



**SERT ELOKSAL VE Ni-B KAPLAMA İŞLEMİ  
UYGULANMIŞ Al7Si ALAŞIMININ AŞINMA  
ÖZELLİKLERİ VE ZrN KAPLANMIŞ KARBÜR  
TAKIMLARLA FREZELEME PERFORMANSININ  
İNCELENMESİ**

**Yunus Eren İŞILDAK**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ**

**2020**

**Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SERT ELOKSAL VE Ni-B KAPLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ Al7Si  
ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ VE ZrN KAPLANMIŞ KARBÜR  
TAKIMLARLA FREZELEME PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**Yunus Eren İŞILDAK**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fatih YILDIZ**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2020**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**SERT ELOKSAL VE Ni-B KAPLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ Al7Si**  
**ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ VE ZrN KAPLANMIŞ KARBÜR**  
**TAKIMLARLA FREZELEME PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Fatih YILDIZ danışmanlığında, Yunus Eren IŞILDAK tarafından hazırlanan bu çalışma 09 / 09 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. A. Fatih YETİM	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Fatih YILDIZ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Yakup UZUN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

\*Bu tez çalışması ..... tarafından ..... nolu proje ile desteklenmiştir.

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

09/ 09 / 2020

Yunus Eren IŞILDAK

# ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

## SERT ELOKSAL VE Ni-B KAPLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ Al7Si ALAŞIMININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ VE ZrN KAPLANMIŞ KARBÜR TAKIMLARLA FREZELEME PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Yunus Eren İŞILDAK

Erzurum Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Bu tez çalışmasında, imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan Al7Si alaşımının farklı yüzey işlemleri ile aşınma dayanımının artırılması ve söz konusu alaşımın talaşlı imalatta verimli/ekonomik bir şekilde işlenebilmesi için etkili bir kesici takım kaplaması önerilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda döküm Al7Si alaşımı numunelere çökelme sertleşmesi ısıl işlemi, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası numunelerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri karakterize edilmiştir. Ayrıca Al7Si alaşımının, kaplanmamış ve ZrN ile kaplanmış karbür parmak frezelerle talaşlı imalat performansı araştırılmıştır. Takımların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, geleneksel yöntemlerde kullanılan takım yolları yerine son dönemde yaygınlaşan akıllı imalat (intelligent machining) olarak adlandırılan SolidCAM i-machining modülü kullanılmıştır. Alaşıma uygulanan çökelme sertleşmesi ısıl işlemi, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemi sonrası aşınma hacimleri büyük oranda azalmıştır. En düşük aşınma hacmi, aynı zamanda en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği Ni-B kaplı Al7Si alaşımı için elde edilmiştir. Talaşlı imalat çalışmaları sonrası ZrN kaplamanın WC takım üzerinde oluşan aşınmayı yaklaşık 4 kat azalttığı ve kaplanmamış takıma oranla iş parçası yüzey kalitesini artırdığı tespit edilmiştir.

**2020, 65 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Al7Si alaşımı, aşınma, sert eloksal kaplama, akımsız Ni-B kaplama, ZrN kaplama, WC, talaşlı imalat, i-machining

## ABSTRACT

MS. Thesis

### WEAR CHARACTERISTICS OF HARD ANODIZING AND Ni-B COATING DEPOSITED ON Al7Si ALLOY AND INVESTIGATION OF ITS MILLING PERFORMANCE WITH ZrN COATED CARBIDE TOOLS

Yunus Eren İŞILDAK

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

In this thesis, it is aimed to increase the wear resistance of Al7Si alloy, which is widely used in the manufacturing industry, with different surface treatments and to propose an effective cutting tool coating in order to machining process efficiently/economically. Accordingly, precipitation hardening heat treatment, Hard Anodizing and Ni-B coating processes were applied to cast Al7Si alloy samples. The structural, mechanical and tribological properties of the samples were characterized after the surface treatments. In addition, the machining performance of Al7Si alloy with uncoated and ZrN coated carbide end mills was investigated. The milling processes was performed to determine the actual working performance of the tools. SolidCAM i-machining module, which has become widespread recently, was used as intelligent machining instead of the tool paths used in traditional methods. After the precipitation hardening heat treatment, Hard Anodizing and Ni-B coating process applied to the alloy, the wear volumes were greatly reduced. The lowest wear volume was obtained for the Ni-B coated Al7Si alloy, which also achieved the lowest coefficient of friction. After machining studies, it was determined that the ZrN coating reduced the wear on the WC tool approximately 4 times and increased the workpiece surface quality compared to the uncoated tool.

**2020, 65 pages**

**Keywords:** Al7Si alloy, wear, hard anodic oxidation, electroless Ni-B coating, ZrN coating, WC, machining, i-machining

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca her türlü fedakârlığı gösteren bilgi ve tecrübesini esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih YILDIZ'a en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan ve bana zaman ayıran Sayın Arş. Gör. Dr. İlyas HACISALİHOĞLU, Arş. Gör. Gürkan KAYA, Makine Yüksek Mühendisi Tefvik Oğuzhan ERGÜDER ve Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada kullanılan alüminyum alaşımı malzemelerin temin edilmesinde katkı sunan CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş.'ye ve firma personellerinden Ar-Ge Mühendisi Bora YAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada kullanılan kesici takımların temin edilmesi için desteğini sunan Karcan Kesici Takım Sanayi Ticaret A.Ş.'ye ve Ar-Ge Asistanı Sercan MERTADAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada alüminyum alaşımı üzerine yapılan kaplamalar konusunda destek veren MGM Metal Kaplama Firmasına ve Sayın Mazhar ACET'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini sunan ayrıca bilgi ve tecrübesini her daim üzerimde hissettiğim sevgili babam Prof. Dr. Ömer İŞILDAK'a ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Hayat boyunca etrafımda ve başımda olmasından derin mutluluk ve sevinç duyduğum biricik annem Nurşen İŞILDAK'a hürmetlerimi sunar, teşekkür ederim.

**Yunus Eren İŞILDAK**

**Eylül 2020**

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Alüminyum Cevheri, Elde Edilişi ve Bazı Özellikleri.....	1
1.2. Alüminyumun Kullanım Alanları .....	2
1.3. Silisyumun Alüminyum Üzerine Etkisi .....	3
1.4. Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlem Mekanizması.....	5
1.5. Malzemelerde Görülen Bir Hasar Mekanizması: Aşınma .....	6
1.6. Aşınmaya Etki Eden Parametreler .....	7
1.7. Aşınma Mekanizmaları .....	7
1.7.1. Adezif/sürtünme aşınması.....	8
1.7.2. Abrazif aşınma .....	8
1.7.3. Yorulma aşınması.....	9
1.7.4. Korozyon aşınma .....	9
1.8. Aşınma Dirençli Kaplamalar.....	10
1.8.1. Eloksal (anodizasyon) ve sert eloksal kaplama.....	10
1.8.2. Akımsız Ni-B kaplama.....	13
1.9. Üretime Genel Bir Bakış .....	15
1.10. Talaşlı İmalata Dair Bir Bakış.....	18
1.11. Talaşlı İmalatta CNC Teknolojileri.....	19
1.12. i-machining Modülü ve İşlevleri .....	20
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>22</b>
2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar .....	22
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>28</b>
3.1. Materyal .....	28
3.2. X Işını Kırınım (XRD) Analizi .....	29
3.3. Aşınma Testleri .....	29
3.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri .....	31
3.5. 3D Yüzey Profilometre Analizleri .....	31
3.6. Mikrosertlik Analizleri.....	32

3.7. Dağlama İşlemleri ve Mikroyapı Analizleri .....	33
3.8. Isıl İşlem.....	34
3.9. SolidCAM i-machining Programlama ve Yüksek Hızlı Freze İşleme.....	35
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>39</b>
4.1. Al7Si Alaşımına Uygulanan Kaplama İşlemlerinin Yapısal ve Mekanik Özellikleri .....	39
4.1.1. Al7Si alaşımının mikro yapısı.....	39
4.1.2. Kaplanmış Al7Si alaşımının kaplama kalınlıklarının ve yüzey görüntülerinin SEM ile incelenmesi .....	40
4.1.3 İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait XRD analizleri .....	42
4.1.4. Mikro sertlik incelemeleri .....	43
4.2. Tribolojik Özellikler.....	44
4.2.1. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait sürtünme katsayısı bulguları .....	44
4.2.2. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma hacimleri .....	45
4.2.3. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma izi sem görüntüleri ve optik profilometre incelemeleri .....	46
4.3. ZrN Kaplanmış Karbür Takımlarla Al7Si Alaşımının Frezeleme Performansı.....	52
4.3.1. WC kesici takım malzemesi üzerine uygulanan ZrN kaplamaya ait karakterizasyon çalışmaları.....	52
4.3.2. İşlemsiz ve ZrN kaplanmış WC kesici takımlarla gerçekleştirilen frezeleme işlemi sonrası takım aşınmalarının değerlendirilmesi .....	54
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
5.1. Sonuçlar .....	57
5.2. Öneriler .....	60
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>65</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
$\text{Å}$	Angstrom
gr	Gram
HV	Vickers Sertlik Birimi
N	Newton
°	Derece
sn	Saniye
$\lambda$	Dalga boyu
$\mu\text{m}$	Mikrometre
V	Kesme hızı
n	Devir sayısı
Lc	Kritik Yük
mm	Milimetre

### Kısaltmalar

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim
CNC	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
COF	Sürtünme Katsayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X Işını kırınım ölçer
WC	Tungsten Karbür
CAPVD	Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama
CVD	Kimyasal Buhar Kaplama

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. AlSi denge diyagramı.....	4
Şekil 1.2. Adezif (sürtünme) aşınma .....	8
Şekil 1.3. Şiddetli abrazif aşınma .....	9
Şekil 1.4. Yorulma aşınması gösterimi.....	9
Şekil 1.5. Korozif aşınma gösterimi.....	10
Şekil 1.6. Eloksal hücrenin yapısı.....	12
Şekil 1.7. Çeşitli eloksal kaplamaların kalınlıkları.....	13
Şekil 1.8. Üretim teknolojilerinin sınıflandırılması.....	16
Şekil 1.9. Üretimin tanımı .....	17
Şekil 1.10. Talaşlı imalat proseslerinin sınıflandırılması.....	18
Şekil 1.11. CAM uygulamasında i-machining döngüsü.....	21
Şekil 3.1. XRD cihazı.....	29
Şekil 3.2. Aşınma test cihazı.....	30
Şekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	31
Şekil 3.4. 3D Profilometre cihazı.....	32
Şekil 3.5. Mikrosertlik cihazı.....	33
Şekil 3.6. Optik mikroskop.....	34
Şekil 3.7. Isıl işlem fırını.....	34
Şekil 3.8. CNC freze tezgahı.....	35
Şekil 3.9. CAM programında simüle edilen stok ve hedef model.....	35
Şekil 3.10. Talaşlı imalatta kullanılan takımlar .....	36
Şekil 3.11. İş takımı seçimi.....	36
Şekil 3.12. SolidCAM imalat adımları.....	37
Şekil 3.13. Takım yolu gösterimi.....	37
Şekil 3.14. iMachining kesim parametreleri.....	38
Şekil 4.1. Dağlanmış Al7Si alaşımına ait mikroyapı görüntüleri .....	39
Şekil 4.2. Al7Si alaşımı üzerine uygulanan kaplamalar ait kesit SEM görüntüleri .....	40
Şekil 4.3. Kaplama yapılmış Al7Si alaşımına ait yüzey SEM görüntüleri.....	41
Şekil 4.4. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait XRD grafikleri.....	42

Şekil 4.5. İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış ve kaplanmış Al <sub>7</sub> Si alaşımına mikrosertlik değerleri.....	43
Şekil 4.6. İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış ve kaplanmış Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait sürtünme katsayısı değişimi.....	44
Şekil 4.7. İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış ve kaplanmış Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri.....	45
Şekil 4.8. İşlemsiz ve kaplanmış Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait aşınma hacimleri.....	46
Şekil 4.9. Aşınma izi SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.10. İşlemsiz Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü.....	48
Şekil 4.11. Isıl işlem uygulanmış Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü.....	49
Şekil 4.12. Sert Eloksal kaplı Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü.....	50
Şekil 4.13. Ni-B kaplı Al <sub>7</sub> Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü...	51
Şekil 4.14. WC kesici takım malzemesi üzerine kaplanmış ZrN kaplamaya ait kesit SEM görüntüleri.....	52
Şekil 4.15. İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait XRD grafiği.....	53
Şekil 4.16. İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait mikrosertlik değerleri.....	53
Şekil 4.17. Yan kenar aşınma genişlikleri.....	55
Şekil 4.18. Frezeleme işlemi sonrası iş parçasının 3D yüzey görüntüleri.....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sert Eloksal ve Ni-B kaplama parametreleri.....	28
Çizelge 3.2. Aşınma test parametreleri.....	30



### 1. GİRİŞ

Metallerin insan hayatına girişi, ateşin, elektriğin hatta tekerleğin icadı gibi iz bırakan bir olay olmuştur. Metaller sayesinde insanlık g¼c¼ kazanmış ve devrimler yapmıştır. Sanayi devrimi bile aslında bir metal devrimidir. Bu malzemeler bug¼ne dek ya dayanıklılığın ya da zenginliğin sembol¼ olmuş, insanlık bu malzemelere sahip olabilmek i¼in madenler kazmış ve can vermiştir. Metaller i¼erisinde m¼hendislik ve yaşam i¼in en b¼y¼k ¼neme sahip olan malzeme uzun yıllar boyunca demir olmuştur. Ancak demir metali işlenmesi zor ve ağır bir metaldir. M¼hendislik i¼in hafifliğin ¼nemli olduğu pek ¼ok alan vardır. Bu sebeple Al¼minyum pek ¼ok kez end¼striye kazandırılmaya ¼alıřılmıřtır. Kolay işlenebilirliği, s¼neklięi ve hafifliğine karşın bir¼ok uygulama i¼in yetersiz kalan mukavemeti bu denemelerin ¼oęunu boşa ¼ıkarmıřtır. Sonunda Al¼minyum alaşımlarının ne denli faydalı olabileceği ortaya ¼ıkmıř ve end¼stride derin bir yankı bulmuştur. ¼zellikle Mg ve Si ile alaşımlandırılarak ¼ok daha verimli bir hal almıştır. Havacılıktan otomotive, savunma sanayisinden bilişim teknolojilerine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Al¼minyuma dair bazı başlıklar aşağıda incelenecektir.

#### 1.1. Al¼minyum Cevheri, Elde Edilişi ve Bazı ¼zellikleri

Al¼minyum hafif bir metaldir ve bu ¼zellięi sebebiyle m¼hendislik ve imalatta ¼zel bir yeri vardır. Ek olarak al¼minyum d¼nya ¼zerinde bolca bulunmasına rağmen, doğal ortamından ¼ıkarılması kolay değildir. B¼y¼k metaller arasında varlığı sadece 1800'lere uzanan yeni bir ¼retim akt¼r¼ olmuştur (Groover 2010).

Başlıca Al cevheri, b¼y¼k ¼l¼de hidratlı al¼minyum oksit ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) ve diğer oksitlerden oluşan boksittir. Boksitten Al ekstraksiyonu ¼ç adımda ¼zetlenebilir: cevherin yıkanması, ince toz haline getirilmesi ve boksitin saf  $Al_2O_3$ 'e d¼n¼řt¼ę¼ Bayer işlemidir. Bu işlemede al¼mina elektroliz ile Al ve  $O_2$ 'ye ayırır. Elektrolizde Al katot,  $O_2$  ise anot olarak konumlanır.

Alüminyumun özellikleri incelendiğinde, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğinin yanı sıra mükemmel korozyon direncine sahiptir. Sert yapısının yanında ince bir oksit yüzeyine sahiptir. Çok sünek bir metaldir ve şekillendirilebilirliği ile dikkat çekmektedir. Saf Alüminyumun mukavemeti nispeten düşüktür ancak özellikle ağırlık önemli bir problemse, bazı çeliklerle rekabet etmek için alaşımlandırılabilir ve ısıl işlemlere tabi tutulabilir (Groover 2010).

### 1.2. Alüminyumun Kullanım Alanları

Binek araç parçalarının üretiminde döküm çelik yerine alüminyum kullanılması için ciddi bir çaba sarf edilmiştir. Bunun sebebi hafifliği sayesinde yakıt tasarrufu sağlaması dolayısı ile hava kirliliğini azaltması hatta emniyeti ve sürüş performansını bile iyileştirmesidir (Polmear 1996; Hirsch 2010). Alüminyum alaşımlarının yüksek korozyon direnci, düşük ağırlık, düşük maliyet ve iyi kaynak kabiliyeti gibi avantajları vardır (Calin et al. 2012; Dursun and Soutis 2013). İlk kez 1920'den sonra alüminyum temelli alaşımlardan üretilen levhalar araç gövdesinin yapımında kullanılmıştır (Akkera et al. 2016). Araç gövdesine ek olarak bazı otomobil parçalarının da üretimi için pek çok kez alüminyum temelli alaşımlar denenmiştir. Günümüzde çevreyi korumak ve enerji tasarrufu sağlamak toplum nezdinde önem arz etmektedir. Bu yüzden hafif, enerji tasarruflu ve çevre dostu araçların geliştirilmesi gerekmektedir (Ambat et al. 2000).

Makine parçaları için alüminyum uygulamaları endüstride gittikçe artmaktadır. Son zamanlarda AlSi alaşımları kavrama, debriyaj, silindir, pistonlar gibi otomotiv sektörü parçalarının tribolojik bileşenlerinden biri olmuştur (Li et al. 2015). Uygun tribolojik özellikler düşük ısıl genleşme ile birleştirilmiş ve geniş çapta bir ötektiküstü AlSi alaşımı elde edilmiştir. İyi aşınma dayanımı sergileyen bu alaşımlar, matris içerisindeki fazlarda dağılan Silisyumca zengindir (Aal and Kim 2013; Kang et al. 2016). Çok sayıda bilim insanı AlSi alaşımlarının aşınma davranışları hakkında araştırma yapmış ve raporlar hazırlamıştır (Heinz et al. 2000; Akkera et al. 2016). Ancak bu raporlar incelendiğinde görülmüştür ki bunlardan sadece birkaçı, Silisyumun sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisini sistematik bir şekilde araştırmıştır. Sonuç olarak bu alaşım türü mükemmel döküm kabiliyeti, kaynak edilebilirlik, ısı iletkenliği, yüksek mukavemet, iyi korozyon ve aşınma direncine sahiptir (Dwivedi 2004; Basavakumar et al. 2009).

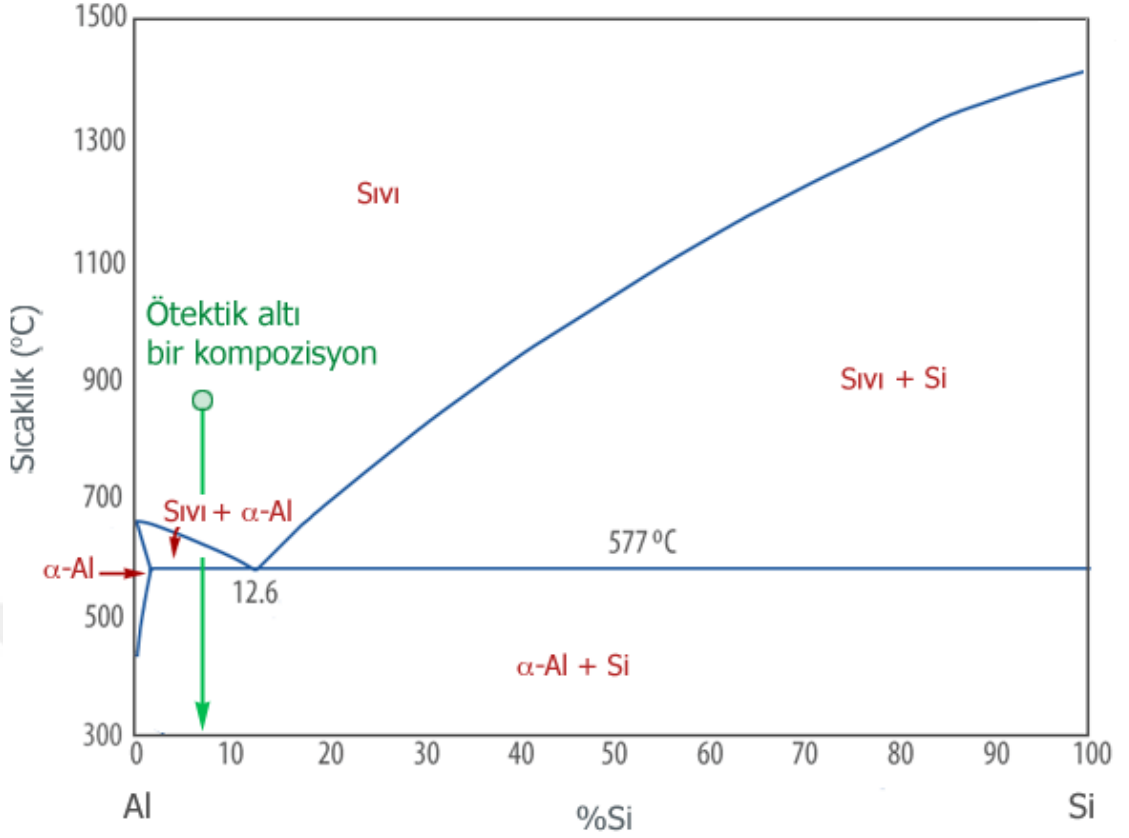
Üretimde maliyeti azaltmak önemli bir mühendislik problemi olmuştur. Binek araç üretiminde olduğu gibi havacılıkta da Alüminyum kullanımı önem arz etmektedir. Özellikle itiş gücü ile alakalı verimi artırmak için hafiflik kritik önem taşımaktadır. Alüminyum hafifliği sayesinde havacılık endüstrisinde sık tercih edilen bir malzemedir. Havacılıkta, yakıt tüketimi, bakım maliyeti, periyodik kontrollerin sıklığı ve hizmet ömrünü uzatırken aynı zamanda taşınan yolcu sayısındaki artış da bu hafiflik sayesinde sağlanmıştır (Dursun ve Soutis 2013).

### 1.3. Silisyumun Alüminyum Üzerine Etkisi

Saf Alüminyum içerisine Silisyum takviyesi yapıldığında malzemenin döküm kabiliyeti iyileşir. Ayrıca korozyon direnci ve kolay işlenebilirliği de göze çarpmaktadır. Özellikle ötektik veya hipoötektik AlSi iyi döküm kabiliyeti ve korozyon direnci ile karakterize edilebilir (Gruzleski and Closset 1990).

Alüminyum endüstride %90 oranında alaşım olarak kullanılmaktadır. Bakır ve Magnezyum ile birlikte ısı işlemlere dayanıklı hale gelmektedir. Silisyum ise döküm işleminde yüksek akıcılık sağlamak ve böylece karmaşık geometriye sahip parçaların döküm yoluyla üretilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca Silisyum döküm malzemedeki çekinti oluşması ihtimalini de azaltmaktadır.

## 1. GİRİŞ



Şekil 1.1. AlSi denge diyagramı (Anonymous)

AlSi sistemine ait faz diyagramı Şekil 1.1’de verilmiştir. Faz diyagramından ötektik noktanın %12,6 Si civarında olduğu görülmektedir. Şayet çekme mukavemeti önemli ise Si miktarı %12,6’nın altında olmalıdır. A356 Alüminyum endüstride çok yaygın kullanılır ve %7 kadar Si ihtiva eder. Yüksek korozyon direncinin istendiği durumlarda ise Si miktarının %12,6’nın üzerine çıkarılması gerekmektedir. Döküm ile AlSi alaşımı elde edilmek istendiğinde maksimum Si yüzdesi %2,4 iken, toz metalürjisi ile %50 civarı Si ihtiva eden AlSi alaşımı elde edilebilmektedir. Bu alaşım içerisinde minimum düzeyde tutulmak istenen element ise demir olup, AlSi alaşımında sünekliği düşürdüğü gibi korozyon direncini de azaltmaktadır (Çetin 2019).

Si elementi Alüminyum Ni, Cu, Mg ile birlikte ısıl işlem sonucunda sertleştirilebilir bir alaşım haline getirir. Silisyum oranı ile çekme mukavemeti de artmaktadır. Si ihtiva eden alaşımların mekanik özellikleri içerdiği Si oranından ziyade bulundurduğu dağılım ve faz şekline bağlıdır. Yuvarlak küçük taneli Si fazının mukavemeti yüksekken iğne şeklinde yönlendirilmiş Si fazı çekme yönünden iyidir ve

süneklik, darbe dayanımı, yorulma açısından düşük mukavemetlidir (Eruslu vd. 1990). Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve sertliğin artırılması için ısıtım işlem uygulanır.

### 1.4. Alüminyuma Uygulanan Isıtım İşlem Mekanizması

Alüminyum alaşımları için sertleştirme işlemi, ısıtım işlem esnasında sekonder faz taneciklerinin daha ince ve homojen dağılımla matris içerisinde çökelmeye uğraması ile sağlanır. Bu sebeple çökeltme sertleşmesi adını almaktadır. Demir dışı metal ve alaşımlarda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca mekanik özelliklerin iyileşmesine ek olarak manyetik ve iletkenlik durumunun da iyileşmesine sebep olmaktadır (Brooks 1982).

Çökeltme sertleştirme prosesi hiçbir deformasyon ve plastik şekil değişimi mekanizması gereksiz sertliği arttırdığı için sanayide önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemle bir malzemenin sertleştirilebilmesi için denge diyagramında solvüs eğrisi bulunmalıdır. Çünkü çökeltme yalnızca solvüs eğrisi ihtiva eden malzemelerde gerçekleşebilir.

Isıtım işlem için öncelikle çökecek fazı ihtiva eden aşırı doymuş, tek fazlı, katı bir eriyik elde etmek amacıyla alaşımlar, solvüs eğrisi üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır ve ikincil beta fazı, alfa katı eriyiği içinde tam olarak çözününceye dek bekletilir. Bekleme sıcaklığında tüm yapı alfa fazına dönüştükten sonra alaşıma ani bir su verme işlemi uygulanır. Bu ani soğuma esnasında beta fazının çökeltmesi engellenir ve oda koşullarında aşırı doymuş bir alfa fazlı katı eriyik ortaya çıkmış olur. Daha sonra bu malzeme yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Çünkü alfa katı eriyiği içerisindeki ikincil faz sıcaklık ve zaman etkisiyle çökeltir ancak bunun için beta fazının çekirdeklenmesi ve daha sonra difüzyon ile büyümesi şarttır. Su verme sonrası oda sıcaklığı difüzyon hızını ciddi anlamda yavaşlatır ve beta çökeltisi ya hiç oluşmaz ya da oluşması çok zaman alır. Çökeltinin oda şartlarında oluşabileceği alaşımlara “doğal yollarla yaşanan alaşımlar” denir. Aynı işlemi oda sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklıkta yapay olarak gerçekleştirerek difüzyon hızı artırılabilir. Bu şekilde çökeltme hızında artış sağlanarak daha kısa sürelerde yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir.

### 1.5. Malzemelerde Görülen Bir Hasar Mekanizması: Aşınma

Sanayi ve üretim proseslerinde geçmişte ve bugün yaygın olarak karşılaşılan problemlerden biri de aşınmadır. Aşınmaya sebep olan durumlar teknik olsa da sonuçları ekonomiktir.

Aşınma, malzemedeki mekanik bir etki ile kütle transferi neticesinde kayıp oluşması durumudur. Genelde yedek parça değişimleri bu sorun neticesinde olur. Hangi ülkede olursa olsun üretim yapılan her yerde aşınmanın maliyeti büyüktür, ayrıca tamir ve değişim süreçleri düşünüldüğünde kayıplar çok büyük boyutlara ulaşabilmektedir.

Aşınma, DIN 50320 ve ASTM G4093 standartları dikkate alındığında, ana malzeme haricindeki katı, sıvı veya gaz malzemelerin teması ile mekanik unsurlar çerçevesinde malzeme yüzeyinden ufak parçaların ayrılması şeklinde tanımlanabilir. Aşınmanın görüldüğü yerler genelde ikili sürtünmeye maruz kalan elemanları ihtiva eden sistemlerdir. Örneğin; tekerlekler, subaplar, yataklar, pistonlar, kesici uçlar ve ağızları, dişliler, değirmenler, yollar, zirai makineler, türbinler vs. olarak sıralanabilir.

Aşınma makine elemanlarının maruz kaldığı zorlanma sonucu gelişen bir hasar mekanizmasıdır. Aşınma zorlanması, dinamik parametreler, çevresel parametreler ve malzeme özelliklerini ihtiva eden bir sürtünme sistematığı içindeki minimal bir değişimle dahi, çok büyük hasarlara sebep olabilmektedir.

Makine elemanlarının ve ürünlerin ömürlerine etki eden temel hasar mekanizmalarından birisi aşınmadır ve tamamıyla ortadan kaldırılamayan kronik bir hasar tipidir. Literatürde bu hasar mekanizması ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve aşınmanın doğasının malzeme çeşidine ve sürtünmeye maruz kalan malzemenin yüzey özelliklerine/durumuna önemli oranda bağlı olduğu görülmüştür (Demir 2012).

### 1.6. Aşınmaya Etki Eden Parametreler

Aşınma genellikle oluşması beklenen bir hasar tipidir. Temas halinde olan makine parçaları ve yüzeyler, oksit filmleri ve makine yağı ile korunsa da mekanik zorlamalar oksit filmini ve yağlı yüzeyi tüketip malzemelerde direkt temasa sebebiyet verebilir. Bu temas sürtünmeye sebep olur, sürtünme de malzeme ömrü ve performansına ciddi etkileri olan aşınmayı doğurur. Aşınmaya etki eden bazı faktörler aşağıda sıralanmıştır:

- Malzeme seçimi
- Sürtünme
- Yüzeğe uygulanan yük
- Sürtünme mesafesi
- Yüzeğe sertliği
- Yüzeğe pürüzlüğü
- Yağlama

### 1.7. Aşınma Mekanizmaları

Temel aşınma mekanizmaları aşağıda sunulmuştur:

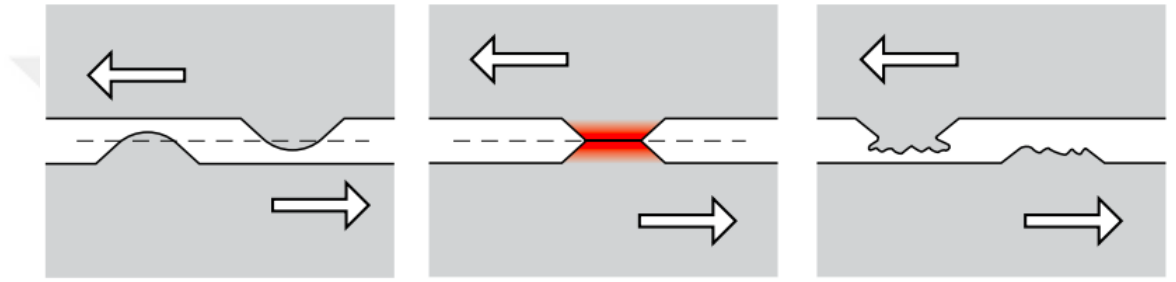
- **Oluşum Şekli ile** adezif aşınma, abrazif aşınma, tabaka aşınması ve titreşim (yorulma) aşınması.
- **Deformasyonun nasıl görüldüğü ile** kayma aşınması, korozyif aşınma, erozyif aşınma ve yuvarlanma aşınması.
- **Özel adlandırılışları ile** öğütmeli aşınma, oymalı aşınma, kazımalı aşınma olarak ayırt edilir.

Aşağıda aşınma türlerinden en yaygın olanları detaylandırılmıştır;

## 1. GİRİŞ

### 1.7.1. Adezif/sürtünme aşınması

İki ayrı metal malzemenin temas ettikleri yüzeylerdeki mekanik gerilmeler ve ardından mikro kaynak düzlemleri oluşturan bir aşınmadır. Oluşması için yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve sürtünme şartları bulunmalıdır. Aşınma mikroskobik düzeydedir bu sebeple çıplak gözle görülemeyebilir. Sürtünme aşınması miktarı malzeme türü, yüzeyler arası oluşan kuvvet, hız, sıcaklık, yüzey temizliği ve sürtünme katsayılarına da bağlıdır. Benzer kristalografik yapıdaki malzemeler arasında sürtünme aşınması riski yüksektir.

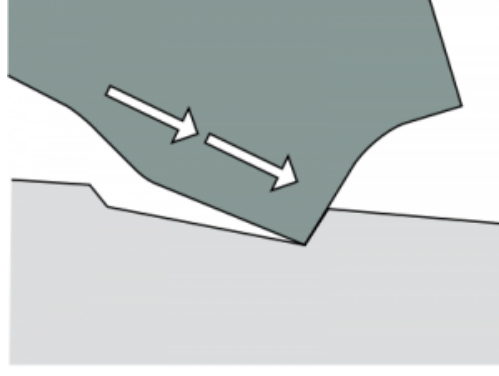


Şekil 1.2. Adezif (sürtünme) aşınma (Anonymous)

### 1.7.2. Abrazif aşınma

Yük durumu ve şiddetine göre sınıflandırılabilir. Düşük, orta ve yüksek şiddetteki abrazif aşınmada ana malzeme üzerinde kayan partikül ya da parçalar aşınmaya sebep olur. Düşük ve orta şiddetteki abrazif aşınmada ana malzemedan parça kopmazken, yüksek şiddetteki aşınmada, yüksek basınçtan dolayı yüzey filminde yıpranma, oyulma ve yontulma ayrıca sert fazların (karbürler vs.) kopması ya da matriste meydana gelen plastik deformasyon şeklinde ortaya çıkabilmektedir.

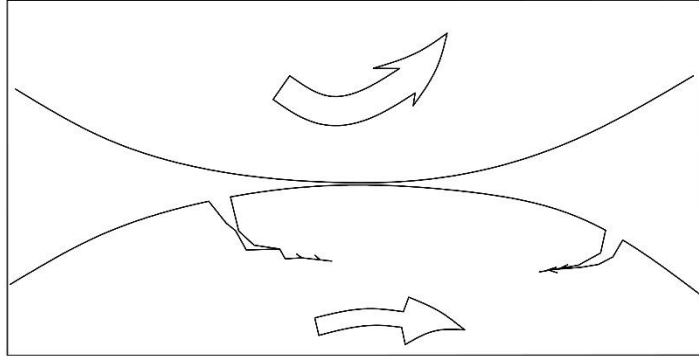
Şiddetli abrazif aşınmada ise darbe eşliğinde gelen düşük, orta ve yüksek aşınmanın bir kombinasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu aşınma türünde, malzeme yüzeyinden büyük parçaların kopması ve derin çizikler oluşması gözlenmektedir. Ek olarak plastik deformasyon da gerçekleşebilmektedir. Engellemek için şok gerilmeleri ve darbelere dirençli sünek malzeme türlerinden faydalanılabilmektedir.



Şekil 1.3. Şiddetli abrazyon aşınma (Anonymous)

### 1.7.3. Yorulma aşınması

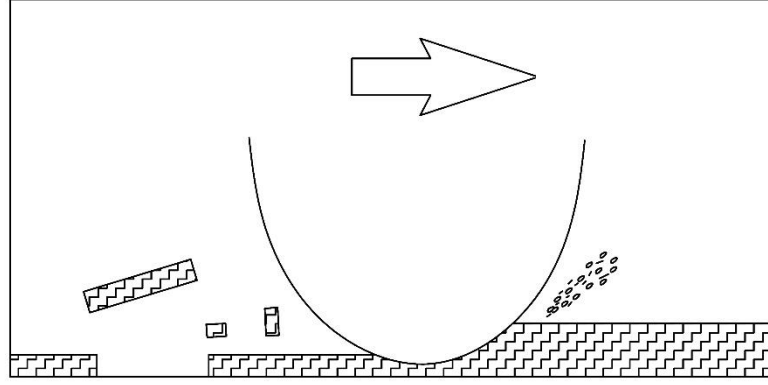
Genellikle dinamik zorlanmaya maruz kalan parçalarda yüzey filminin altında ya da yakınında içyapıda yorulma sonucu yüzey filminden ufak parçaların kopması suretiyle gelişen aşınmadır. Doğal sertliğin önem arz ettiği bir tür olan yorulma aşınması, daha çok yumuşak malzemelerde görülür. Bunu önlemek için yüzey sertleştirme uygulanabilmektedir.



Şekil 1.4. Yorulma aşınması gösterimi

### 1.7.4. Korozyon aşınma

Malzeme yüzeyinde bir kimyasal ile temas sonucu ortaya çıkan tipte bir aşınmadır. Yağ içerisinde bulunan asidin de sebep olduğu bilinmektedir. Isı artışı da aşınma hızını arttırmaktadır. Bunu önlemek için yapılabilecek en iyi işlem koruyucu bir tabaka ile kaplamaktır.



Şekil 1.5 Korozif aşınma gösterimi

### 1.8. Aşınma Dirençli Kaplamalar

Metalik malzemelerin tribolojik özellikleri kullanım alanına göre yetersiz kalabilmektedir. Malzemeler, aşınma performanslarının artırılması için çeşitli yüzey işlemlerine tabi tutulabilir. Bu işlemler temel olarak termo-kimyasal difüzyon işlemleri ve kaplama işlemleri olarak sınıflandırılabilir. Alüminyum hafiflik ve ucuzluk avantajına sahiptir ancak aşınma özelliklerinin çeşitli kaplamalarla iyileştirilerek kullanıldığı durumlarda daha verimli olabilmektedir. Yüzey kaplama işlemleri kimyasal olarak (sol-gel, anodizasyon), buhar fazında (PVD, CVD) ve termal püskürtme (plazma, HVOF) şeklinde gerçekleştirilebilir. Özellikle karmaşık geometriye sahip parçaların homojen bir şekilde kaplanabilmesi için çözelti içerisinde gerçekleştirilen eloksal kaplamalar ve akımsız Ni-B kaplamalar endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada Al7Si alaşımının aşınma performansının iyileştirilmesi için sert eloksal kaplama ve Ni-B kaplama işlemi tercih edilmiştir. Ayrıca söz konusu alaşımın talaşlı imalatta işlenebilirliğinin incelenmesi amacıyla karbür takımlar kaplanmamış ve katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile ZrN kaplanmış olarak test edilmiş ve takım aşınma performansları karşılaştırılmıştır.

#### 1.8.1. Eloksal (anodizasyon) ve sert eloksal kaplama

Malzemeler, mekanik, fiziksel, manyetik ve korozif özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli mekanizmalar ve yollar ile kaplanabilir. Alüminyum kullanımda birçok avantaj sunarken özellikle yetersiz tribolojik özellikleri sebebiyle

## 1. GİRİŞ

---

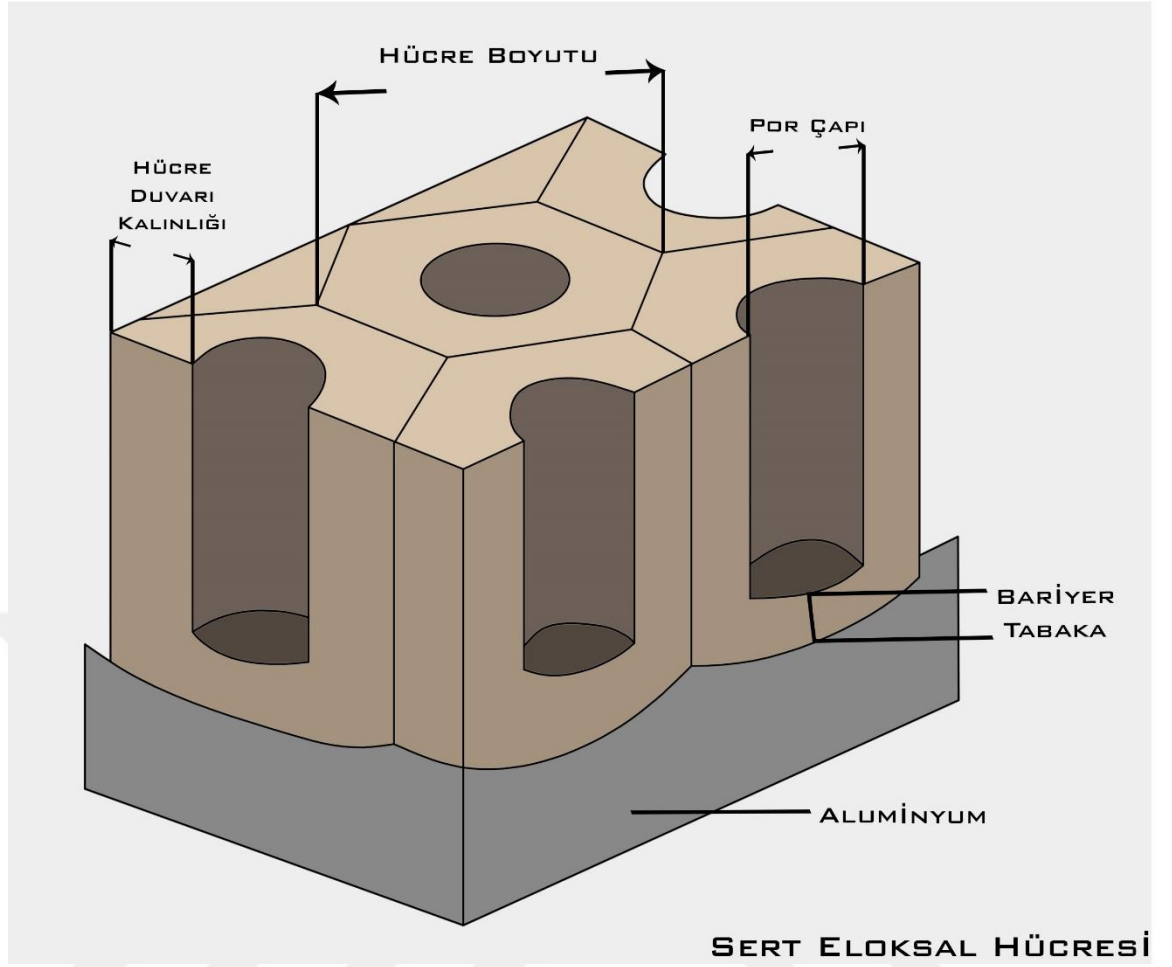
dezavantaja sahiptir. Kaplama işlemleri bu dezavantajın önüne geçmek için tercih edilen bir yoldur.

Alüminyumun doğası gereği hiçbir işleme maruz kalmadan yüzeyinde bir oksit filmi oluşur. Bu oksit tabaka sertlik için avantajlıdır ancak ince olduğunda ekstra bir fayda sağlamaz. Bu sebeple Al alaşımları sanayi uygulamaları için çeşitli yüzey işlemlerine tabi tutulur. Bunlardan biri de Anodizasyon yani eloksal işlemdir. Eloksal ismi Almanca bir terim olmakla beraber Uluslararası literatürde “Anodik Oksidasyon” veya “Anodizasyon” olarak ta bilinmektedir. Bu proses, yüzeyde yapay bir oksit tabaka oluşturmaktan ibarettir. Ayrıca temelde anot ve katot reaksiyonları barındıran elektrokimyasal bir işlemdir (Anonymous).

Eloksal tabakası alüminyuma tutunur ve onunla bütünleşir bu sebeple mükemmel sonuç almak mümkün olur. Eloksal yani  $Al_2O_3$  ciddi anlamda sert ve aşınmaya karşı mukavim olduğundan, Al alaşımı üstün özelliklere sahip olmuş olur. Asit ve diğer kimyasallara karşı da dayanıklı olan bu tabaka korozif direnci de artırır. Eloksal iki ayrı tabakadan oluşur. Bunlar; bariyer tabaka adı verilen ince, yoğun katman ve bu katman üzerinde oluşan porlu, kalın yapıdaki dış tabakadır. Eloksal tabaka kalınlığının %0,1-2’lik kısmı oldukça ince bir tabakadır ve bariyer tabakaya aittir. Bariyer kalınlığı elektrolitteki kompozisyon ve çalışma şartları ile ilişkilidir. Dış tabaka elektrolit etkisiyle porlu yapıdadır.

Aşağıda standart bir eloksal hücresi resmedilmiştir. Hücre boyutu hesabı aşağıdaki formül aracılığı ile hesap edilmektedir (Charles and Grubbs 2001).

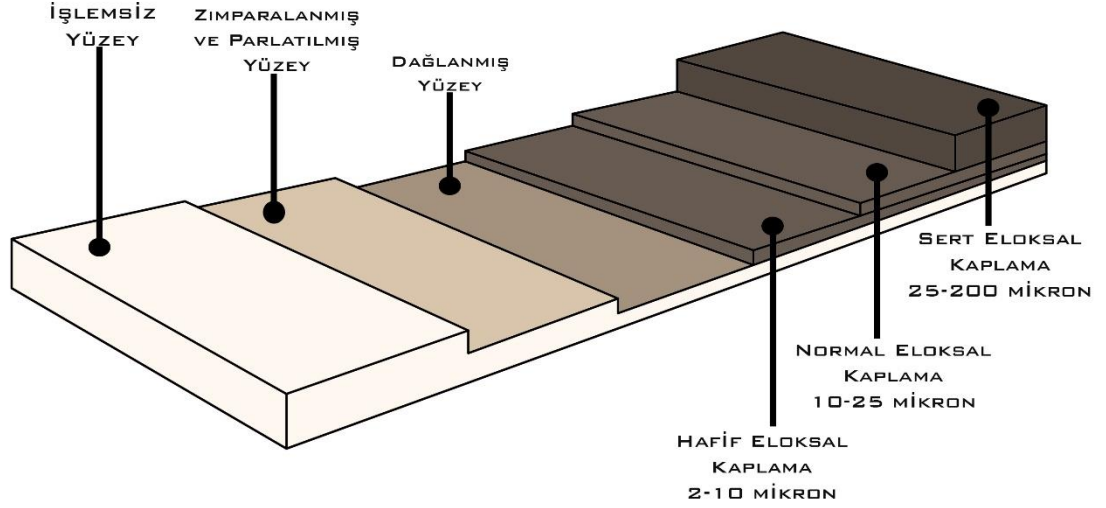
$$Hücre\ Boyutu = 2 \times Hücre\ Duvarı\ Kalınlığı + Por\ Çapı$$



Şekil 1.6. Eloksal hücrenin yapısı

Sert Eloksalın en belirgin özelliği yüksek aşınma dayanımıdır. Bu kaplama da anodik bir kaplamadır ancak diğer anodik kaplamalara göre daha kalındır. Daha özel anodizasyon şartları gerektiren sert eloksal, 25 ile 250  $\mu\text{m}$  arasında bir kalınlığa sahiptir ve kaplama süresi kaplama kalınlığına göre değişiklik gösterir.

## 1. GİRİŞ



Şekil 1.7. Çeşitli eloksallı kaplamaların kalınlıkları

Şekil 1.7’de gösterildiği gibi sert eloksallı (hard anodizing) diğer eloksallara kıyasla ciddi anlamda kalın bir tabakadır. Bu işlemdeki temel parametreler; elektrolitteki konsantrasyon: hacimce %5-15 sülfürik asit, akımdaki yoğunluk: doğru akım  $2-5 \text{ A/dm}^2$ , voltaj: 23-120 volt ve sıcaklık  $-5$  ile  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında olmalıdır. Sert eloksallı böyle bir aşınma direncine sahip olmasının yegâne sebebi ise anodizasyon sıcaklığı ve elektrolit konsantrasyonunun düşük tutulması ve artırılmış akım yoğunluğudur (Jozefowicz 2001).

### 1.8.2. Akımsız Ni-B kaplama

Yükseltgenmesi yani oksidize hale gelmesi kolay olan indirgeme malzemesi, çözültide mevcut ise bu kaplama işlemine akımsız indirgeme denir. Doğru parametrelerle istenen kalınlıkta kaplama yapılabilir. Akımsız yani elektriksiz Ni-B kaplamada dışarıdan hiçbir elektrik kaynağı gerekmez; metalik iyon kaynağı, indirgeme malzemesi, dengeleyicileri ve kalan unsurları içeren banyo çözültisi içerisine kaplanacak malzeme daldırılarak bir potansiyelin oluşturulduğu katalitik bir işlemdir (Delaunois et al. 2000). Oluşan potansiyel sonucunda (+) ve (-) yüklü iyonlar, kaplanacak malzeme yüzeyine çekilir ve yük taşınımı ile enerji oluşur. Ayrıca bu kaplamada karmaşık, girintili, delikli yüzeyler de rahatlıkla uniform şekilde kaplanabilir ve sonrasında herhangi bir yüzey işlemi gerektirmez. Katalitik cinsi kaplamada, çözültide bulunan iyonların indirgenmesi kontrol altındadır ve çözülti banyosu yalnızca

metalik malzeme yüzeylerini kaplayabilir. Karışım çözeltiler ve dengeleyiciler eşliğinde indirgeme tepkimesi termodinamikçe olasıdır. Ancak oldukça yavaştır bu sebeple indirgeme gerçekleşmeyebilir. Katalitik yüzey çözeltiye daldırıldığında, bu yavaş işlemin sebep olduğu atalet kırılarak indirgeme daldırılmış yüzeyde gerçekleşir ve böylece kaplama işlemi tamamlanmış olur. Kaplama malzemesi de katalitik cins olursa indirgeme kendi kendine devam eder (Gots 1984). Akımsız Ni-B kaplama işlemi, katalitik bir metal malzemenin bir diğer katalitik kaplama malzemesi yani Ni-B çözeltisine daldırılması suretiyle oto katalitik şekilde gerçekleşir. Akımsız Ni-B kaplama aşınmaya, takım çeliği ve sert krom kaplamalardan daha dirençlidir ve elektronik ve mikroçip teknolojilerinde Altına alternatif olabileceği ifade edilmiştir (Duncan and Arney 1984). Bunun haricinde petrol ve kimya sanayisinde, tıp alanında, uzay ve savunma sanayisinde, nakliye, madencilik, ahşap, kâğıt sanayinde ve otomotiv alanında da kullanılmaktadır.

Verimli bir akımsız kaplama için öncül işlem uygulanması zorunludur. Taban malzeme yeterli şekilde temizlenmezse kaplama ve malzeme arasındaki adezyon kötüleşir. Yüzeydeki pürüz, gözenekli yapıya sebep olur ve hızla bozunmaya sebebiyet verir. Elektriksiz Ni-B kaplamada uygulanan öncül işlemler, elektro kaplama ön işlemlerine çok benzer ancak daha titiz yapmak gerekir (ASMHandbook 1994).

### **1.8.3. Katodik Ark Fiziksel Buhar Kaplama**

Katodik ark buharlaştırma metodu genellikle TiN vb. sert ve aşınma direnci yüksek kaplamaların üretimi için tercih edilmektedir. Tekniğin yeter derecede homojenizasyon, yüksek düzeyde iyonize olma, ergimiş banyo ortaya çıkmadığı için her konumda kaplanabilme, basit sistemlerle yapılabilme ve uzun ömürlü katot kullanımı sağlaması gibi avantajları vardır (Vyskocil 1990). Dezavantajı ise kaynaktan çıkan dropletlerin sebep olduğu kaplama kalitesini azaltan makropartiküller ortaya çıkarmasıdır.

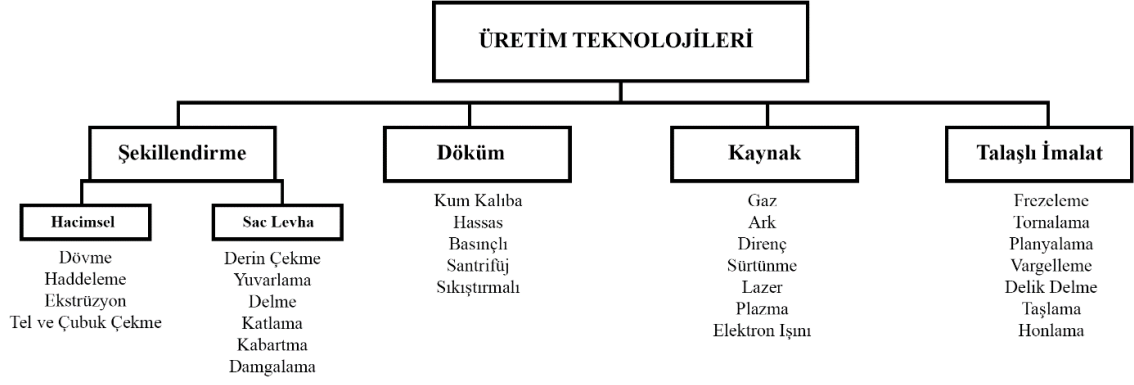
Katodik ark metodunda; buharlaşacak malzeme vakum odasında katot olarak, kaplanacak olan malzeme ise anot olarak konumlandırılır. İşlemde düşük voltajlı yüksek akım katot üzerinde ark oluşturur. Katot üzerinde ark meydana gelen noktalar çok

yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 2500°C) maruz kalabilir ve bu noktalar anında buharlaşır. Katot yüzeyinde ark oluşan noktalar durağan değildir ve sürekli yer değiştirirler. Böylece katot üzerinde homojen buharlaşma sağlanır. Oluşan buhar, katot önündeki yüksek elektron yoğunluğu olan bölgede çarpışarak iyonize olur ve bu iyonlar hızla taşınır. Bu yöntemle üretilen kaplama filmleri hedef yüzeye çok iyi yapışma özelliğine sahiptir. Taşıyabildiği kritik yükler 100N'a kadar ulaşabilir ve taban malzeme ile adezyonu oldukça yüksektir (Türküz 2006).

Katodik ark fiziksel buhar kaplama ile üretilen kaplama türlerinden birisi ZrN olup, bu kaplamanın uygulandığı takımlar birçok malzemenin talaşlı imalatında yüksek verim göstermektedir. ZrN'nin sahip olduğu iyi aşınma direnci, yüksek adezyon direnci ve kimyasal etkiyi minimuma indirmesi TiN kaplamalara bir alternatif olarak sunulabilmesi anlamına gelmektedir. Bu kabiliyeti sebebi ile takım kaplamalarında ve finiş için kullanılan titanyum alaşımli freze takım uçlarında da kullanılır. ZrN kaplamanın bir diğer önemli özelliği ise 45 GPa'nın üzerinde yüksek sertlik değerine sahip olmasıdır. ZrN kaplı takımlar, yüksek termal gerilmelere dayanır ve sergilediği iyi elastik plastik davranışlar, özellikle yüksek sıcaklıklardaki muntazam kesim şartlarını devam ettirmek noktasında önem arz etmektedir (Vereschaka et al. 2018). Kuru talaşlı imalat testlerinde sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesi ZrN kaplı takımlar ile de kolaylaşmıştır. Yapılan işlemlerde ZrN kaplı takımın mükemmel yüzey özellikleri ortaya koyduğu, çok yüksek adeziv aşınma direnci, yapışma ve sarma direnci sergilediği gözlemlenmiştir (Jianxin et al. 2007). 150-500 C° arasında çalışabilen ZrN kaplama, talaşlı imalatta verimli olmasının yanında dental sektöründe de tercih edilen bir malzemedir.

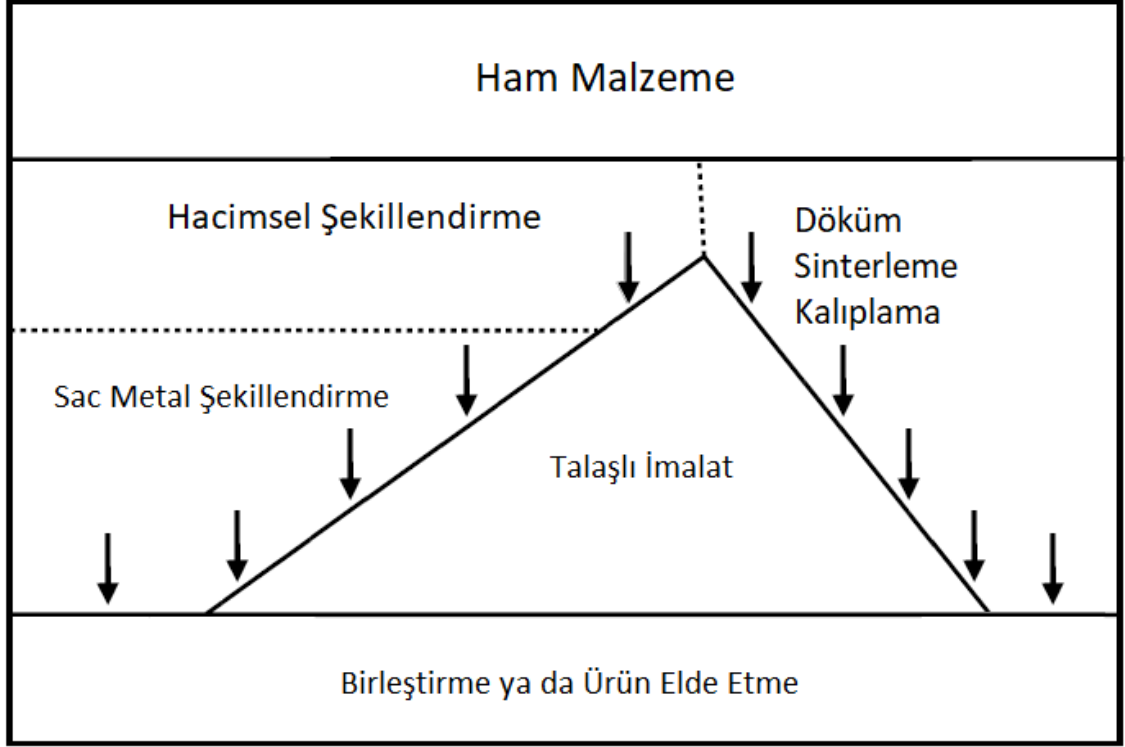
### 1.9. Üretime Genel Bir Bakış

Üretim, ham malzemelerin şeklini değiştirerek ürünler ortaya çıkaran bir süreçtir. Üretim teknolojileri, ham metal malzemeyi şekillendirip bir ürün haline getirene kadar birçok yöntemden faydalanır. Şekil 1.8'de temel üretim tekniklerinin ait bir sınıflandırma yapılmıştır (Youssef and El-Hofy 2008).



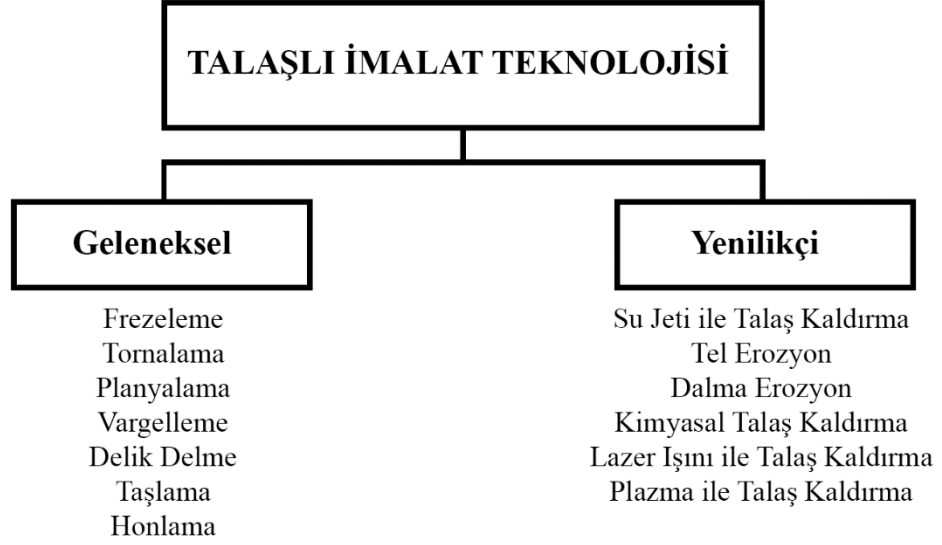
Şekil 1.8. Üretim teknolojilerinin sınıflandırılması (Youssef and El-Hofy 2008).

Plastik şekillendirme metotları yaygın olarak, metali gerekli şekle sokmak için güç uygulamak suretiyle uygulanmakta olup prosesler farklı ölçeklerde. Örneğin birkaç ton ağırlığındaki külçelerin dövülmesi ve haddelenmesinin yanı sıra sadece 0,025 mm çapındaki telin çekilmesine kadar şekillendirme yapılabilmektedir. Büyük ölçekli şekillendirme süreçlerinin çoğu yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir, böylece minimum kuvvet gerekir ve bunun sonucunda yeniden kristalleşme ile metalik yapı iyileştirilebilir. Soğuk şekillendirme ise yüzey pürüzlerinin giderilmesi ve yüksek boyut hassasiyeti gerektiğinde kullanılır. Metaller çubuk yahut plaka şeklinde üretilir. Diğer yandan döküm proseslerinde ise üretilen parça çeşitliği yüksektir. Metal ergitildikten sonra farklı kalıplara döküm yapılarak çok farklı geometriye sahip ürünler elde edilebilir. Üretim, plastik şekillendirme, döküm, sinterleme ve kalıplama gibi işlemleri ihtiva eder ve uygulamaları Şekil 1.9’da gösterilmiştir. Ham malzeme talaşlı imalata tabi tutulmadan önce döküm, hacimsel şekillendirme veya sac şekillendirme ile ön işleme tabi tutulur ve son işlem olarak genellikle talaşlı imalat uygulanır.



Şekil 1.9. Üretimin tanımı (Youssef and El-Hofy 2008)

Talaşlı imalatta, yüzey kalitesi, şekil ve boyut gibi istenen şartları elde edebilmek için malzemedeki fazlalıklar, iş parçası üzerinden belirlenen pasoda alınır. Plastik şekillendirme teknolojisiyle kıyaslandığında talaşlı imalat, hassaslık ve yüzey kalitesi söz konusu olduğunda işlenecek her parçaya rahatlıkla uygulanabilmektedir. Takım tezgâhları işletme ürünlerinin yaklaşık olarak %70'inin üretiminde kritik rol alır. Yenilikçi imalat teknikleri ise, geleneksel metotlarla kesilmesi zor, sert, dayanıklı ve kompleks parçaların işlenmesinde kolaylık sağlamaktadır. Şekil 1.10'da geleneksel ve yenilikçi talaşlı imalat teknolojisine ait bir sınıflandırma yapılmıştır (Youssef and El-Hofy 2008).



Şekil 1.10. Talaşlı imalat proseslerinin sınıflandırılması (Youssef and El-Hofy 2008)

### 1.10. Talaşlı İmalata Dair Bir Bakış

İmalat yani üretim, malzemeyi ham halinden işleyerek istenen geometri ve özelliklere sahip bir ürüne dönüştürür. Eskiden demircilerin döverek şekil verdiği metaller, bugün yine makineler ile dövülerek ya da işlenerek şekillendirilmektedir. Talaş kaldırma süreçlerinde, iş parçası üzerinden fazlalık malzeme belirlenen pasoda talaş kaldırarak alınır ve amaçlanan geometri elde edilir. Geleneksel talaş kaldırma yöntemleri halen sanayide kullanılmakta ve imalatın bel kemiği olmayı sürdürmektedir. Bu makinalarda, kesilen malzemelerden daha sert ve uygun geometriye sahip uçlu takımlar kullanılarak mekanik kesme işlemi ile talaş kaldırılır. İşlemler sonucunda, istenen geometrilere sahip ve ham malzemedan daha işlevsel bir ürün elde edilir. Talaşlı imalatın temel avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Birçok geometrideki malzeme kolaylıkla işlenebilir.
- ✓ Birçok malzeme türü kolaylıkla işlenebilir.
- ✓ Stabil ve doğru işleme yapılabilir.
- ✓ İşlem sonrası yüzey kalitesi ve toleranslar oldukça yüksektir.

Talaşlı imalatın önemli dezavantajları ise, ortaya çıkan atık talaş, uzun süren işleme süreçleri ve takım aşınmalarının sebep olduğu yüksek maliyetlerdir. Talaş miktarı, ürün geometrisine yakın boyutlardaki kütükler işlenerek azaltılabilir. İşlem süreçleri içinse yüksek hızlı talaş kaldırma ve akıllı talaş kaldırma modülleri bir nebze çözüm sunmaktadır. Akıllı talaş kaldırma (i-machining), CNC (Computer Numerical Control) tezgâhlarında kullanılan ve CAM (Computer Aided Manufacturing) uygulamaları üzerinden koordine edilen bir modüldür. Takım aşınmalarının azaltılabilmesi için ise operasyon tipine ve malzeme türüne uygun kaplanmış takımların doğru kesim parametreleri ile kullanılması gerekmektedir

### 1.11. Talaşlı İmalatta CNC Teknolojileri

Yapılan CAM modellemesinin ardından kullandığı standart G-kodları vasıtası ile insan eli değmeden işleme ve imalat yapabilen tezgâhlara CNC adı verilir. Bugün CNC takım tezgâhları imalatın her aşamasında göze çarpmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte kompleks parçaların seri ve hassas olarak imal edilmesi bir zorunluluk olmuştur. Konvansiyonel tezgâhlarda operatör tecrübesine göre uygun imalat yapılsa bile CNC’de olduğu gibi kısa sürede seri ve hassas imalat yapılması mümkün değildir. İnsan faktörü devreye girdiği andan itibaren, tecrübeli bir operatör aynı hassasiyette birkaç parça üretse bile tamamında aynı kaliteye ulaşılması mümkün değildir. Ancak CNC tezgâhları bunu binlerce kez tekrar edebilmektedir. CNC tezgâhların sahip olduğu bazı avantaj ve dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

*Avantajlar;*

- Konvansiyonel tezgâhlarda işleme öncesi yapılan ayarlamalar CNC’ye kıyasla uzun sürmektedir.
- Ölçü, kontrol ve el hareketleri nedeniyle ortaya çıkan zaman kaybı ortadan kalkmıştır.
- İşleme esnasında insan faktörü olmadığından seri ve hassas imalat mümkündür.
- Tezgâhlar yüksek hassasiyette çalışır, çalışma temposu sürekli yüksek ve standarttır.
- Malzeme, emek ve enerji sarfıyatı minimuma indirgenmiştir.

- Operatör hataları ortadan kaldırılmıştır.
- İmalat büyük oranda esnektir, istenen değişiklikler kolayca sağlanır.

### *Dezavantajlar;*

- Detaylandırılmış bir üretim planı gerekmektedir.
- Tezgâhın ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- Tezgâhın çalışma/saat ücreti yüksektir.
- Geleneksel tezgâhlara kıyasla daha düzgün kullanım ve bakıma ihtiyaç duymaktadır ayrıca bakım maliyeti de yüksektir.
- Kesme hızları yüksek olduğu için kaliteli takım kullanılması zorunludur.
- Uzman kişiler tarafından düzenli bakımı yapılmalıdır.

### **1.12. i-machining Modülü ve İşlevleri**

Akıllı talaşlı imalat modülleri CAM programları içerisinde yer alan bir modüldür. SolidCAM yazılımı içerisinde yer alan i-machining modülü CNC imalatının yenilikçi bir işlevidir. CNC tezgâhlarda geleneksel CAM programları ile belirlenen kesim parametreleri, işlenecek parçaya göre farklılık göstermek kaydı ile işlem süresince değişmez. Bu modül talaşlı imalatı optimum hale getirerek dinamik kesim parametreleri ile hızlı kesim ve yüksek takım ömrünü bir arada sunmaktadır. Bu parametrelerden bazıları; devir sayısı, paso miktarı, yana kayma miktarı, imalat ve takım malzemesi parametreleri vb. olarak çoğaltılabilir CAM uygulamasında kullanılan i-machining döngüsü Şekil 1.11’de verilmiştir. Modülün kullandığı strateji; işlenecek geometri, talaş kaldırılacak malzemenin türü, kesici takım malzemesinin türü ve talaşlı imalatta kullanılacak takım tezgâhının kapasitesine bağlı olarak temel kesme parametreleri olan iş mili devri, ilerleme miktarı ve takım yana kayma değerlerinin optimize edilmesidir. Programa başlangıç verisi olarak girilen özelliklerden sonra, program seçilen geometri için hacimsel olarak kaldırılacak talaş miktarını hesaplamakta ve elde edilen bu değere göre takım yana kayma miktarı dinamik olarak değişmektedir (Durmaz 2018).



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

#### 2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Literatürde yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Akkera ve arkadaşları, AlSi ve AlMg alaşımlarını döküm yöntemiyle hazırlayarak ikincil zengin fazda homojen dağılım elde etmiş ve bu numunelerin mikro yapı analizlerini, sertlik değerlerini, çekme dayanım özelliklerini ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sertlik, akma ve çekme direncinin AlSi içerisindeki Si miktarı ve AlMg içerisindeki Mg miktarı artışına bağlı olarak arttığını, aşınma oranının ise alaşımın kompozisyonuna bağlı olduğu, alaşımlarda Si ve Mg içeriği arttıkça aşınma direncinin azaldığı sonucuna varmışlardır (Akkera et al. 2016).

Summer ve arkadaşları, pompaların kayar bağlantılarındaki sürtünme ve aşınma sürecini incelemişlerdir. Bu çalışmada yakın ötektik yapıya sahip iki ayrı AlSi alaşımı farklı üretim sürecinden geçmiş ve tribolojik açıdan sınıflandırılmıştır. Bunlar gerçek hayattaki hasarların pompa testine yansıtıldığı özel test metotlarıyla yapılmıştır. Sonuç olarak AlSi ötektik madde yapısının aşınma performansına önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir. Öte yandan Si miktarının aşınma direncini ciddi oranda arttırdığını gözlemlemişlerdir (Summer et al. 2020).

Yapılan bir çalışmada Raghukiran ve Kumar, hiperötektik AlSi alaşımının farklı kompozisyonlarını (%13-16-19-22 Si içeren) ve AlSi<sub>2</sub>Sc<sub>2</sub> (%13-16-19-22 Si ve %0,8 Sc içeren) alaşımları püskürtme yöntemi ile üretmiştir. Bu alaşımların mikro yapılarında 5-10 µm çapındaki silisyum fazlarının gayet homojen dağıldığını görmüşlerdir. TEM aracılığı ile AlSi<sub>2</sub>Sc<sub>2</sub> yapıda V fazları görmüşler ve bu fazlar iyi sertlik değerlerine ulaşmalarına sebep olmuştur. Numuneleri pin-on disk yöntemi ile aşınmaya maruz bırakmışlar ve düşük silisyum içeren numunelerde, üçlü yapı yani AlSi<sub>2</sub>Sc<sub>2</sub> alaşımları, ikili yapı yani AlSi alaşımlarına göre daha iyi aşınma performansı verdiğini kaydetmişlerdir. Ancak yüksek silisyum içeren numunelerde aşınma performansı arasında kayda değer bir fark görememişlerdir (Raghukiran and Kumar 2015).

Yapılan bir çalışmada, çok sayıda avantajı olduğundan yaygın olarak kullanılan alüminyumun özellikle otomotiv sektöründe yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından ötürü, Al7Si ve Al11Si taban malzemelerini Pin-on disk metoduyla 25 ve 180°C’de aşınma testine maruz bırakmışlardır. Sıcaklık ile birlikte aşınmanın da ciddi oranda arttığı sonucuna varmışlardır. Sonuç olarak silisyum artışı ile malzeme içerisindeki silisyum fazları birbirine yaklaştığı için aşınma direncinin ve sertliğinin arttığını ve Al11Si’un hali hazırda kullanılan fren disklerine alternatif olabileceğini açığa çıkarmışlardır (Ölmez ve Keleşoğlu 2016).

Tomlison ve arkadaşları, Al12Si üzerine lazer yüzey alaşımlandırma (laser surface alloyed) işlemi uygulamış ve numuneleri saf su içerisinde ultrasonik etki ile aşınmaya maruz bırakmışlardır. Yüzeydeki erozyon ve kütle kaybı mikroskobik incelemeler sonucunda ölçülmüştür. Kaplama malzemesi olarak Fe ve Ni alaşımları, Mn, Cu ve Cr kullanmışlardır. Fe ve Ni alaşımlı kaplamaların bu erozyona karşı diğerlerine göre daha dirençli olduğunu görmüşlerdir (Tomlinson and Bransden 1994).

Özkan ve arkadaşları, dizel motorlarda kullanılan AlSi piston malzemesi üzerine plazma püskürtme ile AlSi/B<sub>4</sub>C kaplamışlardır. %5-25 civarı B<sub>4</sub>C tozu içeren AlSi/B<sub>4</sub>C kompoziti mikroyapı, mikrosertlik, yapışma gücü ve termal dayanım açısından incelemiştir. SEM analizi sonucunda bor karbürün kompozit içerisinde homojen olarak dağıldığını ve bor karbür miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik, kaplamanın genleşme katsayısı azaldığını ek olarak AlSi alaşımının sertliğini arttırdığını görmüşlerdir (Sarıkaya vd. 2005).

Voevodin ve arkadaşları, alüminyum taban malzeme üzerine Al-Si-O kaplamalar uygulamışlar ve aşınma performanslarını incelemiştir. Geleneksel kaplama metotları yeterli adezyon sunmadığı için mikro ark oksidasyon metodu ile 100-200 µm kalınlığında Al-Si-O kaplama yapmışlardır. Bu işlem sonrasında kompozit bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> yapısı elde etmişlerdir. Çeşitli testler uyguladıkları numuneler üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (sert eloksal) ve yumuşak alüminasilikat fazı görmüşlerdir. Eloksal kalitesi maksimum olan numunede 17 GPa sertlik değeri elde etmişler ve minimum sürtünme katsayısını Al<sub>0.26</sub>Si<sub>0.08</sub>O<sub>0.66</sub> kaplamada elde etmişlerdir (Voevodin et al. 1996).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Yapılan bir diğer çalışmada Özel ve Vural, içerisinde bazı elementleri farklı oranlarda içeren bir alüminyum alaşımı (%12,6 Si, %1,96 Ni, %0,88 Cu, %0,6 Mg, %0,5 Fe) yüzeyine  $Al_2O_3+13TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$  ve  $Cr_2O_3+25Al_2O_3$  tozlarını plazma püskürtme metodu ile kaplamışlardır. Deneyler sonucunda plazma püskürtme metodunun iyi yüzey kalitesi vermediği ve gözenekli bir kaplama yapısının oluştuğunu görmüşlerdir. En iyi yüzey kalitesini  $Cr_2O_3$  ile kapladıkları numuneden, en kötü yüzeyi ise  $Cr_2O_3+25Al_2O_3$  tozu ile kaplanan numuneden almışlardır (Özel ve Vural 2015).

Sadeler ve arkadaşları, alüminyum alaşımları üzerine uygulanmış ticari sert eloksal kaplamanın aşınma yorulması üzerine çalışmışlardır. T6 alüminyum üzerine 20-25  $\mu m$  kalınlığındaki sert eloksal kaplama uygulanmış numunenin, işlem öncesindeki sertliği 175 HV iken işlem sonrası 380 HV civarına çıktığını gözlemlemişlerdir. Aşınma etkisinin kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin her ikisi içinde yorulma ömrünü oldukça azalttığı bilgisine ulaşmışlar ve kaplamanın aşınma yorulması dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir (Sadeler vd. 2009).

Kong ve arkadaşları 7475 Alüminyum alaşımlarının anodik oksidasyon yani eloksal kaplama ile sergiledikleri sürtünme ve aşınma performansını incelemişlerdir. Sonuç olarak yüzeyde biriken oksit eloksal filminin difüzyon ve tutunma durumunun bahsi geçen performansları etkilediğini, yüzey sertliğinin aşınma direncindeki ana faktör olduğunu, eloksal kaplama ile sertlik artışının sağlandığını ve abrazyon aşınma dayanımının arttığını ve sürtünmede azalma olduğunu gözlemlemişlerdir (K. Dejun et al. 2016).

Zhu ve arkadaşları AlSi üzerine kaplanan eloksal tabakasının oluşum ve büyüme mekanizmasını incelemişlerdir. Silisyuma Sr ilave ederek modifikasyon ve eşzamanlı yönlenmiş katılaşma sağlanmış ve bunu mikro yapısal özellikleri değiştirmek için kullanmışlardır. Sonuç olarak Si fazları arasında anodize olmayan Al fazlarının alaşım içinde kalabildiğini ve Si parçacıklarının geometrisi ve morfolojisine bağlı olarak bazı Al fazlarının anodizasyonunun gerçekleşemeyeceğini, ayrıca silisyum fazlarının oksidasyonu yer yer önleyebildiğini görmüşlerdir (Baiwei Zhu et al. 2016).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Khan ve arkadaşları, plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi ile alüminyum yüzeyleri farklı döngü ve referanslar çerçevesinde darbeli tek kutuplu akım ve doğru akım kullanarak eloksal ile kaplamışlardır.  $Al_2O_3$  üzerinde ortaya çıkan artık gerilmeler XRD ile değerlendirilerek kaplama kalınlığı etkisinin görülmesi hedeflenmiştir. Bu işlem neticesinde kaplama yapılan yüzeyde, kaplama kalınlığı boyunca -45 MPa ile -422 MPa arasında kesme ve -111 MPa ile -818 MPa arasında değişen normal gerilme gradyanının var olduğu görülmüş ve bu gerilmeleri azaltmak için eloksal kalınlığının arttırılmasını çözüm olarak önermişlerdir (Khan et al. 2005).

Fratila ve arkadaşları Al10Si alaşımı ve %3 Cu içeren Al10Si alaşımı üzerindeki eloksal oksit filmini incelemişlerdir. Alaşım içerisindeki Alüminyumun, Silisyuma nazaran anodik oksidasyona daha hızlı uğradığını yani alüminyumun, silisyuma göre daha kolay oksitlendiğini görmüşlerdir. Ayrıca silisyumun eloksal kaplama kalitesini düşürdüğünü, silisyum fazları üzerinde oksitlenme sebebiyle gaz boşlukları oluştuğunu ek olarak bu boşlukların tüm yüzeylerde oluştuğunu görmüşlerdir. Bakır içeren Al10Si alaşımında ise  $CuAl_2$  fazları oluşmuş ve bakır ile birlikte bu yapıların yüzey filminde tespit edilmesiyle malzemenin tam olarak oksidasyona uğramış olduğunu açığa çıkarmışlardır (Fratila-Apachitei et al. 2004).

Forn ve arkadaşları sert eloksal kaplı döküm AlSi alaşımlarından sıkça karşılaşılan yeterli yüzey kalınlığına ulaşamama ve homojenleşememe sorunu üzerine çalışmışlardır. Bu sorunlara çözüm için Thixocasting yarı katı metal şekillendirme yöntemini kullanmışlardır, bu yöntem gözenekliliği ve yüzeyde hapsedilen gaz miktarını azaltmaktadır. Kaplanmış numuneleri T5 ısıl işlemi (6 saat  $170^{\circ}C$ ) ve T6 ısıl işlemine (5 saat  $540^{\circ}C$ ) tabi tutmuşlar ve T6 işlemi uygulanan numunenin T5'e göre sürtünme katsayısı ve aşınma oranı açısından daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Bu işlemler sonrasında yüzey üzerinde oluşan anodik oksit tabakası daha homojen dağılmış ve daha küresel Si fazları elde etmişlerdir (Forn et al. 2007).

Bülbül ve Çelik, akımsız Ni-B kaplanmış saf titanyumun ısıl işlem sonucu performansını incelemişlerdir. Titanyumun kullanım alanındaki genişliğe istinaden düşük sertliği, aşınma dayanımını ve yüksek sıcaklık karşısında gösterdiği düşük

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

korozyon direncini iyileştirmek üzere Ni-B kaplama uygulamışlardır. Akımsız Ni-B kaplanmış saf titanyum numuneye 450, 650 ve 850°C’de ısıtım işlemi uygulanmış, geleneksel karakterizasyon yöntemleri ile numuneleri karakterize etmişlerdir. Üzüm salkımı şeklinde, amorf bir kaplama yapısı gözlemlenmiştir. Isıtım işlemi sıcaklıklarını arttırdıkça kaplamada amorf yapı yerine Ni<sub>2</sub>B ve Ni<sub>3</sub>B ortorombik kristal yapıları elde etmişler ek olarak bu durumun sertlik ve aşınma dayanımını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır (Bülbül ve Çelik 2014).

Pal ve Jayaram, AISI 1018 yumuşak çelik üzerine yapılan akımsız Ni-B kaplamanın sertlik, kuru aşınma ve mikroyapı incelemelerini yapmışlardır. Sertlik, aşınma ve sürtünme performansının borid fazlarının büyüklük ve uzunluğuna ciddi anlamda bağlı olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca yaptıkları testlerde genel olarak kristal borid fazlar arttıkça kaplamanın sertliğinde ve aşınma direncinde artış olduğunu görmüşlerdir. Buna ek olarak sürtünmede de azalma olduğu sonucuna varmışlardır (Soupitak Pal and Jayaram 2018).

Vitry ve arkadaşları akımsız Ni-B kaplamayı Al alaşımları üzerinde oda sıcaklığında büyütmüş, ısıtım işlemi ve birçok teste tabi tutmuştur. Isıtım işlemleri, 400°C’de 1 saat ve 180°C’de 4 saat boyunca uygulanmış ve numunelerden sertlik ölçümleri alınmıştır. Sonuç olarak tüm testler sonrasında iki numunenin de yüksek aşınma direncine sahip olduğunu ve 400°C’de 1 saat fırınlanıp su verilen numunede maksimum sertlik ve aşınma direnci olduğunu tespit etmişlerdir (V. Vitry et al. 2007).

Jianxin ve arkadaşları WC takım üzerine magnetron sıçratma PVD tekniği ile ZrN kaplama işlemi uygulamış ve kaplamanın mikro yapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaplamaların bir kısmını Zr ara tabaka kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kuru şartlarda sert çelik üzerinde talaşlı imalat yapmışlar ve yüzey görüntülerini incelemişlerdir. Zr ara tabaka kullanılan ZrN kaplanmış takımın, ara tabaka kullanılmayan kaplamaya oranla daha yüksek sertliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca takımlarda oluşan yan kenar aşınması değerlerini ölçmüşler ve Zr ara tabaka içeren ZrN kaplı takımın daha verimli olduğunu belirtmişlerdir (D. Jianxin et al. 2007).

Siow ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada TiCN ve ZrN/TiCN kaplı WC takımlar ile TiN kaplı WC takımların aşınma performanslarını karşılaştırmışlardır. Kaplamalar içerisinde yüksek yüzey sertliğine sahip takımın TiCN ile kaplanmış takım olduğunu, ZrN/TiCN kaplı takımların ise TiN kaplı takımlara göre daha yüksek sertliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda tüm kaplamaların, kaplanmamış takımlara göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduklarını, WC takım üzerinde oluşan aşınmayı ciddi oranda azalttığını ve kesici takımların performansını önemli oranda iyileştirdiğini ifade etmişlerdir (Siow et al. 2012).

Literatürde yapılan bu çalışmalar incelendikten sonra AlSi alaşımlarının aşınma performansı üzerine birçok çalışma yapılmış olduğu gözlenmiştir. Sert Eloksal kaplı AlSi alaşımlarının aşınma performansı üzerine sınırlı çalışma olmakla birlikte Ni-B kaplı AlSi alaşımları üzerine yapılan çalışmalara ve bu iki kaplamanın AlSi üzerine uygulanarak kıyaslandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca kesici takım malzemesi üzerine kaplanan ZrN ince filminin karakterize edildiği çalışmalar yapılmış olmakla birlikte, takımların gerçek kesme şartlarındaki performansının karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışma yapılmamıştır. Bu doğrultuda yapılan tez çalışmasında, imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan Al7Si alaşımının farklı yüzey işlemleri ile aşınma dayanımının artırılması ve söz konusu alaşımın talaşlı imalatta verimli/ekonomik bir şekilde işlenebilmesi için etkili bir kesici takım kaplaması önerilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla döküm Al7Si alaşımı numunelere çökelme sertleşmesi ısıl işlemi, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası numunelerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri karakterize edilmiştir. Ayrıca Al7Si alaşımının, kaplanmamış ve ZrN ile kaplanmış karbür parmak frezelerle talaşlı imalat performansı araştırılmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında taban malzeme olarak %7 oranında Silisyum içeren döküm Al7Si alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan alaşım, Erzurum Teknik Üniversitesi ile ikili iş birliği protokolü bulunan CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş (İzmir) firması tarafından temin edilmiştir. Deney numuneleri kaplama işlemleri öncesi sırasıyla 80, 240, 400, 600, 800 ve 1200'lük zımparalarla zımparalanmış ve sonrasında elmas süspansiyonla yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyleri hazırlanan numuneler üzerine Sert Eloksal kaplama ve akımsız Ni-B kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemleri MGM Metal Kaplama firması (Kocaeli) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kaplama parametreleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Sert Eloksal ve Ni-B kaplama parametreleri

Numune	Sıcaklık (°C)	Akım Yoğunluğu (A/dm <sup>2</sup> )	İşlem Süresi (dak)	Elektrolit Konsantrasyonu (% hacim)
Sert Eloksal	-5/-10	DC/1-1,5	2,40	%20 Sülfirik asit

Numune	Sıcaklık (°C)	Bor Oranı (%)	pH	Kaplama Süresi (dak)	Kaplama Hızı (µm/dak)
Ni-B	88-90	12	4,6-4,8	2,30	10-12

Çalışma kapsamında Al7Si alaşımının talaşlı imalat performansının belirlenmesi amacıyla frezeleme işlemi uygulanmıştır. Alaşımın frezeleme prosesinde 12 mm çaplı karbür (WC) parmak frezeler, kaplamasız ve katodik ark fiziksel buhar kaplama yöntemi ile ZrN kaplanmış hali ile kullanılmıştır. Kesici takımlar Karcan Kesici Takım Sanayi Ticaret A.Ş (Eskişehir) tarafından temin edilmiş olup 3 ağızlı 123 serisi Alüminyum işleme takımları kullanılmıştır.

#### 3.2. X Işını Kırınım (XRD) Analizi

Kaplanmış numuneler üzerinde oluşan fazlar  $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$  dalga boyunda Cu-K $\alpha$  radyasyonu ile Şekil 3.1’de verilen GNR-Explorer XRD cihazı vasıtası ile belirlenmiştir. Alınan sonuçlar simetrik tarama konfigürasyonu vasıtası ile 10-90° bandında yapılmış ve alınan pikler Match programı ile değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1. XRD cihazı

#### 3.3. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, Şekil 3.2’de resmi verilen Bruker-UMT tribometre test cihazı kullanılarak Çizelge 3.2’de görülen parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Testler sonrası aşınma hacimleri hesaplanarak yüzey işlemleri arasında karşılaştırma yapılmıştır.

İşlemsiz ve kaplanmış kesici takımların talaşlı imalat performansının irdelenmesi için yapılan yüksek hızlı frezeleme prosesi sonrasında, takımlarda oluşan yan kenar aşınma değerleri belirlenmiştir. Ek olarak takımlar imalattan önce ve sonra hassas terazi ile tartılmış ve kütle kaybı değerleri hesaplanmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.2. Aşınma test parametreleri

Deney parametreleri	Değerler
Test türü	İleri-Geri (Reciprocating)
Uygulanan yük (N)	5
Aşınma stroğu (mm)	4
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Aşındırma süresi (s)	3600
Karşı bilye malzemesi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru Şartlar



Şekil 3.2. Aşınma test cihazı

#### 3.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri

İşlemsiz ve kaplanmış deney numunelerinin yüzey görüntüleri, kaplama kalınlıklarının tespiti için kesit görüntüleri, aşınma izleri ve aynı şekilde işlemsiz ve ZrN kaplanmış kesici takımlarla yapılan frezeleme işlemi sonrası takım üzerinde oluşan yan kenar aşınma genişlikleri, FEI QUANTA-FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

#### 3.5. 3D Yüzey Profilometre Analizleri

Aşınma testleri sonrası numunelerin aşınma hacimlerinin hesaplanması için Şekil 3.4'te resmi verilen Bruker Contour-GT 3D profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma izlerinden 10'ar adet ölçüm alınarak, iz kesit alanı ve iz uzunluğu çarpılmak sureti ile aşınma hacmi hesaplanmıştır. Ayrıca frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların iş parçası üzerinde meydana getirdiği yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tespiti de aynı cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. 3D Profilometre cihazı

#### 3.6. Mikrosertlik Analizleri

Kaplanmış ve kaplanmamış Al7Si alaşımı numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 3.5'te verilen SHIMADZU HMV-G20 cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümler için Vickers metodu uygulanmış, 2 kg yük altında 10 sn beklenecek ve numune yüzeyinde rastgele belirlenmiş noktalardan 10 adet ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri elde edilmiştir. ZrN kaplanmış kesici takım malzemesinin sertlik değerinin belirlenmesi için 50 gr yük kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Mikrosertlik cihazı

#### 3.7. Dağlama İşlemleri ve Mikroyapı Analizleri

Çalışmada kullanılan Al7Si alaşımının mikroyapı incelemeleri için numuneler, %5 HF asit 500 ml su ile seyreltilerek hazırlanan karışım ile 7 sn dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca Sert Eloksal ve Ni-B kaplı numunelerin kaplama kalınlıklarının belirlenmesi için bakalite alınarak hazırlanan kesit numuneleri de aynı çözelti ile dağlanmıştır. ZrN kaplama kalınlığının belirlenmesi için ise WC malzeme seyreltilmemiş kral suyu ( $3\text{HCl} + \text{HNO}_3$ ) ile dağlanmış ve işlem süresi yaklaşık 1 dakika olarak alınmıştır. Dağlanan Al7Si numunesinin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.6'da verilen ZEISS Axiocam 503 Color marka cihaz ile elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Optik mikroskop

#### 3.8. Isıl İşlem

Al7Si alaşımına 540°C’de 240 dakika ısıl işlem uygulanıp, oda sıcaklığında su verildikten sonra 158°C’de 177 dakika süresince yaşlandırma işlemi uygulanmış ve numuneler fırında soğutulmuştur. Bu işlem için Şekil 3.7’de gösterilen Protherm Furnaces ısıl işlem fırını kullanılmıştır.



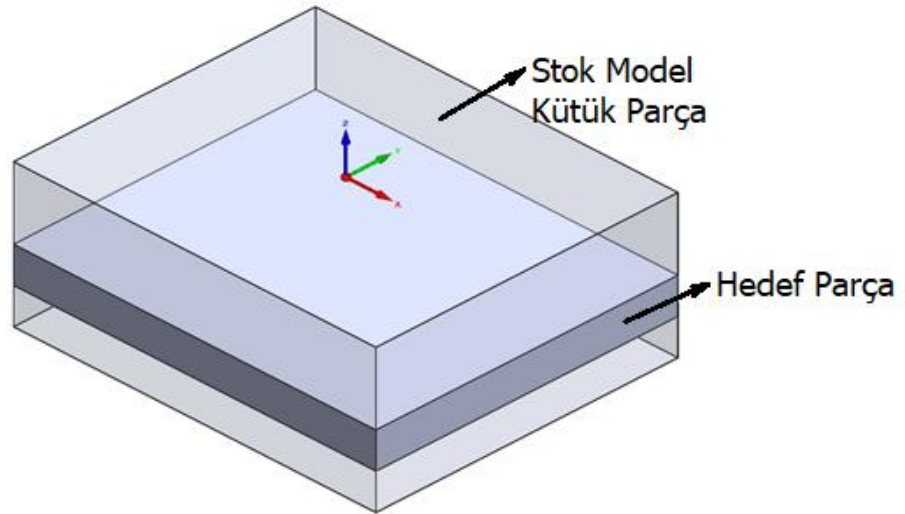
Şekil 3.7. Isıl işlem fırını

#### 3.9. SolidCAM i-machining Programlama ve Yüksek Hızlı Freze İşleme

Bu tez çalışmasında Al7Si alaşımı kütük parçalara uygulanan frezeleme işleminde Şekil 3.8’de görülen Haas-VF2 üç eksenli CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Kullanılan kütük parçalar 90x75x40 mm ölçülerinde prizmatik geometriye sahiptir. Frezeleme operasyonu için gerekli olan G-kodları SolidCAM i-machining yazılımı ile elde edilmiş olup 2.5 eksen frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. CAM programlama için hazırlanan hedef ve stok (kütük) modeller Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



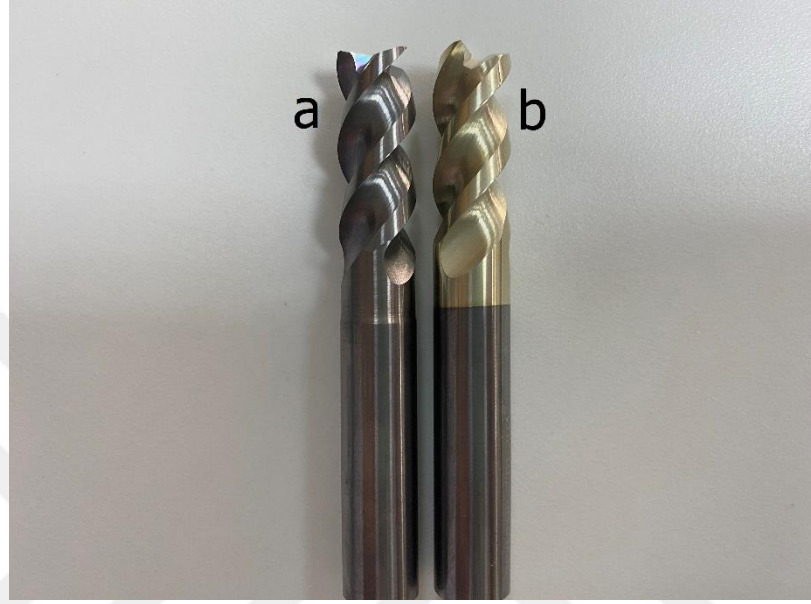
Şekil 3.8. CNC freze tezgahı



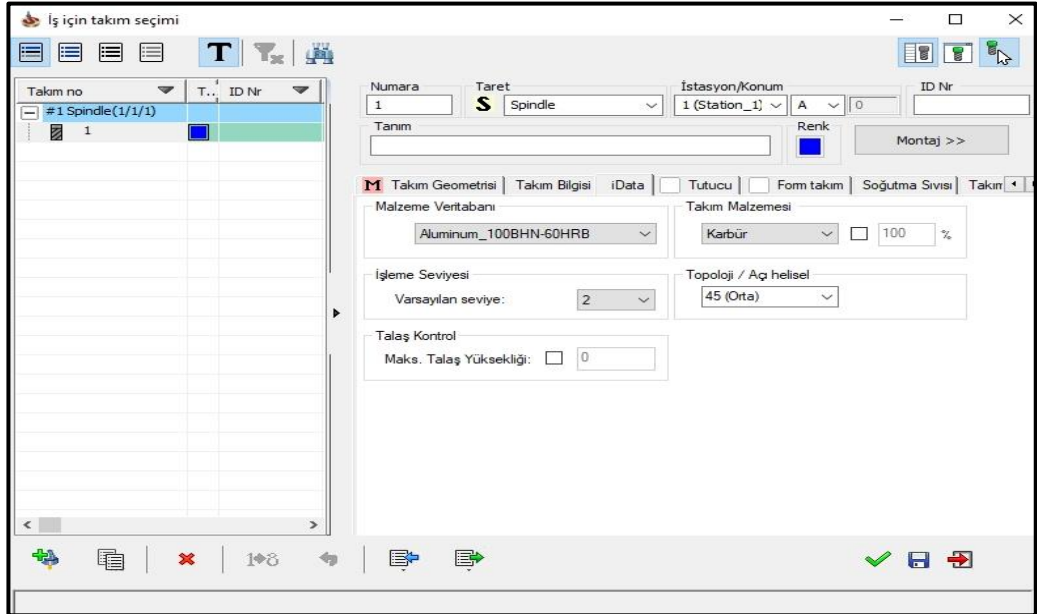
Şekil 3.9. CAM programında simüle edilen stok ve hedef model

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

İşlenecek parçanın sıfır noktası için kütük parçanın üst orta noktası seçilmiştir. Frezeleme işlemleri, 12 mm çaplı, 3 ağızlı ve 45° helis açısına sahip ZrN kaplı tungsten karbür (WC) ve kaplanmamış WC parmak frezeler ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Takım malzemesi ve kesilecek parça malzemesinin seçimine dair program adımı Şekil 3.11’de verilmiştir.



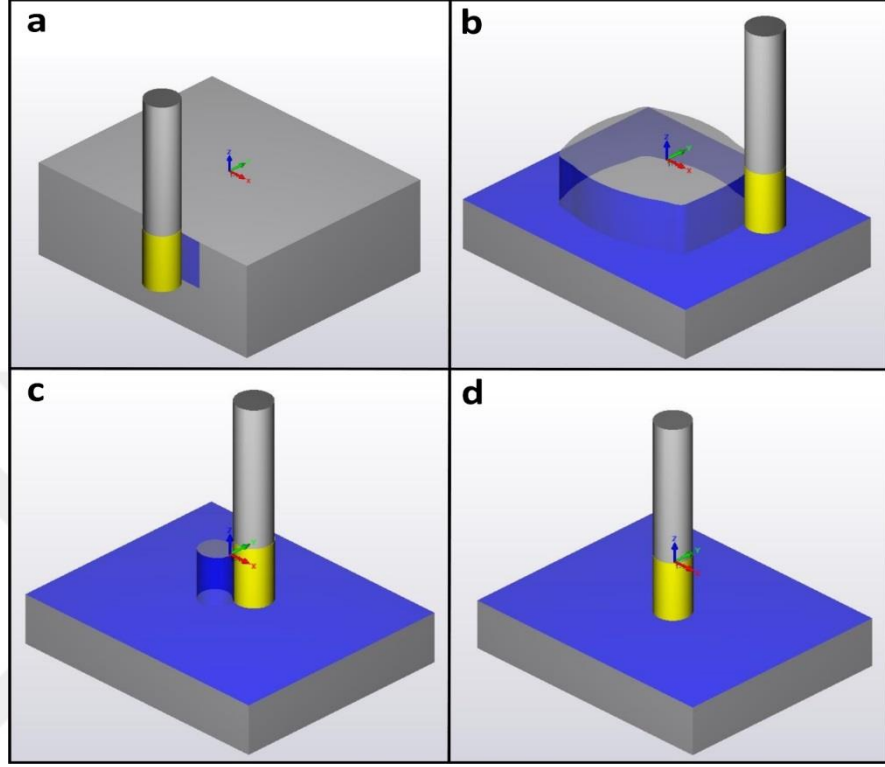
Şekil 3.10. Talaşlı imalatta kullanılan takımlar (a) kaplanmamış WC takım, (b) ZrN kaplanmış WC takım



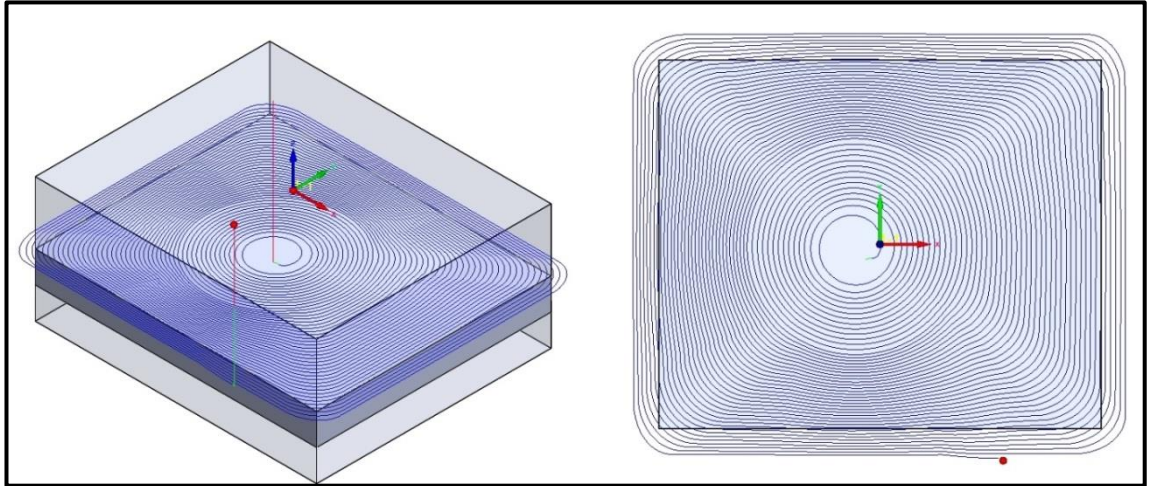
Şekil 3.11. İş takımı seçimi

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

SolidCAM işlem adımları yani simülasyon aşamaları ve oluşturulan takım yolları sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13'te verilmiştir. Kullanılan takımın toplam helis boyu 25 mm olup, frezeleme işleminde Z pasosu 20 mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.12. SolidCAM imalat adımları

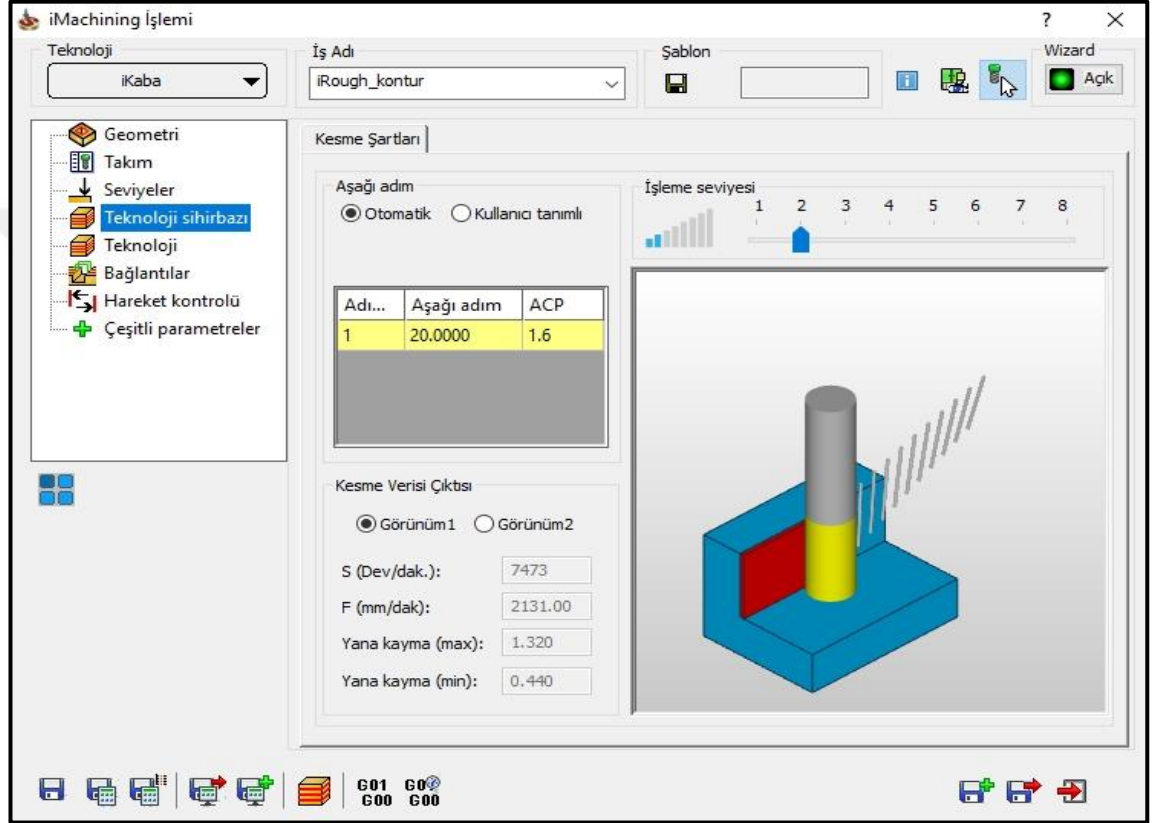


Şekil 3.13. Takım yolu gösterimi

CAM programında kullanılan i-machining işlemi için işleme seviyesi, çalışmada kullanılan tezgâhın maksimum devir sayısı (8000 dev/dak) dikkate alınmak suretiyle 2. kademe olarak belirlenmiştir. Programın optimize ettiği kesim parametreleri

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Şekil 3.13'te görülmekte olup iş mili devri 7473 dev/dak, X-Y düzlemi üzerindeki ilerleme maksimum 2131 mm/dak ve yana kayma değeri maksimum 1,32 ve minimum 0,44 mm arasında geometriye göre değişmiştir. Kullanılan tüm parametreler, takımları doğru bir şekilde kıyaslayabilmek için bütün işlemlerde eşit olarak alınmıştır. Kaplanmamış ve ZrN kaplanmış takımların her birisiyle 2'şer adet kütük parça kesimi yapılmıştır. Her bir takım için toplamda 270 cm<sup>3</sup>'lük bir hacim kaldırılmıştır.



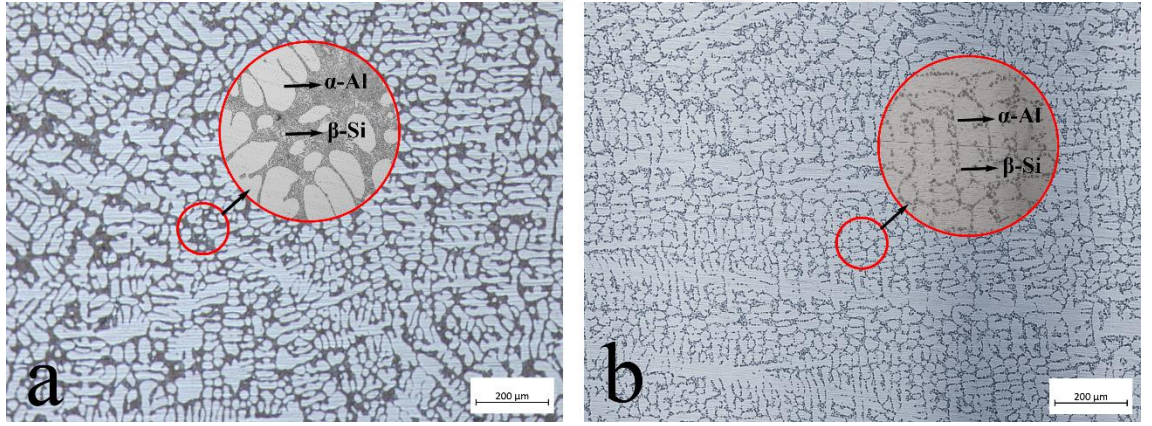
Şekil 3.14. iMachining kesim parametreleri

### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

#### 4.1. Al7Si Alaşımına Uygulanan Kaplama İşlemlerinin Yapısal ve Mekanik Özellikleri

##### 4.1.1. Al7Si alaşımının mikro yapısı

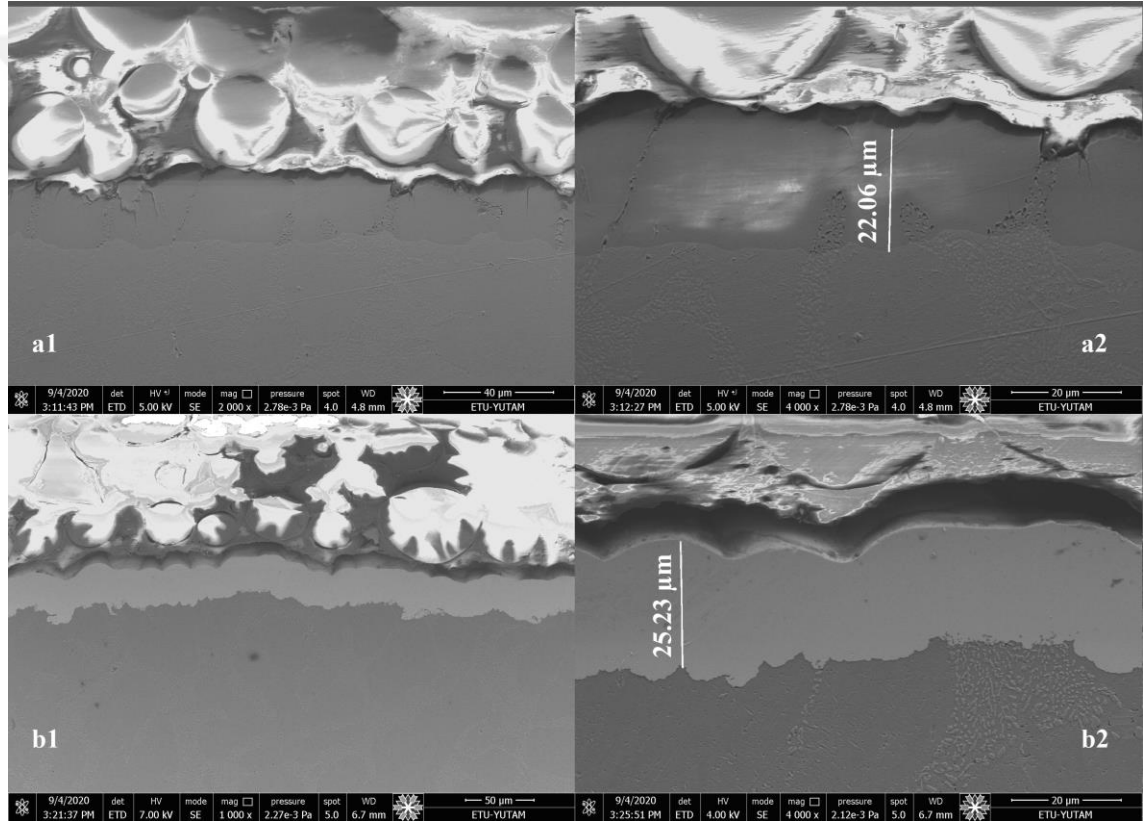
İşlemsiz ve çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmış Al7Si alaşımı, 3. bölümde içeriği verilen çözelti ile dağlanmışır. Optik mikroskop aracılığı ile alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.1’de sunulmuştur. Mikroyapı görüntüleri üzerindeki açık renkli küresel yapılar  $\alpha$  Alüminyum fazı, ara boşluğu dolduran koyu yapı ise  $\beta$  ötektik Silisyumdur. Si elementinin mekanik özelliklere etkisinde, alaşım içerisindeki oranından ziyade faz yapısı ve dağılımı etkili olmaktadır. Yuvarlak yapılı Si fazları, şerit şeklindeki fazlara göre daha mukavimdir (Eruslu vd. 1990). Çökelme sertleşmesi ısıl işlemi sonrası mikroyapının daha ince yapılı bir forma dönüştüğü açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.1. Dağlanmış Al7Si alaşımına ait mikroyapı görüntüleri (a) işlemsiz, (b) çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmış

#### 4.1.2. Kaplanmış Al7Si alaşımının kaplama kalınlıklarının ve yüzey görüntülerinin SEM ile incelenmesi

Şekil 4.2’de Al7Si alaşımı numunelere uygulanan kaplamalara ait kalınlık değerlerinin belirlenmesi için alınan kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Bütün numunelerin kesitlerinden alınan SEM görüntülerinde Al7Si alaşımı üzerine büyütülen Sert Eloksal ve Ni-B kaplamalar belirgin bir şekilde görülmektedir. Kesit resimlerinde görüldüğü gibi, her iki kaplamanın homojen kalınlığa ve yoğunluğa sahip olduğu, kaplama içerisinde boşluk tarzında herhangi bir hata barındırmadıkları tespit edilmiştir.

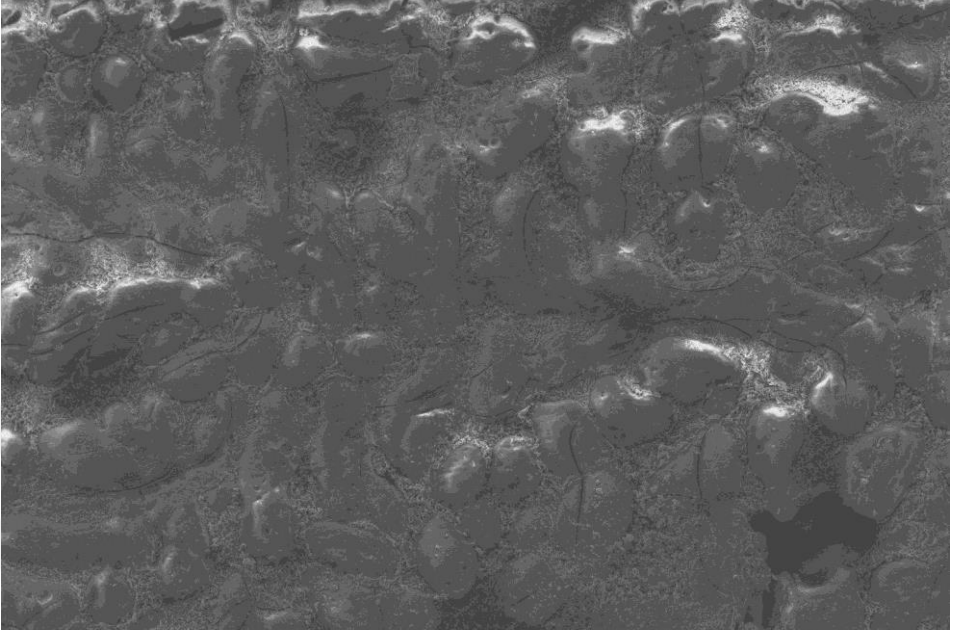
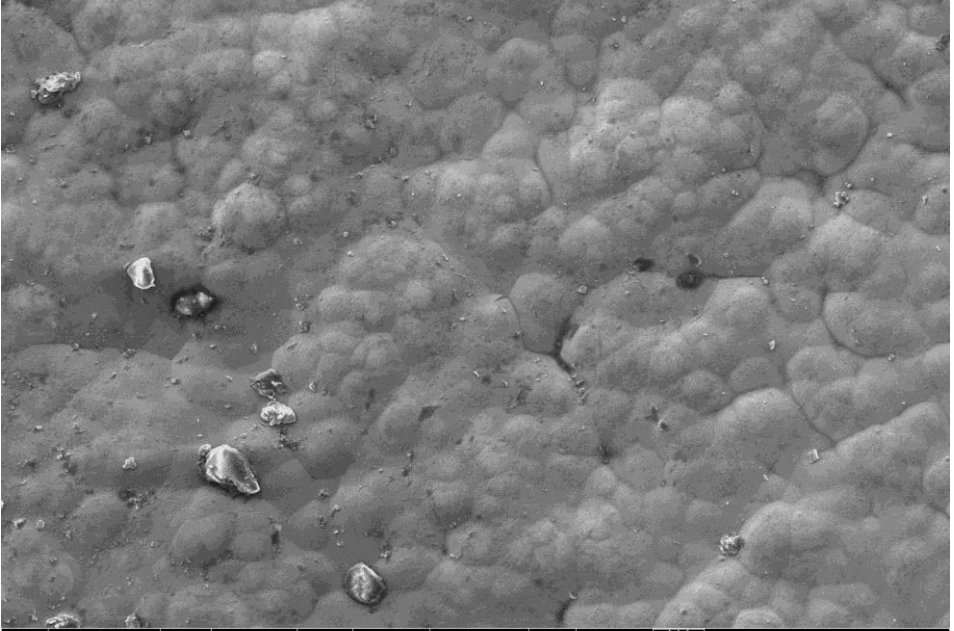


Şekil 4.2. Al7Si alaşımı üzerine uygulanan kaplamalar ait kesit SEM görüntüleri (a1-a2) Sert Eloksal kaplanmış numune, (b1-b2) Ni-B kaplanmış numune

Kesit SEM görüntülerinde açıkça gösterildiği gibi Sert Eloksal kaplı numunenin kaplama kalınlığı 22,06 µm ve Ni-B kaplı numunenin kaplama kalınlığı 25,23 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3’te ise AlSi alaşımı üzerine yapılan sert eloksal ve Ni-B kaplamaya ait yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. İki kaplamanın da taban malzeme yüzeylerinde homojen olarak büyüdüğü açıkça görülmektedir. Sert Eloksal ve

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

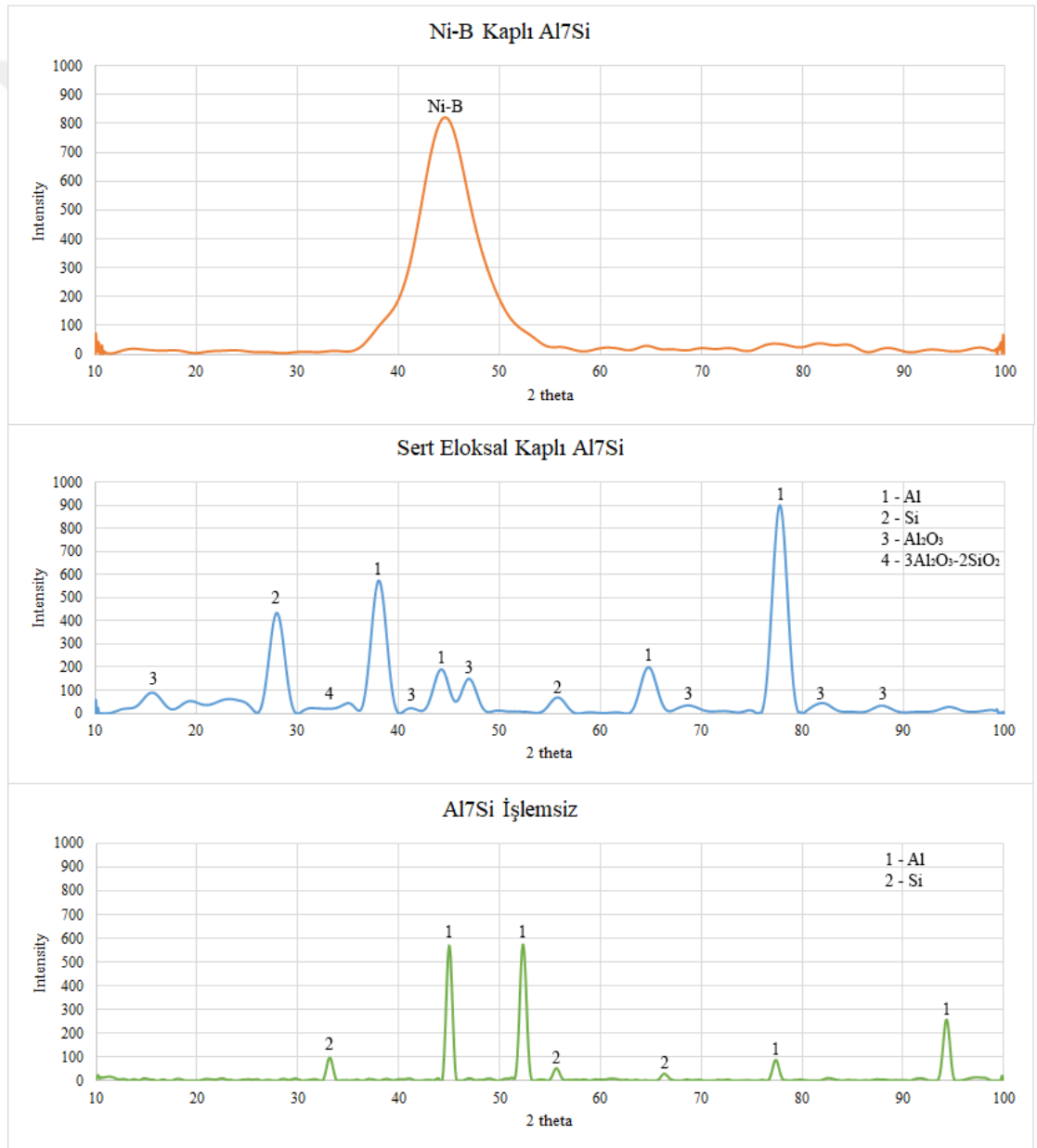
Ni-B kaplanmış yüzeylerin, kullanılan kaplama işleminin doğasından kaynaklı olarak pürüzlü yüzeylere sahip olduğu görülmektedir. Kaplanmış yüzeylere ait yüzey pürüzlülüğü değerleri, Sert Eloksal kaplama için 10,07  $\mu\text{m}$  ve Ni-B kaplama için 9,34  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir.

Numune	Görüntüler
Sert Eloksal Kaplı Al7Si Yüzey Görüntüsü	 <p>8/27/2020 2:52:40 PM det ETD HV 5.00 kV mode SE mag 1 000 x pressure 3.27e-4 Pa spot 3.0 WD 9.9 mm 50 <math>\mu\text{m}</math> ETU-YUTAM</p>
Ni-B Kaplı Al7Si Yüzey Görüntüsü	 <p>8/27/2020 3:14:19 PM det ETD HV 10.00 kV mode SE mag 1 000 x pressure 2.33e-4 Pa spot 3.0 WD 9.2 mm 50 <math>\mu\text{m}</math> ETU-YUTAM</p>

Şekil 4.3. Kaplama yapılmış Al7Si alaşımına ait yüzey SEM görüntüleri

## 4.1.3 İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait XRD analizleri

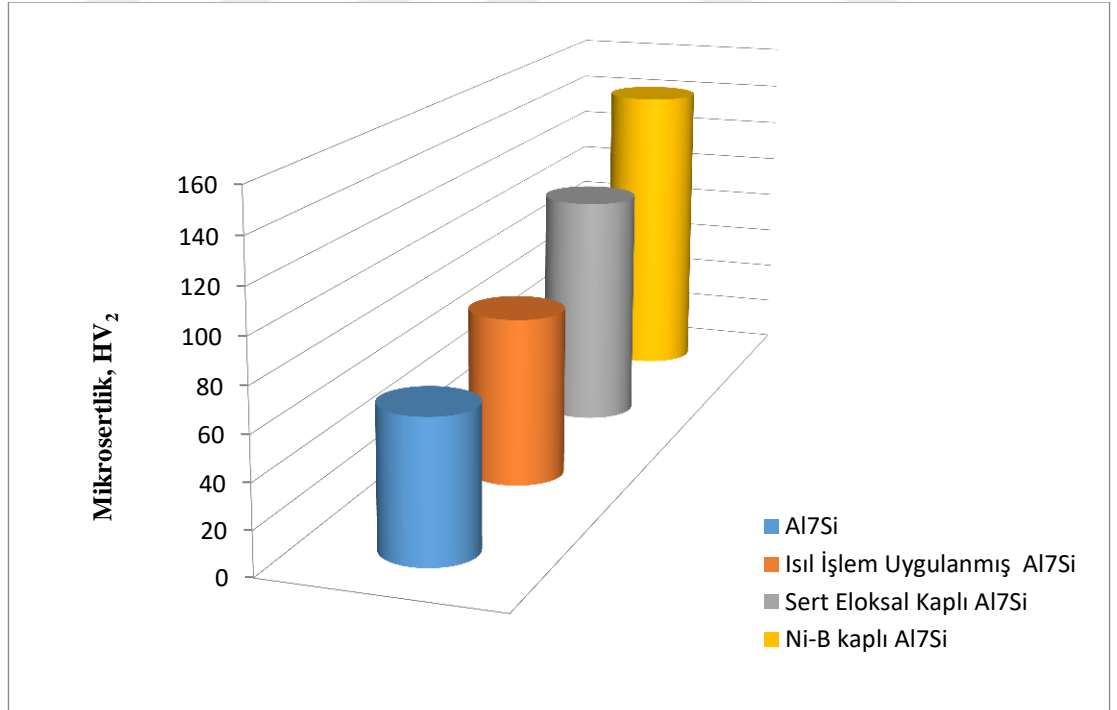
İşlemsiz, Sert Eloksal ve Ni-B ile kaplanmış Al7Si alaşımına ait XRD grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Beklenildiği gibi işlemsiz numunede Al ve Si pikleri bulunmaktadır. Eloksal kaplama sonrası yüzeyde  $Al_2O_3$  ve az miktarda  $SiO_2$  fazlarının oluştuğu görülmektedir. Al7Si alaşımı yüzeyine uygulanan Ni-B kaplamanın amorf davranış sergilediği görülmektedir (Bülbül ve Çelik 2014). Üretilen kaplamalar üzerinde gözlenen fazlar oluşması muhtemel fazlar olup, kaplama işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir.



Şekil 4.4. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait XRD grafikleri

#### 4.1.4. Mikro sertlik incelemeleri

İşlemsiz, ısıtılmış ve kaplanmış Al7Si alaşımına mikrosertlik değerleri Şekil 4.5'te sunulmuştur. İşlemsiz alaşımın sertliği yaklaşık 60 HV<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir. Çökelme sertleştirme ısıtılmış işlemi sonrası sertlik değeri yaklaşık %35 oranında artmıştır. Isıl işlem sonrası sertlik artışı, şerit yönlenmeye sahip olan fazların ısıtılmış işlem sonucunda küresele yakın yapılara dönüştürülmesi ile sağlanır (Vatansever vd. 2018). Kaplama işlemleri sonrası beklenildiğinden daha düşük seviyelerde sertlik artışı görülmüştür. Bu durumun sebebi, Sert Eloksal ve Ni-B kaplamanın pürüzlü yüzeylere sahip olmasından dolayı sertlik ölçümlerinde 2 kg gibi kaplama sertliği ölçmek için nispeten büyük bir yük değerinin kullanılmasıdır. Daha düşük yüklerde yapılan sertlik ölçümlerinde yüzeyde oluşan izler görülmesi mümkün olmamıştır. Dolayısıyla ile kaplanmış yüzeylerden elde edilen sertlik değerleri taban malzemeyi de yansıtmakta olup hibrit sertlik değeri sunmaktadır. Ancak bu duruma rağmen Sert Eloksal kaplı numunenin sertliği işlemsiz numuneye göre 2 kat ve en yüksek yüzey sertliğinin elde edildiği Ni-B kaplamada ise yaklaşık 3 kat sertlik artışı sağlanmıştır.

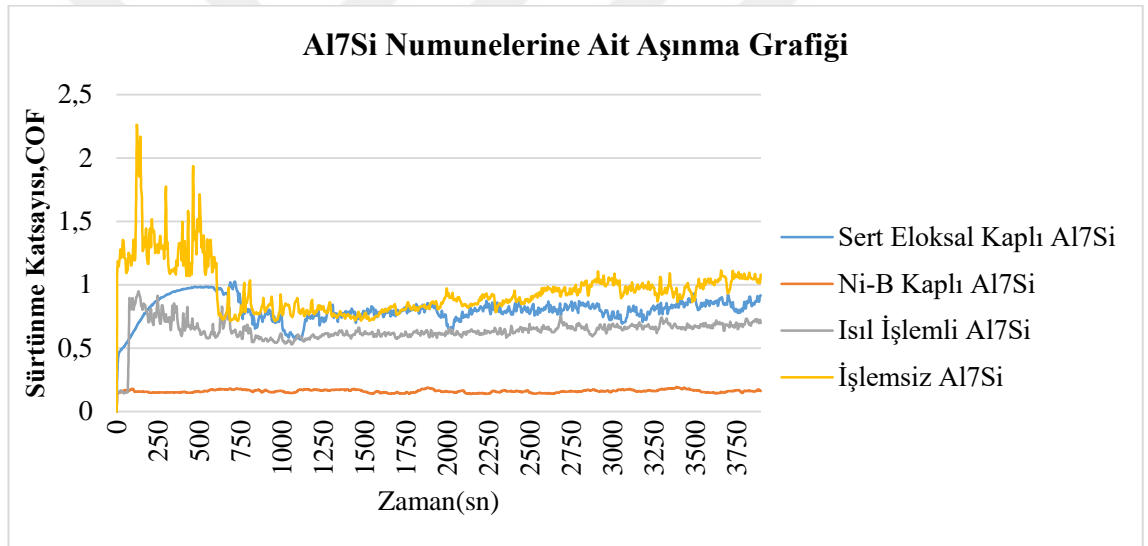


Şekil 4.5. İşlemsiz, ısıtılmış ve kaplanmış Al7Si alaşımına mikrosertlik değerleri

## 4.2. Tribolojik Özellikler

### 4.2.1. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait sürtünme katsayısı bulguları

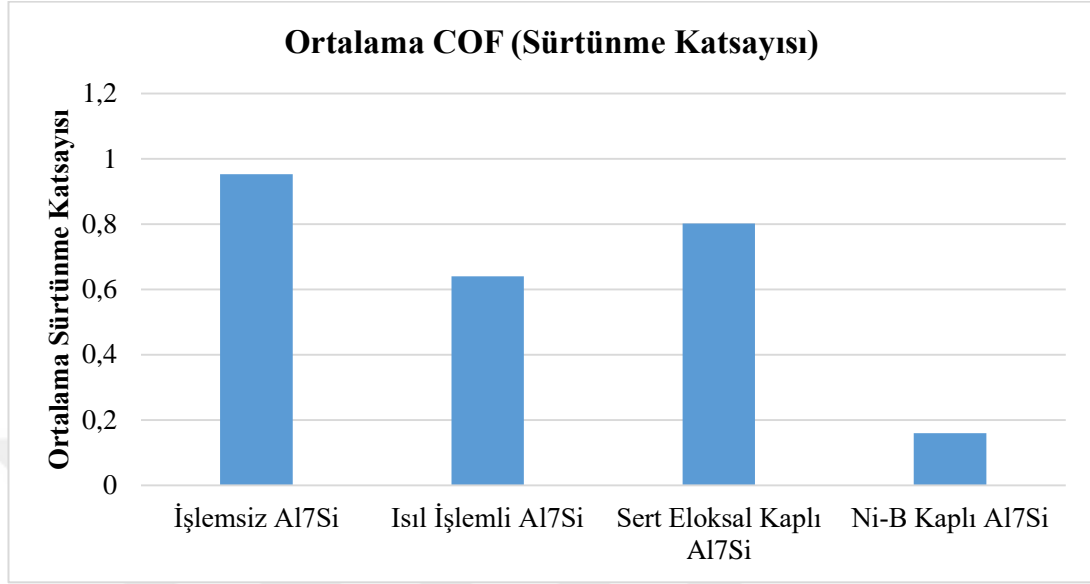
İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış, Sert Eloksal ve Ni-B kaplanmış Al7Si alaşımına ait sürtünme testi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Eğrilerde genel anlamda görünen, sürtünme katsayısının (COF) başlangıçta yüksek değerlere ulaşmasının ve testin ilerleyen safhasında aşınan malzeme çiftlerinde birbirine alışma, kararlı bir davranış sergileme ve daha düşük sürtünme katsayısında normalleşme gözlenmesinin sebebi Hertzian temasıdır. Ayrıca aşınma eğrileri incelendiğinde, anlık değerlerde dalgalanmalar görülmektedir. Bunun sebebi ise sert kaplama yüzeylerinin parçalanarak abrazif etki oluşturmasındandır.



Şekil 4.6. İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait sürtünme katsayısı değişimi

Ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.7'de sunulmuştur. İşlemsiz Al7Si alaşımı için ortalama sürtünme katsayısı 0,95'tir. Sert Eloksal kaplı Al7Si için 0,8 ve ısıl işlemlenmiş Al7Si alaşımı içinse 0,63 olarak belirlenmiştir. Sert Eloksal kaplı numunelerde sürtünme katsayısının izafi olarak bir miktar yüksek çıkmasının sebebi, bu kaplama türünde aşınma testi esnasında taban malzemeye inilmesi ve sonuçta abrazif etkinin daha belirgin bir şekilde ortaya çıkması olarak yorumlanmıştır. Sert Eloksal kaplamaya sürtünme katsayısı değişim eğrisindeki dalgalanmalar bu yorumu destekler niteliktedir. Tüm numuneler içerisinde en düşük ve kararlı sürtünme katsayısı değeri Ni-

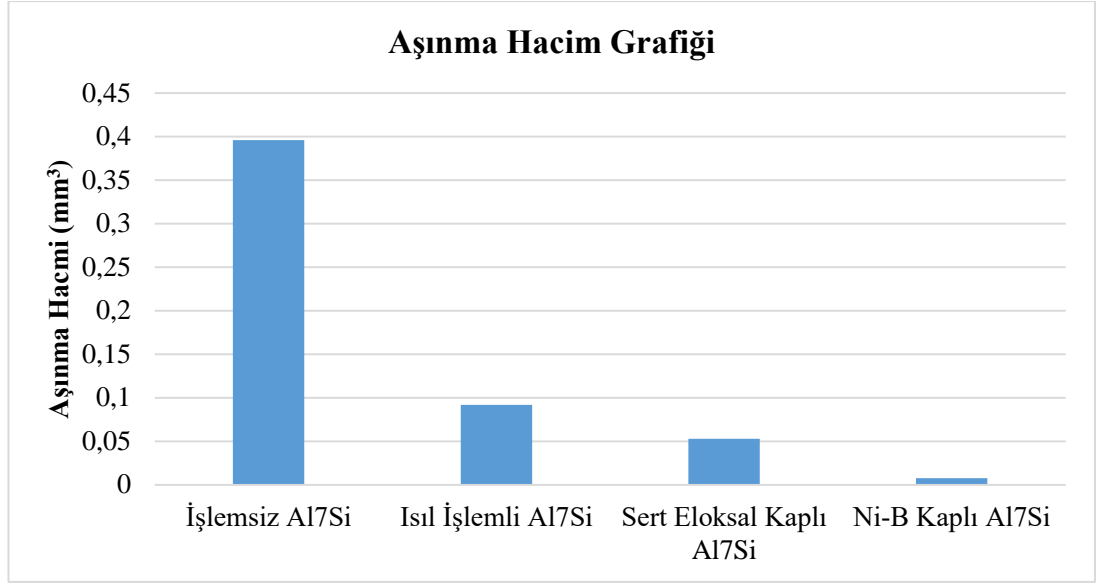
B ile kaplanmış Al7Si alaşımında gözlenmiş olup, ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,16 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

#### 4.2.2. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma hacimleri

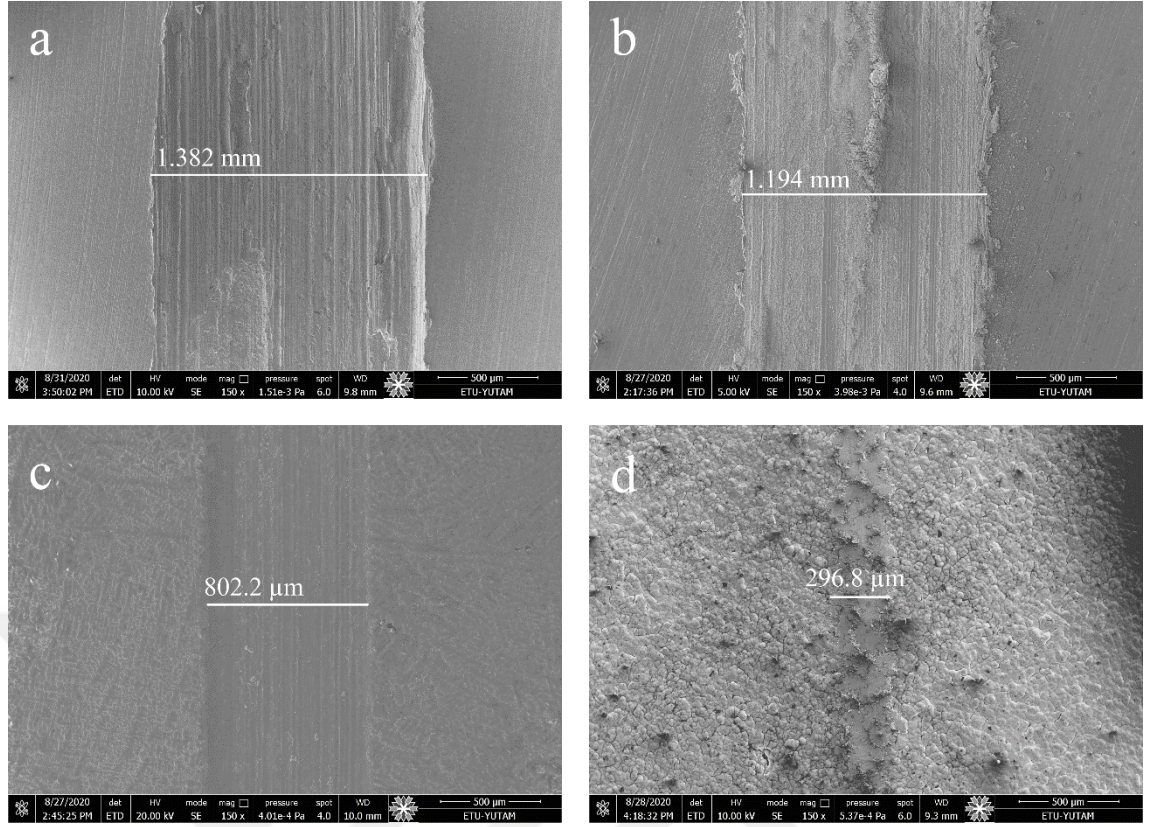
İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış, Sert Eloksal ve Ni-B kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma hacimleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma hacimleri incelendiğinde en yüksek aşınma hacmi işlemsiz Al7Si numunesinde  $0,4 \text{ mm}^3$  olarak elde edilmiştir. Alaşıma uygulanan çökelme sertleşmesi ısıl işlemi, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemi sonrası aşınma hacimleri büyük oranda azalmıştır. En düşük aşınma hacmi ise aynı zamanda en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği Ni-B kaplı Al7Si alaşımı için  $0,007 \text{ mm}^3$  olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile elde edilen aşınma hacmi sonuçlarının sürtünme katsayısı sonuçları ile uyum içerisinde olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.8. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma hacimleri

#### 4.2.3. İşlemsiz ve kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma izi sem görüntüleri ve optik profilometre incelemeleri

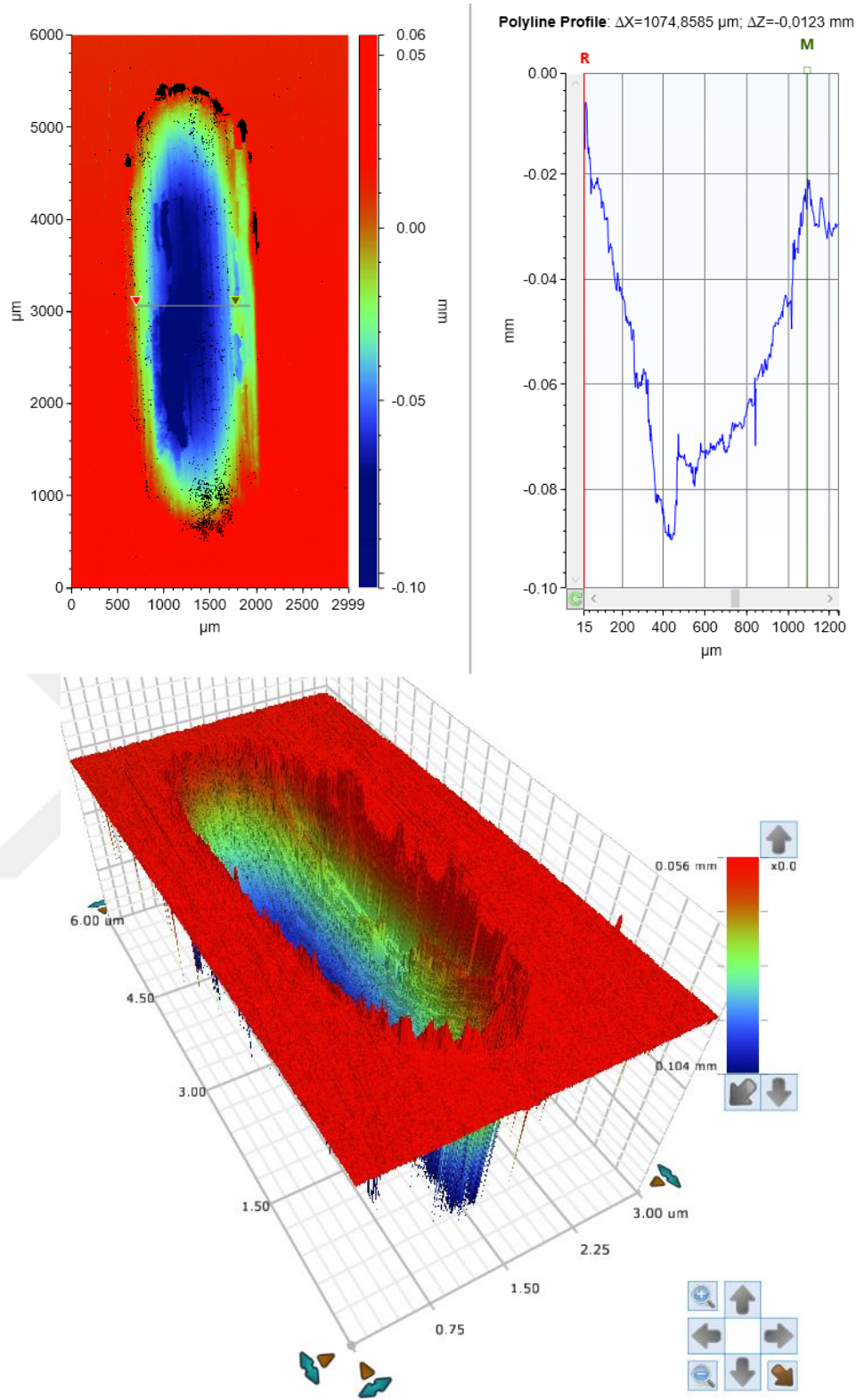
İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış, Sert Eloksal ve Ni-B kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma izi SEM görüntüleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Görüntüler irdelendiğinde en geniş aşınma izi, aşınma hacmi değerlerine de paralellik gösteren işlemsiz Al7Si alaşımı için elde edilmiştir. İşlemsiz ve ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşınma izleri irdelendiğinde adeziv ve abrazif aşınma mekanizmalarının oluştuğu ve her iki iz içerisinde abrazif izlerin varlığı dikkat çekmektedir. Sert Eloksal kaplı numunede ise aşınma iz genişliğinin önemli oranda azaldığı ve abrazif iz oluşumunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ni-B kaplı Al7Si alaşımı için ise aşınma testi sonrası çok düşük genişlikte bir iz olduğu ve taban malzemeye inilmediği gözlenmiştir. Bu noktada en yüksek aşınma direnci Ni-B kaplı malzeme için elde edilmiştir. Elde edilen aşınma izi SEM görüntülerinin hem sürtünme katsayısı değerleri hem de aşınma hacmi sonuçları ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.9. Aşınma izi SEM görüntüleri (a) işlemsiz Al7Si, (b) ısıl işlem uygulanmış numune, (c) Sert Eloksal kaplanmış numune, (d) Ni-B kaplanmış numune

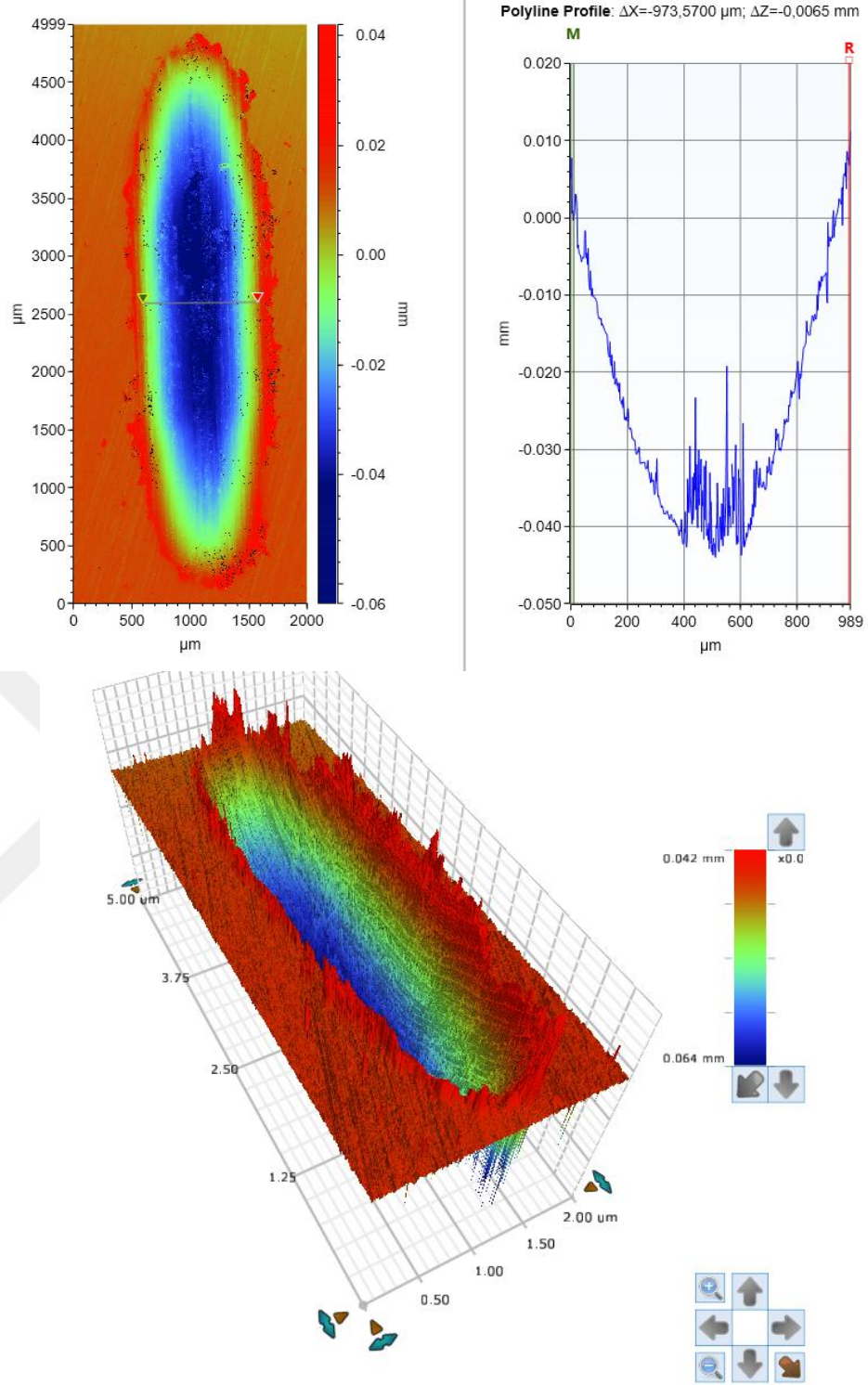
İşlemsiz, ısıl işlem uygulanmış, Sert Eloksal ve Ni-B kaplanmış Al7Si alaşımına ait aşınma izlerinin 3D optik profilometre görüntüleri Şekil 4.10-13'te verilmiştir. Aşınma testlerinde uygulanan 5N normal yükün etkisi ile işlemsiz numunede oldukça derin bir profil oluştuğu tespit edilmiştir. İşlemsiz numune için profil derinliği yaklaşık 90 µm olarak belirlenmiştir. Alaşıma uygulanan çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi ile profil derinliği yaklaşık 45 µm'ye inerek aşınma direncinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Sert Eloksal kaplanmış alaşımda ise profil derinliği yaklaşık 23 µm olarak tespit edilmiştir. Sert Eloksal için kaplama kalınlığı 22,06 µm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2). Dolayısı ile bu kaplama türünde aşınma testi sonrası taban malzemeye inilmiştir. Ancak bu duruma rağmen işlemsiz ve ısıl işlem uygulanmış numuneye oranla profil derinliği büyük oranda azalmıştır. En düşük profil derinliği Ni-B kaplanmış alaşımdan elde edilmiş olup, derinlik değeri yaklaşık 4 µm olarak belirlenmiştir. Ni-B kaplama kalınlığının yaklaşık 25 µm olduğu dikkate alındığında (Şekil 4.2), uygulanan 5N'luk normal yükte çok düşük oranda aşınma oluştuğu ve taban malzemeye inilmediği tespit edilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



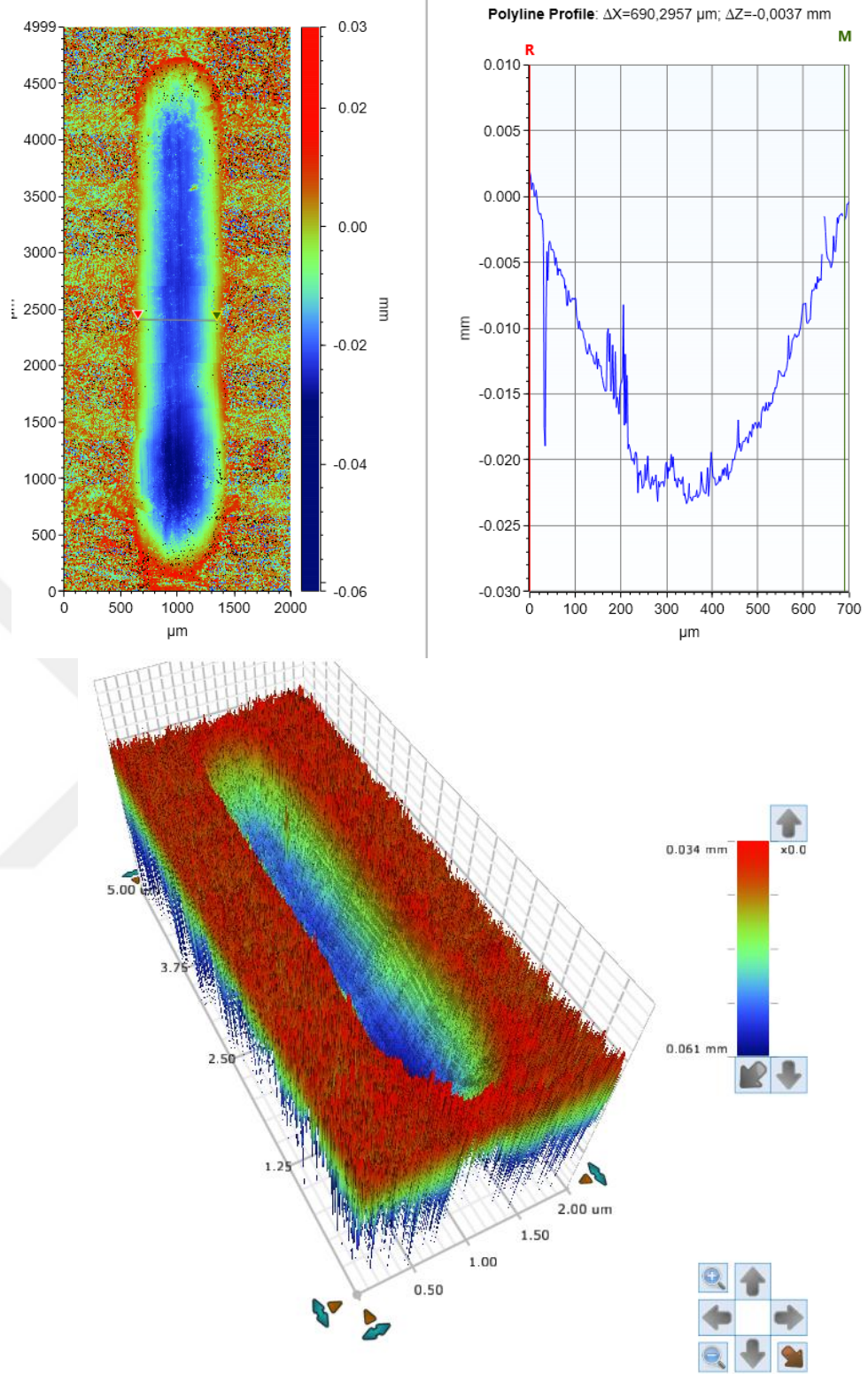
Şekil 4.10. İşlemsiz Al<sub>7</sub>Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



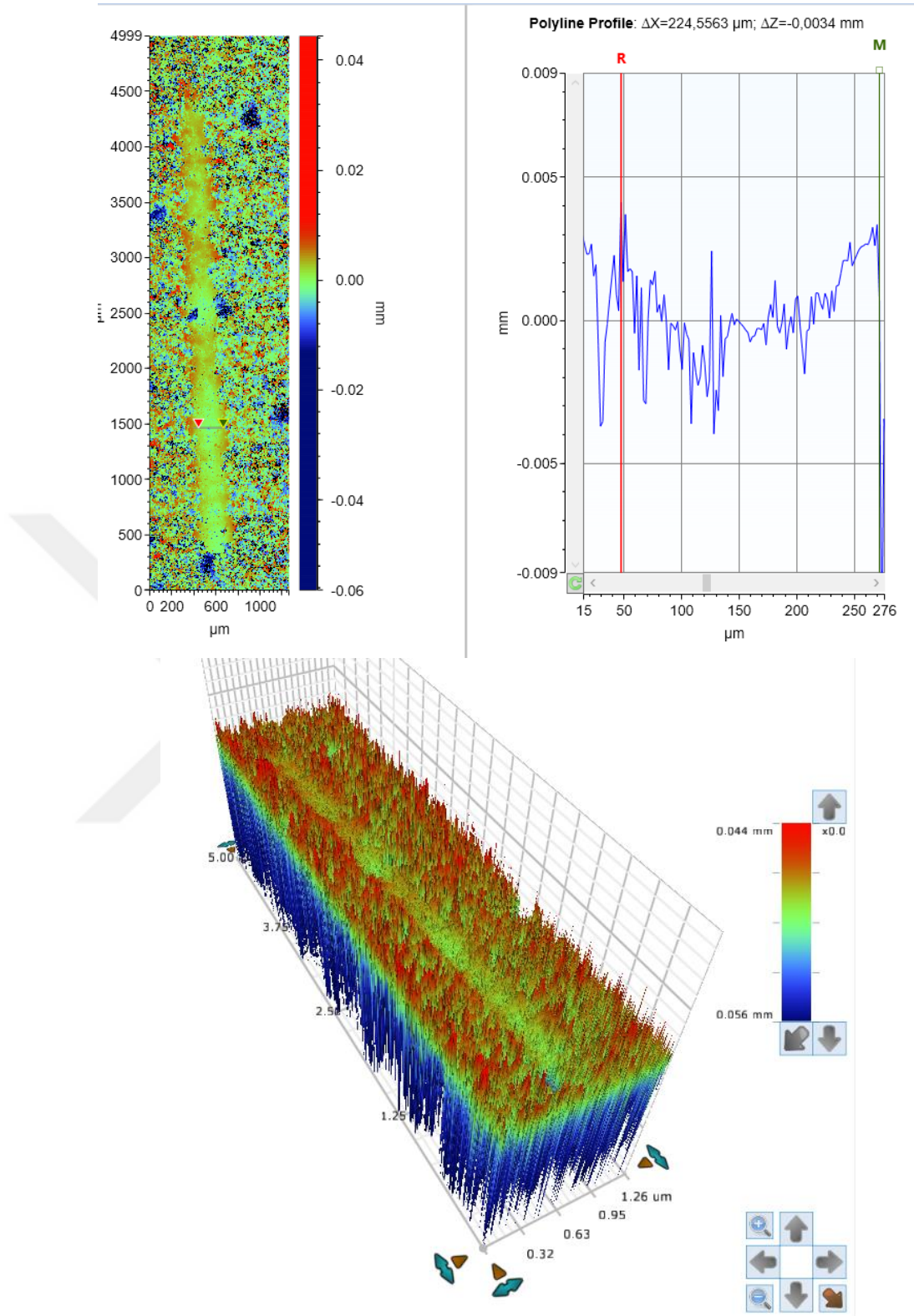
Şekil 4.11. Isıl işlem uygulanmış Al7Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.12. Sert Eloksal kaplı Al<sub>7</sub>Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

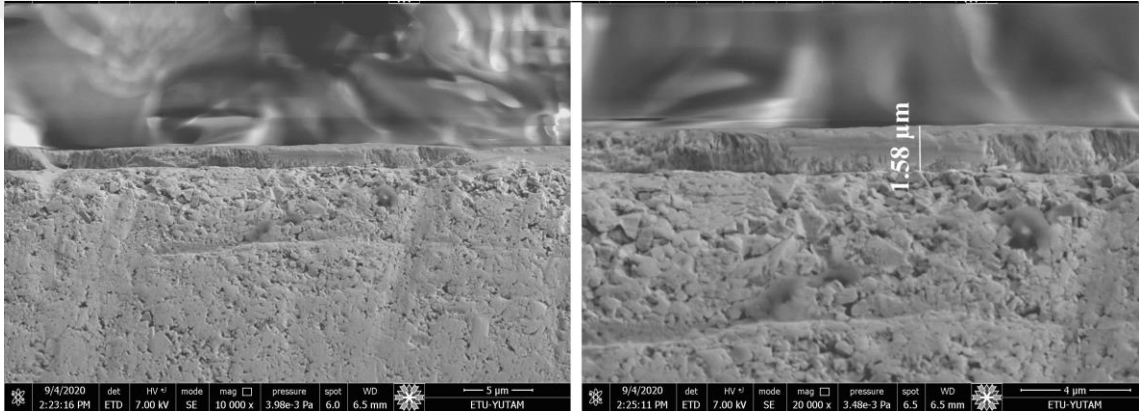


Şekil 4.13. Ni-B kaplı Al<sub>7</sub>Si alaşımına ait aşınma izi profilometre görüntüsü

### 4.3. ZrN Kaplanmış Karbür Takımlarla Al7Si Alaşımının Frezeleme Performansı

#### 4.3.1. WC kesici takım malzemesi üzerine uygulanan ZrN kaplamaya ait karakterizasyon çalışmaları

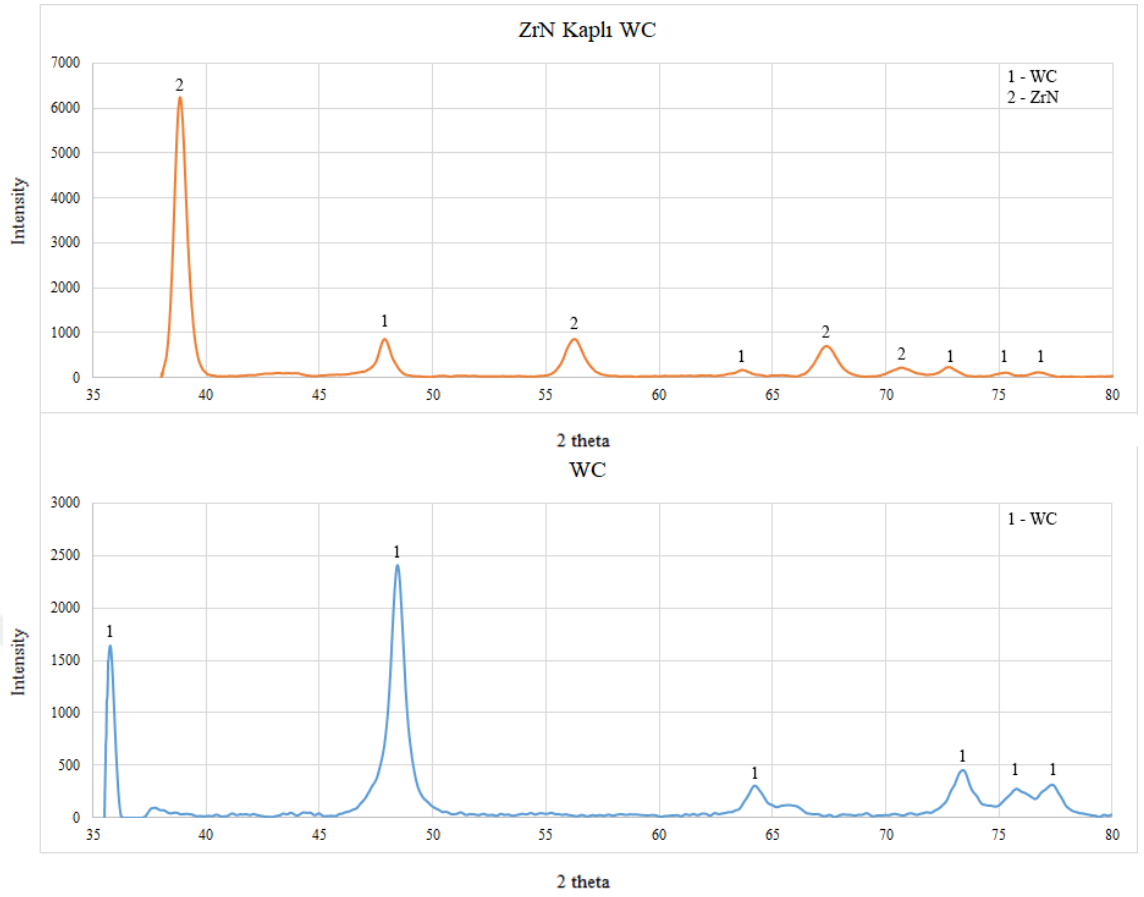
Şekil 4.14'te WC kesici takım malzemesine uygulanan ZrN kaplamaya ait kalınlık değerinin belirlenmesi için alınan kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Numune kesitinden alınan SEM görüntülerinde WC üzerine büyütülen ZrN kaplama belirgin bir şekilde görülmektedir. Kesit resimlerinde görüldüğü gibi, kaplamanın homojen kalınlığa ve yoğunluğa sahip olduğu, kaplama içerisinde boşluk tarzında herhangi bir hata bulunmadığı tespit edilmiştir. ZrN kaplama kalınlığı 1,58 µm olarak belirlenmiştir.



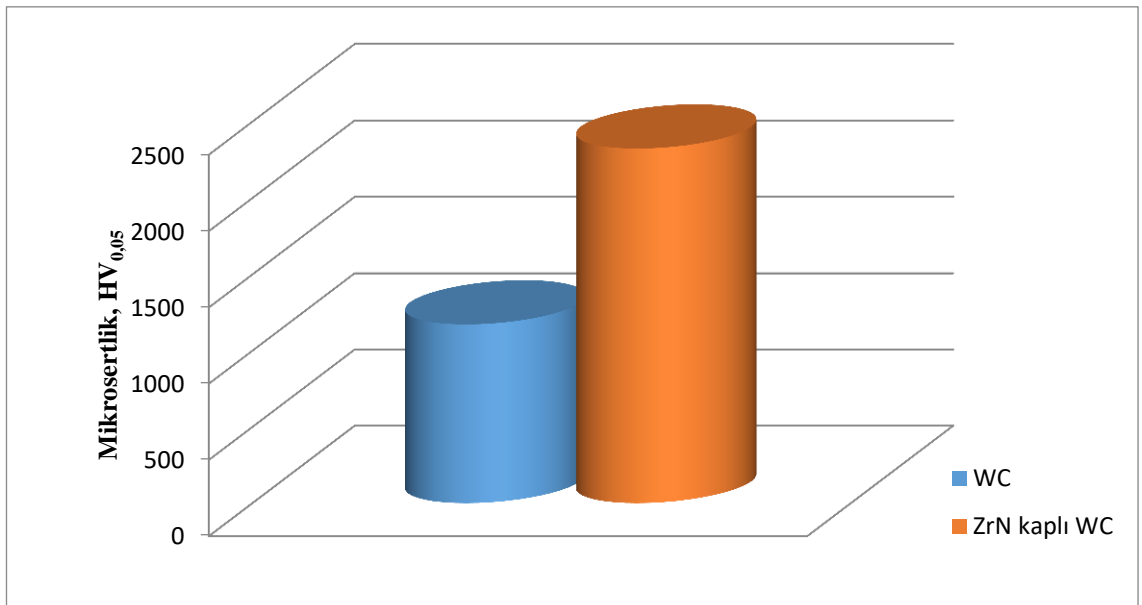
Şekil 4.14. WC kesici takım malzemesi üzerine kaplanmış ZrN kaplamaya ait kesit SEM görüntüleri

İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait XRD grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir. XRD grafiğine göre ZrN kaplama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve kaplama bileşiğine ait piklerin bulunduğu tespit edilmiştir. Kaplanmış numuneye ait XRD grafiği irdelendiğinde ZrN ince film kalınlığının göreceli olarak düşük olması sebebiyle (1,58 µm) WC taban malzemeye ait piklerin de grafikte olduğu görülmüştür.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.15. İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait XRD grafiği



Şekil 4.16. İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait mikrosertlik değerleri

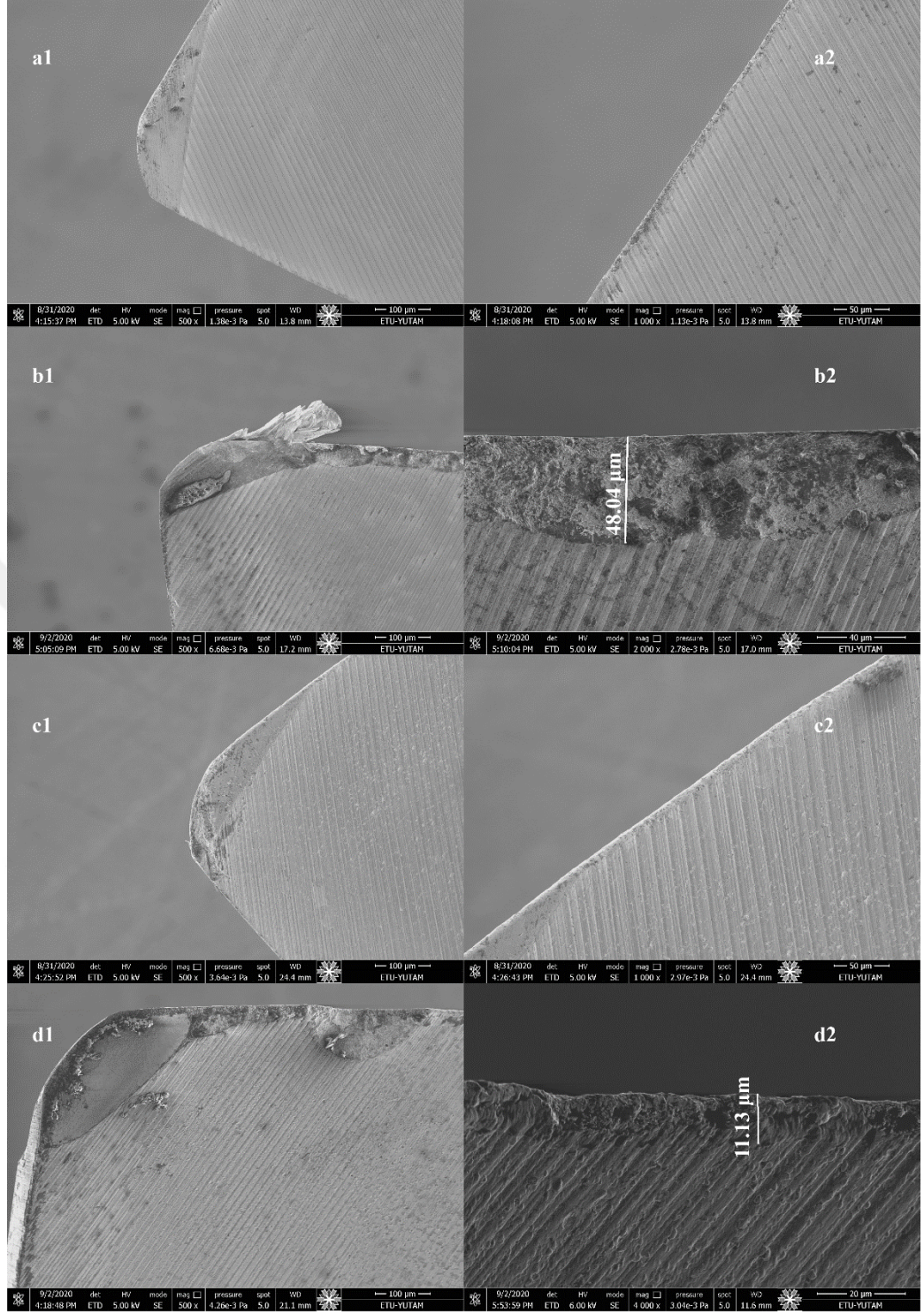
İşlemsiz ve ZrN ince filmi ile kaplanmış WC kesici takım malzemesine ait mikrosertlik değerleri Şekil 4.16'da sunulmuştur. WC takım malzemesi üzerine yapılan ZrN kaplama işlemi sertlik değeri yaklaşık iki kat artmıştır. Kaplanmamış WC takım malzemesinin sertlik değeri 1175 HV<sub>0.05</sub>, ZrN kaplanmış numunenin ise 2350 HV<sub>0.05</sub> olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.2. İşlemsiz ve ZrN kaplanmış WC kesici takımlarla gerçekleştirilen frezeleme işlemi sonrası takım aşınmalarının değerlendirilmesi

Talaşlı imalatta takım ömrünü belirlemek için önem arz eden birçok kriter bulunmaktadır. Bunlar;

- Kesme kenarının kırılması, sıcaklık ile bozulması ya da sürekli uğradığı aşınma sonrasında takımın kesme işlemi yapamayacak hale gelerek tamamen deforme olması,
- İşlem sırasında oluşan ses değişimi,
- Talaş şeklinde değişme,
- İş parçasının yüzey kalitesinde kötüleşme,
- İşlenen parça miktarı
- Takımda yan kenar aşınma miktarının belirlenen bir değere ulaşmasıdır.

Bu kıstaslar arasında en yaygın olanı, takım yan kenar aşınma miktarının tayin edilmesi ve kritik yan kenar aşınma değerine ulaşıldığında takımın bir başkası ile değiştirilmesidir. Bu tezde ZrN kaplı WC kesici takımın yüksek hızlı freze imal işlemi sonrasında ortaya koyduğu aşınma performansının belirlenmesi için yan kenar aşınma genişliği referans olarak alınmıştır. i-machining ile frezeleme işlemi sonrası takımlar üzerinden alınan yan kenar aşınma genişliklerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Frezeleme işlemi sonrası, kaplanmamış WC parmak frezede 48,04 µm, ZrN kaplanmış WC takımda ise 11,13 µm yan kenar aşınma genişliği gözlenmiştir. Bu noktada ZrN kaplamanın WC takım üzerinde oluşan aşınmayı yaklaşık 4 kat azalttığı ve imalat sırasında kütük parçanın takıma sarmasını önlediği açığa çıkmıştır (D. Jianxin et al. 2007).

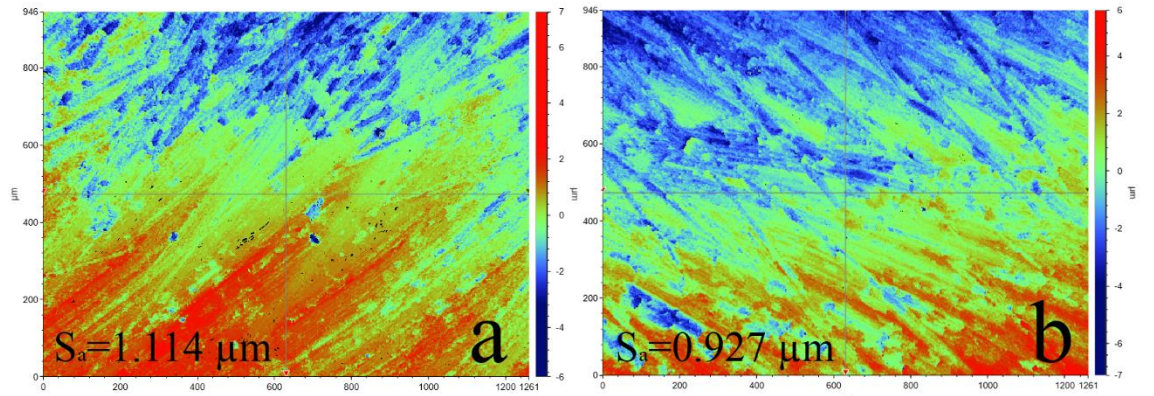


Şekil 4.17. Yan kenar aşınma genişlikleri (a1,a2) kaplanmamış WC takımın frezeleme işlemi öncesi görüntüleri, (b1,b2) kaplanmamış WC takımın frezeleme işlemi sonrası görüntüleri, (c1,c2) ZrN kaplanmış WC takımın frezeleme işlemi öncesi görüntüleri, (d1,d2) ZrN kaplanmış WC takımın frezeleme işlemi sonrası görüntüleri

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar, işlem öncesi ve sonrası ultrasonik banyoda yıkama yapılarak hassas terazide tartılmıştır. Takımdaki kütle durumu belirlenmiştir. Kaplanmamış WC takım ile işlenen parçanın takım üzerine sardığı (Şekil 4.17.b1) gözlenmiş ve kütlede 0,0077 gr artış olmuştur. ZrN kaplı WC takımında ise sarma gözlenmemiş sadece aşınma ortaya çıkmıştır, bu takımında ise 0,0064 gr kütle kaybı olmuştur.

Kaplanmamış ve ZrN kaplı WC takımlarla gerçekleştirilen yüksek hızlı frezeleme işlemi sonrası Al7Si kütük parçanın son işleme yüzeyinden 3D optik profilometre aracılığı ile yüzey pürüzlülüğü değerleri ( $S_a$ = Surface roughness average) alınmıştır. Şekil 4.18'de frezeleme sonrası kütük parçanın 3D profilometre cihazı ile alınmış yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, WC takım ile işlenen yüzey için 1,114  $\mu\text{m}$ , ZrN kaplı WC için ise 0,927  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Bu noktada alınan sonuçlar ZrN kaplı WC takımının kaplanmamış WC'ye göre iş parçası üzerinde daha iyi yüzey kalitesi sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.18. Frezeleme işlemi sonrası iş parçasının 3D yüzey görüntüleri (a) kaplanmamış WC takım ile işlenen yüzey (b) ZrN kaplı takım ile işlenen yüzey

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan Al7Si alaşımının farklı yüzey işlemleri ile aşınma dayanımının artırılması ve söz konusu alaşımın talaşlı imalatta verimli/ekonomik bir şekilde işlenebilmesi için etkili bir kesici takım kaplaması önerilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Al7Si alaşımı numunelere çökelme sertleşmesi ısı işlemleri, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası numunelerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri karakterize edilmiş ve işlemsiz numunelerle farkı belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Ayrıca Al7Si alaşımının, işlemsiz ve ZrN ile kaplanmış karbür parmak frezelerle talaşlı imalat performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Takımların gerçek çalışma performanslarının belirlenmesi için gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, geleneksel yöntemlerde kullanılan takım yolları yerine son dönemde yaygınlaşan akıllı imalat (intelligent machining) olarak adlandırılan SolidCAM i-machining modülü kullanılmıştır. Çalışma sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- XRD sonuçlarına göre, Al7Si alaşımı üzerine Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.
- Sert Eloksal kaplı numunenin kaplama kalınlığı 22,06  $\mu\text{m}$  ve Ni-B kaplı numunenin kaplama kalınlığı 25,23  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. İki kaplamanın da Al7Si taban malzeme yüzeyinde homojen olarak büyüdüğü belirlenmiştir.
- Al7Si taban malzeme üzerine yapılan kaplamaların yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Sert Eloksal kaplama için 10,07  $\mu\text{m}$  ve Ni-B kaplama için 9,34  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.
- İşlemsiz alaşımın sertliği yaklaşık 60 HV<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir. Çökelme sertleştirme ısı işlemleri sonrası sertlik değeri yaklaşık %35 oranında artmıştır. Sert Eloksal kaplı numunenin sertliği işlemsiz numuneye göre 2 kat ve en yüksek yüzey sertliğinin elde edildiği Ni-B kaplamada ise yaklaşık 3 kat sertlik artışı sağlanmıştır.
- İşlemsiz Al7Si alaşımı için ortalama sürtünme katsayısı 0,95, Sert Eloksal kaplı Al7Si için 0,8 ve ısı işlemleri Al7Si alaşımı içinse 0,63 olarak belirlenmiştir. Tüm

numuneler içerisinde en düşük ve kararlı sürtünme katsayısı değeri Ni-B ile kaplanmış Al7Si alaşımında gözlenmiş olup, ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,16 olarak belirlenmiştir.

- Aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma hacimleri göre en yüksek aşınma hacmi işlemsiz Al7Si numunesi için elde edilmiştir. Alaşıma uygulanan çökeltme sertleşmesi ısı işleme, Sert Eloksal ve Ni-B kaplama işlemi sonrası aşınma hacimleri büyük oranda azalmıştır. En düşük aşınma hacmi ise aynı zamanda en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği Ni-B kaplı Al7Si alaşımı için elde edilmiştir.
- İşlemsiz ve ısı işleme uygulanmış numunelerin aşınma izleri irdelendiğinde adeziv ve abrazif aşınma mekanizmalarının olduğu ve her iki iz içerisinde abrazif izlerin varlığı dikkat çekmektedir. Sert Eloksal kaplı numunede ise aşınma iz genişliğinin önemli oranda azaldığı ve abrazif iz oluşumunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ni-B kaplı Al7Si alaşımı için ise aşınma testi sonrası çok düşük genişlikte bir iz olduğu ve taban malzemeye inilmediği tespit edilmiştir.
- İşlemsiz Al7Si alaşımı numune için aşınma profil derinliği yaklaşık 90  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Alaşıma uygulanan çökeltme sertleşmesi ısı işleme ile profil derinliği yaklaşık 45  $\mu\text{m}$ 'ye inerek aşınma direncinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Sert Eloksal kaplanmış alaşımda ise profil derinliği yaklaşık 23  $\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiş olup, bu kaplama türünde aşınma testi sonrası taban malzemeye inilmiştir. En düşük profil derinliği Ni-B kaplanmış alaşımdan elde edilmiş olup, derinlik değeri yaklaşık 4  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiş ve taban malzemeye inilmediği tespit edilmiştir.
- Al7Si alaşımının talaşlı imalatta verimli bir şekilde işlenebilmesi için WC kesici takım üzerine büyütülen ZrN ince filminin başarılı bir şekilde oluşturulduğu ve kaplama kalınlığının yaklaşık 1,58  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür.
- WC kesici takım malzemesi üzerine yapılan ZrN kaplama işlemi ile sertlik değeri yaklaşık iki kat artmıştır. Kaplanmamış WC takım malzemesinin sertlik değeri 1175 HV<sub>0,05</sub>, ZrN kaplanmış numunenin ise 2350 HV<sub>0,05</sub> olarak belirlenmiştir.
- Frezeleme işlemi sonrası, kaplanmamış WC parmak frezede 48,04  $\mu\text{m}$ , ZrN kaplanmış WC takımında ise 11,13  $\mu\text{m}$  yan kenar aşınma genişliği gözlenmiştir.

Bu noktada ZrN kaplamanın WC takım üzerinde oluşan aşınmayı yaklaşık 4 kat azalttığı ve imalat sırasında kütük parçanın takıma sarmasını önlediği açığa çıkmıştır.

- Kaplanmamış WC takım ile işlenen parçanın takım üzerine sardığı gözlenmiş ve takım kütleinde artış tespit edilmiştir. ZrN kaplı WC takımında ise sarma gözlenmemiş sadece aşınma ortaya çıkmıştır.
- WC takım ile işlenen yüzey için 1,114  $\mu\text{m}$ , ZrN kaplı WC için ise 0,927  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Bu noktada alınan sonuçlar ZrN kaplı WC takımın kaplanmamış WC'ye göre iş parçası üzerinde daha iyi yüzey kalitesi sağladığını göstermiştir.

### 5.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması sonrasında, takım yollarının imal edilmek istenen numune geometrisine özel oluşturulduğu işleme yöntemlerinde kullanılacak takım uçlarının seramik filmler ile kaplanmasının takım ömrü ve işlenen yüzey kalitesini iyileştirmede ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca yumuşak malzemelerin kronik sorunu olan aşınma problemine karşı da kaplamalar önemli bir çözümdür. Özellikle Ni-B kaplama taban alüminyum malzemesinin aşınma dayanımı ve sertliğini önemli ölçüde arttırmıştır.

Bu çalışma sonrasında yapılacak diğer çalışmalar ile karbür takımlar üzerine farklı kaplamalar, farklı kalınlıklarda kaplanarak incelenebilir. Sert eloksal kaplamanın verimi parametrelerine bağlı olarak artırılabilir ve Ni-B ile kıyaslanabilir. Ayrıca farklı geometriye sahip iş parçalarında değişken kesme parametreleri denenerek talaşlı imalat verimi üzerine çalışılabilir.

## KAYNAKLAR

- Aal, M. I. A. E., Kim, H. S. 2013. Wear Properties Of High Pressure Torsion Processed Ultrafine Grained Al-7% Si Alloy. *Materials and Design*, 373-382.
- Akquera, H. S., Reddy, N. N. K., Poloju, M., Sekhar, M. C., Yuvaraj, C., Prasad, G. S. 2016. Fabrication Of Cast Aluminium-Silicon (Al-Si) And Aluminium-Magnesium (Al-Mg) Alloys And Their Properties. *Acta Metallurgica Slovaca*, 22, 212-221.
- Ambat, R., Aung, N. N., Zhou, W. 2000. Evaluation Of Microstructural Effects On The Corrosion Behaviour Of AZ91D Magnesium Alloy. *Corrosion Science*, 42, 1433-1455.
- Anonymous. <http://www.coatfab.com/anodising.htm>
- ASM Handbook. 1994. ASM Handbook. Volume 05, 219-243, 978-210-87170-87384-87172.
- Baiwei Zhu, Seifeddine, S., Persson, P. O. Å., Jarfors, A. E. W., Leisner, P., a, C. Z. 2016. A study of formation and growth of the anodised surface layer on cast Al-Si alloys based on different analytical techniques. *Materials and Design*, 254-262.
- Basavakumar, K. G., Mukunda, P. G., and Chakraborty, M. 2009. Dry Sliding Wear Behaviour of Al-12Si And Al-12Si-3Cu Cast Alloys. *Materials and Design*, 1258-1267.
- Brooks, C. R. 1982. Heat Treatment Structure and Properties of Nonferrous Alloys. American Society for Metals, 115-130.
- Bülbül, F., ve Çelik, İ. 2014. Isil İşlemin Akimsiz Ni-B Kaplanan Saf Titanyumun Yapısına Etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 89-94.
- Calin, R., Pul, M., Pehlivanli, Z. O. 2012. The Effect Of Reinforcement Volume Ratio On Porosity and Thermal Conductivity In Al-MgO Composites. *Materials Research*, 15.
- Charles, A., and Grubbs. 2001. Houghton Metal Finishing, Alpharetta. Anodizing of Aluminum.

- Çetin, A. 2019. Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarına genel bir bakış. <https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-silisyum-dokum-alasimlarina-genel-bir-bakis/>
- Dejun K., Jinchun W., Hao L. 2016. Friction and Wear Performances of 7475 Aluminium Alloy after Anodic Oxidation. *Rare Metal Materials and Engineering*, 45, 1122-1127.
- Delaunois F., Petitjean J.P.,Lienard P., Duliere M. J.. 2000. Heat Treatments for Electroless Nickel-Boron Plating on Aluminium Alloys, *Surface Coatings Technology*, 239-248.
- Demir, A. 2012. Farklı Çeliklerin Yorulma Aşınmasında Malzeme Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi. T.C. Trakya Üniversitesi.
- Duncan;, R. N., and Arney;, T. L. 1984. *Plat. Surf. Finish.*, 71,49.
- Durmaz, Y. M. 2018. TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN Seramik Filmleri ile Kaplanmış Karbür Takımların Yüksek Hızlı Frezeleme İşleminde Aşınma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, Erzurum.
- Dursun, T., and Soutis, C. 2013. Recent Developments In Advanced Aircraft Aluminium Alloys. *Materials and Design*, 862-871.
- Dwivedi, D. K. 2004. Sliding Temperature and Wear Behaviour Of Cast Al–Si–Mg Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 328-334.
- Eruslu, N., Altmışoğlu;, A., Taptık;, Y. 1990. Alaşımlar Ders Notları. İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi, 86-97.
- Gots, C. 1984. Le nickel chimiqie dans l'industrie.
- Groover, M. P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems*.
- Gruzleski, J. E., and Closset, B. 1990. Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys.
- Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., Miller, W. S. 2000. Recent Development In Aluminium Alloys For Aerospace Applications. *Materials Science and Engineering*, 102-107.
- Hirsch, J. 2010. Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design. *Materials Transactions*, 52, 818-824.

- Jianxin D., Jianhua L., Jinlong Z., Wenlong S. 2007. Wear mechanisms of PVD ZrN coated tools in machining. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 164-172.
- Jozefowicz, M. 2001. Hard Coat Aluminum Anodizing. *Aluminium Anodizing Compendium*.
- Kang, N., Coddet, P., Chen, C., YanWang, Liao, H., Coddet, C. 2016. Microstructure and Wear Behavior Of In-Situ Hypereutectic Al–High Si Alloys Produced By Selective Laser Melting. *Materials and Design*, 120-126.
- Khan, R. H. U., Yerokhin, A. L., Pilkington, T., Leyland, A., Matthews, A. 2005. Residual stresses in plasma electrolytic oxidation coatings on Al alloy produced by pulsed unipolar current. *Surface and Coatings Technology*, 1580-1586.
- Li, D., Cui, C., Wang, X., Wang, Q., Chen, C., Liu, S. 2015. Microstructure Evolution And Enhanced Mechanical Properties Of Eutectic Al–Si Die Cast Alloy By Combined Alloying Mg And La. *Materials and Design*, 820,828.
- Ölmez, S., ve Keleşoğlu, E. 2016. Alüminyum Silisyum Alaşımların Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 31-39.
- Özel, S., ve Vural, E. 2015. Alüminyum Alaşımı Yüzeyine Kaplanan Tabakaların Mikroyapı ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 211-218.
- Polmear, I. J. 1996. Recent Developments in Light Alloys. *Materials Transactions*, 37, 12-31.
- Raghukiran, N., and Kumar, R. 2015. Effect of scandium addition on the microstructure, mechanical and wear properties of the spray formed hypereutectic aluminum–silicon alloys. *Materials Science and Engineering A*, 138-147.
- Sadeler, R., Atasoy, S., Arıcı, A., Totik, Y. 2009. The Fretting Fatigue of Commercial Hard Anodized Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1280-1284.
- Sarikaya, O., Anik, S., Aslanlar, S., Okumus, S. C., Celik, E. 2005. Al–Si/B<sub>4</sub>C composite coatings on Al–Si substrate by plasma spray technique. *Materials and Design*, 2443-2449.

- Siow, P. C., Ghani, J. A., Ghazali, M. J., Jaafar, T. R., Selamat, M. A., Haron, C. H. C. 2012. Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application. *Ceramics International*, 1293-1298.
- Soupitak Pal, and Jayaram, V. 2018. Effect of microstructure on the hardness and dry sliding behavior of electroless Ni-B coating. *Materialia*, 47-64.
- Summer, F., Pusterhofer, M., Grün, F., Gódor, I. 2020. Tribological investigations with near eutectic AlSi alloys found in engine vane pumps Characterization of the material tribo-functionalities. *Tribology International*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106236>
- Tomlinson, W. J., and Bransden, A. S. 1994. Cavitation erosion of laser surface alloyed coatings on Al-12%Si. *Wear*, 59-65.
- Türküz, M. C. 2006. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Yapılan ZrN İnce Film Kaplamanın Kaplama Parametrelerinin İncelenmesi ve Optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Vatansever F., Ertürk A.T., Karabay S., 2018. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi. *Journal of Science and Engineering*, 20, 707-803.
- Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Y., Sitnikov N., Deev K., Mokritskii, V. P. a. B. 2018. Increase in Efficiency of End Milling of Titanium Alloys Due to Tools with Multilayered Composite Nano-Structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N Coatings. *Coatings*, 8.
- Vitry V., Dumortier, C., Delaunois, F. 2007. Mechanical properties and scratch test resistance of nickel-boron coated aluminium alloy after heat treatments. *Surface and Coatings Technology*, 3316-3324.
- Voevodin, A. A., Yerokhin, A. L., Lyubimov, V. V., Donley, M. S., Zabinski, J. S. 1996. Characterization of wear protective Al-Si-O coatings formed on Al-based alloys by micro-arc discharge treatment. *Surface and Coatings Technology*, 86-87.
- Vyskocil, J. a. M., J. 1990. Arc Evaporation of Hard Coatings: Process and Film Properties. *Surface and Coating Technology*, 299-311.
- Youssef, H. A., and El-Hofy, H. 2008. *Machining Technology Machine Tools and Operations*.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler**

Adı-Soyadı : Yunus Eren İŞILDAK  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.05.1993 / Samsun  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +905326974824  
e-mail : y.erenisildak@gmail.com

### **Eğitim**

<b>Derece</b>	<b>Üniversite</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği ABD	2020
Lisans	Erciyes Üniversitesi	2017
Lise	Tokat Anadolu Lisesi	2011

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl**

Tokat Selçuk Yapı Denetim 2018

Tokat Asay Yapı Denetim 2020

**Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)** (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)\*

**Hakemli Dergiler** (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

**Ulusal Kongre Sunum** (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

**Uluslararası Kongre Sunum** (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)