlar nedeniyle çok daha erken ortaya çıktığını göstermektedir. Yaklaşık 40.000 saatlik çalışma sonunda meydana gelen bu beklenmeyen kırılma, malzeme uyumsuzluğu, yüzey süreksizlikleri, yetersiz kaynak kalitesi ve uygun olmayan bakım-onarım uygulamalarının birleşik etkisiyle gelişen yorulma hasarının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Ferhan Fıçıcı ve çalışma arkadaşları, Hidromek 220LC-2 model ekskavatörün bomu için parametrik bir üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bom üzerindeki kritik bölgelerdeki gerilme dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, özellikle kaynaklı bölgelerdeki gerilim yoğunlaşmalarının, yorulma çatlaklarının temel nedeni olduğunu bildirdi. Geliştirilen model aracılığıyla bomun çeşitli noktalarında eşdeğer Von Mises gerilmeleri hesaplanmış ve bu bölgelerdeki gerilme seviyeleri dikkate alınarak Goodman kriteri ile yorulma ömrü tahminleri yapılmıştır [21].

Tablo 1. Çevrim Sayıları [21]

		1	2	3	4
Se = 47 MPa	N	172573	308987	217660	251934
Se = 53 MPa	N	227144	419529	290057	338360

Tablo 1'de elde edilen çevrim sayıları ekskavatör bomu alt sacının kalınlığı 3mm arttırılarak tekrar hesaplanmıştır. Yeni sac kalınlığı için elde edilen değerler ve çevrim sayısındaki yüzde artış Tablo 2'de verilmiştir [21].

Tablo 2. Çevrim Sayıları ve Ömürde Yüzde Artışlar [21]

		1	2	3	4
Se = 47 MPa	N	176518	334554	285846	325743
	Yüzde Artış	2,29%	8,27%	31,33%	29,30%
Se = 53 MPa	N	232617	456173	386500	443527
	Yüzde Artış	2,41%	8,73%	33,25%	31,08%

Bu tabloda da görülebileceği gibi sac kalınlığındaki artış ile %2,29'luk bir ömür artışı elde etmek mümkün olmaktadır. Bu sonuç, küçük tasarım değişikliklerinin bile yorulma dayanımını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir [21].

M. Bošnjak ve arkadaşları bir tekerlekli ekskavatörün (BWE) kovasında meydana gelen hasarın incelemesini gerçekleştirmiştir. Araştırma kapsamında malzeme özelliklerini analiz etmek için kimyasal analiz testleri, sertlik ölçümleri ve gerinim ölçümü gibi deneysel testleri içeren bir hasar analizi metodolojisi yolu izlenmiştir. Ardından bu deneysel veriler farklı yük koşulları altında kepçe üzerindeki gerilim durumlarını hesaplamak üzere Doğrusal

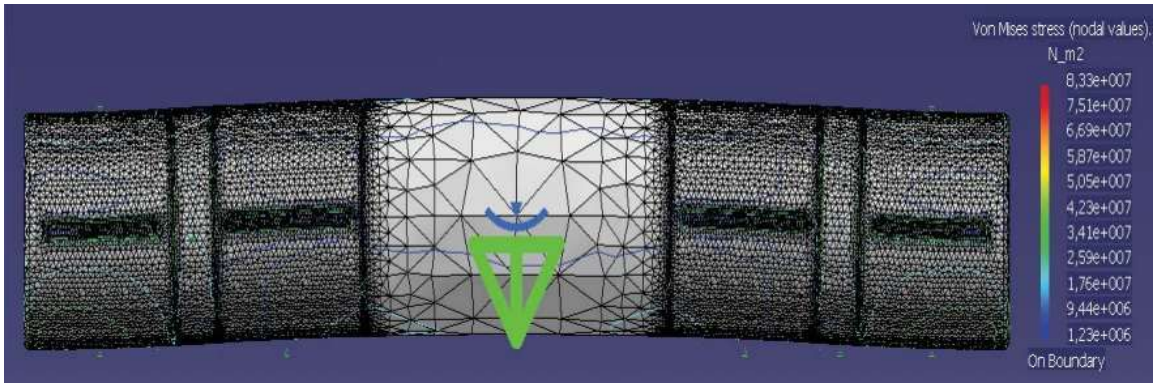
Sonlu Elemanlar Yöntemi (LFEM) ile birleştirilmiştir. Çalışmada hasara neden olan mekanizmaları belirlemek amacıyla deneysel olarak belirlenen çalışma ve kalıntı gerilmelerin üst üste bindirilmesi ve toplam asal gerilmelerin hesaplanması yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda hasarın; hatalı malzeme seçimi ve kusurlu geometrik şekillendirme gibi tasarım kaynaklı hatalardan meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yapıda bulunan kalıntı gerilmeler ve kaynakta bulunan soğuk çatlaklar gibi üretim kaynaklı hatalar da yorulma çatlaklarının oluşmasına ve beraberinde ekskavatör kovalarının hasara uğramasına neden olmuştur [22].

A. Öndürücü ve Ö. Kandbir, bir greyderin dişli rotunda meydana gelen hasarın nedenini araştırmıştır. Hasarlı parçanın kimyasal analizi gerçekleştirilmiş ve malzeme bilgisi **St52 (S355) çeliği** olarak belirlenmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik, çentik darbe ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemeler optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiş, kırılmanın sünek kırılma yapısı gösterdiği gözlemlenmiştir. Parçanın ayrıca sonlu elemanlar modeli oluşturularak analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda, parçanın hasara uğramasının temel nedeni olarak çalışma şartları nedeniyle aşırı zorlanma ve darbe yüklemesi olarak belirlenmiştir. Meydana gelen kırılmanın ise malzeme dayanımının üzerinde bir gerilme oluşması sonucu meydana gelen Ayrılma kırılması veya zorunlu kırılma olduğu ve hasarın gerilim yığılmasının beklendiği birleşme noktasında gerçekleştiği görülmüştür [6].

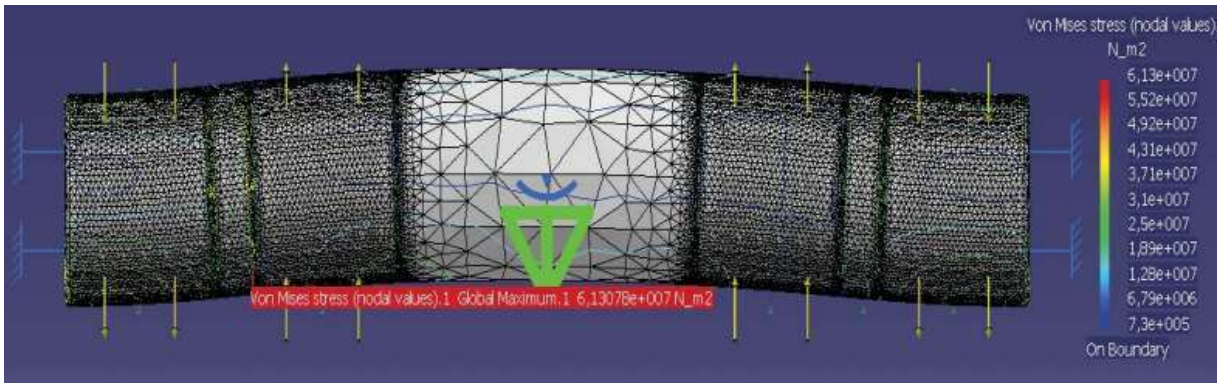
M. Makaracı ve çalışma arkadaşları, direksiyon sisteminin önemli parçası olan direksiyon aksonunun statik yükler altındaki davranışını incelemiştir. Bu çalışmada 3 boyutlu geometriye sahip akson modeli ile aksonun gerilme analizleri, darbe yükü, acil frenleme ve kaygan zemin koşulları gibi zorlu saha çalışma senaryolarında Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) kullanılarak gerçekleştirilmiş. Malzeme olarak QT500-7 küresel dökme demir kullanılmıştır. Analizlerin sonucunda ise en yüksek gerilmenin malzemenin akma mukavemeti olan 320 MPa değerinin altında olduğu ve statik olarak bu durumun güvenli olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar asıl hasarın yorulma sonucunda gerçekleşebileceğini belirtmiş olup bu nedenle de yorulma testinin de yapılmasının gerekliliğini belirtmiştir [23].

Dudziński ve arkadaşları, çalışmalarında bir ekskavatörün bom süspansiyonunda meydana gelen hasarın kök neden analizini gerçekleştirmiştir. Bu hasar makinenin performansında ciddi aksamalara ve uzun süreli hizmet dışı kalmaya bağlı oldukça yüksek finansal kayıplara neden olmuştur. Gerçekleştirilen metalografik incelemeler ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile analizlerle hasarın üç faktörün birleşimi sonucu oluşan bir yorulma kırılması olduğu ortaya konmuştur. İlk olarak aksın malzemesinin, nicel olarak yüksek yüklere maruz kalan taşıyıcı yapılar için uygun olmayan, Widmanstätten yapısına sahip homojen olmayan ferritik ve perlitik bir mikroyapı sergilediği görülmüştür. Bu durum temin edilen malzemenin, analiz bilgilerini içeren sertifikasındaki gereksinimleri karşılamadığını refere etmektedir. İkinci olarak yorulma çatlağının başlama noktasının, eksende bir yapısal çentik üzerinde olduğu belirlenmiştir ek olarak deforme olmuş bir segmanının ek eğilme kuvvetleri oluşturarak kırılma bölgesinde gerilim konsantrasyonunu artırdığı da görülmüştür. Bu durum ilgili bölgede akma mukavemetini aşan düşük çevrimli yorulma gerilimine yol açmıştır. Son olarak ise makine üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümler, maksimum yüklerin teorik tasarım yüklerinden %18 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Düzeltici aksiyon olarak, aksın tasarımının tamamen yeniden düzenlenmesi gerçekleştirilmiş ve uygun Widmanstätten yapısı içermeyen mikroyapıya sahip 40HM çeliği kullanılmıştır. Bunun sonucunda tasarım FEM ile doğrulanmıştır ve maksimum gerilimlerin malzemenin yorulma mukavemeti sınırının altında kaldığını ve mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı raporlanmıştır [24].

Demiralp ve Türkeş, gerçekleştirdikleri çalışmalarında bir ekskavatörün kova-arm bağlantısını sağlayan SAE 8620 çeliğinden imal edilen piminin yorulma dayanımını üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile incelemiştir. Pim üzerindeki kanallar yağlamanın daha sağlıklı yapılması için açılmışken çentik etkisi göz önüne alınmamıştır. Yağlama kanalları (Şekil 4) pimin ömrünün daha kısa olmasına ve yorularak kırılmasına yol açmaktadır. Başka bir deyişle, yağlama kanalları pimin ömrünü kısaltmakta ve yorulma kırılmasına neden olmaktadır. Araştırmacılar yeni bir tasarımla yağlama kanallarını kaldırarak düz pim tasarımı yapmış (Şekil 5), aynı koşullar altında analizi tekrarlayarak sonucunda pim üzerindeki en yüksek gerilimin üçte bir değerinde düşüş gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Pim üzerindeki kanallar burca taşınarak yağlama görevini meydana getirmesi sağlanmış olup yorulma ömrü artmıştır. Her iki makine de aynı arazi koşullarında çalıştırıldığında, kanallı pimli ekskavatör on bir bin (11.000) saatlik çalışmadan sonra yorulma nedeniyle kırılırken, düz pimli ekskavatör on sekiz bin (18.000) saatlik çalışmadan sonra yorulma nedeniyle kırılmaktadır. Ayrıca düz pim üretiminin hem kolay hem de uygun maliyetli olduğu belirtilmektedir [25].



Şekil 4. Kanallı Pim Üzerindeki Eşdeğer Gerilmeler [25]



Şekil 5. Düz Pim Üzerindeki Eşdeğer Gerilmeler [25]

-Hasar Önleme Çareleri

İş makinelerinde meydana gelen hasarın doğru analiz edilmesi ve proaktif yaklaşımların benimsenmesi hem makinenin performans verimliliği için hem de ekonomik kayıpların en aza indirilmesi için günümüzde önemini korumaktadır. Mevcut durumda iş makinelerinin ve makine parçalarının kullanım ömrünü uzatmak ve meydana gelebilecek hasarları mümkün olan en temel aşamada tespit etmek hasarın büyümeden önlenmesi yaklaşımıdır.

Parçalarda oluşan hasarların tamamen önlenmesi mümkün olmasa da iş makinelerinde özellikle kaynaklı bağlantılarında meydana gelen hasarların önüne geçmek için tasarım, üretim ve işletme aşamalarında mühendislik aksiyonları alınmalıdır [5]. Kaynaklı birleşimlerde hasarın

temel nedeni, çoğunlukla uygulanan kaynak işlemi sırasında yapılan hatalar ile ana malzeme ve kaynak metali arasındaki uyumsuzluklardan kaynaklandığı görülmektedir.

Bu tür hataların ve hasarların önlenmesi için, her bir birleşim için uygun Kaynak Prosedür Şartnamesi (WPS) hazırlanmalıdır. Kaynak işlemi sonrası Tahribatsız Muayene (NDT) gerçekleştirilmelidir. Ayrıca kritik olarak belirlenen kaynak bölgelerinde nüfuziyet kontrolü, uygun ısı girdisi ve paso arası sıcaklık kontrolü uygulanmalıdır. Isı girdisinin uygun kontrol edilememesi ve soğuma hızındaki dengesizlikler metalurjik yapı farklılıklarına yol açar [20]. Kaynak parametreleri, malzeme mikro yapısını kontrol edecek şekilde optimize edilmelidir ve Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) genişliği ve sertlik dağılımı düzenli olarak ölçülmelidir.

Tasarım aşamasında malzemenin dayanımı, özellikle darbe enerjisi ve eğme dayanımı yüksek olacak şekilde yeterince yüksek seçilmelidir. Hasara neden olan hatalı malzeme seçimi ve kusurlu geometrik şekillendirme gibi tasarım kaynaklı hatalardan kaçınılmalıdır [6]. Bakım onarım sürecinde eklenen parçaların malzeme özelliklerinin, ana malzeme ile tam olarak uyuşmaması nedeniyle bu uyumsuzluk bölgesel dayanımı düşürerek çatlak oluşuma yol açar [20].

Tasarımsal unsurlardaki yanlış seçimler (kaynak dikişinin şekli, nüfuziyet derinliği vb.) gerilim yığılmalarına ve mukavemet açısından zayıf bölgelere neden olabilir. Yağlama kanalları gibi çentik etkisi yaratan detaylar, pimin ömrünü kısaltıp yorulma kırılmasına neden olabilir; bu kanalların burca taşınması gibi tasarımsal çözümler yorulma ömrünü önemli ölçüde artırmıştır. (11.000 saatten 18.000 saate çıkış) [25].

4. SONUÇ

Bu derleme çalışmasında literatürde bulunan çalışmalar kapsamında iş makinelerinde işletme şartlarında karşılaşılan başlıca hasar türleri, hasarların oluşum nedenleri ve önleyici öneriler alt başlıklar halinde değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar, iş makinelerinde meydana gelen hasarların önemli bir kısmının kaynaklı bağlantı esaslı olduğunu kaynaklandığını göstermektedir. Özellikle ekskavatör tipi iş makinaları yoğun dinamik yükler, darbeli zorlanmalar ve zorlu çevresel koşullar altında çalışan kritik yapısal elemanlardır.

Literatür verileri ekskavatör bomları, bağlantı noktaları ve benzeri konstrüksiyon parçalarında görülen hasarların çoğunlukla kaynak nedeniyle yorulma çatlaklarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yorulma hasarı, tekrarlı yüklemelere maruz kalan kaynaklı makine parçalarında birincil hasar nedenidir. Tahminlere göre, bir makinenin hizmet ömrü boyunca meydana gelen arızaların yaklaşık yüzde sekseni (%80) yorulma hasarından oluşmaktadır.

Hasarlar genellikle tasarım kaynaklı hatalar (yanlış malzeme seçimi, tasarım kusurları), üretim ve tesis aşamasında ortaya çıkan hatalar (kaynak proses hataları, eksik nüfuziyet, cüruf kalıntıları) ve uygun olmayan servis koşullarına bağlı hatalar (aşırı zorlanma, yetersiz bakım) gibi teknolojik hataların birleşimi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Hasar analizleri, imal edilen çelik yapılarda yorulma çatlağının çoğunlukla gerilim yığılmasının yüksek olduğu çentik etkisine sahip kaynak geometrilerinden başladığını göstermiştir. Kaynaklı bağlantılar, yük aktarımında yüksek gerilim yığılmalarına yol açarak, zamanla servis şartlarındaki yüklemelere rağmen hasar oluşturabilmektedir.

KAYNAKÇA

[1]. Kun Ş. 2018. Ağır iş Makinelerinin Çalışma Ortamında Risk Analizi ve Yönetimi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi.

[2]. Arı O. 2018. İş makinelerinde hasar analizi ve önlemi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi.

[3]. Anık S. Kaynaklı Tasarımın Esasları, Ders Notları

[4]. Eryürek B., Dikicioğlu A. 2003. Onarım Kaynağında Hasar Analizinin Önemi. Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 1-6.

[5]. Varol H. 2008. Av ve Spor Tüfeklerin İçin Kritik Parçaların Hasar Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

[6]. Öndürücü, A., Kanbir, Ö. 2017. Bir Greyderin Dişli Rotunun Hasar Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 21 Sayı 2, 599–606.

[7]. Mercan S. 2019. Kaynak Bağlantılarında Hasar Analizi. IJIEA Cilt 3 Sayı 2, 67-75.

[8]. Ayşe B. R., Pense A. W. 1994. Welding Failure Analysis. Materials Characterization, Vol 33,3, Page 295-309.

[9]. Sehgal R., Angra S., Sharma V. 2007. Failure Cause Analysis Of Welded Joints. Indian Journal of Engineering Materials Sciences, Vol 14, Page 24 - 30.

[10]. Web Kaynağı Failure Analysis. Retrieved From

http://www.tech.plym.ac.uk/sme/Interactive_Resources/tutorials/FailureAnalysis/index.html

[11]. Anonim. 2002. Failure Analysis and Prevention. Vol 11 P. 2910. ASM International.

[12]. Canale L. C. F., Mesquita R. A., Totten G. E. 2008. Failure Analysis of Heat Treated Steel Components. ASM International.

[13]. Soylu S. 2024. Ekskavatör Kolunun Yapısal Optimizasyon Yöntemleri ile Ağırlığının Azaltılması ve Yorulma Analizi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

[14]. Daničić D., Sedmak S. 2014. Bucket wheel excavator damage by fatigue fracture- case study. Procedia Materials Science, Vol 3, Page 1723–1728.

[15]. Berković M., Maksimović S., Sedmak, A. 2004. Analysis of Welded Joints by Applying the Finite Element Method. IVK, 2, Page 75–84.

[16]. Daničić, D. 2010. Diagnosis of Conditions and Behavior for Steel Structures of Mining Machinery.

[17]. Maneski T., Ignjatović D. 2004. Repair and Reconstruction of Bucket Wheel Excavators. IVK, Vol 1, 9–28.

[18]. Aydoğdu K., Genel K. 2002. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 6 Sayı 1, 84-89.

[19]. American Society for Metals. 1996. Metals Handbook: Fatigue and Fracture Control of Welments. MetalsPark, Ohio.

[20]. Maury H., Illera D., Pugliese V., Wilches J., Gómez H. 2018. Failure assessment of a weld-cracked mining excavator boom. Engineering Failure Analysis 90, 47–63.

[21]. Dağ S., Fıçıcı F., Geniş K. 2007. İş Makinalarında Kırılma ve Yorulma Problemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 48 Sayı 571, 3-5.

[22]. Bošnjak S. M., Arsić M. A. 2018. Failure of the bucket wheel excavator buckets. Engineering Failure Analysis 84, 247-261.

[23]. Makaracı M. Demir S., Bahçacı O. 2013. Direksiyon Aksonlarının Statik Hasar Analizi. APJESS, Cilt 1 Sayı 3, 21-27.

[24]. Dudziński W., Odyjas P., Olejnik M. 2025. Root Cause Analysis and Evaluation of Corrective Actions for Discharge Boom Suspension Failure in Bucket Wheel Excavator. Sci Rep 15, 28384.

[25]. Demiral M. A., Türkeş E. 2011. Ekskavatör Arm ve Kova Bağlantı Piminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yorularak Kırılmasının İncelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 26, 109-116.