YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANILACAK GÖZENEKLİ PASLANMAZ ÇELİK TOZ METAL PARÇALARIN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Adem KÖYLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MART 2010
ANKARA

Adem KÖYLÜ tarafından hazırlanan "YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANILACAK GÖZENEKLİ PASLANMAZ ÇELİK TOZ METAL PARÇALARIN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI " adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yusuf USTA …….
Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN …….
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Yusuf USTA …….
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. İbrahim USLAN …….
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Göksel ÖZKAN …….
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Necip CAMUŞÇU …….
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Tarih: 01 / 03 / 2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU …….
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Adem KÖYLÜ

YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANILACAK GÖZENEKLİ PASLANMAZ ÇELİK TOZ METAL PARÇALARIN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Adem KÖYLÜ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2010

ÖZET

Bu çalışmada; özel kalıp ve zımbaların tasarım ve imalatı yapılarak, yakıt hücrelerinin ısı değiştiricilerinde kullanılmak üzere SS316L küresel paslanmaz çelik tozlarından, gözenekli yüzeye sahip parçalar üretilmiştir. Preslemede, minimum basınç ve sıcaklık değerleri ile tozlar ve altlık arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca; altlık ve tozların bağlanması için, altlığın yüzey pürüzlülüğün arttırılması yöntemi uygulanmıştır. Yüzey aşındırma teknikleri araştırılmış, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmiştir. Bunun yanında sıcaklık ve basıncın, açık gözeneklilik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan deney ve testler 200 MPa presleme basıncı, 500°C presleme sıcaklığı, R_a=1,7 µm altlık yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yeterli başlangıç koşulları olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : **625.02.05**
Anahtar Kelimeler : **Yakıt hücresi, gözenek, paslanmaz çelik, sinterleme, pürüzlülük, toz metalurjisi**
Sayfa Adedi : **60**
Tez Yöneticisi : **Yrd. Doç. Dr. Yusuf USTA**

INVESTIGATION OF PRODUCTION PARAMETERS OF POROUS STAINLESS STEEL SURFACES USED ON FUEL CELLS

(M. Sc. Thesis)

Adem KÖYLÜ

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
March 2010

ABSTRACT

In this study, parts that have porous media surface of SS316L spherical stainless steel powder has been produced to be used for heat exchangers of the fuel cells by designing and producing die and special punches. Minimum pressures and temperatures for compacting have been examined to have bonding between powders and a substrate. Moreover, surface roughness of the substrate has been increased in order to bond substrate and the powders. Surface etching techniques have been investigated and minimum surface roughness have been defined. Besides the effect of temperature and pressure on open porosity have been investigated. The experiments and the tests showed that 200 MPa compacting pressure, 500°C temperature and R_a=1,7 µm roughness on the substrate are enough as the initial conditions.

Science Code : 625.02.05
Key Words : Fuel cell, pore, stainless steel, sintering, surface roughness, powder metallurgy
Page Number : 60
Adviser : Asst. Prof. Dr. Yusuf USTA

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında deneyim ve bilgisiyle bana yol gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yusuf USTA' ya teşekkür ederim.

Bilhassa tozların teminindeki desteğinden dolayı değerli hocam Doç.Dr. İbrahim USLAN' a teşekkür ederim. Bu süreçte emekleri yadsınamayacak; Serkan ŞAHİN'e, AFS firmasına, Aykut KILIÇ' a, Kimya Yüksek Mühendisi Nazmi ÖZTÜRK'e, ısıl analizdeki desteklerinden dolayı Tayfun ALBAYRAK ve Turgay KABACAN'a, ayrıca isimlerini sayamadığım hocalarıma ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme ve eşime minnettarlığımı sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. YAKIT HÜCRELERİ 7

2.1. Teknolojik Gelişimi 7

2.2. Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi 9

2.3. Yakıt Hücrelerin Kıyaslanması 9

2.4. Yakıt Hücresinde Atık Isı Oluşumu ve Isının Hücreden Uzaklaştırılması 12

2.4.1. Yakıt hücresinde atık ısı oluşumu 12

2.4.2. Yakıt hücresinde oluşan atık ısının uzaklaştırılması 14

2.5. Gözeneklilik ve Gözenekli Yüzey Oluşturma 16

2.5.1. Gözeneklilik 16

2.5.2. T/M gözenekli yüzey oluşturmak 17

3. GÖZENEKLİ SS316L PASLANMAZ ÇELİK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ YÜZEYİ ÜRETİMİ 18

3.1. Kalıbın Tasarımı ve İmalatı 18

3.2. Toz Metal Sıkıştırma Kalıbının Phoenics ile Isıl Analizi 19

Sayfa

3.3. Toz Metal Sıkıştırma Kalıbının Kontrol Ünitesinin Tasarlanması …….. 21

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 23

4.1. Toz Presleme Deney Düzeneği ……..…..……..……... 24

4.2. Sıcak Presleme Deneyinin Yapılışı ……....……....…….24

4.3. Kimyasal Yöntemle Yüzey Pürüzlülüğünün Artırılması……...……. ..27

4.4. Östenitik Paslanmaz Çelikler ve Korozyonu……..…..……..……... 29

4.5. Hızlandırılmış Korozyon Deney Düzeneği ……..…..……..……... 32

4.6. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Korozyonu İçin Hazırlanan Hızlandırılmış Korozyon Deney Düzeneği ……..…..……..……... 33

4.7. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi.... 37

4.8. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi..... 39

4.9. Kimyasal Yöntemle Pürüzlendirilmiş Altlıklarla Yapılan Presleme ve Sinterleme Çalışmaları ……..... 43

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 48

KAYNAKLAR 51

EKLER.....55
EK-1. 55 mm metal toz sıkıştırma kalıbının imalat resmi 56
EK-2. Çözeltide yük altında gerilim değerleri ve akım yoğunluğu tabloları.....57
EK-3. Altlık numunelerine ait pürüzlülük değer tablosu ve ortalama değer tablosu.58

ÖZGEÇMİŞ 60

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Yakıt hücrelerinin kısaca karşılaştırılması…….10

Çizelge 4.1. SS316L paslanmaz çelik altlıkların kimyasal kompozisyonu ..……28

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. a) 1839 yılında Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi b) Grove pilinin ayrıntılı çizimi c) 1839 yılında ayrıntılı çizimi verilen hücreler. 7

Şekil 2.2. Yakıt hücresi (PEM) ve yapısı ……..12

Şekil 2.3. Yakıt Hücresi (PEM) ve tabanında gözenekli tabaka bulunan kanaldaki akış ……... 13

Şekil 2.4. Yakıt hücresi bipolar levhasının hidroform yöntemiyle oluşturulması ….16

Şekil 3.1. 55 mm toz sıkıştırma kalıbının montaj teknik resmi…….....18

Şekil 3.2. Toz sıkıştırma kalıbın katı modellemesi …….……..…..... 20

Şekil 3.3. 37,5dk'lık ısıtma süresi sonunda kalıpta oluşan sıcaklık dağılımı…..….. 21

Şekil 4.1. Cl^- iyonunca zengin elektrolit ortamda korozyon oluşumu …….. 28

Şekil 4.2. Elektrolitik ortamda oluşabilecek kimyasal korozyon türleri ……29

Şekil 4.3. Klorür çözeltisinde 30°C ve 70°C de 304 paslanmaz çelik malzemede oluşan oyuk morfolojileri ……...31

Şekil 4.4. Klorür+sülfat ve yalnızca sülfat çözeltisinde 30°C ve 70°C'de 304 paslanmaz çelik malzemede oluşan oyuk morfolojileri ……..……...32

Şekil 4.5. İnşaat çeliklerinin korozyon dayanımları için yapılan çalışmalarda kullanılmış olan hızlandırılmış korozyon deney düzeneği şematik gösterimi ……...33

Şekil 4.6. Altlıklar için hazırlanan hızlandırılmış deney düzeneği ……...… 35

Şekil 4.7. Çözelti direncinde görülen artışın zamana göre değişimi …..……...… 37

Şekil 4.8. Altlık numunelerine ait Ra ve Rz değerleri …….…….....38

Şekil 4.9. Sinterleme işlemi sırasında sıcaklığın kademeli olarak yükseltilmesi ve düşürülmesi …..…….…… 45

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim membran yakıt hücresi ……. 8

Resim 2.2. Modelleme çalışmaları ile geliştirilmiş bipolar levha örnekleri 15

Resim 3.1. İmalatı tamamlanmış 55 mm toz sıkıştırma kalıbının alt kalıp kısmı (seramik rezistansı ve termokupl ile birlikte montajlı şekilde)…….. 19

Resim 3.2. Sıkıştırma kalıbının üst zımba kısmı (seramik rezistansı ve termokupl ile birlikte montajlı şekilde)..... 19

Resim 3.3. Isıl izolasyonu yapılmış toz sıkıştırma kalıbı (Resimde üst izolasyon levhası çıkarılmış haldedir)…… 22

Resim 4.1. a)Toz eleme cihazı b)Elek …….……...23

Resim 4.2. Metal toz presleme deney düzeneği …….…….……24

Resim 4.3. DARTEC kontrol ünitesi program monitörü a) yükleme hızı b) yük limiti …….…… 25

Resim 4.4. 450°C presleme sıcaklığı, 100 MPa basınç altında altlığa tutunmamış bir numune a) Presleme b) Numunenin çıkarılması c) SS316 paslanmaz çelik küreler kendi aralarında bölgesel olarak tutunmuş ancak altlığa tutunmamıştır……26

Resim 4.5. 490 °C presleme sıcaklığı, 150 MPa basınç altında altlığa bölgesel tutunmuş bir numune……..……..27

Resim 4.6. Anot altlıkların hazırlanması ……..…….……..33

Resim 4.7. Farklı sıcaklıklardaki denemeler ve NaCl çözeltisinde $FeCl_2$ flokları...34

Resim 4.8. Reaksiyon başlarında anottan çıkan Fe^{+2} katyonlarının katoda doğru ilerlemesi …….……..36

Resim 4.9. Taylor Hubson SURTRONIC 3+ ile altlıkların pürüzlülüklerinin ölçülmesi …….……..... 38

Resim **Sayfa**

Resim 4.10. Olympus GX71 optik mikroskop……... 39

Resim 4.11. Altlık numunelerine ait yüzey görüntülüleri (50x) ……41

Resim 4.12. Numuneye ait 200x büyütülmüş yüzey görüntüsü …..……..... 41

Resim 4.13. Numuneye ait kademeli büyütülmüş yüzey görüntüleri
a)500x b)1000x …… 41

Resim 4.14. Pitting korozyonu sonrası altlıkta delinme……..42

Resim 4.15. Anot olarak polarize edilen altlığın güç kaynağı bağlantı tarafı
ve anot uç kısmı pitting korozyonu yoğunlukları……...… 43

Resim 4.16. Altlığa tutunmamış olan 1 numaralı numune …….. 44

Resim 4.17. Sinterleme fırını ve ekipmanları ……45

Resim 4.18. Sinterleme fırınına giren (a) ve çıkan (b) numunelerdeki
renk değişimi …… 46

Resim 4.19. Sinterleme fırınından çıkan numunelerin geometrilerindeki
değişim……46

1.GİRİŞ

Toz metalürjisi (T/M), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir. T/M nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır.

T/M'nin uygulamaları oldukça geniştir. Tungsten lamba filamentleri, dişçilik, dişli çarklar, yağlamasız yataklar, elektrik kontakları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır. T/M parça pazarının %75'i otomotiv endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Avrupa yapımı arabalar 7 kg, Japon yapımı arabalar ise 5 kg T/M parçaya sahip olduğu halde, Amerikan arabaları 16 kg'dan daha fazla T/M parça içermektedir [1].

Mühendislik uygulamalarının en önemli ve en çok karşılaşılan işlemlerinden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı değişimidir. Bu değişimin yapıldığı cihazlar, genelde ısı değiştirici olarak adlandırılmakta olup, pratikte termik santrallerde, kimya endüstrilerinde, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, taşıtlarda, elektronik cihazlarda, yakıt pilleri, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında, ısı depolanması vb. birçok yerde bulunabilmektedir. Basınçlı kap olarak kabul edilebilen ısı değiştiricilerinin tasarımında, basınç, sıcaklık

ve malzeme seçimi en önemli etkenlerdir. Isı değiştiricilerinin konstrüksiyonunda yumuşak çelikler, alaşımlı çelikler, özellikle bakır gibi diğer alaşımlar, seramikler veya özel maksatlar için de grafit gibi malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin seçiminde korozif, sıcak, basınçlı, asitli veya bazik ortam çalışma koşullarına dayanaklılığının yanı sıra, özellikle metal malzemelerde imalat kolaylığının (bilhassa kaynak kabiliyeti), ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı yayınım katsayısı gibi fiziksel özellikler, pratikte standart çap ve boyutlarda imal edilebilme ve fiyat gibi etkenler göz önünde tutulmalıdır [1].

Paslanmaz çelik; endüstriyel tesislerde, korozyon dayanımı gereken yerlerde sıkça kullanılır. Korozyona sebep olan sıvılar ve H_2S gibi gazların bulunduğu ortamlarda paslanmaz çelikler, kimyasal dayanımları ve fiziksel mukavemetleri ile öne çıkmaktadırlar. Paslanmaz çelikten mamul ısı değiştiricileri yakıt hücreleri alanındaki malzeme gereksinimini, özellikle korozyona olan direnci nedeniyle karşılamaktadır. Bilindiği gibi yakıt hücrelerinde (yakıt pillerinde); elektrokimyasal tepkime sonucu açığa çıkan ısıyı uzaklaştırmak, bu teknolojinin verimli olarak kullanılabilirliğini etkilemektedir.

Yakıt hücreleri yapıları gereği küçük ve karmaşık geometriye sahip olduğundan oluşan ısıyı atabilmek için gerekli mekanizmanın boyutları sınırlanmaktadır. Buna karşın, yakıt hücresinin gücü arttıkça açığa çıkan ısı da doğal olarak artacak ve daha büyük kapasiteli ısı değiştirici kullanımı zorunlu hale gelecektir.

Liter ve Kaviany [2] yaptıkları çalışmalarında, gözenekli yüzeylere sahip ısı değiştiricileri ile kılcal etkisiyle çift fazlı ısı transferi (sıvı ve gaz) ve aynı zamanda artırılmış yüzey alanı elde etmişler ve böylece düz bir plakaya göre %300 gibi bir artışla ısı transferi kapasitesine ulaşılabileceğini göstermişlerdir. Ulaşılan bu sonuç, yakıt hücresi ve elektronik cihazların soğutucularında gözenekli yüzeylere sahip ısı değiştiricilerinin kullanılabileceği yönünde bir motivasyon oluşturmuştur.

Literatür incelendiğinde, gözenekli yüzeylerin oluşturulabilmesi için özellikle başta kimyasal olmak üzere çeşitli yöntemler olduğu görülmektedir [3-6]. Ancak, kontrol

edilebilir ve açık gözenekliliğe sahip parçalar için toz metalurjisi yöntemi önemli bir çözümdür. Bunun yanı sıra iki farklı sıvı arasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla bir plaka üzerinde gözenekli yapıyı oluşturmak için de yine T/M yöntemi önemli bir alternatif olacaktır.

Gözenekli T/M parçalar geniş ve değişken bir uygulama alanı bulmuştur. Tipik T/M parçaların yapısal teorik yoğunluğu %85-%99,9 aralığında değişirken, kullanılan teknik ve sinterlemeyle %25 ile %85 arası teorik yoğunluklu parçalar üretilebilmektedir. Filtreler, kendi kendini yağlayabilen yataklar, bataryaların elektrotları, akış kontrol cihazları, akış sınırlandırıcıları, darbe emiciler ile köpüksü yapılar bu parçalara örnek olarak verilebilir [7].

Toz metalurjisi teknolojileri parçacıkları üretir, bunların özelliklerini kontrol eder, istenilen şekillere sıkıştırır ve belirli bir sıcaklığa ısıtıp parçacıklar arasında bağ oluşturarak güçlü bir ürüne dönüştürür. Toz teknolojilerinin önemli olmasının nedenlerinden birisi, sadece tekrar aynı ürünü kopyalama özellikleriyle değil, aynı zamanda uygulanabilir ürünler oluşturmak için gözeneklerin veya fazların istenilen yere konulmasına imkan sağlamasındandır. Toz metalürjisi yöntemi yağlama, süzme ve enerji dağıtımında faydalanılan gözenekli yapı üretimine de izin verir. Bu ürünlerin imalinde rekabet edebilecek başka bir teknoloji de genellikle yoktur.

Gözeneklilik basınç altında düşmekte yoğunluk üst sınırına yaklaşmaktadır. Yüksek gözenekliliğe sahip olabilmek için düşük basınçta presleme gerekirken, tozların bir altlığa tutunabilmesi için sıkıştırma basıncının artırılması gerekmektedir. Bakır ile yapılan çalışmalarda; minimum basınç seviyesinin 15MPa civarında olabileceği, ancak tutunma için sıcaklık altında preslemenin yapılması gerektiği ve bunun da minimum 350°C olması gerektiği belirtilmektedir [8].

Yakıt hücrelerinde kullanılan ısı değişicilerinde paslanmaz çelik plakalar tercih edilmektedir. Özellikle yüksek korozyon dayanımıyla bilinen östenitik paslanmaz çelikler ve bunların düşük karbonlu formları endüstriyel işlemeye uygundur. Bakır tozlarından başarı ile üretilen gözenekli yüzeylerin [8], yakıt hücrelerinin ısı

değiştiricilerinde anılan özellikleri nedeniyle paslanmaz çelikten üretilmesi fikri bu çalışmanın kaynağını oluşturmaktadır.

Koç ve arkadaşları çalışmalarında, mikro ölçekli gözenekli yüzeylerin imalini sıcaklık ve mekanik özellikler yönünden incelemişlerdir. Çalıştıkları kalıpta farklı iki yüzey formu bulunan numuneler oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu numunelerde presleme basıncı, sıcaklık, bekleme zamanı, toz boyutu, altlık gibi özellikleri göz önünde bulundurarak testlerinin sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Gözenekli mikro-kanallı plakaların; yakıt hücresi ve diğer ısı değiştirici uygulamaları (gözenekli, paslanmaz çelik ve diğer metal alaşımlar) için fabrikasyon imalatlarının olabileceğini belirtmişlerdir. Tozlar ve yüzey arasında güçlü bir bağ sağlamak amacıyla, sıcaklık mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. Bu değeri bakır için minimum 450–500°C olarak saptamışlardır. Eğer sıkıştırma sırasında sıcaklık 900–1000°C civarında değilse, sinterlemenin gerekli olacağı, oksidasyonu engellemek için, sıkıştırma ve sinterleme korumalı atmosferde yapılmasının gerekeceği, yüksek basınç ve sıcaklık değerleri, her ne kadar güçlü ve kompakt bir yapı için gerekse de gözenekliliği sınırladığı, tutarlı gözeneklilik seviyeleri için uygun toz boyutunun sağlanması gerektiği, sıcaklığın da bağ gücünü artırmak için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [9].

Mahabunphachai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sıvı ile şekillendirme (hydroforming) yöntemi kullanılarak, 0,05 mm kalınlığındaki SS304 levha ile 0,5x0,5 mm çok ince akış kanallı bipolar levha üretilmiştir. Belirtilen sıvı ile şekillendirme yöntemi ile iki levha arasındaki form verilmiş kanalcıklara basınçlı sıvı verilerek kılcal denebilecek kanallar üretilerek bipolar plaka ısı transfer sıvısı için kanal oluşturulmuştur [10].

Gu ve Shen tarafından gerçekleştirilen çalışma; doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) deneysel düzeneği kullanılarak, sinterlenmiş gözenekli 316L paslanmaz çelik bileşenlerin işleme koşulları ve mikro yapısal özellikler incelenmiştir. Lazer güç oranı hızını taramak için tanımlanan lineer enerji yoğunluğu (LED), lazer sinterleme mekanizmasına uyarlamak için kullanılmıştır. Yazarlar, lazer gücü veya

tarama hızı artırıldığında, gözenek oluşumunun genellikle daha yüksek olduğunu, lazer ışınlama sırasında kısmen erimiş parçacıklarla birlikte, lazer sinterlenmiş gözenekli yapı elde etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Sinterlenmiş örneklerde genellikle %21–55 gözeneklilik elde etmişlerdir. Optimum işletme şartları altında 152 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir [11].

Cora ve arkadaşları çalışmalarında, geliştirilmiş ısı transferi uygulamaları için mikro ölçekli gözenekli yüzey yapılarının imalatını gerçekleştirmişlerdir. Deneysel bir süreç optimizasyonu olan çalışmalarında, mikro ölçekte gözenekli ve kanallı yapılar elde ederek, kanallardaki yükseklik ve genişlik oranlarını değiştirmişler ve h/w=0;0,84;1,68 oranlarına sahip; düz ve kanallı numuneler oluşturarak gözeneklilik, basınç ve sıcaklık değerlerine göre üretim şartlarının aralıklarını belirlemişlerdir. Bu numunelerin yapışma gücünü geliştirdikleri cihazda test etmişlerdir. Bakır tozlarının yüzeye yapışma sıcaklığının minimum 350°C, sıkıştırma basıncının en az 15 MPa olduğunu, %40'ın üzerinde gözenekliliğe sahip yüzeylerin üretilebileceğini, ancak tutunma dayanımının %4 seviyelerine kadar inebileceğini göstermişlerdir. Gözenekliliğin artışı ile birlikte tutunma dayanımının azaldığı vurgulanarak, küresel bakır tozundan mikro gözeneklere sahip yüzeyler için sınır değerleri belirlemişlerdir [8].

Molin ve diğerleri, imalat maliyetleri önemli ölçüde azalmış olan katı oksit yakıt hücrelerinin (SOFCs) SS316L gözenekli paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde, yüksek sıcaklıkta çalışma özelliklerini değerlendirerek, 316L paslanmaz çelik yüzeyin termogravimetrik analizini yapmışlardır. Özellikle işletme sıcaklığı 500°C olan katı yakıt hücrelerinde; XRD analizi ve elektriksel ölçümler yapmışlardır. Östenitik 316L malzeme ile 500°C sıcaklık altında işletilen bir hücrede deneyler yapılarak, hava oksidasyonunun yüksek olduğu 500°C üstü sıcaklıklarda paslanmaz çelik altlık kullanmanın uygun olmayacağını belirlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde, 300 saat sonra 800°C'deki yakıt hücresindeki hava oksidasyonundan dolayı paslanmaz çelik başlangıç kütlesinin %5 azaldığı görülmüştür [12].

Wang ve diğerleri, anot malzemesi olarak gözenekli $AgCe_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.9}$ sermetin kullanıldığı orta sıcaklık katı oksit yakıt hücresinde CO yakıt ile deneyler yapmışlardır. %47 gözeneklilikteki AgCSO sermette uygun elektrik iletkenliği, aktivite ve oksidasyon özellikleri bulunmuştur [13].

Yang ve arkadaşları, metan buharlı katı oksit yakıt hücresinin gözenekli yüzeyini incelenmiştir. Aktif gaz ve ürünler H_2, CO, CO_2 bir arada ise, CO konsantrasyonunun oldukça düşük olduğu, metan buharının genel etkisi kuvvetli endotermik reaksiyon olduğunda tepkimedeki gaz sıcaklığının akış yönü boyunca önemli ölçüde azaldığı görülmüş; uygun çalışma koşulları olan 800°C da ε=0,4 değerine ulaşılmıştır. Girişe verilen uygun H_2O:CH_4 oranının H_2 verimi ve karbon birikimi üzerindeki etkilerinin birbirlerine bağımlı olduğu, gözenekli yüzeyde küçük Ni parçacıklarının bulundurmanın, katalizör yüzeyinde karbon birikimi için daha kolay olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır [14].

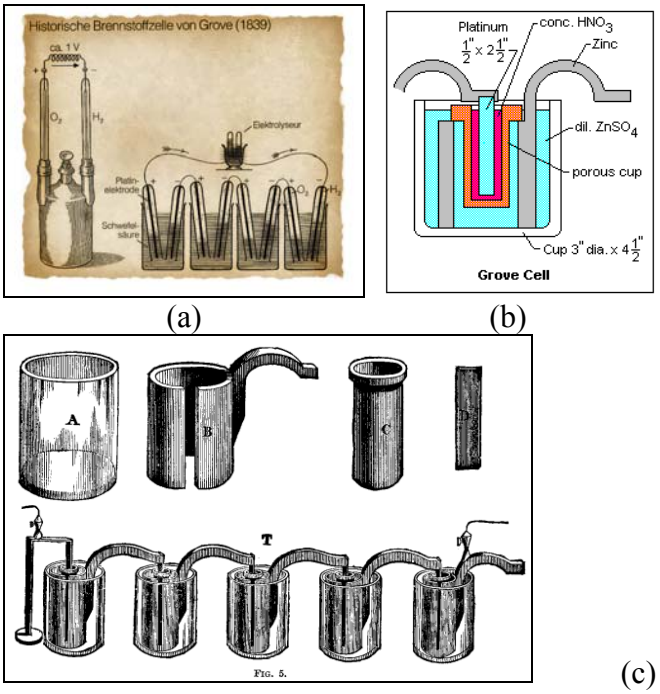
Bu çalışmada, özel geometriye sahip kalıp ve zımbaların tasarım ve imalatı yapılarak, yakıt hücrelerinin ısı değiştiricilerinde kullanılmak üzere SS316L küresel paslanmaz çelik tozlarından gözenekli yüzeye sahip parçalar üretilmiştir. Bu tozların altlığa tutunması için gerekli minimum basınç ve sıcaklık değerleri ve koşulları araştırılmıştır. Bu parametreler ışığında; altlığın yüzey pürüzlülüğü, toz boyutu, basınç ve sıcaklık parametrelerinin gözenekli yüzeyin altlığa tutunmasına etkisi ve altlıklara ait yüzey morfolojileri incelenmiştir.

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuarı, Prof. Dr. Süleyman Sarıtaş Toz Metalurjisi Laboratuarı ile Kimya Mühendisliği laboratuarlarında, pres, sinterleme fırınları, toz eleme makinası, DC güç kaynağı, pürüzlülük ölçüm cihazı, metalografik numune hazırlama üniteleri, optik ve elektron mikroskop mevcut olup, çalışmalar bu laboratuarlarda gerçekleştirilmiştir.

2. YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Teknolojik Gelişimi

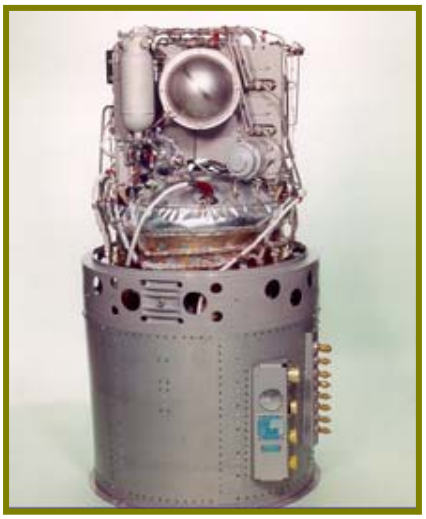
Yakıt hücreleri, verimli, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu enerji üretiminde kullanılan, gelecek kuşaklarda çok daha yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilen önemli yaklaşımlardan biridir. Yakıt gazlarındaki kimyasal enerji; düşük enerjili, minimum hareketli parçalar içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik enerjisine dönüştürülür. Yakıt hücreleri ilk defa 19. yüzyılın sonunda geliştirilmiştir. İlk pratik yakıt hücreleri Apollo uzay programı için 1960'larda yapılmıştır; günümüzde de hala uzay projelerinde yakıt hücrelerinin kullanımı devam etmektedir. 1839 yılında Sir William Grove seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşmuş bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır (Şekil 2.1). Daha sonraki yıllarda Grove, önceki çalışmasında kullandığı sistemden elli tanesini birleştirerek oluşturduğu bir sistemde daha fazla elektrik akımı üretmeyi başarmıştır [15].



(a) (b) (c)

Şekil 2.1. a) 1839 yılında Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi b)Grove pilinin ayrıntılı çizimi [16]. c) 1839 yılında ayrıntılı çizimi verilen hücreler [17].

Yakıt hücresi terimi ilk olarak 1889'da Ludwing Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Mond ve Longer oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir. 1894'de Wilhwm Oswalt kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal hücre yapmıştır. 1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt hücresinin geliştirmiştir. 1952'de Bacon ve arkadaşları 5 kW'lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan traktör dizayn etmişlerdir. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinaların başlangıcı olmuştur. 1960'lı yıllarda NASA yakıt hücresi teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmıştır. Yakıt hücreleri hafif olmaları ve yan ürün olarak su üretmelerinden dolayı uzay uygulamaları için düşünülmeye başlanmıştır. Uzay çalışmalarında yakıt hücrelerinin kullanılması; yüksek verim, düşük gürültü ve titreme, yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak Gemini uzay aracında General Elektrik tarafından üretilen proton değişim membran yakıt hücresi kullanılmıştır (Resim 2.1). 1970'li yıllarda General Motor "Elektrovan" adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir. 1970'li yıllarda devlet destekli yakıt hücresi araştırmaları başlamış ve bu amaçla Los Alamos Ulusal Laboratuarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuarları kurulmuştur [15].



Resim 2.1. Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim membran yakıt hücresi

2.2. Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi

Yakıt gazlarındaki kimyasal enerji düşük enerjili, minimum hareketli parçalar içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik enerjisine dönüştürülür. Yakıt hücreleri düşük gürültü seviyesinde, az kirletici ürün açığa çıkararak yüksek verimle çalışabilmektedirler, tek yan ürün saf sudur. H_2; katottaki oksijenin indirgenmesiyle birlikte anotta yükseltgenir. Bunun yanı sıra yakıt hücresinde metanol, su ve CO_2'ye veya CO'e dönüşebilmektedir. Yakıt hücrelerinin en önemli uygulaması uzay araçlarında başlıca enerji kaynağı olarak kullanılmalarıdır. H_2-O_2 yakıt hücrelerinin insanlı uzay araçlarında kullanımı; içme ve soğutma amaçlı olarak saf suyun üretimini sağlamaktır. Nüfusu yoğun olan bölgelerde bile yakıt hücrelerini baz alan güç istasyonları kurulabilmektedir. Yakıt hücrelerinin; düşük emisyon ve gürültü seviyeleri ile H_2'nin temel enerji kaynağı olması durumundaki yüksek verimlilikleri nedeniyle yakın gelecekte önemli rol oynayacağı tahmin edilmektedir [15].

Zamanla fosil yakıtların azalmasından duyulan endişe sonrası içten yanmalı motorlara göre pahalı bir yöntem olan yakıt hücreleriyle elektrik üretme, yüksek verimliliği ve emisyonsuz olması sayesinde tekrar araştırılmaya ve geliştirilmeye başlamıştır [18].

2.3. Yakıt Hücrelerin Kıyaslanması

Günümüzde pek çok çeşit yakıt hücresi vardır. Kullanım amacına, kullandığı yakıtın çeşidine ve saflığına, sıcaklık, basınç ve nem gibi çalışma koşullarına göre ve maliyeti düşürmek amacıyla yakıt hücresi çeşitleri geliştirilmiştir. Bu çeşitlemenin sonu yoktur, ancak genellikle kullanılan zar ve yakıt hücrelerinde ayıraç olmaktadır. Bugüne kadar olan yakıt hücrelerinin kısaca karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir [19].

Çizelge 2.1. Yakıt hücrelerinin kısaca karşılaştırılması

Yakıt Hücresi Türü	Zar	Mobil İyon	Çalışma Sıcaklığı	Çalışma Aralığı	Yakıt	Verim	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
Proton geçirgen zarlı yakıt hücresi (PEMFC) [Larmine and Dicks,2005]	PTFE (Nafion) katı	H^+	20-100 °C	<1W - 200kW	H_2	%35 - 50	Düşük sıcaklık yüksek enerji yoğunluğu, hafif, hızlı ilk çalışma, Katı Elektrolit	Çok saf H_2, Pahalı katalizör	Portatif Sistemler, Jeneratör, Askeri sistemler
Katı oksit yakıt hücresi (SOFC) [Larmine and Dicks,2005]	Seramikler (YSZ,C_eO_2) katı	O^{-2}	500-1000 °C	1W - 250kW	H_2 , CO_2 , CH_4	%45 - 60	Yüksek verim, yakıt çeşitliliği, ucuz katalizör, hızlı ilk çalışma, Katı Elektrolit	Yüksek Sıcaklık , Korozyon , Hücre üretimi zor ve pahalı	Elektrik santralleri, Orta Ölçekli işletmeler için ısı ve elektrik, Portatif Sistemler
Alkaline (bazik) yakıt hücresi (AFC) [Larmine and Dicks,2005]	Bazik Solüsyonlar (NaOH,KOH) sıvı	OH^-	50-100 °C	200W - 10kW	H_2	%35 - 50	Katottaki aktivasyon kaybı düşük, sıvı elektrolit, yüksek temas	Çok saf H2, Pahalı katalizör	Uzay araçları
Fosforik Asit yakıt hücresi (PAFC) [Larmine and Dicks,2005]	Fosforik asit (H_3PO_4) sıvı	H+	190-220 °C	10KW - 1MW	H_2	%35 - 50	Saflığı düşük hidrojen kullanılabilir, sıvı elektrolit, yüksek temas		Elektrik santralleri, Orta Ölçekli işletmeler için ısı ve elektrik
Eriyik Karbonat yakıt hücresi (MCFC) [Larmine and Dicks,2005]	Eriyik Alkali Karbonatlar (Li_2CO_3,K_2CO_3) sıvı	CO_3^{-2}	600-650 °C	200KW - 10MW	H_2,CO	%45 - 60	Yüksek verim, yakıt çeşitliliği, ucuz katalizör, Sıvı Elektrolit, yüksek temas	Yüksek Sıcaklık , Korozyon	Elektrik santralleri
Doğrudan Metanol (veya Etanol) yakıt hücresi (DMFC veya DEFC) [Larmine and Dicks,2005]	PTFE (Nafion) katı	H^+	50-100 °C	<1W - 200W	CH_3OH, (C_2H_5OH)	%25 - 40	Ucuz Yakıt, Kolay depolanan sıvı yakıt	Düşük verim , metanolün zehirli bir yakıt olması	Portatif Sistemler
Doğrudan Bor hidrür yakıt hücresi (DBFC) [Lakeman,2005]	Bazik Solüsyonlar / Anyon veya katyon geçirgen zar,	OH^-	20-100 °C	1W - 200W	BH_4^{-1}	%35 - 50	Alternatif yakıt, yüksek açık uç gerilimi	Yakıtın elde edilmesi zor	Deneme aşamasında

Fosforik asit yakıt hücreleri elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanır, verimi %40-50 civarındadır, ancak kaybedilen ısı bir yeniden dönüştürme sisteminde kullanıldığında bu %80'lere kadar çıkabilir. Bunun gibi katı oksit yakıt hücrelerinde de, katı elektrolitin her iki yanı özel gözenekli elektrot malzeme ile kaplanmıştır [20]. Ancak, yüksek çalışma sıcaklıkları aynı zamanda malzemeler üzerine katı dayanım kısıtlamaları getirir. Hücre çalışma sıcaklıklarında düşük maliyetli, yüksek dayanımlı malzemelerin geliştirilmesi bu teknolojinin yüzleştiği başlıca meydan okumadır [21]. Bunun gibi eriyik karbonat yakıt hücreleri, yüksek-sıcaklıklı yakıt hücreleridir. 650ºC ve üstü sıcaklıklarda çalıştıklarından, %60'a kadar verim sergilerler ve bu kayıp sıcaklık, yeniden üretim için kullanıldığında %80'lere kadar çıkabilir. Halen kullanımda olan üniteler 2 MW'a kadar güç üretirler, ancak 50 MW'dan 100 MW'a kadar güç üretecek kapasiteye sahip üniteler için tasarımlar mevcuttur [22].

Saf hidrojenle çalışan yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında doğrudan metanol yakıt hücresi teknolojisi (DMYH) göreceli olarak daha yenidir ve DMYH araştırma ve geliştirmeleri diğer yakıt hücrelerinin kabaca 3–4 yıl gerisindedir [21].

Yüksek-sıcaklık alkali yakıt hücreleri (AYH) 100ºC ve 250ºC arasındaki sıcaklıklarda çalışırlar. Bununla birlikte, yeni AYH tasarımları yaklaşık 23ºC ve 70ºC arasındaki daha düşük sıcaklıklarda çalışırlar. AYH'lerin yüksek performansı hücre içinde gerçeklesen kimyasal reaksiyonların içinde bulundukları süreç yüzündendir. Bunlar aynı zamanda uzay uygulamalarında %60'a varan verimlilikler göstermiştir [21].

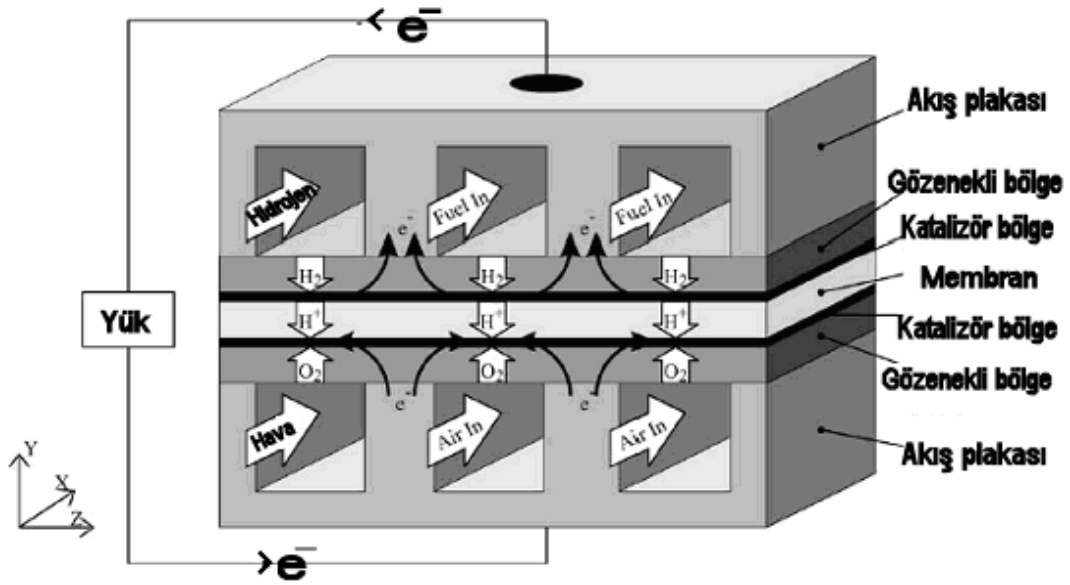
Proton değişim zarlı yakıt hücresi (PDZYH) ince, geçirgen bir tabaka seklindeki polimer bir elektrolit ile çalışır. Bu zar küçük ve hafif olmakla birlikte düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 80ºC civarında) çalışır. Diğer elektrolitler 1000ºC'ye varan sıcaklıklar gerektirir. Bu yakıt hücresinin çalışması için proton değişim zarlı elektrolit üzerinden hidrojen protonlarının içinden geçmesine izin vermeli ancak elektronların ve daha ağır gazların geçişine izin vermemelidir. Bir PDZYH'nın

verimi %40–50'lere ulaşır. Halen 50 kW kapasiteye sahip üniteler kullanımdadır ve 250 kW kadar güç üretebilecek olanları geliştirilmektedir [22].

2.4. Yakıt Hücresinde Atık Isı Oluşumu ve Isının Hücreden Uzaklaştırılması

2.4.1. Yakıt hücresinde atık ısı oluşumu

PEM yakıt pilinin amacı, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirerek güç üretmektir. Şekil 2.2'de yapısı verilen yakıt pili, katot ve anot bölgesinden oluşur. Katot tarafındaki akış kanalından hava geçerken, anot tarafındaki akış kanalından hidrojen (yakıt) geçmektedir. Anot tarafındaki gözenekli tabakadan katalizör tabakaya geçen hidrojen, platin katalizör sayesinde elektronlarını bırakır [23].



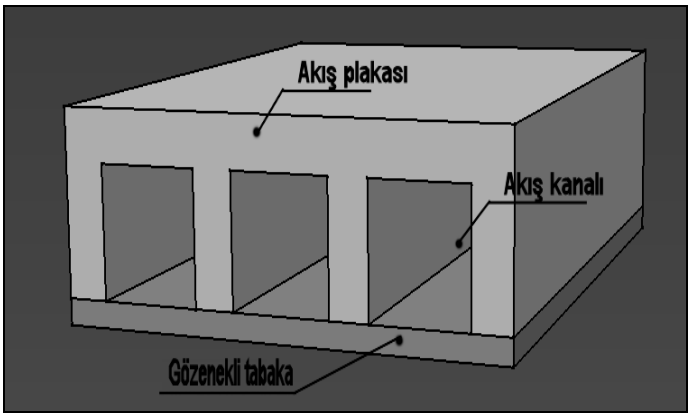
Şekil 2.2. Yakıt hücresi (PEM) ve yapısı

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \qquad (2.1)$$

Elektronlar, dış devre boyunca elektrik akımı oluşturarak faydalı işe dönüştürülür. Elektronlarını veren hidrojen molekülleri, hidrojen iyonları olarak (proton) membran içinde ilerleyerek katot tarafına ulaşır. Buradaki iyonlar, katot tarafından geçen oksijen molekülleri ile katalizör bölgesinde birleşerek suyu ve atık ısıyı oluşturur.

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O + \text{Atık ısı} \quad (2.2)$$

Akış kanallarındaki basınç düşümünün sonucu olarak gözenekli tabakaya gaz geçişi olmaktadır. Şekil 2.3'te akış kanalının içerisinden geçen akışkan, gözenekli ortamda uniform şekilde gaz dağılımı oluşturur. Difüzyon bölgesine düzgün dağılan akışkan molekülleri katalizör bölgeye gelerek burada reaksiyona girerler. Katalizör bölgede oluşan elektronlar, gaz difüzyon (gözenekli) bölgesinden kanal plakasına ilerleyerek düzgün elektron dağılımı oluştururlar [24].



Şekil 2.3. Yakıt hücresi (PEM) ve tabanında gözenekli tabaka bulunan kanaldaki akış

Reaksiyon sunucu ortaya çıkan atık ısının sistemden uzaklaştırılması verimin artışına sebep olacaktır. Bir yakıt hücresi kimyasal enerjiyi mükemmel bir şekilde elektrik enerjisine çeviriyor olsaydı, yakıt hücresinin ideal voltajı 25°C ve 1 atmosferde 1,23 volt olurdu. Yakıt hücresi 80°C sıcaklığı civarına kadar ısıtıldığında ideal hücre voltajı 1,18 volta kadar düşer. Bununla birlikte hücre voltajını daha da aşağılara düşüren birçok faktör mevcuttur. Hücre dışında ölçülen voltaj elektriksel verim için iyi bir ölçüttür; voltaj düşerse, elektriksel verim de düşer ve su ile ısı oluşumu için çok daha fazla kimyasal enerji harcanmış olur [20].

Sıcaklığın bu etkisi Nafion™ membranlarda da görülmektedir. Şöyle ki; Nafion membranların proton iletkenlikleri yüksek sıcaklıklarda (120ºC), içerdikleri suyun buharlaşması nedeniyle azalmaktadır [25].

Şu anda DuPont tarafından üretilen Nafion adlı perflorosülfonik asit kopolimer kullanmak, polimer elektrolit membran yakıt hücreleri için en popüler metottur. Nafion'un yakıt hücreleri uygulamalarında iyi kimyasal ve fiziksel özellikleri olmasına rağmen onu sınırlayan üç teknik sınırlama vardır.

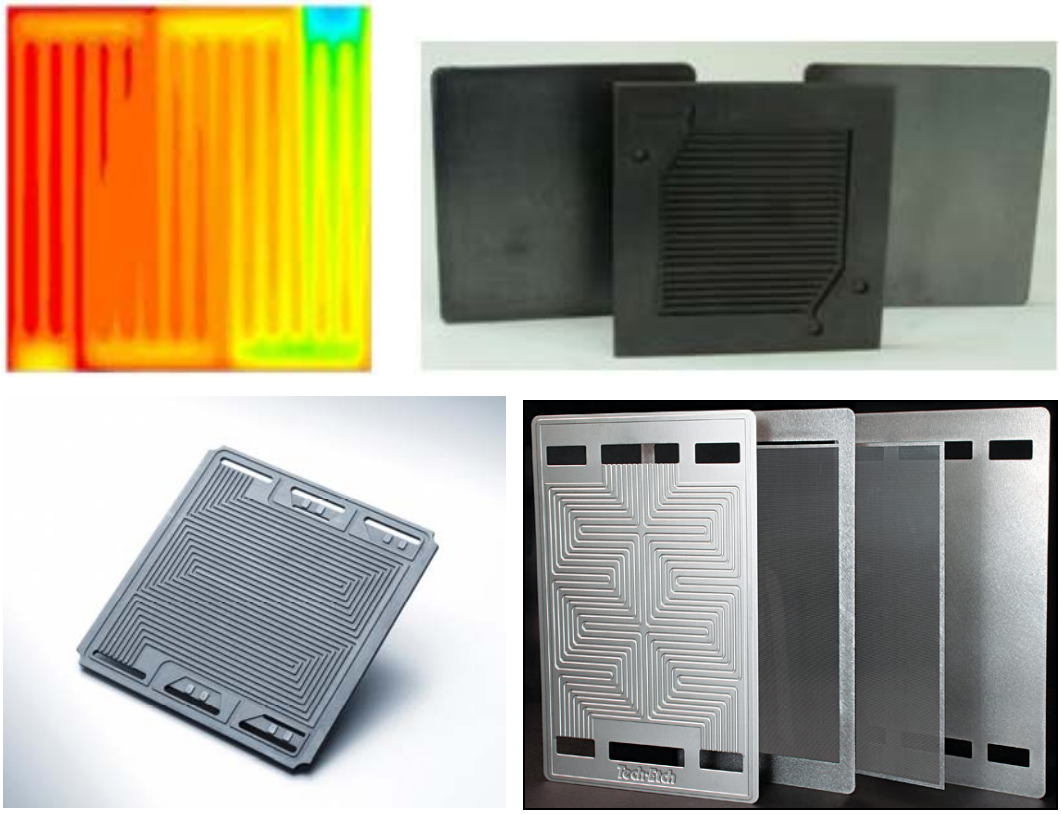
• Yüksek maliyete sahip olması
• Düşük nem ya da yüksek sıcaklıkta iletkenliğinin düşük olması
• Hücre verimini azaltan yüksek metanol geçirgenliği

Bu sebeplerden dolayı Nafion yerine farklı polimerlerden oluşan membran sentezleri önem kazanmıştır [25].

2.4.2. Yakıt hücresinde oluşan atık ısının hücreden uzaklaştırılması

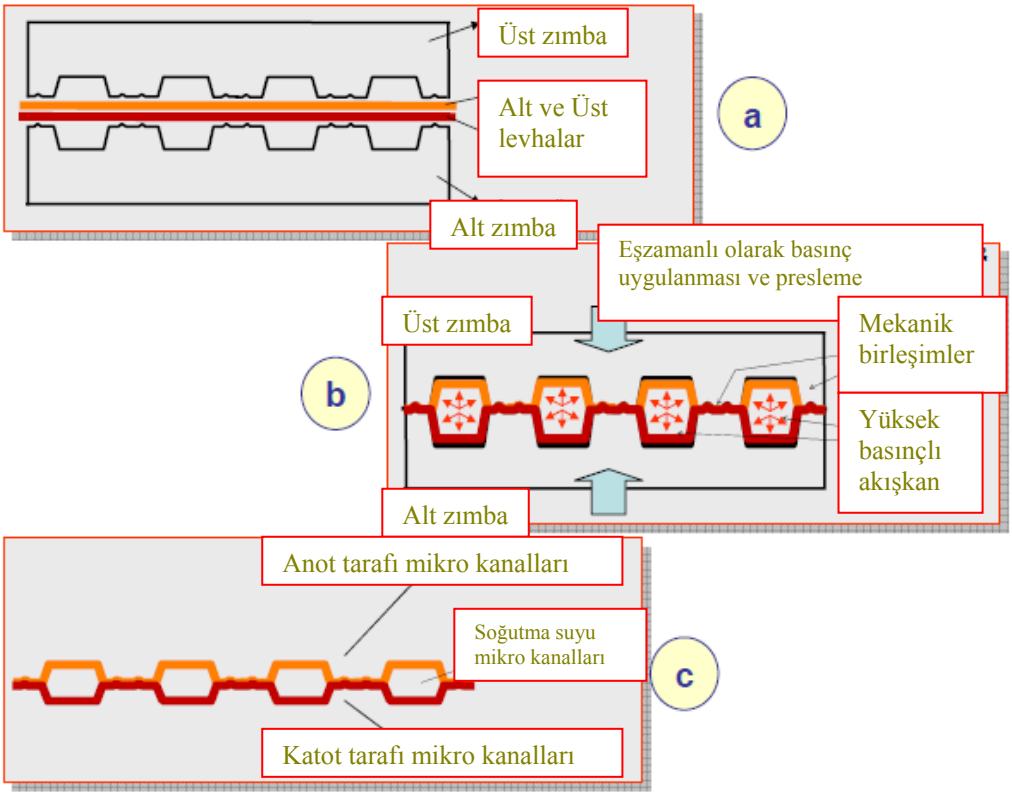
Yakıt pillerindeki sıcaklığın ortamdan uzaklaştırılması işleminde gerçekten iyi ısı transferi uygulamalarına(ısı değiştiricilerine) ihtiyaç duyulmaktadır. Hücrelerin üzerindeki yüksek ısıyı bertaraf edebilmek için konvansiyonel ısı değişicileri yetersiz kalmaktadır. Burada gereken, küçük eşanjör yüzeylerinden büyük ısı transferidir [26, 27]. Bu çalışmada, büyük ısı kapasitesine sahip gözenekli paslanmaz çelik ısı değiştiricisinin T/M ile elde edilebilirliği ve bunun yakıt hücrelerine adaptasyonu hedeflenmiştir.

Bipolar plakalar, girdi gazları hücreye dağıtmada ve üretilen akımı bitişik hücreye geçirmede kullanılan, elektrik iletkenliğine sahip yapılardır (Resim 2.2). Yakıt pili performansını ve fiyatını doğrudan etkilemektedirler. Bu nedenle bipolar plakalar için gaz geçirgenliği, elektriksel iletkenlik, mukavemet, hacimsel güç yoğunluğu, çözünmeye karşı dayanıklılık, yoğunluk, korozyona karşı dayanıklılık ve geri dönüştürülebilirlik konularında Ar-Ge çalışmaları sürdürülmektedir [28].



Resim 2.2. Modelleme çalışmaları ile geliştirilmiş bipolar levha örnekleri [28].

Isının hücre üzerinden uzaklaştırılmasında ve yakıt hücreleri için gerekli potansiyel farkı sağlamaları amacıyla bipolar levhalar seri olarak bağlanırlar. Bu seri bağlama özellikle hücrenin orta kısımlarında ısının artmasına neden olmaktadır. Yakıt hücreleri çeşitli bileşenleri arasında, bipolar plakaları yüksek maliyet, yüksek ağırlık ve yüksek hacimli bileşenleri olarak durmaktadır [10]. Bu sebeple bipolar levhalar farklı tekniklerle üretilmektedir. Şekil 2.4'te hidroform yöntemi kullanılarak çok ince akış kanallı bipolar levha üretimli görülmektedir. Hidroform yöntemi ile iki levha arasındaki form verilmiş kanalcıklara basınçlı sıvı verilerek kılcal denebilecek kanallar üretilip, bipolar plaka ısı transfer sıvısı için kanal oluşturulmuştur [10].



Şekil 2.4. Yakıt hücresi bipolar levhasının hidroform yöntemiyle oluşturulması [10].

Şekil 2.4.c'de, yakıt hücreleri içerisinden geçecek olan yakıt için oluşturulan anot ve katot tarafı mikro kanalları görülmektedir. Mikro kanalların bulunduğu bölgelerde mekanik birleştirmeler de bulunmaktadır. Bununla birlikte yüksek basınçla oluşturulmuş olan ve kesiti kapalı bölge teşkil eden, soğutma sıvısı kanalları görülmektedir [10]. Bu ve benzeri çalışmalarda ne kadar artırılmış ısı transfer uygulamaları olursa olsun verim %300'leri bulmaz. Gözenekli yüzeyler veya gözenekli-modüle edilmiş yüzeyler kullanarak ısı transfer verimi bu değerlere ulaşabilir [9].

2.5. Gözeneklilik ve Gözenekli Yüzey Oluşturma

2.5.1 Gözeneklilik

Gözeneklilik, malzeme içerisindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı şeklinde tanımlanır.

$$\varepsilon = \left[\frac{Vb}{Vb + Vk} \right] \tag{2.4}$$

Burada; V_b toplam boşluk hacmini, V_k toplam katı hacmini ve ε gözenekliliği göstermektedir. Gözeneklilik, gözenekli ortamın yapısına bağlı olarak 0 ile 1 arasındaki değerleri alabilir. Örneğin metaller ve bazı volkanik kayalar için gözeneklilik çok düşük değerlerdedir, oysa fiber filtreler ve ısıl yalıtım malzemeleri yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerdir. Malzeme içerisindeki gözeneklerin hepsi birbiri ile bağlantılı olmayabilir. Diğer gözenekler ile bağlantısı olmayan gözeneğin ortamdaki akış olayına katkısı yoktur [29].

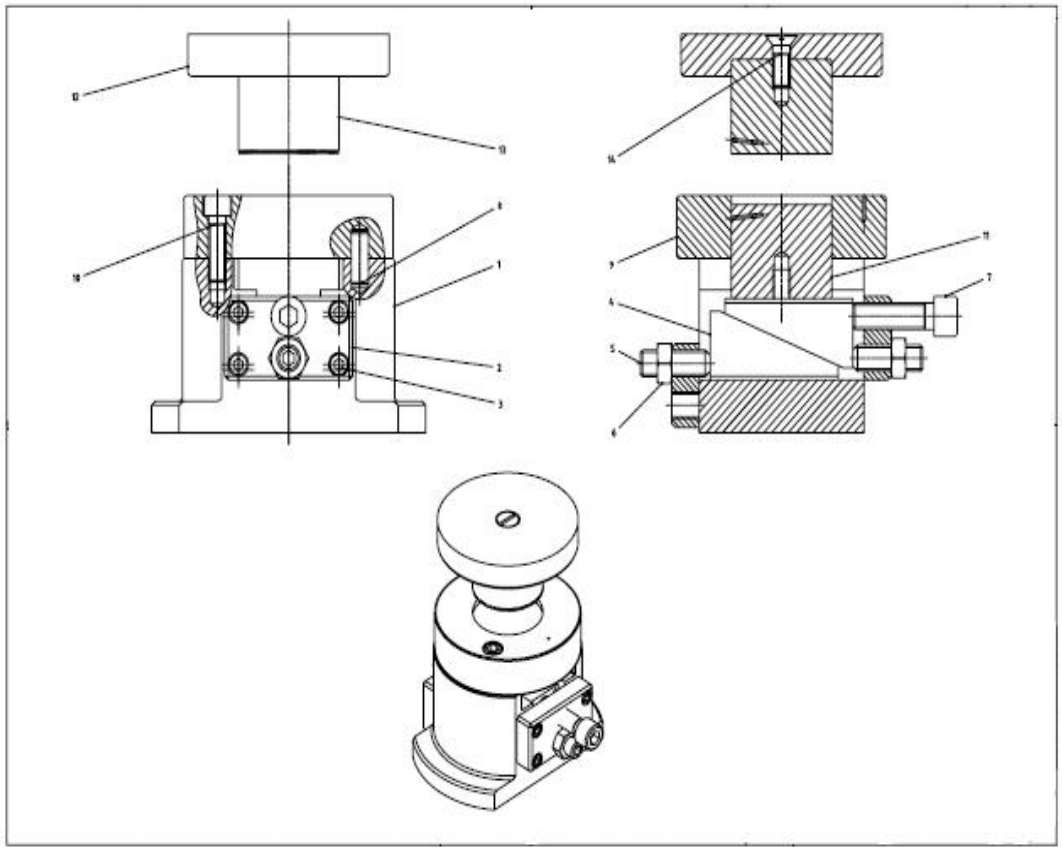
2.5.2. T/M yöntemi ile gözenekli yüzey oluşturulması

Toz metalürjisinin üstün özelliklerinden birisi de basınç ve uygun sıcaklık altında açık/kapalı gözeneklilik elde edilebilmesidir. Bununla ilgili olarak; SS316L paslanmaz çelik tozlarının kullanımıyla ısı değiştiricisi pakası oluşturmak amacıyla, kalıp ve zımba tasarımı yapılmış, preslemenin ısı altında gerçekleşmesi düşünülmüştür. Böylece yakıt hücrelerinin ısı değiştiricilerinde kullanılmak üzere küresel paslanmaz çelik tozlarından gözenekli yüzeye sahip parçalar üretilmiştir.

3. GÖZENEKLİ SS316L PASLANMAZ ÇELİK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ YÜZEYİ ÜRETİMİ

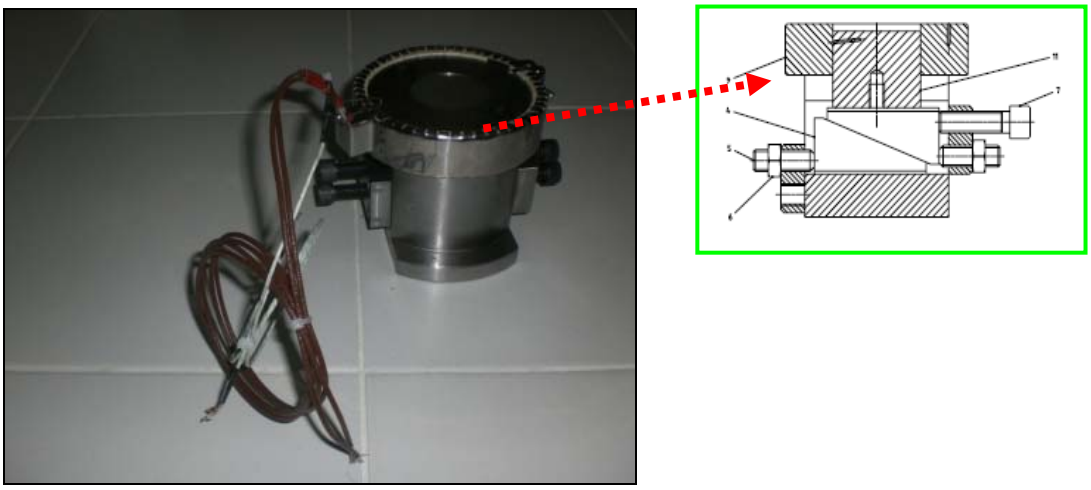
3.1. Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Çalışmanın bu aşamasında mekanik özellikleri belirlenerek, EK-1'de imalat resimleri bulunan 55 mm iç çapa sahip metal toz sıkıştırma kalıbının tüm parçalarının imalatı yapılmış ve Şekil 3.1'de perspektifi de görülen montaj işlemleri tamamlanmıştır.

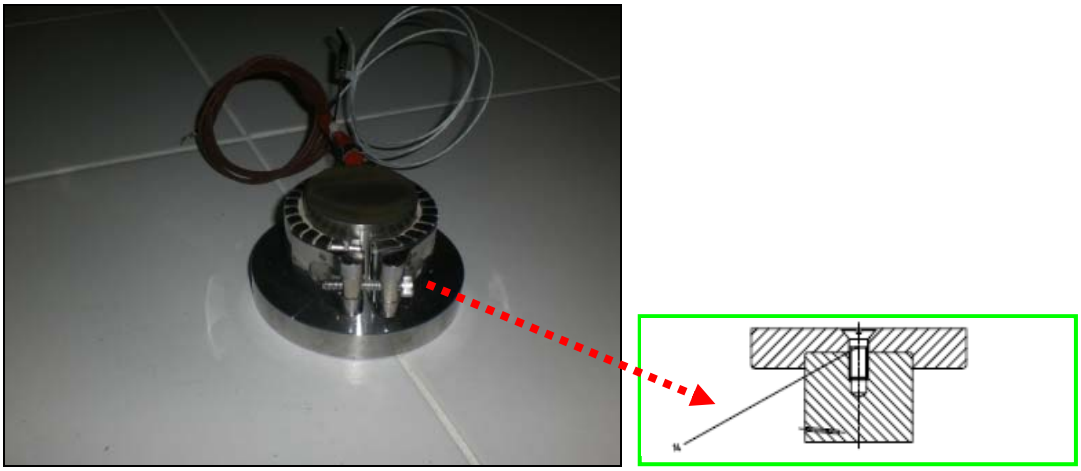


Şekil 3.1. Toz sıkıştırma kalıbının montaj teknik resmi

Resim 3.1 ve Resim 3.2'de deneye hazır kalıbın alt ve üst kısımlarının ısıtıcı yerleştirilmiş halleri görülmektedir.



Resim 3.1.Sıkıştırma kalıbının alt kalıp kısmı (seramik rezistansı ve termokupl ile birlikte montajlı şekilde)



Resim 3.2.Sıkıştırma kalıbının üst zımba kısmı (seramik rezistansı ve termokupl ile birlikte montajlı şekilde)

3.2. Toz Metal Sıkıştırma Kalıbının PHOENICS ile Isıl Analizi

İmalatları tamamlanarak montajları yapılan sıkıştırma kalıbının mekanik kısımlarının yanı sıra elektriksel kısımlarının hesap ve analizleri yapılmıştır. Kalıpta; alt kalıp yatağının çevresi ve üst zımbanın hemen üzerinden olmak üzere iki farklı bölgeden ısıtma yapılmıştır.

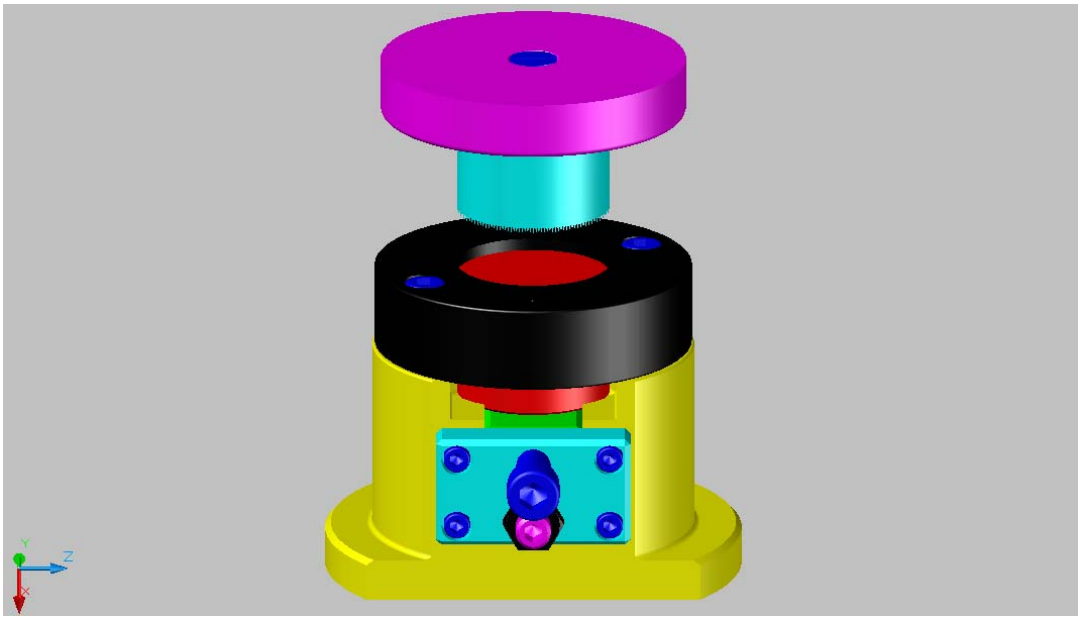
Isıtma elemanları olarak seramik rezistanslar düşünülmüş, kalıbın maksimum 700°C sıcaklığa çıkacağı düşüncesi ile ısıtma için kullanılacak rezistanslar yüksek sıcaklık

dayanımlı olarak seçilmiştir. Bu ısıtıcılar çap, sıcaklık, yükseklik ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak özel olarak imal edildiğinden, kalıba ait ısıl analiz yapılırken gerçek güç değerlerini belirlemek maksadıyla rezistanslara ait iç dirençler ölçülerek güç hesabı yapılmıştır.

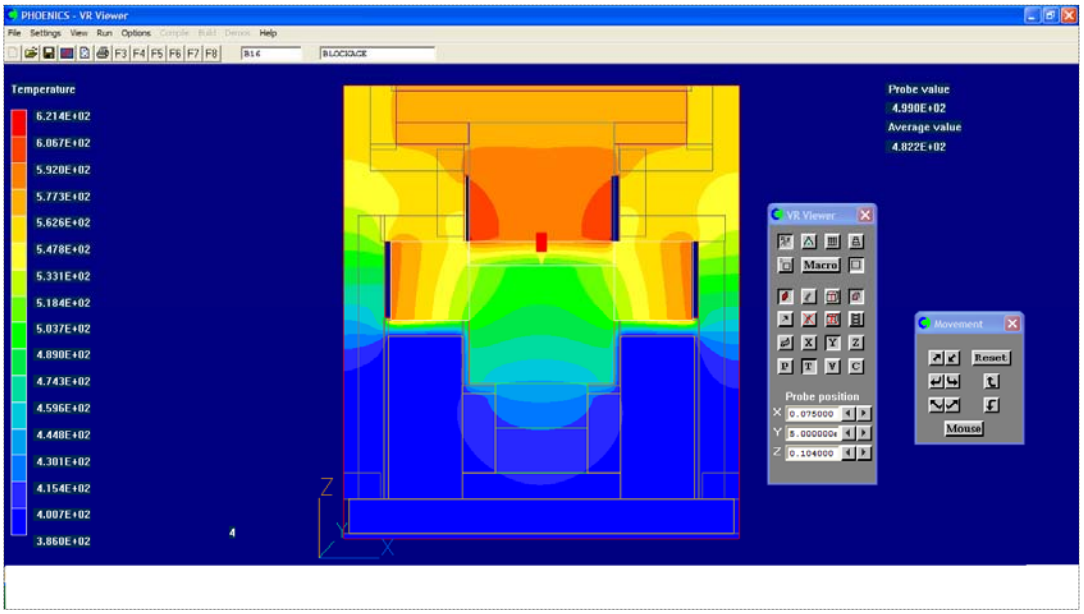
Alt Seramik Isıtıcı direnç değeri : 53,2 Ω
Üst Seramik Isıtıcı direnç değeri : 123,9 Ω

Bu değerler doğrultusunda üst ısıtıcının gücü $P_{üst}$= 400 Watt ve alt ısıtıcının da gücü P_{alt}= 925 Watt olarak bulunmuştur.

Toz metal kalıbın ısıl analizi için modellemesi yapılmıştır (Şekil 3.2). Modellemede PHONEICS programı kullanılmış, kalıbın oda sıcaklığından 500°C'lik bir sıcaklığa ulaşması için gereken zaman 2250 saniye (37,5 dak.) olarak bulunmuştur. (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Toz sıkıştırma kalıbının katı modeli



Şekil 3.3. 37,5 dakika ısıtma süresi sonunda kalıpta oluşan sıcaklık dağılımı

3.3. Toz Metal Sıkıştırma Kalıbının Sıcaklık Kontrol Ünitesinin Tasarlanması

Kalıp üzerindeki sıcaklığın sabit bir değerde kalmasını sağlayacak; birbirinden bağımsız iki adet GEMO marka DT-104A sıcaklık kontrolörü ile On-Off kontrol ünitesi oluşturulmuştur. İki adet SIEMENS 3TF40 trifaze kontaktör (fazları şöntlenmiş) rezistansları sürmektedir. Sıcaklık değerlerini okumak için kullanılan algılayıcılar, iki adet K tipi termokupldur (-100….+1300°C). Kontrol ünitesi yanmaya mukavim yalıtkan bir pano içerisine kontaktörleriyle birlikte monte edilmiştir. Bağlantılar için klemensler yerleştirilmiştir. Ünite girişinde iki adet SIEMENS C20 anlık yükselen akımlara duyarlı sigorta bulunmaktadır. Sistem bu haliyle 1300°C sıcaklığa kadar kontrol işlemi yapabilmektedir.

Kontrol ünitesinin pano içerisinde bulunması gereken, panoyu ve sistemini gösteren, elektrik projesi AUTOCAD ortamında çizilerek pano içerisine konulmuştur.

Kontrol ünitesinde gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra kalıp izolasyon malzemesi ile kaplanmış, alt ve üst izolasyon levhaları ile pres yüzeyinden ısıl olarak yalıtıldıktan sonra kalıp çalıştırılmıştır (Resim 3.3).



Resim 3.3. Isıl İzolasyonu yapılmış toz sıkıştırma kalıbı. (Resimde üst izolasyon levhası çıkarılmış haldedir.)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Toz metal ısı transfer plakaları üretmek için, uygun toz boyutu olan, elek üstü 150-200 µm çapında küresel SS316L paslanmaz çelik tozuna ihtiyaç duyulmuştur [8]. Temin edilen 150 µm çapında küresel paslanmaz çelik tozu içerisinde bulunan daha küçük çapta tozlar ortamdan açık gözenekliliği etkileyeceğinden, Resim 4.1'de görülen 75 µm' lik elek kullanılarak, 75–150 µm (elek üstü) ve 75 µm altı (eleğin altında kalan kısım) tozlar birbirinden ayrılmıştır.



(a)



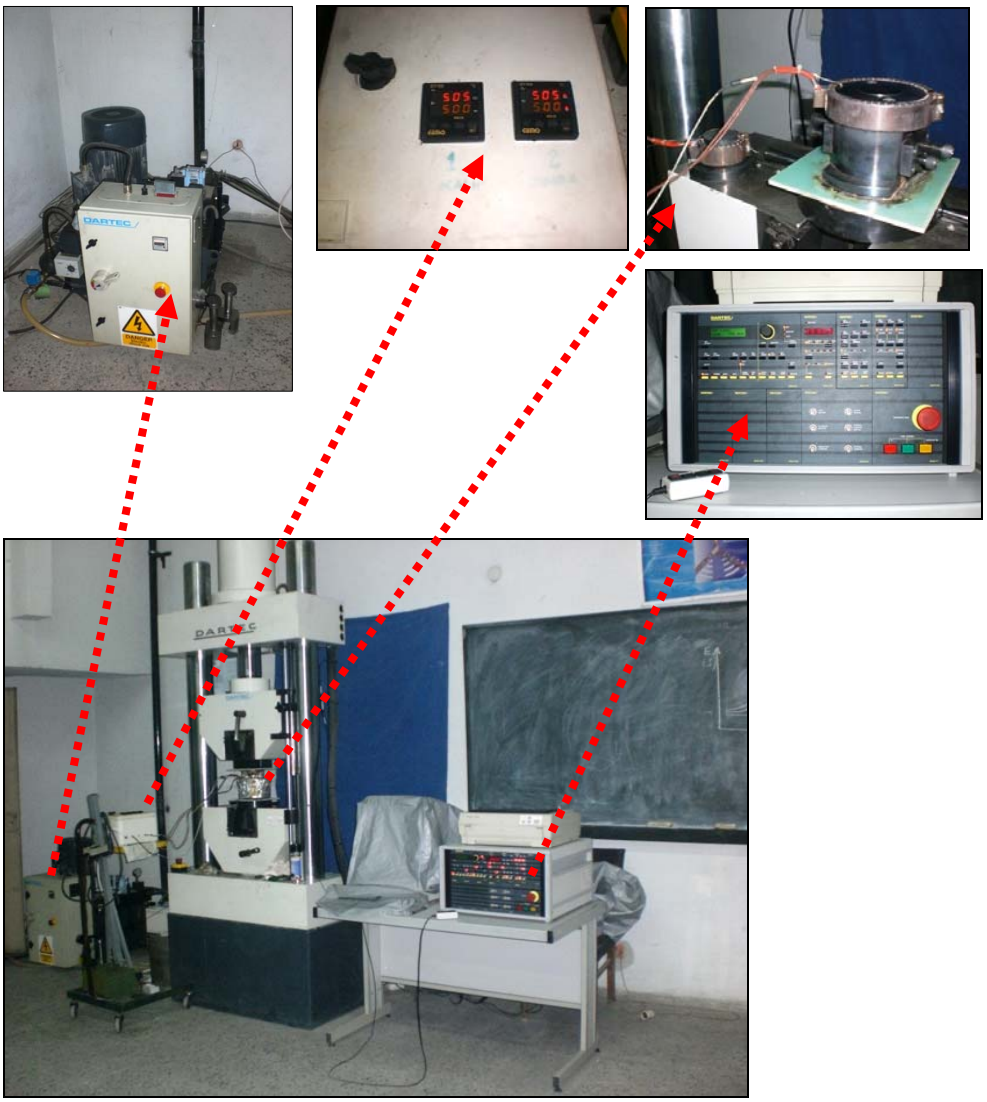
(b)

Resim 4.1. a) Toz eleme cihazı b) Elek

Tozların altlığa tutunmasını test etmek amacıyla elek altı (<75 µm) tozlar da kullanılmıştır. Deneylerde 100 µm kalınlığında SS316L paslanmaz çelik levhalar altlık olarak kullanılmıştır.

4.1. Toz Presleme Deney Düzeneği

Tozların preslenmesi için, mekanik laboratuarında bulunan DARTEC marka üniversal çekme-basma cihazı kullanılmıştır (Resim 4.2). Cihazın kontrol ünitesi kullanılarak basma yükü profili oluşturulmuştur.



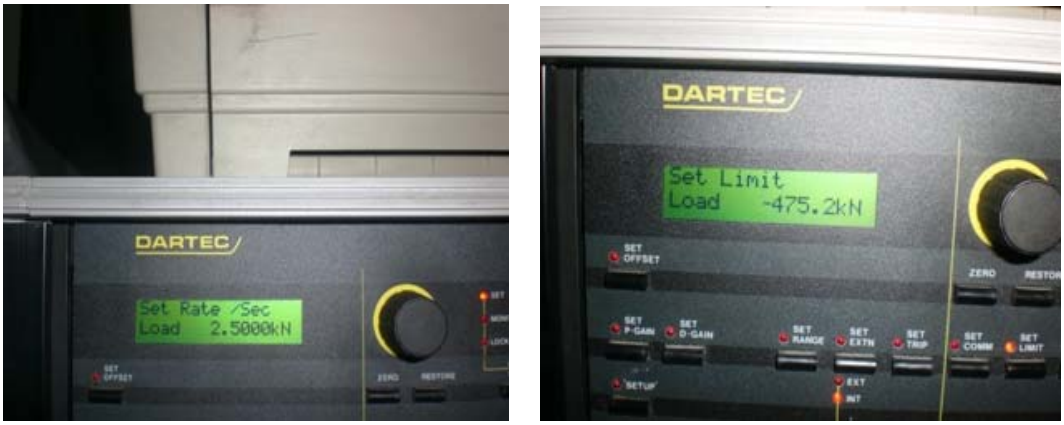
Resim 4.2. Metal toz presleme deney düzeneği

4.2. Sıcak Presleme Deneyinin Yapılışı

Öncelikle, düz yüzeyli numuneler oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu maksatla 55 mm çapında kesilen altlıkların, tozlara doğrudan temas edecek yüzeyleri zımparalanarak hazırlanmıştır.

75 µm elek altı tozlar, yaklaşık 2 mm kalınlıkta bir katman oluşturacak ve uniform bir yayılma gösterecek şekilde alt kalıba koyulmuştur. Bu tozların üzerine altlıklar (55mm çapında kesilen altlıkların zımparalanmış yüzeyleri tozlarla temas edecek şekilde) yerleştirilmiştir. Daha sonra üst zımba yerleştirilerek izolasyonlar sarılmış ve kalıp ısıtılmıştır. Isıtma süresi laboratuar ortamında, 500°C sıcaklık için 32 dakika civarındadır. Homojen sıcaklığın sağlanması için bu sürenin yeterli olduğu görülmüştür. Önceden ayarlanmış basınç değerine 10 saniyede ulaşılacak şekilde rampa girişi uygulanmış ve bu basınç altında 60 s beklenmiştir. Bu süre bitiminde pres üst çenesi kalıp üst zımbasından ayrılmış, izolasyon ceketleri çıkarılarak kalıbın soğuması beklenmiştir. Kalıbın yükseltme mekanizması vidaları yardımıyla numune alınır.

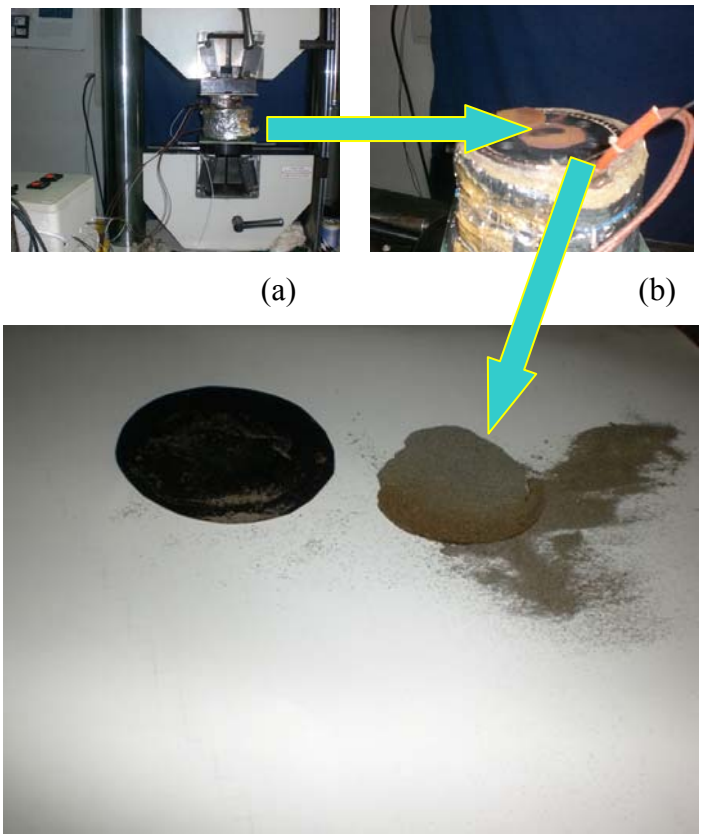
DARTEC kontrol ünitesinde yapılan ayarlamalar: Kontrol ünitesinin yükleme hızı endüstriyel bir üretim prosesine uygun olacak gerçeklikte olmalıdır. Yani, hızla istenilen basınç değerine çıkılmalıdır. Böylece kalıp ısısının pres tarafından absorbe edilmesi de önlenmektedir. Gerekli basınç değerleri göz önünde bulundurularak basma kuvveti değeri ayarlanmış (Resim 4.3) ve ünite üzerindeki start ramp tuşu ile yükleme programı başlatılmıştır.



(a) (b)

Resim 4.3. DARTEC kontrol ünitesi program monitörü a) yükleme hızı b) yük limiti

Deneysel çalışmalarda sıcaklık ve basınç değerleri uygun aralıklarla değiştirilmiştir. Resim 4.4 ve Resim 4.5'te bazı numuneler ve deneysel sıcaklık ve basınç değerleri verilmektedir.



(a) (b) (c)

Resim 4.4. 450°C presleme sıcaklığı, 100 MPa basınç altında altlığa tutunmamış bir numune a) Presleme b) Numunenin çıkarılması c) SS316 paslanmaz çelik küreler kendi aralarında bölgesel olarak tutunmuş ancak altlığa tutunmamıştır.



Resim 4.5. 490°C presleme sıcaklığı, 150 MPa basınç altında altlığa bölgesel tutunmuş bir numune

Sıcaklık ve basınç değerleri T=530°C, P=200 MPa olana kadar uygun aralıklarla yükseltilmiştir. Daha yüksek basınç ve sıcaklık değerleri kalıp mukavemet sınırlarına yaklaşmaktadır. Bu sebeple kalıbın gerek fiziki gerek ısıl yüklerle deforme olmasının önüne geçilmiştir. Tozların kendi aralarında tutunması (Resim 4.5), ancak altlığa tutunmamaları, altlıklara ait pürüzlülük değerlerinin yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Altlığın pürüzlülük değerlerinin ise, artırılması gerekliliği doğmuştur.

Yüzey pürüzlülüğü artırma işlemi öncelikle kaba zımparalarla gerçekleşmiş, ancak yine sonuç alınamamıştır. Bu durumda daha etkin bir yöntem kullanılarak daha yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılması gerekmektedir.

4.3. Kimyasal Yöntemle Yüzey Pürüzlülüğünün Artırılması

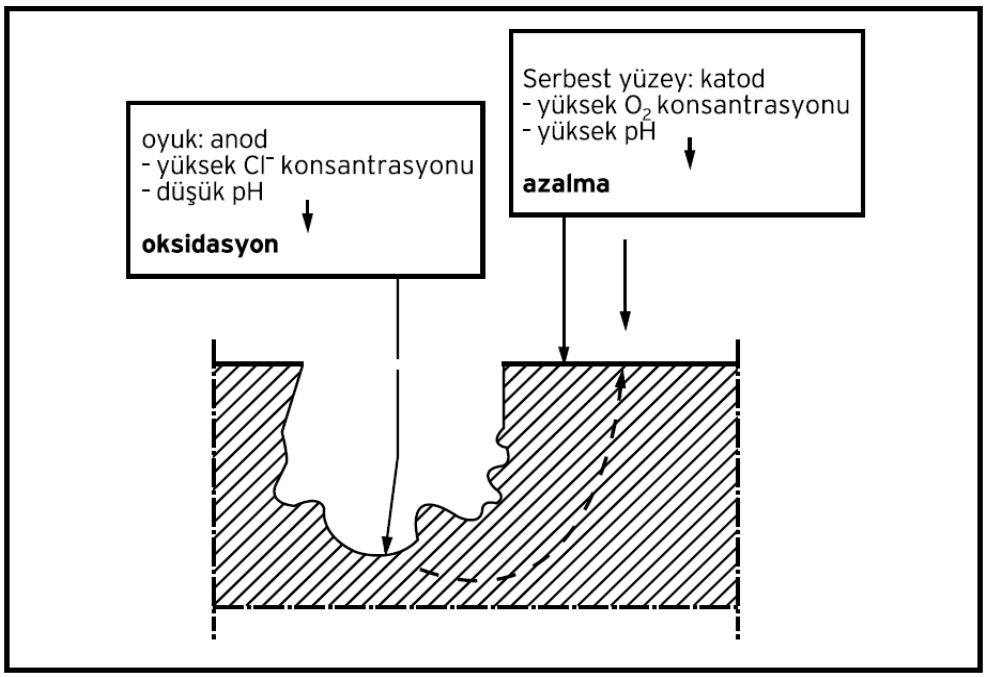
Çalışmada kullanılan 100 μm kalınlığındaki SS316L östenitik paslanmaz çelik levhanın kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 4.1. SS316L paslanmaz çelik altlıkların kimyasal kompozisyonu.

C	**Cr**	**Mo**	**Ni**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Fe**
0,021	16,82	2,44	11,5	0,406	1,50	0,0338	0,0478	66,19

Altlık pürüzlülük değerlerini artırmak için malzeme yüzeyinde kimyasal korozyon oluşturmak amacıyla, numuneler 30 gün süreyle %20NaCl, %18HCl, %20Fe_3Cl çözeltilerinde oda sıcaklığında bekletilmiştir. Literatürde bu sürenin 180 güne kadar uzayabildiği görülmektedir [30].

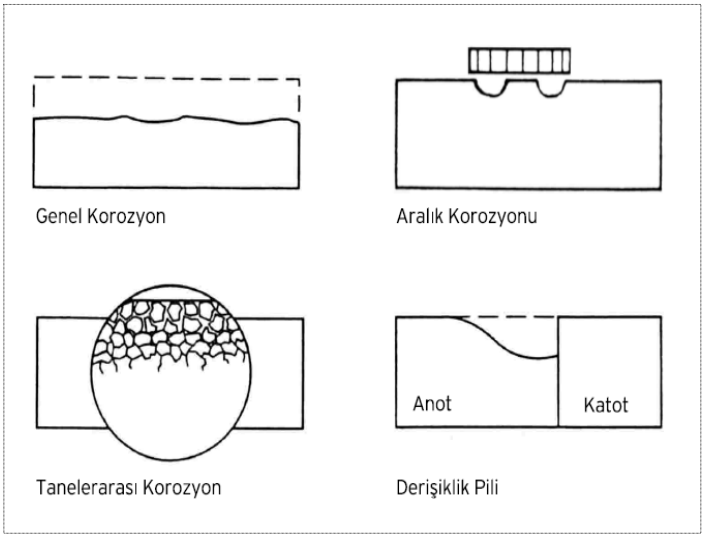
Elektrolitik sıvı içerisinde bekleyen metal içerisinde aktiflikleri farklı bölgeler ve mikro yapılar arasında reaksiyon başlar. Bu reaksiyon neticesinde kimyasal korozyon oluşur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Cl^- iyonunca zengin elektrolit ortamda korozyon oluşumu

Korozyon, metallerin kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonu sonucu malzeme özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesidir. Kimyasal korozyon metalin içinde bulunduğu ortamdaki diğer bir elementle doğrudan elektron alışverişinin söz konusu olduğu bir reaksiyondur (Şekil 4.2). Metal genellikle ortamdaki oksijene elektron

verir. Burada reaksiyon sonucu metal oksit oluşur. Oksidasyonu özellikle yüksek sıcaklıklarda belirgindir. Elektrokimyasal korozyonda konum olarak çoğunlukla farklı yerlerde oluşan iki kısmi reaksiyon vardır. Genel olarak bütün metallerde ve özellikle paslanmaz çeliklerde elektrokimyasal korozyon hasarlarına daha çok rastlanmaktadır.



Şekil 4.2. Elektrolitik ortamda oluşabilecek kimyasal korozyon türleri

4.4. Östenitik Paslanmaz Çelikler ve Korozyonu

Paslanmaz çelikler en basit tanımıyla en az %12 krom içeren demir krom alaşımlarıdır. Bugün krom, demir ve nikel alaşımı olarak bilinen östenitik paslanmaz çelikler 200 ve 300 serisi olarak piyasada bilinmektedir. Yüksek mukavemet ve korozyon direnci sayesinde uçak, kimya, petro-kimya, gıda, ilaç endüstrisinde, nükleer enerji santrallerinde ve paslanmaz eşya endüstrisinde kullanılırlar. 304 ve özellikle bunun düşük karbonlu modeli olan 304L tipi paslanmaz çelikler kaynaklanabilme özelliği sayesinde taşıma tanklarında ve kaynatma kazanlarında tercih edilir. 304 tipi çeliğin yeterli olmadığı koşullarda kimyasallara ve çukurcuklaşmaya karşı dirençli olan 316 ve 316L tipi paslanmaz çelikler kullanılır. 316 (%2–4 molibden içeren) tipi paslanmaz çelikler düşük karbonlu olarak 316L, dayanıklılığı arttırmak için nitrojen eklenmesi ile 316N, işlenebilirliği iyileştirmek amacıyla sülfür eklenmesi 316F ve yüksek karbon değerlerinde 316H olarak adlandırılır [31].

Östenitik paslanmaz çelikler asitlere dayanımı yüksek olması ile tercih edilmektedir. Bunların içerisinde SS316 ve duplex paslanmaz çelikler daha yüksek korozyon dayanımı istenildiğinde öne çıkmaktadır.

Taneler arası korozyon anodik kontrol altında belirlenir. Yani, potansiyel pasif bölgeye doğru arttırıldığında numune anodik olarak davranır, metal çözünmesi başlar ve oksit koruyucu tabaka oluşur. Fakat tane sınırları boyunca kromca az olan bölgeler ile taneler arasında potansiyel farkı meydana gelir. Taneler katodik, tane sınırları da anodik rol oynar [31].

Bu sebepten dolayı paslanmaz çelik altlıklar anot olarak polarize edilerek yüzeyde pürüzlülüğü artıracak korozyon hedeflenmiştir.

Oyuklanma (pitting) korozyonunun kimyasal mekanizmasında anotta gerçekleşen yarı hücre reaksiyonu;

Demir katyonları için (Fe/Fe^{+3} ve Fe^{+3}/Fe^{+2})

$$Fe \rightarrow Fe^{+3}+3e^{-} \quad (4.1)$$

$$Fe^{+3} + e^{-} \rightarrow Fe^{+2} \quad (4.2)$$

Katotta ise;

$$2H^{+}+2e^{-} \rightarrow H_2 \quad (4.3)$$

Çözelti içerisindeki klor iyonları ise kendi çevrelerinde düşük pH'lı bir bölge oluştururlar [32]. Bu bölge aşağıdaki katyon hidroliz reaksiyonu ile birlikte gelişir:

$$Fe^{+2} +2H_2O+2Cl^{-} \rightarrow Fe(OH)_2+2HCl \quad (4.4)$$

Klor anyonları çözelti içerisinde, pitting korozyonunda çok agresif rol oynarlar. Bu hidroliz reaksiyonu ile birlikte Fe^{+2} iyonları ile Cl^{-} iyonlarının birleşerek $FeCl_2$

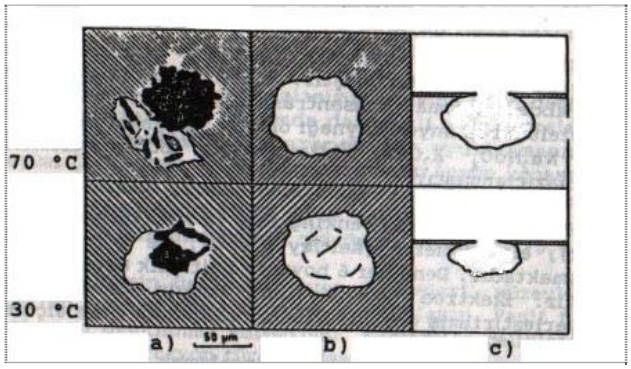
tuzunu oluştururlar. Bu; reaksiyon sonunda yüksek oranda çözünebilen bir tuzdur [32].

$$Fe^{+2} + 2Cl^{-} \rightarrow FeCl_2\,(sıvı) \qquad (4.5)$$

$FeCl_2$ (sıvı) çökelmesi için çukurcuklaşma (pitting) gereklidir. Bu Fe^{+2} çözeltide kritik konsantrasyonda bulunması durumunda gerçekleşir.

$$FeCl_2\,(sıvı) \rightarrow FeCl_2\,(katı) \qquad (4.6)$$

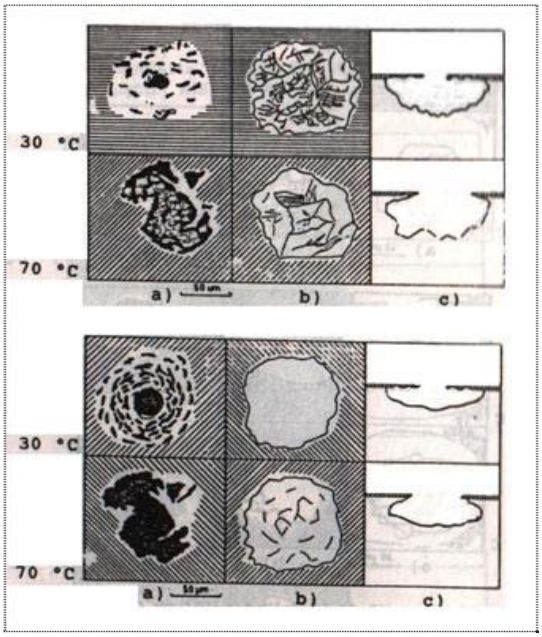
Yüzey üzerinde demir, oksit ve hidrat(Fe, O ve OH) ince bir film oluşturduğundan, $FeCl_2$ (katı - tuz) bu film katmanı tarafından bloke olur [32].



Şekil 4.3. Klorür çözeltisinde 30°C ve 70°C de 304 paslanmaz çelik malzemede oluşan oyuk morfolojileri [33].

Görülüğü gibi, klorür çözeltisinde yapılan deneyde; pasif film tabakası östenitik paslanmaz çelik levhada oluşan oyuklanmanın üzerini kaplamış pasif film %10 luk HNO_3 (nitrik asit) çözeltisi kullanılarak ultrasonik olarak örtünün üstü açılmış oyuk içi morfolojisi görüntülenmiştir. Burada incelenen morfoloji, düzgün ve yarı küresel bir yüzeyin bulunmadığı gözlenmiştir [33].

Klorür çözeltisine 0,05M sülfat eklendiğinde oyuk iç yüzeyi daha düzgün ve parlaktır. Deney sülfatlı bir çözelti içerisinde tekrarlanmış ve oyuk morfolojisinde belirgin bir fark görülmemiştir [33].



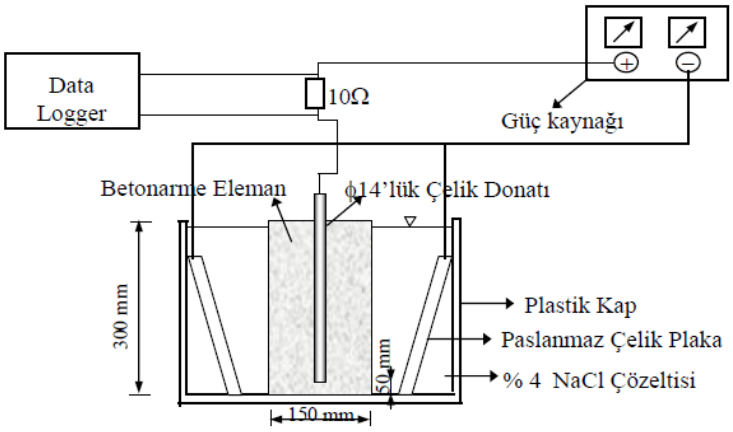
Şekil 4.4. Klorür+sülfat ve yalnızca sülfat çözeltisinde 30°C ve 70°C de 304 paslanmaz çelik malzemede oluşan oyuk morfolojileri [33].

Her iki deneyde 70°C'de oyuklanma potansiyeli aynı görülmüştür. Aynı şekilde oyuk morfolojisinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir [33].

4.5. Hızlandırılmış Korozyon Deney Düzeneği

Altlıklar, anot olarak polarize edildiğinde, elektrolitik bir sıvı içerisinde korozyon hızının dakikalar mertebesine indiği bilinmektedir. İnşaat çeliklerinin korozyon dayanımları için yapılan çalışmalarda; Şekil 4.5'te görülen düzenek kurulmuştur. Sisteme 30 volt DC verilerek pozitif kutuptan donatı çubuğu (çalışan elektrot) ve negatif kutbuna plakalar (karşıt elektrot) olacak şekilde bağlanmışlardır [30].

Ayrıca; hızlandırılmış deney düzeneğinde her bir hazneden korozyon akımı değerleri data logger tarafından toplanmış korozyon akım grafikleri çizilmiştir [30].



Şekil 4.5.İnşaat çeliklerinin korozyon dayanımları için yapılan çalışmalarda kullanılmış olan hızlandırılmış korozyon deney düzeneği şematik gösterimi [30].

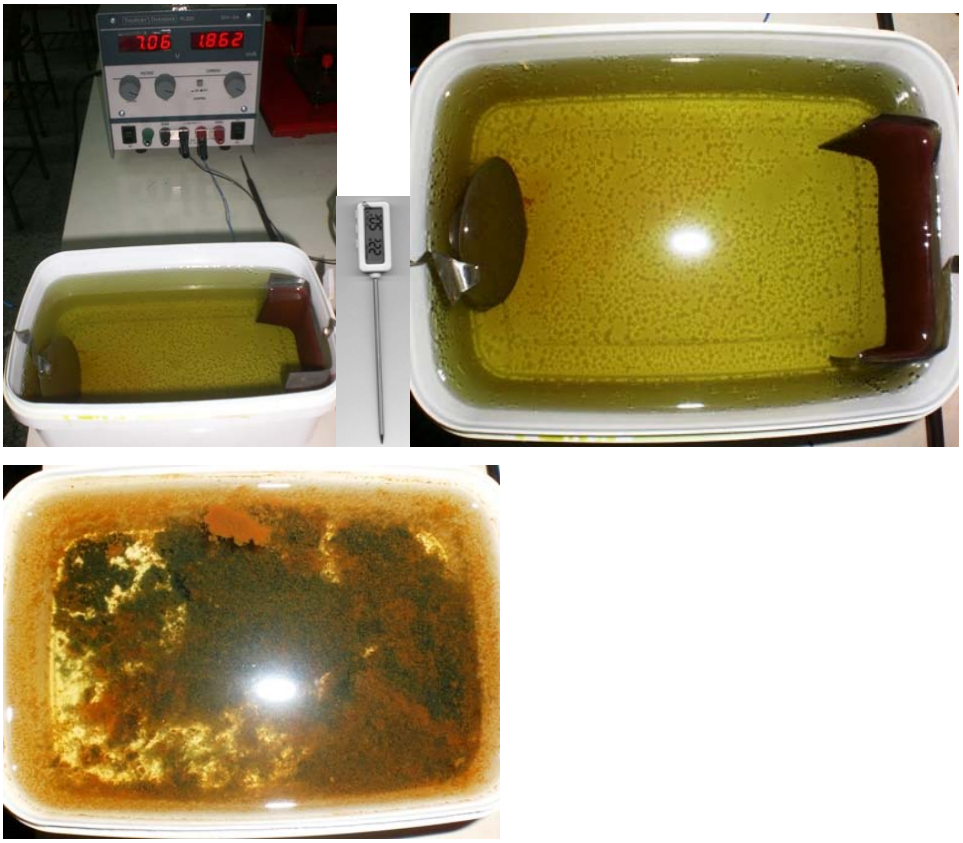
4.6. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Korozyonu İçin Hazırlanan Hızlandırılmış Korozyon Deney Düzeneği

Bu çalışmada kullanılan, östenitik paslanmaz çeliklerden SS316L levha (100 µm kalınlığında) anot olarak kullanılmıştır. Katot olarak; yine aynı levhadan oluşturulmuş SS316L levha kullanılmıştır. Elektrolitik sıvı içerisinde elektrot bağlantısı olmayacak şekilde katot bağlantı ucu çıkarılmıştır (Resim 4.6). Anot levhasının tek tarafı (pitting korozyonunun istendiği yüzey) 80 mesh zımpara ile pürüzlendirilmiştir. Anodun bu pürüzlendirilmiş yüzeyi katot tarafına doğru konumlandırılmıştır. Elektroliz işlemi 1lt. hacminde plastik bir kapta gerçekleşmiştir.



Resim 4.6. Anot altlıkların hazırlanması

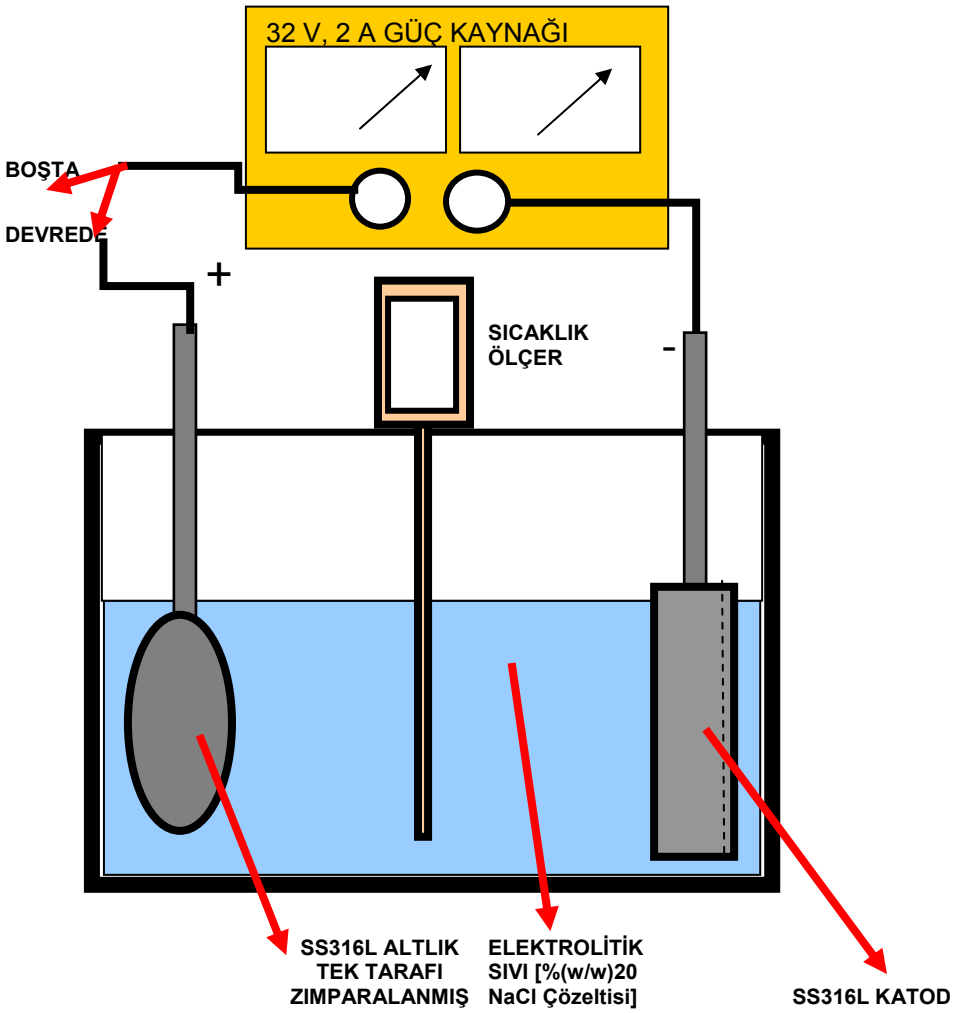
Pürüzlülük deneyleri önce farklı çözeltilerde oda sıcaklığında yapılmış ancak belirgin bir pürüzlülük artışı gözlenmemiştir. Gözlemlenen NaCl içerisinde sıcaklık artışı olduğunda korozyonun hızla arttığıdır. Bu gözlem, çözelti kabı içerisindeki $FeCl_2$ flokları oluşumunun hızlanması ve belirginleşmesidir (Resim 4.7).



Resim 4.7. Farklı sıcaklıklardaki denemeler ve NaCl çözeltisinde $FeCl_2$ flokları.

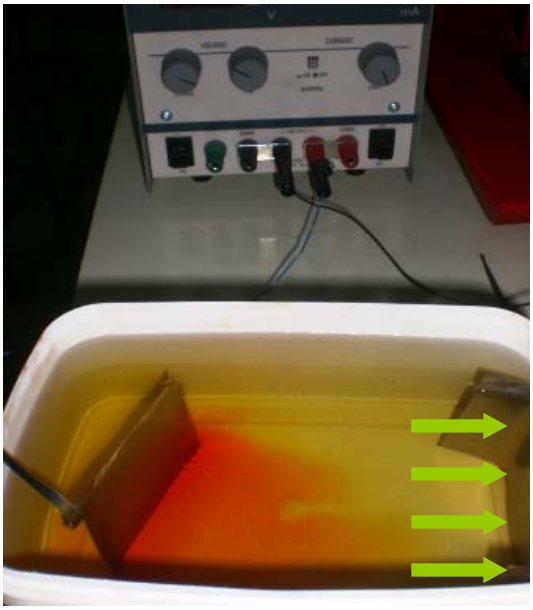
Çözelti kabının dışında hazırlanan, 70°C üzerinde bir sıcaklığa sahip $\%_{(w/w)}$20 NaCl çözeltisi (kütlece %20 NaCl çözeltisi: 1000g NaCl çözeltisinde 200 g katı NaCl bulunduğunu ifade etmektedir) istenilen T_0 başlangıç sıcaklığı olan 70°C geldiğinde, Şekil 4.6.'daki gibi polarize edilmiş anot korozyonu, deney süresi başlatılarak akım verilip, çözeltide reaksiyonu başlatılmıştır. (Resim 4.8).

Anot yüzey alanı	:23,8 cm^2
Boşta gerilim değeri	:30 Volt
Ayarlanan akım değeri	:2000 mA



Şekil 4.6. Altlıklar için hazırlanan hızlandırılmış deney düzeneği.

Deney düzeneği için kullanılan güç kaynağı, 32V-2A DC güç kaynağıdır. Elektriksel gerilim %1, akım ise %0,1 hassasiyetle ayarlanabilmektedir. Sıcaklık ölçümü için dijital çözelti sıcaklık ölçüm probu kullanılmıştır.



Resim 4.8. Reaksiyon başlarında anottan çıkan Fe^{+2} katyonlarının katoda doğru ilerlemesi.

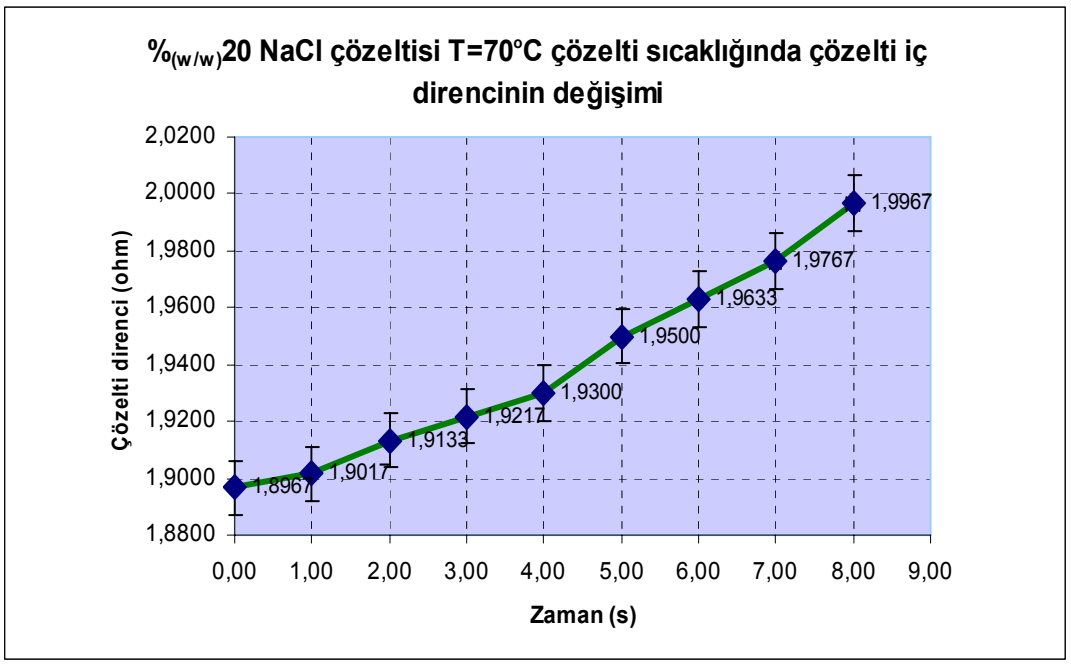
İlk yüksek pürüzlülük değerine sahip yüzeyler elde edilip, olumlu sonuçlar alınmasından sonra şartları birbiriyle aynı sekiz adet altlık hazırlanmıştır. Bu altlıkların deney düzeneğimizdeki değerleri şöyledir.

Levha Kalınlığı	:100 µm
Çözelti konsantrasyonu	: $\%_{(w/w)}$20 NaCl
T_0 başlangıç sıcaklığı	:70°C
Anot yüzey alanı	:23,8 cm^2
Boşta gerilim değeri	:30 Volt
Yükte gerilim değeri	:3,79 – 3,99 Volt
Ayarlanan sabit akım değeri	:2000 mA
Deney süresi	:8 dakika

(Başlangıçta ve sonraki her 60 saniyede yükteki gerilim değeri not edilmiştir.)

Bu şartlara uygun olarak başlayan elektro-kimyasal reaksiyonda; çözelti içerisindeki klor iyonları, anottan gelen demir katyonları ile birleşerek, belirli bir süre içerisinde oyuklanma korozyonunu gerçekleşmektedir. Reaksiyon başında ve takibenden her

dakika başında, yük altındaki gerilim değeri okunmuştur. Zaman içerisinde gerilimde artış gözlemlenmiştir. Gerilimdeki artışın nedeni, çözeltinin elektriksel iletkenliğindeki azalmadır. Çözelti iletkenliğinin azalması; serbest Cl^- iyonlarının azalmasını göstermektedir. Bu durum, reaksiyonunun gerçekleşmekte olduğunun göstergesidir. İletkenliğin azalmasıyla meydana gelen çözelti iç direncinin artışı gerilimde yükselme olarak kendini göstermektedir. Bu artışın 8 dakika içerisindeki değişimi Şekil 4.7' de görülmektedir.



Şekil 4.7. Çözelti direncinde görülen artışın zamana göre değişimi.

Reaksiyonda sıcaklığın artışı reaksiyon hızını artırdığından, reaksiyon süresi kısalmıştır. Deneyin oda sıcaklığına yapılması durumunda reaksiyon hızı düşmüş, pitting korozyonu süresi artmıştır.

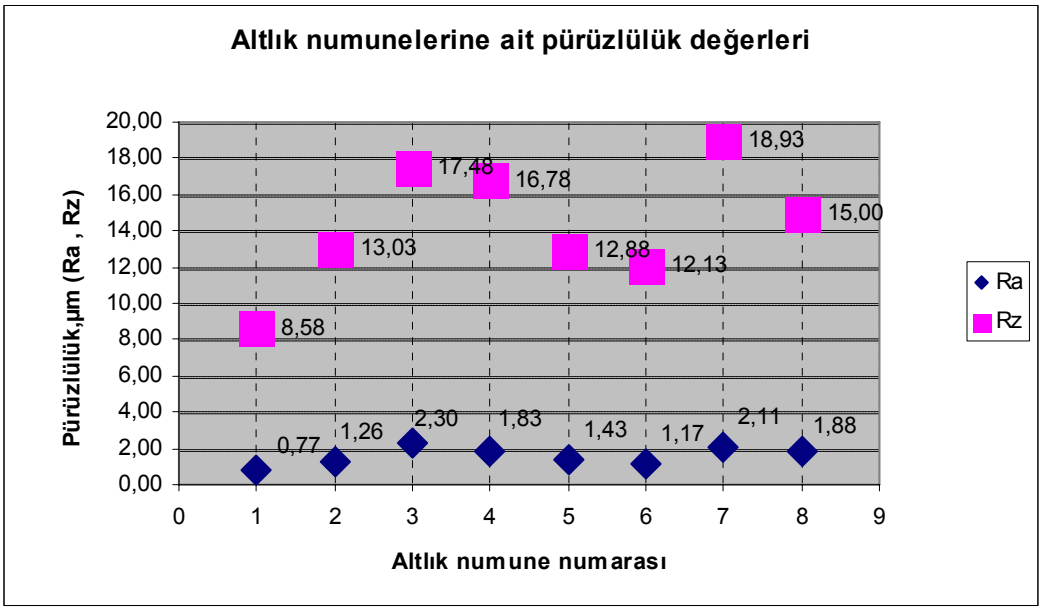
4.7. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi

Elde edilen sekiz adet altlığın pürüzlülük değerleri Taylor Hubson SURTRONIC 3+ pürüzlülük ölçüm cihazı (Resim 4.9) ile ölçülmüştür (EK–3).



Resim 4.9. Taylor Hubson SURTRONIC 3+ ile altlıkların pürüzlülüklerinin ölçülmesi.

Ölçümler sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ve profildeki tepe-çukur yükseklikleri (Rz) pürüzlülük değerleri Şekil 4.8'deki grafikte verilmiştir. Ra ortalama değeri 1,7 µm civarında iken Rz değerleri 8,58–18,93 µm arasında değişmektedir. Ortalama Rz değeri 14,4 µm civarındadır. Bu fark uniform bir yüzey dağılımı olmadığını göstermektedir. Uniform kabul edilebilir bir yüzeyin Rz/Ra=4 oranına sahip olması gerekir [34, 35].



Şekil 4.8. Altlık numunelerine ait Ra ve Rz değerleri.

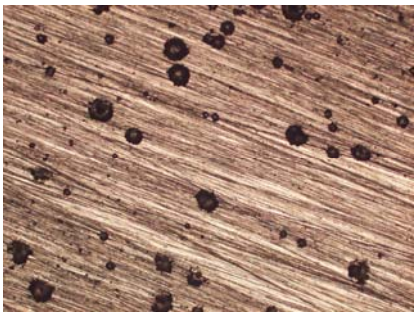
4.8. SS316L Paslanmaz Çelik Anodun Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi

Pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinden sonra, sayısal ortama görüntü aktarabilen OLYMPUS GX71 optik mikroskopta (Resim 4.10) numunelerin yüzey morfolojileri incelenmiştir (Resim 4.11).

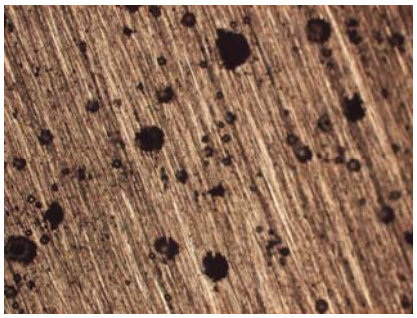


Resim 4.10. Olympus GX71 optik mikroskop.

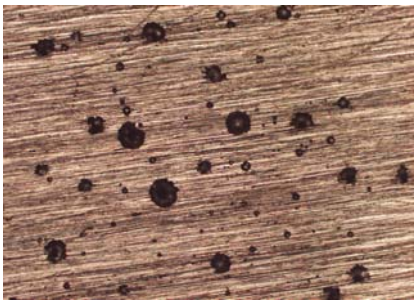
Numunelere ait mikroskoptan alınan yüzey görüntüleri Resim 4.11'dedir.



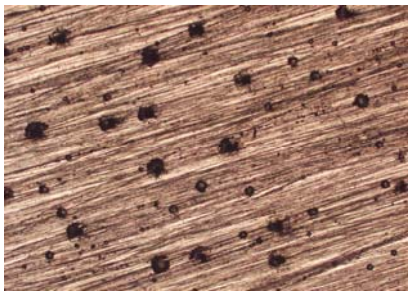
R_a=0,77 µm, R_z=8,58 µm
Altlık numarası: 1



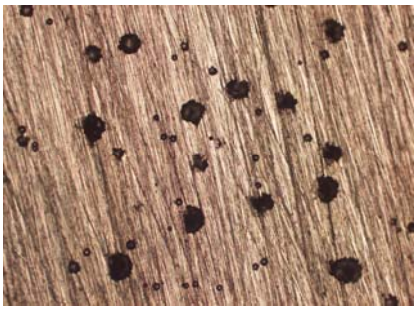
R_a=1,26 µm, R_z=13,03 µm
Altlık numarası: 2



R_a=2,30 µm, R_z=17,48 µm
Altlık numarası: 3



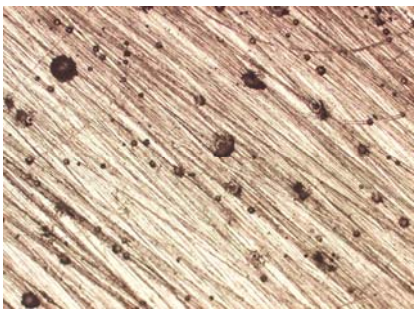
R_a=1,83 µm, R_z=16,78 µm
Altlık numarası: 4



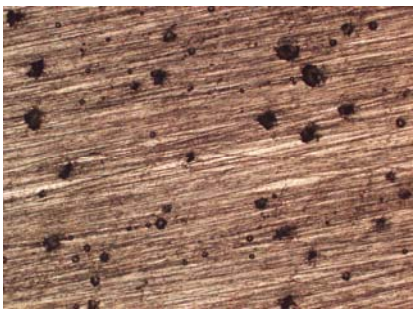
R_a=1,43 µm, R_z=12,88 µm
Altlık numarası: 5



R_a=1,17 µm, R_z=12,13 µm
Altlık numarası: 6



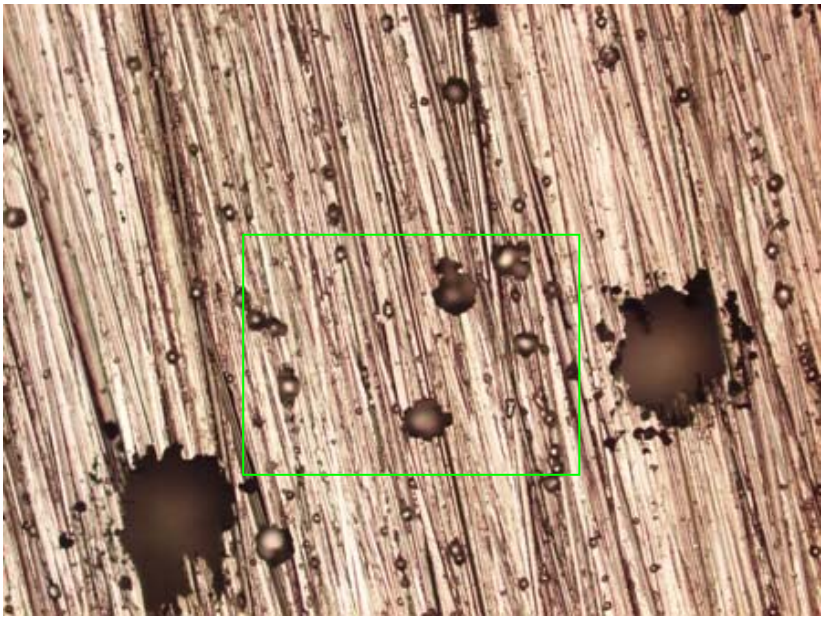
R_a=2,11 µm, R_z=18,93 µm
Altlık numarası: 7



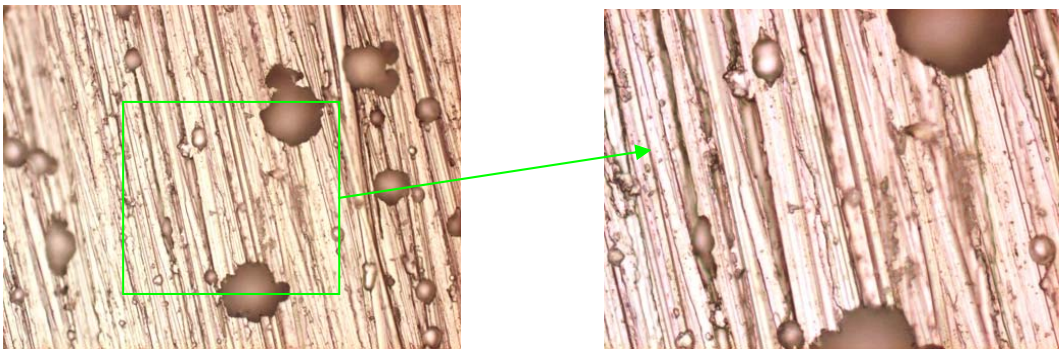
R_a=1,88 µm, R_z=15,00 µm
Altlık numarası: 8

Resim 4.11. Altlık numunelerine ait yüzey görüntüleri (50x)

Görüntüler daha yakından incelenmiştir. 1000x büyütmeye kadar optik mikroskopta çukurcuklar gözlenebilmektedir. Resim 4.12 ve Resim 4.13' te görülen görüntülerde boyut olarak farklı delik çapları görülmektedir.



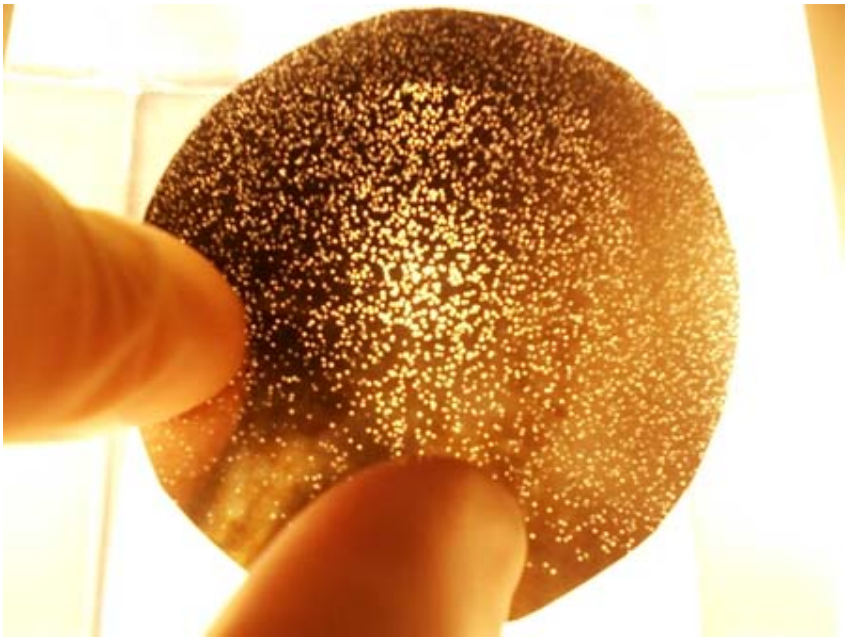
Resim 4.12. Numuneye ait 200x büyütülmüş yüzey görüntüsü



a) 500x b) 1000x

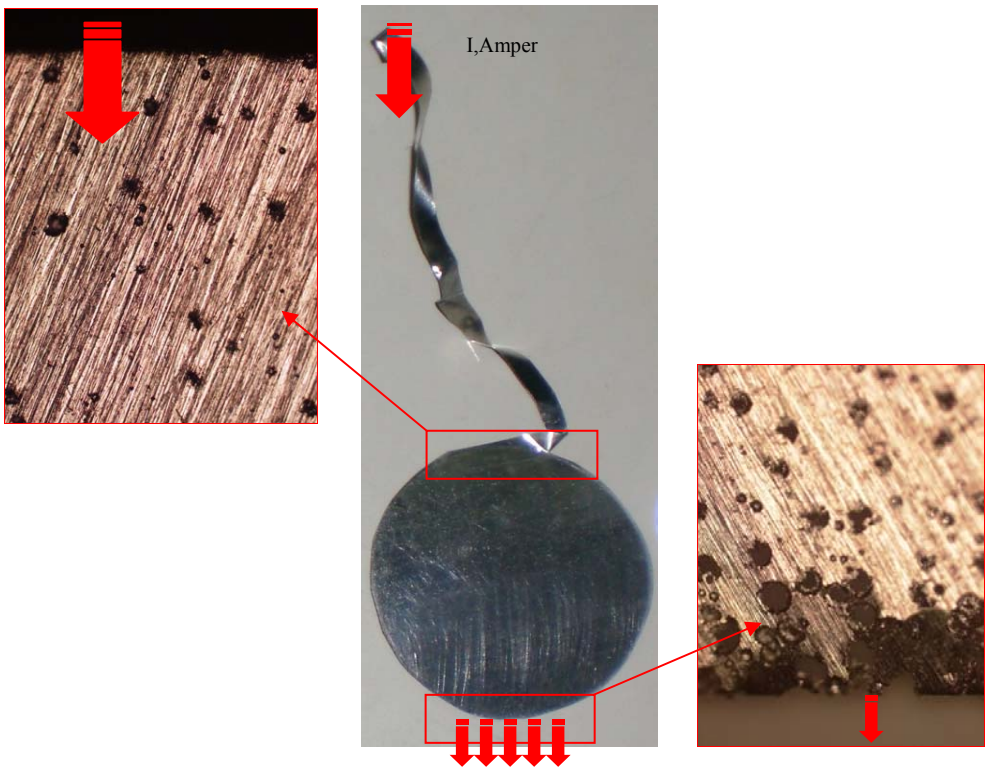
Resim 4.13. Numuneye ait kademeli büyütülmüş yüzey görüntüleri. a) 500x b) 1000x

Numune üzerinde meydana gelen pitting korozyonu neticesinde korozyona uğrayan, 100 µm kalınlığındaki altlık yüzeyine yakından bakıldığında seyrek denilebilecek aralıklarla çukurcuk oluşturmuş ve devamında delinmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleşen bu mikro boyuttaki delikler kuvvetli ışık altında görülebilmektedir (Resim 4.14).



Resim 4.14. Pitting korozyonu sonrası altlıkta delinme.

Aynı numune üzerinde bakıldığında, farklı büyütme oranlarında pitting (çukurcuklanma) korozyonunun gelişim aşamaları ve çukurcuk çapının büyümesi görülmektedir. Buradan, sürenin artırılması durumunda çukurcukların çaplarının artacağı ve anot olarak polarize edilen altlıkların korozyon etkisiyle yok olacakları anlaşılmaktadır. Zamanın iyi kontrol edilmesiyle maksimum çukurcuk çapı kontrol edilebilir. Ancak, akımın sürekliliği sırasında yeni başlayan pitting korozyonları da gelişecektir. Bu durumda akım değerinin pitting gelişimi ile ilişkili olduğu görülmektedir.



Resim 4.15. Anot olarak polarize edilen altlığın güç kaynağı bağlantı tarafı ve anot uç kısmı pitting korozyonu yoğunlukları.

Altlık numunesi üzerindeki korozyon, alt ve üst bölgede farklılık göstermektedir. Mikroskopta anot altlığın, akım giriş ve çıkış tarafları incelendiğinde; anot akım çıkış tarafında belirgin bir korozyon olduğu görülmektedir. Burada; anoda akım girişinin tek noktadan olması durumunda, korozyonun yoğunluğunun o noktada azaldığı görüşü ağırlık kazanmaktadır (Resim 4.15).

Ayrıca, çözelti üst yüzeyinde O_2 konsantrasyonunun tabandakinden fazla olmasının, çözelti içerisindeki anodun alt ve üst bölgelerindeki kimyasal tepkimeyi bölgesel olarak etkilemiş olacağı düşünülmüştür.

4.9. Kimyasal Yöntemle Pürüzlendirilmiş Altlıklarla Yapılan Preslenme ve Sinterleme Çalışmaları

T/M numunelerini elde etmek için yapılan ön deneylerde tespit edilen T=500°C ve P=200 MPa değerinde presleme yapmadan önce, 75µm elek üstü tozları kullanılması

düşünülmüştür. Küresel yapıya sahip tozlar, düzlemsel yapıdaki altlığa noktasal bir temas sağlarlar. Tozların çapı küçüldükçe noktasal temas artmakta, büyük çaplarda ise aynı yüzey alanındaki noktasal temas düşmektedir. Bu sebeple tane büyüklüğü altlığa tutunma kabiliyetini etkilemektedir. Altlığa tutundurma çalışması için kullanılan daha küçük tane boyutlu (75µm elek altı) tozların altlığa ve birbirlerine tutunma kabiliyeti elek üstü tozlara göre daha yüksektir. Ancak açık gözenekliliğin oluşabilmesi için, 75–150 µm tozların kullanılması uygun bulunmuştur [8].

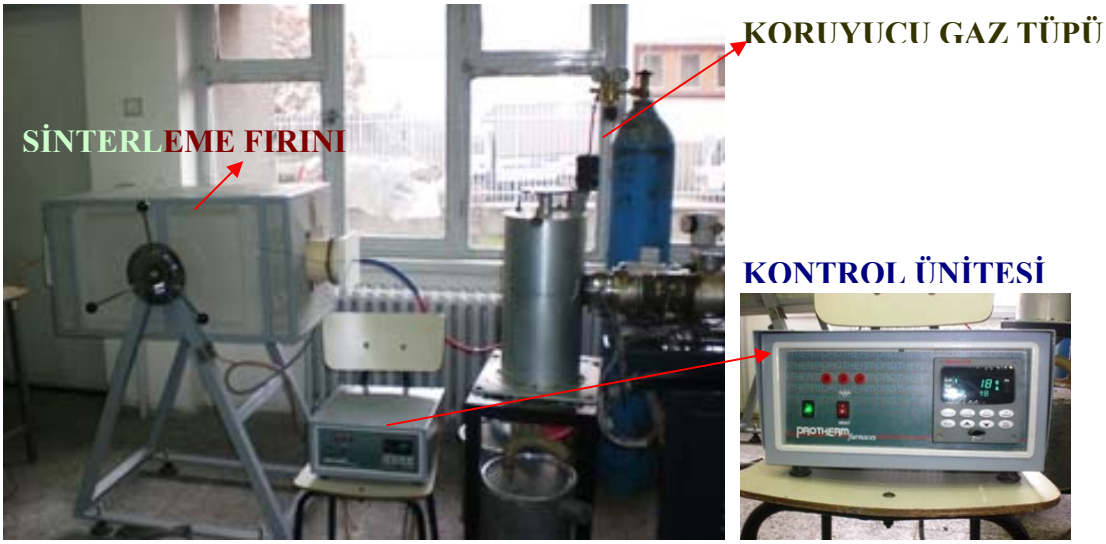
Bu şartlarda; pürüzlülük değerleri R_a=0,77 µm, R_z=8,58 µm olarak ölçülmüş olan 1 numaralı altlık kullanılarak, T=500°C ve P=150 MPa şartlarında preslenmiş, ancak Resim 4.16'da görüldüğü gibi altlığa tutunma gerçekleşmemiştir.



Resim 4.16. Altlığa tutunmamış olan 1 numaralı numune.

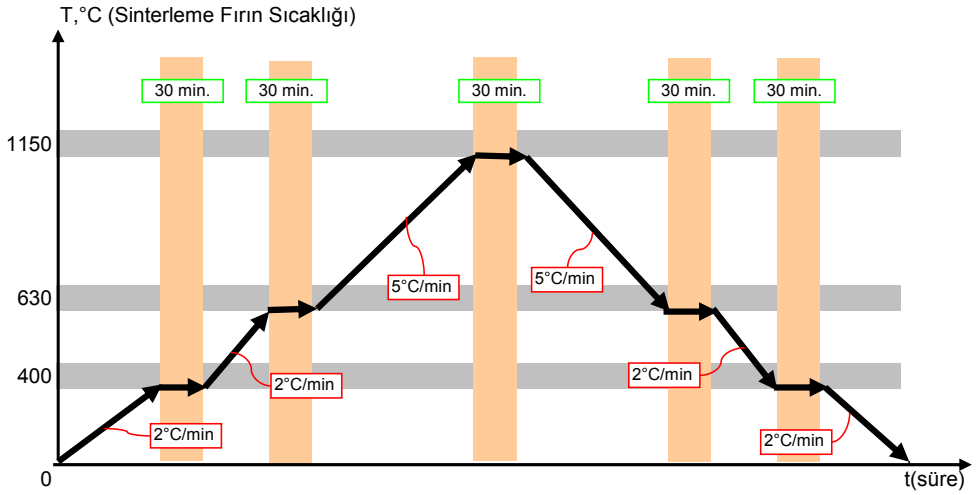
Tozlar geri kalan pürüzlendirilmiş altlıklara T=500°C ve P=200 MPa şartlarında preslenmiş, hepsinde hem tozlar hem de altlık arasında tutunma sağlanmıştır. Tutunan bu numuneler sinterleme fırınına gönderilmek üzere uygun şekilde muhafaza edilmişlerdir.

Sinterleme işlemi 1150°C sıcaklıkta 30 dakika beklenmek suretiyle korumalı atmosferde yapılmıştır. Koruyucu gaz olarak %95 Argon %5 Hidrojen kullanılmıştır. Sinterleme işlemi; PROTHERM-Furnaces PTF 12/38/250 marka/model elektrikli sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.17).



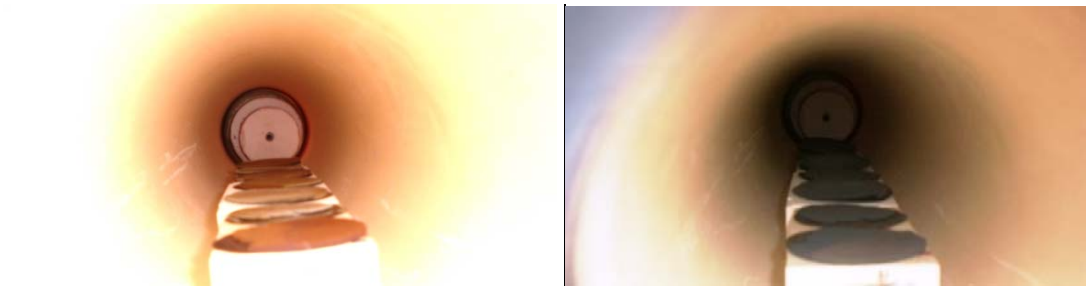
Resim 4.17. Sinterleme fırını ve ekipmanları.

Uygulanan sinterleme sıcaklık profili Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Sinterleme işlemi sırasında sıcaklığın kademeli olarak yükseltilmesi ve düşürülmesi.

Görüldüğü gibi bu şartlarda sinterlenen malzeme üzerinde görünür renk değişimleri meydana gelmiştir. Numunede sinterleme sıcaklığında oksijenle reaksiyon gerçekleşmiştir. Koruyucu gaz atmosferinin yetersiz kaldığı düşünülebilir.

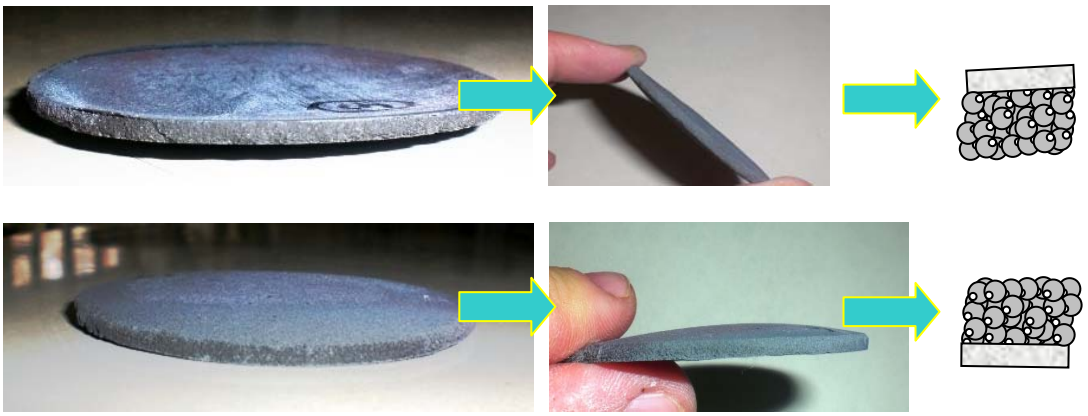


(a) (b)

Resim 4.18. Sinterleme fırınına giren (a) ve çıkan (b) numunelerdeki renk değişimi.

Resim 4.18'den görüldüğü gibi bu şartlarda sinterlenen malzeme üzerinde görünür renk değişimleri meydana gelmiştir. Buradan mevcut laboratuar şartlarının yeterince sağlanamadığı anlaşılmıştır.

Bunun yanında, disk şeklinde giren malzemede şekil değişiklikleri meydana gelmiştir. Malzeme üzerinde, orta kısmından kenara doğru gidildikçe azalan bir bombe oluşmuştur. Altlığın tutunduğu yüzeyde meydana gelen bombenin derinliği 3mm civarındadır (Resim 4.19). Bombenin meydana gelmesinin anizotropik malzeme bileşiminden meydana gelebileceği tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak, SS316L levha (100 µm kalınlığında) ile, SS316L paslanmaz çelik tozlardan oluşan (2 mm kalınlığında ve daha az yoğun) katmanlar ısı altında farklı ısıl davranışlar gösterebilirler. Altlık ile tozlar arasında presleme ile oluşan mekanik bağ, ısı altındaki malzemenin davranışını sınırlandırmıştır.



Resim 4.19. Sinterleme fırınından çıkan numunelerin geometrilerindeki değişim.

Laboratuar şartlarında; 1150°C sıcaklık altında, koruyucu atmosferin yeterli olmadığı düşünülmektedir. Malzemedeki siyaha benzer renk değişimi yüksek sıcaklıkta hava ile temastan kaynaklanan oksitlenmeyi göstermektedir. Koruyucu atmosfer olarak kullanılan %95 Argon %5 Hidrojen karışımı 1150°C sıcaklıkta yetersiz kalmıştır. Bu durum koruyucu gaz karışım oranından veya fırına giren koruyucu gaz karışımının debisinden olabileceği gibi, tüp fırının girişinde ve çıkışında dışarıdan havanın girişi tamamen engellenememiş de olabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, özel geometriye sahip kalıp ve zımbaların tasarım ve imalatı yapılarak, yakıt hücrelerinin (fuel cell) ısı değiştiricilerinde kullanılmak üzere SS316L küresel paslanmaz çelik tozlarından gözenekli yüzeye sahip parçalar üretilmiştir. Bu tozların altlığa tutunması için gerekli minimum basınç ve sıcaklık değerleri ve koşulları araştırılmıştır. Bu parametreler ışığında toz boyutu, basınç ve sıcaklık parametrelerinin gözenekli yüzeyin altlığa tutunmasına etkisi ve altlıklara ait yüzey morfolojileri incelenmiştir.

Çalışmada; farklı geometrilere sahip zımbalarla sıcaklık, basınç ve toz boyutu parametrelerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ancak; 500°C sıcaklık ve 50 MPa basınç altında tozlar birbiri arasında tutunurken altlığa yapışma sağlanamamıştır. Basınç değeri 200 MPa değerine kadar testler yapılmıştır. Bu nedenle gözeneklilikten daha önce altlık pürüzlülüğünün artırılması konusuna yoğunlaşılmıştır. Böylece, farklı yüzey geometrileri (farklı zımba kullanımı) yerine sadece düz yüzeyli numuneler elde edilmiştir (tek tip zımba kullanılmıştır).

Gerek kalıptaki olumsuz deformasyonu önlemek ve gerekse uygulanabilirlik bakımından maksimum değerler olarak, 200 MPa basınç ve 530°C sıcaklık kullanılmış ancak, numunelerde sınırlı ve bölgesel olarak altlığa tutunma gözlenmiştir.

Altlık malzemesinin yüzeyine herhangi bir işlem yapılmaksızın, tozlarla altlık arasında tutunma sağlanamamıştır. Bunun üzerine 80, 150 ve 240 mesh'lik zımparalar ile altlık yüzeyi pürüzlendirilmiş ancak yeterli bir tutunma sağlanamamıştır.

Altlığın tutunmasını güçlendirecek kimyasal bir pürüzlülük artırma çalışması yapılarak, mekanik tutunma için minimum pürüzlülük değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan kimyasal çözeltilerin farklı derişimlerinde pürüzlülüğü artıracak olan korozyon gözlemlenmiştir. NaCl, HCl ve Fe_3Cl çözeltileri kullanılarak

pürüzlendirme çalışmaları yapılmış, en büyük oyuklanma (pürüzlülük) NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla [3,30,31] paralellik göstermektedir. Ortalama pürüzlülük değeri Ra=1,7 μm, ortalama Rz değeri ise 14,4 μm civarındadır. Rz/Ra oranının yaklaşık 8 belirlenmesi, pürüzlülüğün uniform dağılmadığını göstermektedir.

SS316L paslanmaz çelik levhaların tutunma yüzeylerindeki pürüzlülük değeri sıcaklığın artışı ile birlikte her üç çözelti içerisinde artmıştır.

Pürüzlülük değerini artırmak için kullanılan deney düzeneğinde 8 dakika sonunda 84 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 100μm kalınlığındaki altlıkların yüzey pürüzlüklerinin, tutunmayı sağlayacak değere çıktığı gözlenmiştir. Altlıklarda meydana gelen pitting korozyonu deliklerinin akım, zaman, konsantrasyon ve levha kalınlığı parametreleri ile farklılaştırılabileceği görülmektedir.

Altlık numunesi üzerindeki korozyon, alt ve üst bölgede farklılık göstermektedir. Mikroskopta anot altlığın, akım giriş ve çıkış tarafları incelendiğinde, anot akım çıkış tarafında belirgin bir korozyon olduğu görülmektedir. Burada; anoda akım girişinin tek noktadan olması durumunda, korozyonun yoğunluğunun o noktada azaldığı görüşüne dayandırılmıştır (Resim 4.15).

Ayrıca, çözelti üst yüzeyindeki O_2 konsantrasyonunun tabandakinden fazla olmasının, anodun alt ve üst bölgelerindeki kimyasal tepkimeyi bölgesel olarak etkilemiş olacağı sonucuna varılmıştır.

Kimyasal yöntemle pürüzlendirme çalışması yapılırken, her taraftan eşit şekilde pürüzlenmiş, daha uniform pürüzlü yüzeyin şartları araştırılmalıdır.

Çözelti türü, çözelti konsantrasyonu, akım, gerilim, süre parametreleri değiştirilerek pürüzlülüğün kontrol altına alınabileceği düşünülmektedir. Bu parametre değişiklikleri ile farklı çalışmalar yapılabileceği görülmüştür.

1150°C sıcaklıkta 30 dakika beklenmek suretiyle korumalı atmosferde yapılan sinterleme işleminde, koruyucu gaz olarak %95 Argon %5 hidrojen kullanılmıştır. Ancak; sinterlenen malzeme üzerinde görünür renk değişimleri meydana gelmiştir.

Renk değişimlerinin yanında, disk şeklinde giren malzemede şekil değişiklikleri meydana gelmiş, numunelerde bombe oluşmuştur. Malzeme üzerinde; orta kısmından kenara doğru gidildikçe azalan bir bombe oluşmuştur. Altlığın tutunduğu yüzeyde meydana gelen bombelerin derinliği 3 mm civarındadır.

Yapılan çalışmalarda, özellikle sinterleme işleminde, şartlarının yeterince sağlanamadığı anlaşılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalardan sağlıklı sonuçların alınabilmesi için laboratuar şartlarının (sinterleme işlemi) iyileştirilmesi önerilmektedir.

Çalışma sırasında düz yüzeylere sahip numuneler elde edilmiştir. Altlığa tutunmanın başarı ile sağlanmasının ardından, yüzey alanını artırmak amacıyla mikro kanalların bulunduğu numuneler elde edilmeli ve bunların gözeneklilikleri araştırılmalıdır.

Kimyasal yöntemden farklı olarak elektroerezyon yöntemi, daha kontrol edilebilir yüzey pürüzlendirme imkanı sunabilir. Bu sebeple, yüzey pürüzlendirmede elektroerezyonla pürüzlülük artırma yönteminin kullanılması önerilmektedir.

Yapılacak çalışmalarda, daha farklı koruyucu gaz atmosferleri yalnızca sinterleme aşamasında değil, presleme aşamasında da kullanılabilir. Hidrojen gazı altında presleme ve bunun sonuçları üzerine çalışmalar yapılabilir. Ayrıca belirli bir sıcaklık altında aktifleştirme işlemi uygulanarak, parametrelerin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Türk Toz Metalurjisi Derneği "Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri" http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd_tr.htm (2009).

2. Liter S.G., Kaviany M., "Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment", ***International Journal of Heat and Mass Transfer,*** 44: 4287–4311 (2001).

3. Qiao, Y.X., Zheng, Y.G., Okafor, P.C., Ke, W., "Electrochemical behaviour of high nitrogen bearing stainless steelin acidic cloride solution: Effect of oxygen, acid concentration and surface roughness", ***Electrochimica Acta.,*** 54: 2298–2304 (2009).

4. Sato, S., Enoeda, M., Kuroda, T., Oharo, Y., Mohri, K., Cardella, A., "Characteristic evaluation of HIP bonded SS/DSCu joints for surface roughness", ***Fusion Engineering and Design,*** 58-59: 749–754 (2001).

5. Torikai, Y., Penzhorn, R.D., Matsuyama, M., Watanabe, K., "Tritium uptake by SS316 and its decontamination", ***Journal of Nuclear Materials,*** 329-333: 1624–1628 (2004).

6. Wang, Y., Northwood, D.O., "An investigtion into polypyrrole-coated 316L stainless steel as a bipolar plate material for PEM fuel cells", ***Journal of Power Sources.,*** 163: 500–508 (2006).

7. Neikov O., Naboychenko S., Mourachova I., Gopienko V.,Frishberg I., "Handbook Nonferrous Metal Powders: Technologies and Applications", ***Elsevier*** , Amsterdam, 212-213 (2009).

8. Cora Ö. N., Usta Y., Koç Y., "Micro-manufacturing of micro-scale porous surface structures for enhanced heat transfer applications: an experimental process optimization study" ***Journal Of Micromechanics And Microengineering***, 1-19 (2009) .

9. Koç, M, Usta, Y., Karakoç, A., "Investigations on thermo-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features", ***Journal of Power Sources.,*** 179: 592–602 (2008).

10. Mahabunphachai, S., Koç, M., Ni, J., "Development of a novel process for manufacturing of fuel cell bipolar plates: internal pressure assisted embossing of microchannels with in-die mechanical joining", ***2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering.,*** MSEC2006-21034, Ypsilanti, 1-5 (2006).

11. Gu, D., Shen, Y., "Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features", ***Applied Surface Science,*** 255: 1880–1887 (2008).

12. Molin, S., Gazda, M., Kusz, B., Jasinski, P., "Evaluation of 316 L porous stainless steel for SOFC support", ***Journal of the European Ceramic Society,*** 29: 757–762 (2009).

13. Wang, F.Y., Jung, G.B., Su, A., Chan, S.H., Hao, X., Chiang, Y.C., Porous Ag–Ce0.8Sm0.2O1.9 cermets as anode materials for intermediatetemperature solid oxide fuel cells using CO fuel", ***Journal of Power Sources*****,** 185: 862–866 (2008).

14. Yang, Y., Du, X., Su, A., Yang, L., Huang, Y., Xian, H., "Investigation of methane steam reforming in planar porous supportof solid oxide fuel cell", ***Applied Thermal Engineering,*** 29: 1106–1113 (2009).

15. İnternet: Hacettepe Üniversitesi "Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi" http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/yakitpili.htm (2010).

16. İnternet: University of Denver "The Telegraph Line: Batteries" http://mysite.du.edu/~jcalvert/ (2010).

17. İnternet: The Hebrew University of Jerusalem The Institute of Chemistry "Origin of the Electric Current: Galvanic Batteries" http://chem.ch.huji.ac.il/history/grove.htm (2010).

18. F. Barbir, "PEM Fuel Cells : Theory and Practice", ***Elsevier***, (2005).

19. Dündar F. , "PEM tipi yakıt hücrelerinde kullanılan katalizörlerde farklı karbon desteği kullanılarak yüzey alanının arttırılması ve kinetik özelliklerinin geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü***, Gebze, 4-10 (2006).

20. Bilaloğlu S. , "Proton değişim zarlı yakıt hücresi üretim yöntemlerinin incelenmesi ve Nafion™ 115 proton değişim zarı kullanarak üretilen yakıt hücrelerinin performans verilerinin değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Gebze, 22–29 (2006).

21. İnternet: U.S. Department of Energy "Types of Fuel Cells" http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html (2010).

22. İnternet: The National Museum of American History "Molten Carbonate Fuel Cells" http://americanhistory.si.edu/fuelcells/mc/mcfcmain.htm (2010).

23. Berning, T., Djilali, N., '' Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell: A Parametric Study Using a Three-Dimensional Computational Model Transport phenomena in a PEM fuel cell'', ***11th Canadian Hydrogen Conference***, Victoria, 699-707 (2001).

24. Oosthuizen, P.H., Sun, L., McAuley, K.B., "The effect of channel-tochannel gas crossover on the pressure and temperature distribution in PEM fuel cell flow plates", ***Appl. Thermal Eng.***, 25: 1083-1094 (2005).

25. Şahin, A., "Yakıt hücrelerinde kullanmak üzere yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozit membran sentezi", Yüksek Lisans Tezi, ***Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 2,11 (2007).

26. Nishikawa K, Ito N., Tanaka K., "Enhanced heat transfer by nucleate boiling on a sintered metal layer" ***Heat Transfer Japan Res.,*** 8: 65–81 (1979).

27. Chien L.H., Chang C. C., "Experimental study of evaporation resistance on porous surfaces in flat heat pipes" ***Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems—Itherm pp,*** 236–242 (2002).

28. İnternet: Tübitak Marmara Araştırma Merkezi "İleri Enerji Teknolojileri/Yakıt Pili Grubu/Bipolar Plakalar" http://www.mam.gov.tr/ee/sib/yakit-pili.html (2010).

29. Akbal, S., "Tektürel olmayan gözenekli bir ortamda doğal taşınımla ısı ve kütle geçişinin sonlu hacim yöntemi ile sayısal olarak incelenmesi", Doktora Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü ,*** İstanbul, 2,11 (2007).

30. İnternet: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası " Çimento Tipinin Donatı Korozyonuna Etkisi" http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3157.pdf (2010).

31. İnternet: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası " AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Taneler Arası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi" http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi140/d140_5061.pdf (2010).

32. Almomani, M., "Perforated pitting prevention of 316L stainless steel using hafnium dioxide-aliminium oxide nanolaminate films", Doktora Tezi, ***The University of Wisconsin,*** Milwaukee, 6,7,8 (2009).

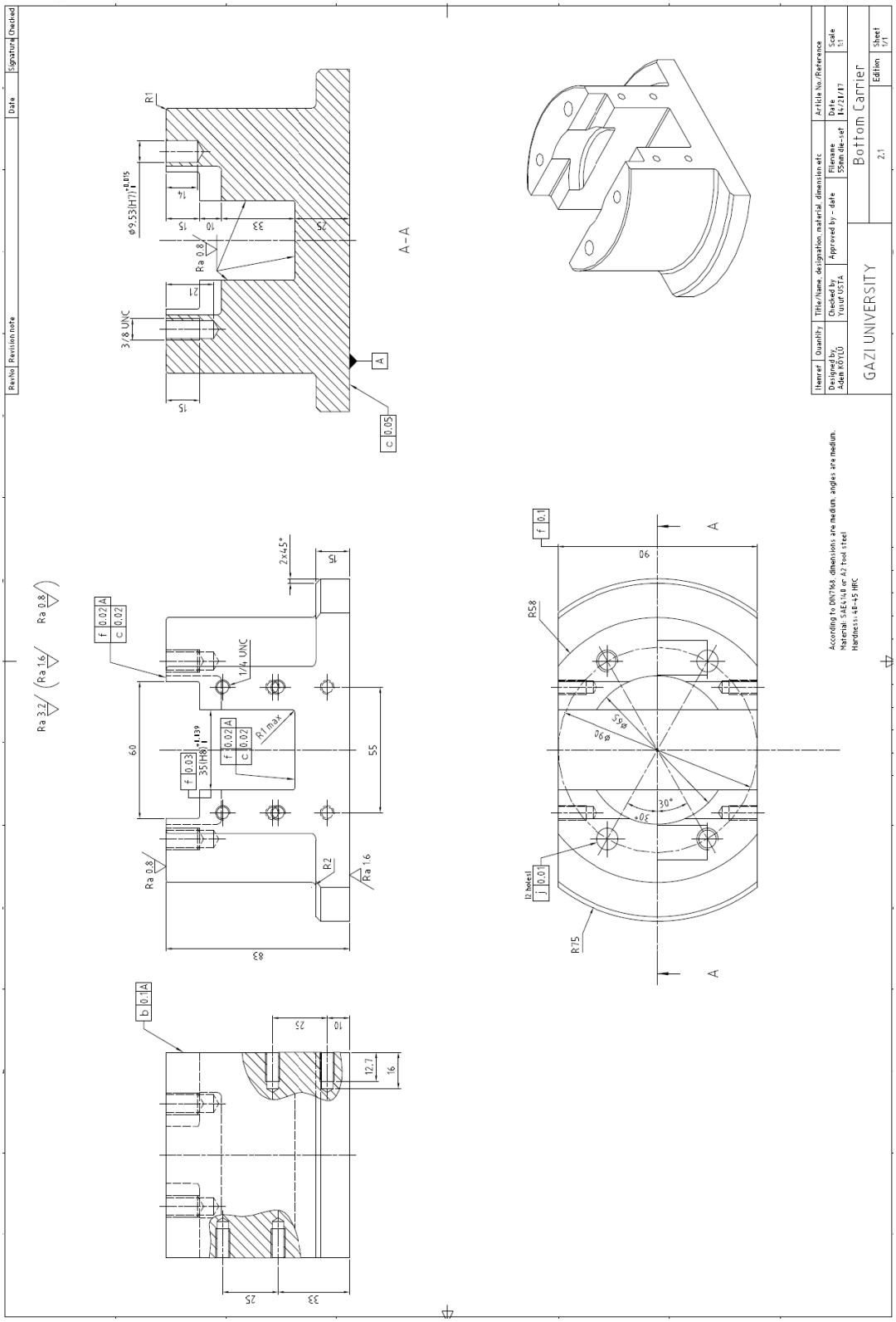
33. Sertçelik, F., Ürgen, M., Çakır A.F., "Paslanmaz çeliklerin oyuklanmasına molibdat, sülfat ve kromat iyonlarının etkisi", ***II. Korozyon Sempozyumu/Bildirileri***, Ankara, 35-37 (1990).

34. EN ISO 1302:2002, "Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation", ***International Standard ISO,*** 90-93 (2002).

35. TS 2040 EN ISO 1302, “Geometrik mamul özellikleri (GMÖ) – Teknik mamul dokümantasyonunda yüzey durumlarının gösterilişi”, ***Türk Standardı,*** (2005).

EKLER

EK-1. 55 mm metal toz sıkıştırma kalıbının imalat resmi



Şekil 1.2. 55 mm metal toz sıkıştırma kalıbının alt ana taşıyıcı teknik resmi

EK-2. Çözeltide yük altında gerilim değerleri ve akım yoğunluğu tabloları

		Çözelti üzerinde görülen gerilim değeri(volt)			
	zaman(sn)	Numune1	Numune2	Numune3	Numune Ortalama
1	t 0	3,80	3,66	3,92	3,79
2	t 1	3,79	3,68	3,94	3,80
3	t 2	3,81	3,71	3,96	3,83
4	t 3	3,83	3,73	3,97	3,84
5	t 4	3,86	3,74	3,98	3,86
6	t 5	3,92	3,77	4,01	3,90
7	t 6	3,96	3,79	4,03	3,93
8	t 7	3,97	3,82	4,07	3,95
9	t 8	4,03	3,85	4,10	3,99

Şekil 2.1. Çözeltide yük altında gerilim değerleri.

Süre (sn)	I (Anod Akımı, mA)	U(Gerilim,V)	R (Çözelti Direnci,Ω)	R (Çözelti Direnci,Ω)	Anod Alanı (cm^2)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)
0	2000	3,79	1,89		23,8	84,2
1	2000	3,80	1,90		23,8	84,2
2	2000	3,83	1,91		23,8	84,2
3	2000	3,84	1,92		23,8	84,2
4	2000	3,86	1,93		23,8	84,2
5	2000	3,90	1,95		23,8	84,2
6	2000	3,93	1,96		23,8	84,2
7	2000	3,95	1,97		23,8	84,2
8	2000	3,99	1,99		23,8	84,2

Şekil 2.2. Anot üzerindeki akım yoğunluğu.

EK-3. Altlık numunelerine ait pürüzlülük değer tablosu ve ortalama değer tablosu

Altlık numunelerine ait pürüzlülük değer tablosu

Numune	Ölçüm	R_a	R_q	R_{zDIN}	R_t	R_y	S_m
1	1	0,34	0,48	3,10	6,80	6,40	34,00
	2	0,90	1,76	10,20	17,60	17,60	51,00
	3	1,38	3,36	16,40	38,70	38,70	48,00
	4	0,44	0,76	4,60	11,10	11,10	44,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
2	1	0,40	0,60	4,20	6,90	6,40	39,00
	2	2,42	5,54	24,00	50,20	50,20	68,00
	3	1,34	3,24	16,10	38,80	30,60	55,00
	4	0,88	1,50	7,80	15,10	13,80	80,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
3	1	2,08	4,50	16,00	44,60	44,60	76,00
	2	3,38	6,60	24,80	48,70	48,70	66,00
	3	1,58	3,30	13,00	30,00	30,00	50,00
	4	2,14	5,44	16,10	55,10	55,10	53,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
4	1	1,52	3,24	14,00	37,10	37,10	88,00
	2	2,54	6,22	19,60	62,40	62,40	51,00
	3	0,54	0,92	6,60	12,20	12,00	40,00
	4	2,70	5,28	26,90	43,70	43,70	54,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
5	1	0,34	0,46	2,30	3,30	2,80	47,00
	2	1,02	1,60	8,40	14,80	14,80	84,00
	3	1,82	5,04	19,50	56,00	56,00	53,00
	4	2,54	5,46	21,30	48,50	48,50	120,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
6	1	1,40	2,86	18,20	27,40	27,40	52,00
	2	1,14	2,64	8,90	27,90	27,90	42,00
	3	0,82	1,52	9,70	16,30	15,80	40,00
	4	1,30	2,98	11,70	34,80	34,80	47,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
7	1	1,60	3,62	14,30	39,10	39,10	45,00
	2	3,16	6,36	25,50	52,60	52,60	59,00
	3	2,64	5,82	22,80	55,00	55,00	58,00
	4	1,04	1,98	13,10	20,10	20,10	68,00
Numune	**Ölçüm**	**R_a**	**R_q**	**R_{zDIN}**	**R_t**	**R_y**	**S_m**
8	1	1,88	5,12	14,90	55,30	55,30	47,00
	2	3,40	7,00	26,10	54,10	54,10	65,00
	3	0,38	0,52	3,30	5,00	4,60	36,00
	4	1,86	4,70	15,70	47,10	47,10	54,00

Tüm numuneler; L_c=0,80µm (ölçüm aralığı) ölçülmüştür.

Şekil 3.1. Altlık numunelerine ait pürüzlülük değer tablosu.

EK-3. (Devam) Altlık numunelerine ait pürüzlülük değer tablosu ve ortalama değer tablosu

Altlık numunelerine ait pürüzlülük ortalama değer tablosu

Numune	R_a	R_q	R_{zDIN}	R_t	R_y	S_m
1	0,77	1,59	8,58	18,55	18,45	44,25
2	1,26	2,72	13,03	27,75	25,25	60,50
3	2,30	4,96	17,48	44,60	44,60	61,25
4	1,83	3,92	16,78	38,85	38,80	58,25
5	1,43	3,14	12,88	30,65	30,53	76,00
6	1,17	2,50	12,13	26,60	26,48	45,25
7	2,11	4,45	18,93	41,70	41,70	57,50
8	1,88	4,34	15,00	40,38	40,28	50,50

Şekil 3.2. Altlık numunelerine ait ortalama pürüzlülük değer tablosu.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: KÖYLÜ, Adem
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 22.06.1976 Bolvadin
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 508 77 35
Faks	: 0 (312) 508 77 99
e-mail	: akoylu@ilbank.gov.tr , adamvillager@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi/ Makina Müh.	1998
Lise	Yenimahalle Teknik ve EML./Elektronik	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1998–2010	İller Bankası Genel Müdürlüğü	Makina Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Resim, Bilgisayar Teknolojileri, Elektronik