



**SİLİSYUM KARBÜR (SiC) VE BOR KARBÜR (B4C)  
TAKVİYELİ ZK60 ALAŞIM KOMPOZİTLERİNİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE DELME  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Hayreddin BOZTAŞ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**SİLİSYUM KARBÜR (SiC) VE BOR KARBÜR (B4C) TAKVİYELİ ZK60  
ALAŞIM KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE DELME  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hayreddin BOZTAŞ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2023**

Hayreddin BOZTAŞ tarafından hazırlanan “SİLİSYUM KARBÜR (SiC) VE BOR KARBÜR (B4C) TAKVİYELİ ZK60 ALAŞIM KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE DELME İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ESEN .....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 09/06/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İsmail ESEN (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih PEHLİVAN (KBÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Hayreddin BOZTAŞ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SİLİSYUM KARBÜR (SiC) VE BOR KARBÜR (B<sub>4</sub>C) TAKVİYELİ ZK60 ALAŞIM KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE DELME İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hayreddin BOZTAŞ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İsmail ESEN

Haziran 2023, 129 sayfa

Bu çalışmada, ZK60 alaşımı ve ZK60 alaşımından üretilen kompozitlerin delme işlenebilirliği araştırılmıştır. ZK60 alaşımı, SiC ve B<sub>4</sub>C partikül takviyeleri ile güçlendirilerek ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitleri üretilmiştir. Üretimde, karıştırmalı döküm işlemi tercih edilmiştir ve takviye malzemelerinin erimiş ZK60 matrisi içerisine homojen dağılımını sağlamak için yarı katı sıcaklıkta karıştırma yöntemi kullanılmıştır. Üretilen ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine sırasıyla homojenleştirme ve ekstrüzyon işlemleri uygulanmıştır. Üretimi tamamlanan ZK60 alaşımının ve ZK60 kompozitlerine delik delme işlenebilirliklerinin yanı sıra yoğunluk ölçümü, mikro yapı karakterizasyon analizleri, korozyon testi, mekanik testler ve delik delme sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Mikro yapı karakterizasyon sonuçlarına göre, MgZn<sub>2</sub> ve Zn<sub>2</sub>Zr intermetaliklerinin tüm kompozitlerde mevcut olduğu belirlenmiştir.

ZK60 alaşımına SiC takviyesi sonucunda matriste Mg<sub>2</sub>Si intermetaliki oluşurken B<sub>4</sub>C takviyesi sonucunda MgB<sub>2</sub> intermetalikiinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Tane boyutu lmlemleri sonuçlarına göre, en dşuk tane boyutu ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinde 3 m olarak llştr. ZK60 alaşımı ile karşılaştırıldığında, korozyon hızı ZK60+%5SiC kompozitinde 2,16 kat azalırken, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinde 4,06 kat artmıştır. Sertlik testlerine göre, ekstrüze ZK60 alaşımının sertlik değeri %10 B<sub>4</sub>C takviyesi ile %69,9 artış göstermiştir. Ekstrüze ZK60 alaşımının maksimum basma mukavemeti %10 SiC takviyesi ile %31,6 artarak 287,23 MPa değerinden 378,00 MPa değerine yükselmiştir. Aşınma testlerinin sonucuna göre ise en dşuk aşınma oranı ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinde  $1,71 \times 10^{-5} g/m$  değerindedir. ZK60 alaşımının aşınma yüzeyinde yoğun abrasif aşınma mekanizmaları bulunurken, üretilen ZK60 kompozitlerinin aşınma yüzeylerinde yoğun adhezif aşınma mekanizmalarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Delik delme testleri ve sonlu elemanlar analizlerinin (SEA) sonuçlarına göre, ekstrüze ZK60 alaşımının SEA itme kuvveti değer, deneysel itme kuvvetinin yaklaşık 4 katı çıkmıştır. ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinde SEA itme kuvvetleri ile deneysel itme kuvvetleri arasında yaklaşık 3 kat fark varken delme momenti değer neredeyse aynıdır. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin deneysel itme kuvveti ile SEA itme kuvveti ortalama değerleri arasındaki fark %2,5'tir. Buna karşı deneysel delme momenti, SEA delme momentinden 1,5 kat yüksek değerde çıkmıştır. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin deneysel itme kuvveti değer SEA itme kuvveti değerinden 2,5 kat; deneysel delme momenti değer SEA delme momenti değerinden 2,6 kat yüksek değerde çıkmıştır. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin deneysel itme kuvveti değer SEA itme kuvveti değerinden 3,2 kat daha dşuktur. Ayrıca SEA delme momenti değer deneysel delme momenti değerinden 1,42 kat daha yüksektir. Delik delme çalışmaları sonucunda, ZK60 alaşımının delme işlenebilirliği SiC takviyesi ile artarken B<sub>4</sub>C takviyesi ile azalmıştır. Bu çalışmadaki testlerin sonuçlarına göre SiC ve B<sub>4</sub>C takviyeleri ZK60 alaşımına birlikte eklenmeleri durumunda birbirlerinin olumsuz etkilerini iyileştirdiği ve yapısal özellikleri geliştirdiği sonucuna ulaşılıştır.

**Anahtar Sözcükler :** ZK60, SiC, B<sub>4</sub>C, Mikroyapı, Korozyon, Mekanik zellikler, Aşınma, Delik delme işlenebilirliği, Sonlu elemanlar analizi

**Bilim Kodu :** 91438

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND DRILLING MACHINABILITY OF SILICON CARBIDE (SiC) AND BORON CARBIDE (B<sub>4</sub>C) REINFORCED ZK60 ALLOY COMPOSITES**

**Hayreddin BOZTAŞ**

**Karabuk University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İsmail ESEN**

**June 2023, 129 pages**

In this study, ZK60 alloy and composites produced from ZK60 alloy investigated the hole drilling machinability. ZK60 alloy was strengthened with SiC and B<sub>4</sub>C particle reinforcements to produce ZK60+5%SiC, ZK60+10%SiC, ZK60+5%B<sub>4</sub>C, ZK60+10%B<sub>4</sub>C and ZK60+5%SiC+5%B<sub>4</sub>C composites. In the production, the stirred casting process was preferred, and the semi-solid temperature stirring method was used to provide the homogeneous distribution of the reinforcement materials into the molten ZK60 matrix. Homogenization and extrusion processes were applied to the produced ZK60 alloy and ZK60 composites, respectively. In addition, the produced ZK60 alloy and ZK60 composites underwent hole-drilling machinability, density measurement, microstructure characterization analysis, corrosion test, mechanical tests and hole-drilling finite element analyses.

According to the microstructure characterization results, it was determined that  $MgZn_2$  and  $Zn_2Zr$  intermetallics were present in all composites. According to the microstructure characterization results, it was determined that  $MgZn_2$  and  $Zn_2Zr$  intermetallics were present in all composites. It was observed that  $Mg_2Si$  intermetallic was formed in the matrix due to SiC reinforcement to ZK60 alloy, while  $MgB_2$  intermetallic was formed due to  $B_4C$  reinforcement. According to the results of grain size measurements, the smallest grain size was measured as 3  $\mu m$  in ZK60+5% $B_4C$  and ZK60+10% $B_4C$  composites. Compared to ZK60 alloy, the corrosion rate decreased by 2,16 times in the ZK60+5%SiC composite and increased by 4,06 times in the ZK60+10% $B_4C$  composite. According to the hardness tests, the hardness value of the extruded ZK60 alloy increased by 69,9% with 10%  $B_4C$  reinforcement. The maximum compressive strength of the extruded ZK60 alloy increased by 31.6% from 287,23 MPa to 378,00 MPa with 10% SiC reinforcement. According to the results of the wear tests, the lowest wear rate is  $1,71 \times 10^{-5} g/m$  in the ZK60+10% $B_4C$  composite. While there are intense abrasive wear mechanisms on the wear surface of the ZK60 alloy, it has been observed that there are intense adhesive wear mechanisms on the wear surfaces of the produced ZK60 composites. According to the results of hole drilling tests and finite element analysis (SEA), the SEA thrust force of the extruded ZK60 alloy was approximately four times the experimental thrust force. In ZK60+5%SiC and ZK60+10%SiC composites, there is a 3 times difference between SEA thrust force and experimental thrust force, while the drilling moment value is almost the same. The difference between the experimental thrust force of the ZK60+5% $B_4C$  composite and the thrust force of the SEA is 2,5%. On the other hand, the experimental drilling moment was 1,5 times higher than the SEA drilling moment. The experimental thrust force of the ZK60+10% $B_4C$  composite is 2,5 times the SEA thrust force; the experimental drilling moment value was 2,6 times higher than the SEA drilling moment value. The experimental thrust force value of the ZK60+5%SiC+5% $B_4C$  composite is 3,2 times lower than the SEA thrust force value. In addition, the SEA drilling moment value is 1,42 times higher than the experimental drilling moment value. As a result of drilling studies, the drilling machinability of ZK60 alloy increased with SiC reinforcement and decreased with  $B_4C$  reinforcement. According to the results of the tests in this study, it was concluded that when SiC and



B4C reinforcements are added together to the ZK60 alloy, they improve the negative effects of each other and the structural properties.

**Key Word** : ZK60, SiC, B<sub>4</sub>C, Microstructure, Corrosion, Mechanical properties, Wear, Drilling machinability, Finite element analysis

**Science Code** : 91438

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışması süresince beni yönlendiren, çalışmaların planlanmasında ve araŐtırılmasında desteğini esirgemeyen danıŐman hocam sayın Prof. Dr. İsmail ESEN'e teŐekkürlerimi sunarım.

ÇalıŐmalarım süresince sağladıkları imkanlardan dolayı Karabük Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne; engin bilgilerini esirgmeden paylaŐan Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI ve Doç. Dr. Yunus TREN hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destek olan çok sevgili anneme, babama ve kardeŐlerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalıŐmasını 1002 Hızlı Destek Projesi kapsamında 122M233 proje numarası ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu alıŐmayı KBBAP-21-YL-109 proje numarası ile destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel AraŐtırmalar Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xx
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI .....	5
2.1. MAGNEZYUM.....	5
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	7
2.2.1. Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkisi.....	8
2.2.1.1. Alüminyum .....	9
2.2.1.2. Çinko.....	9
2.2.1.3. Zirkonyum.....	10
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜM YÖNTEMLERİ.....	11
2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYONU .....	13
2.5. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPZÖZİTLER .....	14
2.5.1. Magnezyum Esaslı Silisyum Karbür Kompozitleri.....	15
2.5.2. Magnezyum Esaslı Bor Karbür Kompozitleri .....	15
2.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA DEFORMASYON .....	16
2.6.1. Magnezyum Alaşımlarının Kayma Mekanizmaları.....	16
2.6.2. Magnezyum Alaşımlarında İkizlenme Mekanizması .....	17

2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YENİDEN KRİSTALLEŞME .....	19
BÖLÜM 3 .....	20
DELİK DELME İŞLEMİ VE TERMİNOLOJİSİ .....	20
3.1. DELİK DELME İŞLEMİNİN MEKANİĞİ.....	21
3.2. MATKAP YÜZEYLERİNDE AŞINMA MEKANİZMALARI .....	24
BÖLÜM 4 .....	27
LİTERATÜR BİLGİSİ .....	27
4.1. ZK60 ALAŞIMI LİTERATÜR TARAMASI.....	27
4.2. DELME İŞLENEBİLİRLİĞİ LİTERATÜR TARAMASI.....	33
BÖLÜM 5 .....	35
MATERYAL VE METOT .....	35
5.1. GENEL BAKIŞ.....	35
5.2. ZK60 ALAŞIMI VE ZK60 KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ.....	35
5.2.1. Karıştırmalı Döküm .....	35
5.2.2. Homojenleştirme Isıl İşlemi .....	37
5.2.3. Ekstrüzyon İşlemi .....	38
5.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ .....	38
5.4. MİKRO YAPI KARAKTERİZASYONU .....	39
5.4.1. XRD Faz Analizi .....	40
5.4.1.1. Fazların Gibbs Değerlerinin Hesabı ve Termokimyasal Çözümleme .....	40
5.4.2. Mikro Yapı Görüntüleme .....	41
5.4.2.1. Tane Boyutu Hesabı.....	42
5.4.3. SEM-EDX Analizleri.....	42
5.5. KOROZYON TESTİ.....	43
5.6. SERTLİK TESTİ.....	44
5.7. BASMA TESTİ.....	44
5.8. AŞINMA TESTİ .....	45
5.9. DELİK DELME TESTİ .....	46
5.10. DELİK DELME SONLU ELEMANLAR ANALİZİ .....	47

5.10.1. Malzeme Modelinin Oluşturulması .....	47
5.10.2. Sonlu Elemanlar Modeli .....	49
<b>BÖLÜM 6 .....</b>	<b>52</b>
<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>52</b>
6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI .....	52
6.2. MİKRO YAPI KARAKTERİZASYONU SONUÇLARI .....	53
6.2.1. XRD Faz Analizleri Sonuçları.....	53
6.2.1.1. Fazların Gibbs Değerlerinin Sonuçları ve Termokimyasal Çözümleme .....	54
6.2.3. Mikro Yapı Görüntüleme .....	55
6.2.3.1. Tane Boyutu Hesabı.....	57
6.2.4. SEM-EDX Sonuçları .....	59
6.3. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI.....	62
6.3.1. Korozyon Yüzeyleri SEM İncelemeleri .....	64
6.3.2. Korozyon Yüzeylerinin Faz Analizleri.....	65
6.4. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI.....	68
6.5. BASMA TESTLERİ SONUÇLARI .....	69
6.5.1. Kırılma Yüzeylerinin SEM İncelemeleri.....	71
6.6. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI .....	72
6.6.1. Aşınma Yüzeylerinin SEM-MAP İncelemeleri.....	74
6.6.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları.....	77
6.7. DELİK DELME TESTİ SONUÇLARI .....	79
6.7.1. Matkap Çıkış Yüzeyi Geometrisi ve Çapak Oluşumu İncelemeleri.....	92
6.7.2. Delik İç Yüzeylerinin SEM İncelemeleri .....	96
6.7.3. Talaş Yapılarının SEM İncelemeleri .....	98
6.8. DELİK DELME SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI .....	103
6.8.1. Johnson-Cook ve Ductile Damage Sonuçları .....	103
6.8.2. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları .....	103
6.8.3 Sonlu Elemanlar Analizi ve Delik Delme Testlerinin Karşılaştırılması	117
<b>BÖLÜM 7 .....</b>	<b>119</b>
<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>119</b>

KAYNAKLAR ..... 124

ÖZGEÇMİŞ ..... 129

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Mg birim HSP kristal yapısındaki atom pozisyonlarının şematik gösterimi. .....	6
Şekil 2.2. Mg-Zn faz diyagramı. ....	10
Şekil 2.3. Mg açısından zengin bölge odaklı Mg-Zr faz diyagramı. ....	11
Şekil 2.4. Ekstrüzyon prosesi ve kullanılan sistem parçaları. ....	13
Şekil 2.5. Mg alaşımlarının kayma mekanizmaları; a) taban kayma, b) prizmatik kayma, c) birincil piramidal kayma, d) ikincil piramidal kayma. ....	17
Şekil 2.6. İkizlenme mekanizmasının şematik gösterimi. ....	18
Şekil 2.7. İkizlenme tiplerinin şematik gösterimi. ....	18
Şekil 3.1. Delik delme parametreleri. ....	22
Şekil 3.2. Takım aşınmasının aşamaları: (I) ilk kopma; (II) aşamalı uniform aşınma; (III) hızlandırılmış veya katastrofik aşınma. ....	26
Şekil 5.1. Üretim işlemlerinin görüntüleri: a) yarı katı sıcaklıkta karıştırma, b) döküm .....	37
Şekil 5.2. Döküm işlemi tamamlanmış ZK60 alaşımının görüntüsü. ....	37
Şekil 5.3. Ekstrüzyon işlemi öncesi: a) ekstrüzyon düzeneği, b) numune hazırlığı... ..	38
Şekil 5.4. Hazırlanan numunenin sudaki ağırlığının hassas terazide ölçümü. ....	39
Şekil 5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) düzeneği.....	43
Şekil 5.6. Brinell sertlik ölçüm testi.....	44
Şekil 5.7. Basma testi uygulaması.....	45
Şekil 5.8. Delik delme testlerinde kullanılan matkapların teknik resmi. ....	46
Şekil 5.9. Üç boyutlu tasarımların örnek görüntüleri: a) numune; b) matkap. ....	49
Şekil 5.10. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinin montaj görüntüsü. ....	50
Şekil 5.11. Sonlu elemanlar modelinin mesh ağı görüntüsü.....	51
Şekil 6.1. XRD faz analizi sonuçları: a) ZK60+%10SiC, b) ZK60+%10B4C, c)ZK60+%5SiC+%5B4C.....	54
Şekil 6.2. Gibbs serbest enerji değişim grafiği. ....	55
Şekil 6.3. ZK60 alaşımı görüntüleri: a) döküm, b) homojenleştirilmiş. ....	56

Şekil 6.4. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B4C, e) ZK60+%10B4C, f) ZK60+%5SiC+%5B4C numunelerinin mikro yapı görüntüleri.....	57
Şekil 6.5. ZK60+10%SiC numunesinin SEM mikrografı.....	59
Şekil 6.6. ZK60+10%B4C numunesinin SEM mikrografı.....	60
Şekil 6.7. ZK60+5%SiC+5%B4C numunesinin SEM mikrografı.....	61
Şekil 6.8. Potansiyodinamik polarizasyon logaritmik eğrisi.....	62
Şekil 6.9. a) ZK60+%10SiC b) ZK60+%10B4C numunelerinin 1000X büyütmedeki korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.....	65
Şekil 6.10. Korozyon yüzeyi XRD analizi: a) ZK60+%10SiC, b) ZK60+%10B4C.	66
Şekil 6.11. Kimyasal tepkimelerin oksit bileşik oluşturma istekliliklerini gösteren Ellingham diyagramı.....	67
Şekil 6.12. Basma testi sonuçları.....	70
Şekil 6.13. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B4C, e) ZK60+%10B4C, f) ZK60+%5SiC+%5B4C numunelerinin 250X büyütme basma yüzeyi SEM mikrografları.....	72
Şekil 6.14. Aşınma testi kütle kaybı grafiği.....	73
Şekil 6.15. Ekstrüze ZK60 alaşımının a) SEM, b) MAP görüntüleri.....	74
Şekil 6.16. ZK60+%10SiC numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.....	75
Şekil 6.17. ZK60+%10B4C numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.....	76
Şekil 6.18. ZK60+%5SiC+%5B4C numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.....	76
Şekil 6.19. Sürtünme katsayısı değişim grafiği.....	78
Şekil 6.20. ZK60 alaşımının farklı uç açılarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	80
Şekil 6.21. ZK60 alaşımının farklı uç açılarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.	80
Şekil 6.22. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açılarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.	82
Şekil 6.23. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açılarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.	82
Şekil 6.24. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açılarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.	84



Şekil 6.25. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	84
Şekil 6.26. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	86
Şekil 6.27. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	86
Şekil 6.28. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	88
Şekil 6.29. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	88
Şekil 6.30. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	90
Şekil 6.31. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.....	90
Şekil 6.32. ZK60 alaşımı matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	92
Şekil 6.33. ZK60+%5SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	93
Şekil 6.34. ZK60+%10SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	94
Şekil 6.35. ZK60+%5B4C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	95
Şekil 6.36. ZK60+%10B4C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	95
Şekil 6.37. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.....	96
Şekil 6.38. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B4C, e) ZK60+%10B4C, f) ZK60+%5SiC+%5B4C numunelerinin 250X büyütme delik iç yüzeyi SEM mikrografları.....	97
Şekil 6.39. Delik delme testleri sırasında oluşan talaş tipleri: a) testere dişli kırık kısa talaş, b) testere dişli sürekli uzun talaş, c) sürekli talaş yığılması.....	98
Şekil 6.40. ZK60 alaşımının farklı parametrelerdeki talaş formları.....	99
Şekil 6.41 ZK60+%5SiC kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.....	100
Şekil 6.42. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları....	100
Şekil 6.43. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.....	101
Şekil 6.44. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları... ..	102
Şekil 6.45. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.....	102
Şekil 6.46. Sonuçlandırılmış sonlu elemanlar analizi örnek test.....	104

Şekil 6.47. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	105
Şekil 6.48. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	105
Şekil 6.49. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	107
Şekil 6.50. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	107
Şekil 6.51. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	109
Şekil 6.52. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	109
Şekil 6.53. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	111
Şekil 6.54. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	111
Şekil 6.55. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	113
Şekil 6.56. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	113
Şekil 6.57. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	115
Şekil 6.58. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .	115

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Mg'ye ait genel özellikler. ....	5
Çizelge 2.2. ASTM-A275 standardına göre alaşım elementleri ve kısaltmaları [10].	8
Çizelge 5.1. Üretimde kullanılan SiC ve B4C takviyelerinin özellikleri. ....	36
Çizelge 5.2. Teknik resmi verilen matkapların ölçüleri (Şekil 5.8). ....	46
Çizelge 5.3. Delik delme test parametreleri. ....	47
Çizelge 6.1. Hesaplanan kuru ağırlık, yaş ağırlık ve yoğunluk değerleri. ....	52
Çizelge 6.2. ASTM E112 tane boyu ölçümler tablosu. ....	58
Çizelge 6.3. ZK60+10%SiC numunesinin EDX sonuçları. ....	60
Çizelge 6.4. ZK60+10%B4C numunesinin EDX sonuçları. ....	60
Çizelge 6.5. ZK60+5%SiC+5%B4C numunesinin EDX sonuçları. ....	61
Çizelge 6.6. Korozyon testi sonuçları. ....	63
Çizelge 6.7. Brinell sertlik ölçüm sonuçları. ....	69
Çizelge 6.8. Maksimum basma mukavemeti değerleri. ....	70
Çizelge 6.9. Aşınma oranı sonuçları. ....	74
Çizelge 6.10. Hesaplanan sürtünme katsayı değerleri. ....	78
Çizelge 6.11. ZK60 alaşımının delik delme testleri sonuçları. ....	81
Çizelge 6.12. ZK60+%5SiC kompozitinin delik delme testleri sonuçları. ....	83
Çizelge 6.13. ZK60+%10SiC kompozitinin delik delme testleri sonuçları. ....	85
Çizelge 6.14. ZK60+%5B4C kompozitinin delik delme testleri sonuçları. ....	87
Çizelge 6.15. ZK60+%10B4C kompozitinin delik delme testleri sonuçları. ....	89
Çizelge 6.16. ZK60+%10B4C kompozitinin delik delme testleri sonuçları. ....	91
Çizelge 6.17. Delik delme testleri genel ortalama değerleri. ....	91
Çizelge 6.18. Johnson-Cook hesabı sonuçları. ....	103
Çizelge 6.19. Ductile Damage hesap sonuçları. ....	103
Çizelge 6.20. ZK60 alaşımının SEA sonuçları. ....	106
Çizelge 6.21. ZK60+%5SiC kompozitinin SEA sonuçları. ....	108
Çizelge 6.22. ZK60+%10SiC kompozitinin SEA sonuçları. ....	110
Çizelge 6.23. ZK60+%5B4C kompozitinin SEA sonuçları. ....	112

Çizelge 6.24. ZK60+%10B4C kompozitinin SEA sonuçları.....	114
Çizelge 6.25. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin SEA sonuçları. ....	116
Çizelge 6.26. SEA genel ortalama değerleri.....	116
Çizelge 6.27. Deneysel ve SEA delik delme sonuçları.....	117

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Mg	: magnezyum
SiC	: silisyum karbür
B <sub>4</sub> C	: bor karbür
Zn	: çinko
Zr	: zirkonyum
MgO	: magnezyum oksit
C	: karbon
Al	: alüminyum
Mn	: mangan
B	: bor
Ca	: kalsiyum
Ag	: gümüş
Ce	: seryum
Ga	: galyum
Ni	: nikel
Cu	: bakır
Th	: toryum
Cd	: kadmiyum
Tl	: talyum
Li	: lityum
<i>l</i>	: delik boyu
<i>d</i>	: delik çapı
<i>V<sub>c</sub></i>	: kesme hızı
<i>V<sub>f</sub></i>	: ilerleme hızı
<i>n</i>	: devir sayısı
<i>D<sub>m</sub></i>	: matkap çapı

- $f_n$  : devir başına ilerleme  
 $b$  : kesici kenar uzunluğu  
 $h$  : talaş kalınlığı  
 $A$  : talaş kesit alanı  
 $F_c$  : esas kesme kuvveti  
 $k_c$  : özgül kesme direnci faktörü  
 $k_T$  : matkap malzemesinin cinsi faktörü  
 $k_g$  : kesici kenar etkin talaş açısı faktörü  
 $k_a$  : aşınma etkileri faktörü  
 $k_{vc}$  : kesme hızı faktörü  
 $z$  : kesme yüzey sayısı  
 $M_D$  : delme momenti  
 $M_\mu$  : delme sürtünme momenti  
 $M_T$  : toplam delme momenti  
 $d_1$  : matkap çapı  
 $l_1$  : matkap uzunluğu  
 $l_2$  : matkap kesme uzunluğu  
 $l_3$  : matkap kanal uzunluğu  
 $\alpha$  : matkap ön (uç) açısı  
 $\omega$  : matkap helis açısı  
 $\rho$  : yoğunluk  
 $\rho_{su}$  : su yoğunluğu  
 $w_{hava}$  : havadaki ağırlık  
 $w_{su}$  : sudaki ağırlık değeri  
 $\Delta G$  : Gibbs serbest enerji  
 $\Delta H$  : entalpi değeri  
 $H_r$  : reaktantların entalpi değeri  
 $H_p$  : reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin entalpi değeri  
 $\Delta S$  : entropi değeri  
 $S_r$  : reaktantların entropi değeri  
 $S_p$  : reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin entropi değeri  
 $HB$  : Brinell sertlik değeri  
 $MPa$  : megapaskal

- N : newton  
 $\sigma$  : normal gerilme değeri  
 $\sigma^*$  : gerilme üç eksenliliği  
 $\sigma_m$  : ortalama gerilme değeri  
 $\sigma_{eq}$  : eşdeğer Von-Mises gerilme değeri  
 $\sigma_1$  : x-eksenindeki gerilme değeri  
 $\sigma_2$  : y-eksenindeki gerilme değeri  
 $\sigma_3$  : z-eksenindeki gerilme değeri  
 $T$  : sıcaklık  
 $T_r$  : oda sıcaklığı  
 $T_e$  : erime sıcaklığı

## **KISALTMALAR**

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)  
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)  
EN : European Norm (Avrupa Normu)  
SEM : Scanning Electrone Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)  
XRD : X-ray Diffractometer  
MAP : Mapping (Haritalama)  
EDX : Energy Dispersive X-ray (Enerji Dağıtıcı X-ışını)  
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi  
DRX : Dynamic Recrystallization (dinamik yeniden kristalleşme)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Otomotiv, havacılık ve uzay uygulamaları için döküm ve işlenmiş formlarda malzemelere olan ihtiyaç, yapısal malzemelerin çeşitli yollarla geliştirilmesinin önünü açmıştır. Kullanılan malzemelerin ağırlıkları sonucu yüksek enerji tüketimi, hafif malzemeler üzerindeki talebin artmasına ve düşük yoğunluğa sahip yeni yapısal malzemelerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bunun sonucu olarak, endüstriyel uygulama alanlarında beklenen mekanik standardı karşılayabilmeleri için mevcut hafif malzemeler üzerinde birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Magnezyum (Mg), yapısal metaller arasında en düşük yoğunluğa ( $1,738 \text{ g/cm}^3$ ) sahip olması ve yüksek özgül dayanımından dolayı ( $\sim 52 \text{ kN*m/kg}$ ) sanayi uygulamalarında potansiyeli yüksek olan bir malzeme olarak görülmüştür [1].

Saf Mg, üzerinde yapılan birçok araştırma sonucunda düşük korozyon direnci ve mukavemet özelliklerinden dolayı kullanıma uygun bulunmamış ve temel özelliklerini iyileştirmek için pek çok alaşımlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alüminyum (Al), Çinko (Zn), Mangan (Mn), Zirkonyum (Zr) gibi bazı elementlerin alaşımlama için kullanılması, Mg'nin mukavemet, korozyon, şekillendirilebilirlik gibi birçok özelliklerini geliştirmiştir [1–3]. Bu elementlerin kullanımı sonucunda AZ (Mg-Al-Zn), ZK (Mg-Zn-Zr) ve AM (Mg-Al-Mn) gibi birçok Mg alaşımları ortaya çıkmıştır. Alaşımların içeriğindeki elementlerin farklı kombinasyonları sonucunda Mg alaşım serilerinin standartları oluşmuştur. Özellikle ZK60 alaşımlarının (%93,5 Mg-%6 Zn-%0,5 Zr) yapısında bulunan Zn ve Zr elementlerinin kristal kafes yapılarının Mg'nin kristal kafes yapısına uygunluğu diğer alaşımlardan daha yüksek mukavemete ve şekillendirilebilirliğe sahip olmasını sağlamaktadır [3].

Mg alaşımlarının üretiminde döküm, toz metalürjisi, sıvı emdirme gibi farklı üretim metotları kullanılmaktadır. Ancak karıştırmalı döküm yöntemi ile üretim, diğer üretim



yöntemlerine nazaran düşük maliyet ve yüksek üretim hızı nedeniyle kolayca uygulanabilir. Bu üretim yöntemi, ürünün kesintisiz şekil oluşumunu sağladığı bilinmektedir. Karıştırılmalı döküm prosedürü uygulanan Mg alaşım eriyiklerinin karıştırılma sıcaklığı, partiküllerin matris üzerindeki dağılımında önemli bir rol oynar. Alaşımların üretimi, karıştırma sıvı sıcaklığının üzerinde yapıldığında gözeneklilik, partikül kümeleri ve yüksek oksit inklüzyonları meydana gelebilir. Ayrıca ıslanabilirliği etkileyip erimiş metalin yüzey geriliminin artması veya azalması sonucu tanelerin yüzey enerjisinde değişikliklere neden olur [3].

Uygun üretim, alaşımlama işlemleri uygulanan yapısal malzemelere haddeleme, ekstrüzyon işleminin uygulanması kristal yapılarında kalıcı şekil değişikliği sağlamaktadır. Diğer metallerde olduğu gibi plastik deformasyon sonucu Mg tane küçülmesi sağlanarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Ayrıca dinamik etkiler sonucunda yeniden kristalize olmuş tanelerin boyuta ve pürüzlülüğe etkileri katı çözelti sertleştirme, kararlı ikincil faz yapılarının oluşumu sağlanarak giderilebilir. Ekstrüzyon, haddeleme, homojenleştirme, yaşlandırma veya şekil verme proseslerinde deformasyon oranı, sıcaklık, hız, ısıl işlem ortamı gibi parametreler nihai mikroyapının kapsamlı bir şekilde şekillendirilmesine neden olur. Bu nedenle, farklı alaşımlama yöntemleri, plastik deformasyon ve ısıl işlem koşulları, Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için kabul gören yöntemlerdir [2,3].

Mg alaşımlarında tane küçültme etkisi olan bir diğer proses ise seramik takviyeler ile metal matrisli kompozit üretimidir. Seramik takviyeli Mg matrisli kompozitlerin üretimi, yeni çalışılmaya başlanan ve son dönemde üzerinde sıkça çalışmalar gerçekleştirilen bir konudur. Yapılan çalışmalarda seramik malzemelerin metal matrisli kompozit üretimi için uygunluğu birçok sefer ifade edilmiştir [4]. Mg matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları Silisyum Karbür (SiC), Bor (B), Bor Karbür (B<sub>4</sub>C) ve Alüminadır (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Seramik takviyeler arasında en çok tercih edilen SiC takviyesi, Mg alaşımların yapısında yüksek kimyasal uyumluluğa, sertlik değerinin yükselmesine ve düşük yoğunluğa sahip olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, SiC takviyesinin Mg alaşımlarında elastisite modülünü ve çekme mukavemetini arttırdığı bilinmektedir [5–8]. Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan takviye malzemelerinden bir diğeri de B<sub>4</sub>C malzemesidir.

B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş Mg esaslı kompozitler, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli, sert ve rijit malzemelerdir. Ayrıca, B<sub>4</sub>C takviyesi Mg matrisinde kararlı davranış sergiler. SiC takviyeli Mg bazlı kompozitler otomotiv ve havacılık endüstrisi uygulamalarında tercih edilirken, B<sub>4</sub>C takviyeli Mg kompozitler havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilmektedir [7].

Mg alaşımı üzerinde yapılan çalışmaların kısa sayılabilecek sürede gerçekleşmesi ve ZK60 alaşımlarının mekanik ve kimyasal özellikleri, mikro yapı karakterizasyonları, dökülebilirlikleri, takım tezgahlarında işlenebilirlikleri ve sanayi uygulamalarında meydana gelebilecek aşınma, korozyon dirençlerindeki değişimleri gibi bilgiler sınırlıdır. Ayrıca matkap takımları ile delik delme prosesi sanayi uygulamalarında en çok kullanılan ve sıkça karşımıza çıkan talaşlı imalat yöntemlerinden biri olmasına karşı ZK60 alaşımının delme işlenebilirliği üzerinde yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Hafif malzemelerin ön planda olduğu uzay ve havacılık endüstrisinde, kaynaklama işlemlerinin az tercih edilmesi sebebiyle vida ve perçin ile birleştirme yöntemlerinin tercih ediliyor olması, delik delme işleminin çokça kullanılmasına sebep olmaktadır. Delme işlemi gerçekleştirilirken yapısal malzeme kaynaklı olarak takım araçlarının zarar görmesi, hasarlı ürün üretimi gibi koşulların oluşması durumunda üretici firmalara maddi olumsuzluklar ve iş kayıplarına uğrayabilir. Bunlar gibi olumsuzlukların havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında oluşabilme ihtimali, yapısal malzemelerin delme işlenebilirlik kapasitelerinin önemli bir kriter olmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, ZK60 alaşımına farklı oranlarda SiC, B<sub>4</sub>C ve SiC+B<sub>4</sub>C partikül takviyeleri eklenerek fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ileri malzeme standartlarına uygun kompozit malzemeler üretilmesi ve üretilen bu malzemelerin delme işlenebilirliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. ZK60 matrisli kompozitlerin üretim proseslerinde, yarı katı sıcaklıkta karıştırmalı döküm yöntemi, homojenleştirme ve ekstrüzyon prosedürleri uygulanmıştır. Üretimi tamamlanan ekstrüze ZK60 alaşımı ve kompozitlerinin mikroyapı karakterizasyonu, mekanik özellikleri, korozyon özellikleri ve delme işlenebilirlikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile önümüzdeki yıllarda daha da çok önem kazanması öngörülen ZK60 matrisli seramik takviyeli kompozitlerin yapısal özellikleri ile ilgili literatürdeki

eksiklik kapatılması ve ticari hafif malzeme olarak kullanımları geliştirilerek yaygınlaştırılması öngörülmektedir.

## BÖLÜM 2

### MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

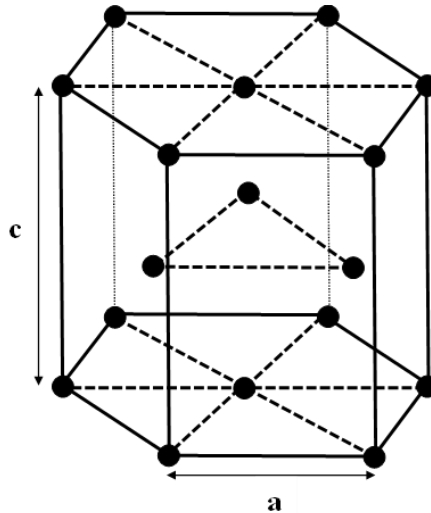
#### 2.1. MAGNEZYUM

Havacılık, uzay ve otomotiv uygulamaları için yeni yapısal malzemelerin geliştirilmesi, döküm ve işlenmiş formlarda hafif parçalara olan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Saf Mg, yapısal metaller arasında en düşük yoğunluğa ( $1,738 \text{ g/cm}^3$ ) sahip metal malzemedir ve yoğunluğu, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen Al alaşımlarından ( $2,60\text{-}2,85 \text{ g/cm}^3$ ) yaklaşık 0,65 kat daha düşüktür. Genel özellikleri Çizelge 2.1'de sunulan saf Mg'nin özgül dayanımının (maksimum dayanım/yoğunluk) yüksek olması geleneksel uygulamaların yanı sıra ileri malzeme uygulamalarında da kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Ek olarak Mg'nin düşük ergime sıcaklığı dökülebilirliği arttırmakta ve üretim kolaylığı sağlamaktadır [2,3,9].

Çizelge 2.1. Mg'ye ait genel özellikler.

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Yoğunluk	1,738 ( $\text{g/cm}^3$ )
Kristal Yapı	Hekzagonal sıkı paket
Ergime Noktası	650 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Özgül Isısı	0,25 ( $\text{cal/g } ^{\circ}\text{C}$ )
Termal İletim Katsayısı	156 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ )
Çekme Akma Dayanımı	80-180 (MPa)
Young Modülü	45 (GPa)
Çekme Uzama	% 4,2
Sertlik	30-47 HB

Saf Mg, düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım ve dökülebilirlik avantajlarından dolayı büyük potansiyele sahip olmasına rağmen düşük mukavemet özellikleri ve yüksek gevrekliği sebebiyle hafif yapısal malzeme olarak kullanımları için yeterli mukavemet özelliklerini karşılamamaktadır. Mg'nin hekzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısında birincil kayma, ikincil kayma ve ikizlenme deformasyon kayma mekanizmaları dışında herhangi bir kayma mekanizması gerçekleşmez. Şekil 2.1'de sunulan HSP kristal yapısının oda sıcaklığındaki kayma gerilmeleri, yapısında bulundurduğu prizmatik ve piramidal kayma sistemleri gibi taban kayma sistemlere göre çok daha düşük değerde gerçekleşir. Deformasyon ikizlerinin HSP kafes yapısına yeniden uyumunu sağlamasına ve oda sıcaklığındaki deformasyon derecesinin daha fazla gerçekleşmesine rağmen, temel kayma sistemleri dış uzamayı tam olarak karşılayamaz. Dolayısıyla Mg'nin sahip olduğu HSP kafes yapısı mekanik olarak kullanım kapasitesini sınırlayan ve işlenebilirliği düşüren temel etken olmuş olur. Oda sıcaklığındaki zayıf şekillendirilebilirlikleri, düşük deformasyon özellikleri, yüksek gevreklik ve düşük simetri gibi birçok yapısal dezavantajlar da yine Mg'nin kristal yapısından kaynaklanmaktadır. Bunlara ek olarak Mg'nin kimyasal tepkimeye girme isteği ve çok düşük korozyon potansiyeline sahip olması ( $(E_{kor})_{Mg} = -2,37 \text{ V}$ ) oksitlenme eğilimini ve galvanik korozyona olan yatkınlığını artırarak korozyon direncini olumsuz etkilemektedir [2–4,10].



Şekil 2.1. Mg birim HSP kristal yapısındaki atom pozisyonlarının şematik gösterimi.

Bahsi geçen tüm avantajlar ve dezavantajlar karşılaştırıldığında mekanik özellikleri geliştirdiği takdirde Mg'nin sanayi uygulamalarındaki kazançları üstün gelmektedir. Bu durum Mg'yi geliştirilmesi gereken bir malzeme haline getirmiş ve birçok çalışmada tercih edilmesine sebep olmuştur. Özellikle Alüminyum (Al), Çinko (Zn), Manganez (Mn) ve Zirkonyum (Zr) gibi birçok element kullanarak Mg'nin mukavemet, korozyon, şekillendirilebilirlik gibi temel özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmaların başarı ile sonuçlanması sonucunda AZ (Mg-Al-Zn), ZK (Mg-Zn-Zr) ve AM (Mg-Al-Mn) gibi Mg'nin temel alaşım serileri oluşmuştur. Ayrıca bazı çalışmalarda ise Mg'nin şekillendirilebilirliğini geliştirmek için ekstrüzyon, eşit kanallı açılmal işlem, asimetrik haddeleme, termomekanik işlem gibi farklı deformasyon teknikleriyle Mg'nin kristal yapısı değiştirilmeye de çalışılmıştır [2,3,10,11].

## **2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI**

Mg, alüminyumdan %33, çelik ve çinkodan %75 daha hafif olduğu için çeşitli endüstrilerde hafif yapısal bir malzeme olarak kullanılabilir. Ayrıca, Mg'nin düşük ataleti, özellikle otomotiv ve havacılık uygulamalarındaki hızlı hareket eden bileşenler için bir avantajdır. Yapılan geliştirme çalışmaları birçok elementin Mg'nin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için kullanılabileceğini ortaya çıkarmış ve bu sayede Mg alaşımlarında bir standart oluşturulmuştur. Mg alaşımları, diğer metal alaşımlarıyla karşılaştırıldığında çok yüksek özgül çekme-basma mukavemeti değerlerine, yüksek elastisite modülüne ve dolayısıyla çok büyük süneklığe sahip hale getirilebilir [3].

Mg alaşım elementlerini iyileştirdiği özelliklere göre üç gruba ayırmak mümkündür. İlk gruptaki alaşım elementleri yüksek oranda hem mukavemeti hem de sünekliliği artırır. Bu elementler Al, Zn, Ca, Ag, Ce, Ga, Ni, Cu, Th şeklinde sıralanabilir. İkinci gruptaki alaşım elementleri düşük mukavemet artışı sağlarken yüksek oranda da sünekliliği artırır. Bunlar Cd, Tl ve Li elementleridir. Son olarak üçüncü grupta Sn, Pb, Bi ve Sb alaşım elementleri bulunur ve bu elementler sünekliliği düşürmelerine karşın yüksek oranda mukavemet artışı sağlayabilen elementlerdir. Bu elementlerden farklı olarak Mg alaşımlarına Zr ilavesi, özellikle dökümlerde yüksek oranlarda mukavemet

ve sünekliği arttırmasına rağmen Zr elementinin Al ve Mn elementleri ile kullanılması dökülebilirlik, korozyon direnci gibi bazı temel özelliklerde olumsuz etkilere sebebiyet verir [12]. Ek olarak alaşım elementlerinin birlikte kullanımı sonucunda AM (Mg-Al-Mn), AS (Mg-Al-Si), AZ (Mg-Al-Zn), ZC (Mg-Zn-Cu) ve ZK (Mg-Zn-Zr) gibi birçok Mg alaşımları ve bu alaşımların içeriğindeki elementlerin farklı oran kombinasyonları sonucunda standart Mg alaşım serileri ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada da kullanılan ZK60 alaşımlarının (%93,5 Mg-%6 Zn-%0,5 Zr) yapısında bulunan Zn ve Zr elementlerinin kristal kafes yapılarının Mg'nin kristal kafes yapısına uygunluğu diğer alaşımlardan daha yüksek mukavemete ve şekillendirilebilirliğe sahip olmasını sağladığı bilinmektedir [2,13].

Mg alaşımları ticari alanlarda karışıklık olmaması için ASTM-A275 standardına göre kısaltmalar kullanılarak isimlendirilmiştir. Bu isimler, içerdikleri elementlere ve elementlerin eklenme oranlarına göre iki harf ve iki sayı (örneğin AB12) şeklinde kısaltılmıştır. Yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinin isim kısaltmaları Çizelge 3.2 'de sunulmuştur [10]. ASTM-A275 standardına göre ZK60 alaşımının isimlendirilmesi açıklanacak olunursa “Z” harfi alaşıma en fazla eklenen element olan Zn'yi ve “K” harfi alaşıma ikinci olarak en fazla eklenen element olan Zr'yi ifade eder. “6” rakamı alaşıma eklenen Zn oranının 5,6-6,4 arasında olduğunu, “0” rakamı ise alaşıma eklenen Zr oranının 0,0-0,5 arasında olduğunu ifade eder [10,11].

Çizelge 2.2. ASTM-A275 standardına göre alaşım elementleri ve kısaltmaları [10].

Harf	A	C	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Cu	RE	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

### 2.2.1. Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkisi

ZK60 alaşımı mevcut çalışmaların odak noktası olmasından kaynaklı olarak bu kısımda Zn ve Zr elementlerinin Mg üzerindeki etkisi detaylandırılmıştır. Bunlara ek olarak, en yaygın alaşım elementi olarak kullanılan Al elementinin Mg alaşımlarındaki etkisi de bu başlık altında incelenmiştir.

### 2.2.1.1. Alüminyum

Al elementi Mg alaşımlarında en çok kullanılan alaşım elementlerinin başında gelir ve endüstriyel olarak kullanılan basınçlı döküm Mg alaşımlarının ana alaşım elementidir. Bunun sebebi Mg ile atom boyutlarının farkı yaklaşık %13'tür. Atom boyutları arasında oluşan bu fark sayesinde, katı çözelti halindeyken kristal kafes çarpılması oluşturarak dislokasyon yığılmalarını engeller ve alaşımın dayanımını artırır. Ayrıca Al elementinin Mg katı çözeltisi içindeki maksimum çözünürlüğü ağırlıkça %12,7'dir (450 °C) ve ağırlıkça %6 fazla takviye edilen Mg-Al alaşımları ısı işlem uygun hale gelir ancak döküm prosesleri sırasında döküm çekilmesi riskini artırır [7,11,13].

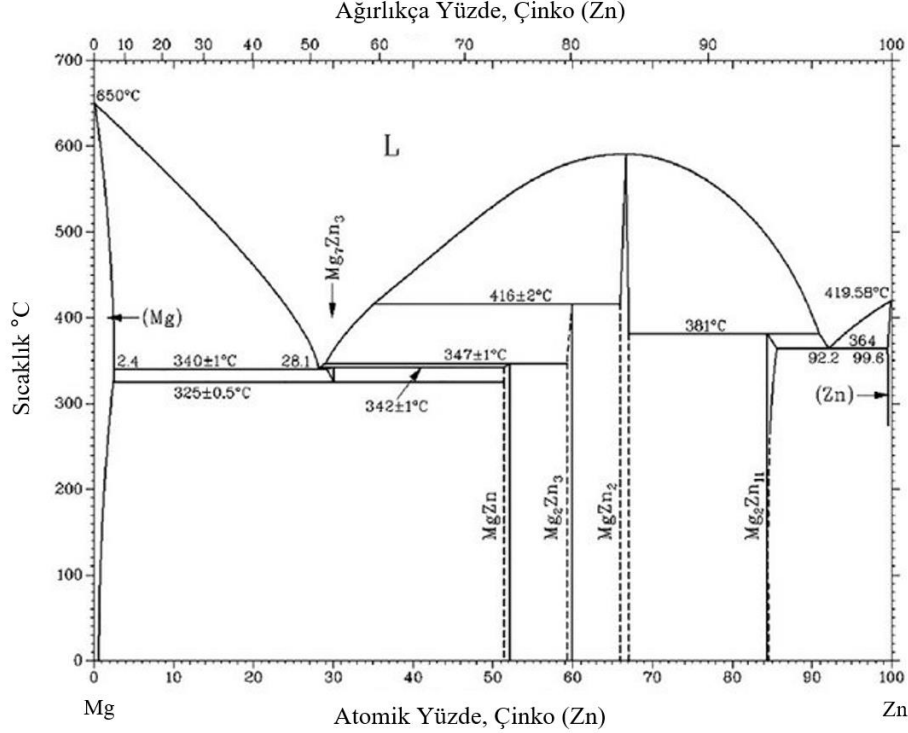
Mg matrisine Al ilavesi, eriyiğin akışkanlığını artırarak dökülebilirliği geliştirir. Al'nin oda sıcaklığındaki çözünürlüğü ağırlıkça %2 değerlerine kadar düşebilmektedir. Bu durum Mg matrisinde kırılğan çökelteleri oluşmasına ve mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik bileşiği bazal düzlemde konumlanmasından kaynaklı olarak dislokasyon hareketlerini engellemeye etkisi yoktur [14].

### 2.2.1.2. Çinko

Zn elementi Mg alaşımlarda yaygın olarak kullanılan bir diğer alaşım elementidir. Döküm proseslerinde ergimiş Mg'nin akışkanlığını arttırmasına karşın döküm parçalarının iç kısımlarında mikro düzeyde topaklanmaya da sebep olabilmektedir. Zn elementinin Mg katı çözeltisi içinde bulunması durumunda çözünebilirliği ağırlıkça yaklaşık %6,0-6,5 ve oda sıcaklığındaki çözünürlüğü ağırlıkça yaklaşık %1'dir. Mg matrisine Zn elementinin ilavesi ile prizmatik düzlem yumuşaması gerçekleşir ve bunun sonucunda oda sıcaklığındaki mukavemet değerleri yüksek oranlarda iyileştirilebilir. Mg matrisindeki artan Zn ilavesi ikincil kayma mekanizmaları sonucunda meydana gelen yumuşamanın katı çözelti sertleşmesi ile dengelenerek gevrekliği arttırmaktadır. Zn elementi, Mg matrisinde düşük sıcaklıklarda ötektik fazlar oluşturur ve Mg matrisinde Zr ile birlikte kullanılırsa, Hall-Petch etkisi sayesinde Mg tane boyutunu küçültür ve Mg'nin mukavemet değerlerini iyileştirir. Zn'nin bu etkisi, dislokasyon enerjisini azaltır ve Mg'nin mikro yapısındaki



dislokasyonların çapraz kaymasını sınırlar [15–17]. Ek olarak Şekil 3.2’de Mg-Zn faz diyagramı sunulmuştur [18].

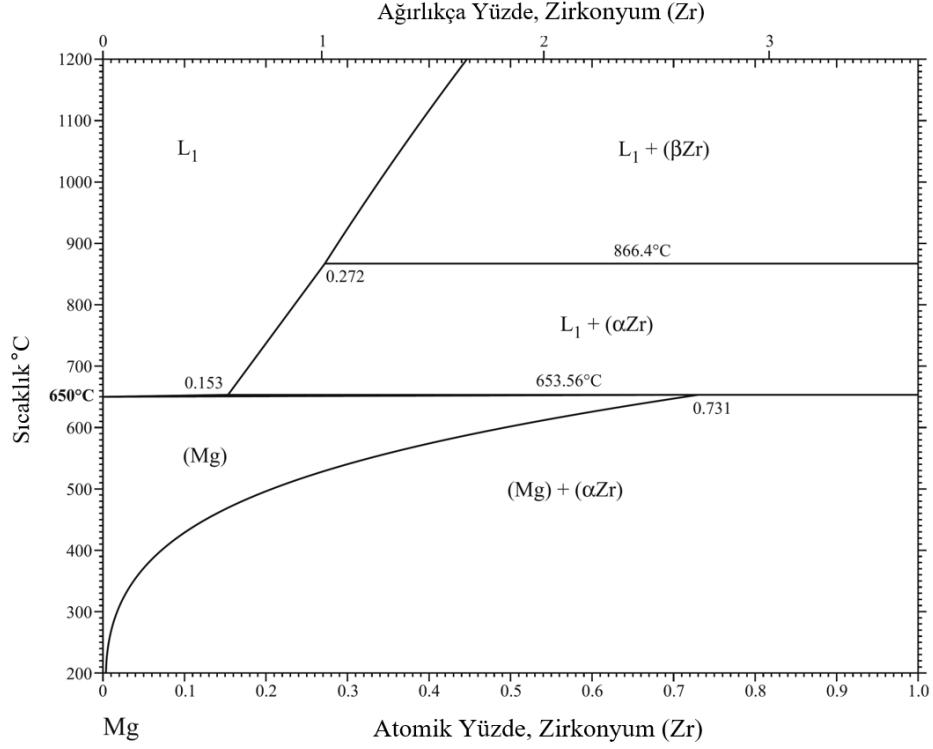


Şekil 2.2. Mg-Zn faz diyagramı [18].

### 2.2.1.3. Zirkonyum

Zr elementi saf Mg yapısında tane inceltme için en etkili alaşım elementlerinden biri olarak bilinir. Mg eriyiğine ağırlıkça %0,5-1,0 oranında Zr takviye edilmesi sonucunda tane boyutu önemli ölçüde azaltabilir, tekdüze ve eş eksenli mikro yapının oluşumunu sağlar [19,20]. Zr'nin ağırlıkça takviye oranının düşük olması nedeniyle Şekil 3.3'te Mg açısından zengin bölge odaklı Mg-Zr faz diyagramı sunulmuştur. Ana alaşım elementi olarak Al veya Mn kullanılan Mg alaşımlarında Zr elementinin bir tane inceltme faktörü olarak kullanılması mümkün değildir. Zr elementinin Mg-Al veya Mg-Mn alaşımlarında kullanılması durumunda mikro yapının tane inceltmesini engelleyen kararlı intermetalik bileşikler oluşur ve alaşımın özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Ancak yapılan birçok çalışmada, en az ağırlıkça %4'e kadar Zn ilavesiyle Zr'nin çözünürlüğünü artırmanın mümkün olduğunu ve oluşan intermetaliklerin mekanik özellikleri geliştirdiğini belirtmişlerdir. Ek olarak Zr

elementinin Mg-Zn alaşımlarına eklenmesi durumunda Mg matrisinde daha koaksiyel ve küresel taneler oluşması sağlanır [20,21].



şekil 2.3. Mg açısından zengin bölge odaklı Mg-Zr faz diyagramı [22].

### 2.3. MAGNEZYUM ALAşIMLARININ DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Mg alaşımlarının akışkanlık ve dökülebilirlik kapasitelerinin Al ve Cu'ya kıyasla daha yüksek olması döküm prosesinin Mg alaşımlarının üretimlerinde yaygın kullanılmasını sağlamıştır. Mg'nin demir ile reaksiyona girme eğiliminin çok düşük olması sebebiyle Mg alaşımlarının döküm proseslerinde genellikle çelik ergitme potası ve döküm kalıpları kullanılır. Yüksek sıcaklığın Mg ile O elementlerinin kimyasal reaksiyon tepkimesini kolaylaştırmasından dolayı Mg alaşımlarının döküm prosesi sırasında oksitlenme eğilimini artırır ve yanma tepkimesinin gerçekteşmesine sebep olur. Ergitme işlemleri sırasında Mg eriyiğinin yüzeyinde cüruf benzeri sürekli koruyucu tabakanın oluşmaması dökülen malzemenin iç çeperlerinde oksitlenmelerin meydana gelir. Bu olumsuzluklardan dolayı Mg alaşımlarının döküm prosesleri sırasında atmosferdeki O elementi uzaklaştırılması gerekir. Gerçekteştirilen çalışmalar sonucunda örtü tozu veya Ar, SF<sub>6</sub> gibi gazların kullanımı ile Mg-O reaksiyonları

önlenebilmektedir. Mg alaşımlarının üretimi üç farklı döküm yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Bunlar, gravite döküm, düşük basınçlı döküm ve yüksek basınçlı dökümdür [2,3,23].

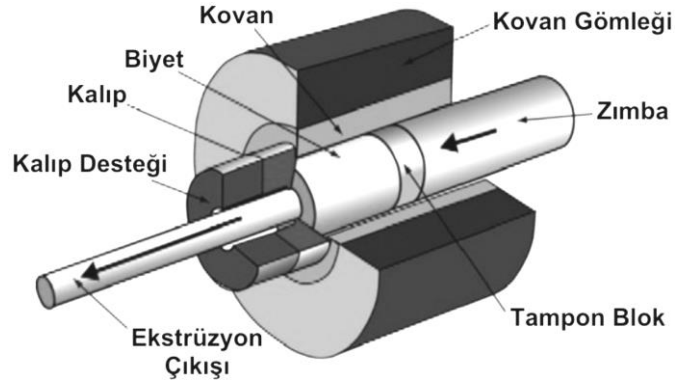
Gravite döküm, yerçekimi etkisini kullanarak birçok yapısal malzemenin üretiminde kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Mg alaşımlarının gravite döküm proseslerinde kum veya metal kalıp kullanılması dışında herhangi bir farklılık bulunmamaktadır. Mg alaşımlarının gravite döküm yöntemleri diğer tüm metallerin dökümleri ile aynı olmasına rağmen Mg'nin oksitlenme eğilimi nedeniyle kalıplamada kullanılacak malzemeler oksit reaksiyonlar oluşturmamalı ve döküm ortamı koruyucu gaz ile korunmalıdır [3,13,23].

Düşük basınçlı döküm işleminde, döküm kalıbının altına yerleştirilmiş bir besleme kanalı bulunan ve bir potanın etrafına inşa edilen alçak basınç odasındaki ergimiş metal, kanaldan yukarı doğru itilir ve kalıba doldurulur. Metal tamamen katılaşıncaya kadar düşük basınç korunur. Düşük basınçlı döküm yöntemi, Al malzemelerinin endüstriyel seri üretimi için kullanılan bir teknolojidir ve Mg alaşımlarının seri üretiminde 3 mm' den ince parçalar üretilmediğinden bu döküm yönteminin adaptasyon çalışmaları devam etmektedir [3,23].

Yüksek basınçlı döküm yöntemi, sıcak hazne veya soğuk hazne kullanılarak yapılabilir. Sıcak hazneli yüksek basınçlı dökümde, erimiş metal, kontrollü atmosfer ile çelik potada tutulurken, belirli bir miktarda metal, valf tarafından kalıba pompalanır. Soğuk hazneli dökümde ise sıvı metalin bir pota yardımıyla hazneye döküldükten sonra kalıp boşluğuna itilmesi için hidrolik silindir kullanılır. Yüksek basınçlı döküm, hafif metal bileşenlerin geliştirilmesi ve üretilmesi için cazip birçok yönlülük sağlar. Büyük, ince cidarlı ve karmaşık malzemeler, birkaç damgalama ve kaynaklamadan oluşan çelik yapıların yerini alarak ucuza üretilir. Bu durum, Mg alaşımlarının üstün kalıp doldurma özellikleriyle mümkün olmaktadır. Al dökümlerine kıyasla Mg alaşımları daha ince kalınlıkta (1-1,5 mm) dökülebilir [3,23].

## 2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYONU

Ekstrüzyon işlemi, yarı mamul bir malzemenin kendi kesit alanından küçük bir kesit alanına sahip kalıp boşluğundan itme kuvveti ile geçirilerek plastik şekil verilmesi işlemidir. Basit bir ekstrüzyon prosesi ve kullanılan sistem parçaları Şekil 3.4 'te sunulmuştur. Mg alaşımları haddeleme, dövme işlemlerinin yanı sıra ekstrüzyon işlemiyle de plastik deformasyon uygulanması sonucu yeniden şekillendirilmeye uygun malzemelerdir. Mg alaşımlarının ekstrüzyonundaki en önemli sorun iyi bir mekanik özellik ve ekstrüze edilebilirlik kombinasyonuna sahip olamamalarıdır [24].



Şekil 2.4. Ekstrüzyon prosesi ve kullanılan sistem parçaları.

Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı, ekstrüzyon prosesinin teorik faktörleridir. Bu faktörlere göre, Mg alaşımlarının mekanik özellikleri ve mikro yapı karakterizasyonu önemli ölçüde değişikliğe uğrayabilir. Ek olarak bu faktörler DRX mekanizmasının tane küçültücü etkisi sonucu son malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Ekstrüzyon oranı, yarı mamul kesit alanının ürünün kesit alanına oranıdır ve proses sırasındaki mekanik işin miktarını gösterir. Ekstrüzyon sıcaklığı ise ekstrüzyon prosesi uygulanacak yarı mamulün ve ekstrüzyon ortamının sıcaklığını ifade eder. Ekstrüzyon prosesinde yarı mamul ve ortam sıcaklığının yaklaşık aynı değerlerde olması gerekir. Ayrıca Mg alaşımları düşük sıcaklıklarda zayıf şekillendirilebilirlik gösterdiğinden ekstrüzyon işlemi yüksek sıcaklıklarda yapılması uygundur. Yüksek sıcaklık etkisinin matristeki yumuşama mekanizmalarını oluşturması sayesinde deformasyon düşük ekstrüzyon hızında gerçekleştirilebilir. Ekstrüzyon hızı ise alaşımın içeriği, mikroyapı ve mikro yapı karakterleri ile doğrudan

ilişkilidir. Yüksek hızlarda gerçekleşen ekstrüzyon işlemlerinde, yarı mamul sıcaklığı düşükse gereken pres basıncı artar. Buna karşın ekstrüzyon işlemi sırasında yarı mamul sıcaklığı yüksek olduğunda ise ekstrüzyonun sıcaklığı daha da artarak yüzeyde sıcak çatlamalara sebep olur. Ekstrüzyon işlemi sırasında sıcak çatlamlar meydana gelen ürünlerde özellikle mukavemet düşüşü meydana geldiğinden dolayı kullanılamaz hale gelebilir [24].

## 2.5. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPZÖZİTLER

Metal matrisli kompozitler günümüz endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Özellikle Mg alaşımları gibi mukavemet ve korozyon özellikleri yetersiz yapısal metaller, birçok takviye elamanı aracılığıyla kompozit malzeme haline getirilmiş ve yetersiz özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Metal matrisli kompozitlerin üretim prosesleri esnasında takviye malzemesinin çekirdeklenmesi, dislokasyonu, çökmesi ve kimyasal reaksiyon etkileri oluşur. Bu etkiler diğer yapısal metaller ile üretilen kompozitlerde olduğu gibi Mg esaslı kompozitlerin mikro yapısı karakterizasyonunu ve mekanik özelliklerini direkt etkilemektedir [25,26].

Mg esaslı kompozitlerde matris ile takviye malzemesi arasındaki kimyasal ilgi genellikle yüksek oranda arayüzey bağı ile neticelenmektedir. Ancak Mg alaşımlarının mevcut kimyasal ilgisi, üretim prosedürlerindeki sıcaklığın yüksekliği sebebiyle şiddetli reaksiyonlar oluşturarak üretimde birtakım sınırlayıcı durumlara neden olmaktadır. Ayrıca Mg esaslı kompozitlerde matris ile takviye malzemelerinin kimyasal reaksiyonları sonucunda intermetalik bileşikler oluşmaktadır. Yüksek mukavemet değerlerine sahip Mg esaslı kompozitlerin üretiminde, takviye malzemeleri genellikle seramiktir ve partikül şeklinde kullanılmaktadır. Mg esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan güçlendirme elemanları ise Bor (B), Bor Karbür ( $B_4C$ ), Silisyum Karbür ( $SiC$ ) ve Alüminadır ( $Al_2O_3$ ) [6-8].

Bu çalışmada kullanılan takviye malzemeleri  $SiC$  ve  $B_4C$  partikül takviyeleri olduğundan dolayı bu kısımda  $SiC$  ve  $B_4C$  takviyelerinin Mg üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır.

### 2.5.1. Magnezyum Esaslı Silisyum Karbür Kompozitleri

SiC takviyeli Mg bazlı kompozitler, yüksek kimyasal uyumluluğa, sertlik değerine ve düşük yoğunluğa sahiptir. SiC ile güçlendirilmiş Mg matrisli kompozitler genellikle sıvı emdirme ve karıştırmalı döküm yöntemleri ile üretilmiştir. Ayrıca, Mg alaşımlarına SiC takviyesi üzerine yapılan çalışmalar, malzemenin esneklik modülünü ve çekme mukavemetini arttırdığını bildirmektedir. Mg matris ile SiC partiküllerinin ara yüzeyinde oluşan kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan intermetalik bileşiklere önlem alınması gerekmektedir. Üretim şartlarına bağlı olarak SiC partikülleri, MgO fazlarının oluşması sonucunda film tabakası şeklinde matris içerisinde ayrışabilir. Bu film tabakaları yarım mikrometre kalınlığa ulaşması halinde arayüzeyde çatlama ihtimalini artırır. Uygun üretim koşullarında Mg alaşımlarına eklenen SiC takviyelerinin matris içerisinde kararlı Mg<sub>2</sub>Si intermetalik fazlarını meydana getirdiği ve Mg alaşımlarının mukavemet, korozyon ve süneklik özelliklerini iyileştirdiği literatür çalışmalarında raporlanmıştır. Günümüzde SiC partikül takviyeli Mg bazlı kompozitler otomotiv ve havacılık endüstrisi uygulamalarında tercih edilmektedir [7].

### 2.5.2. Magnezyum Esaslı Bor Karbür Kompozitleri

Son yıllarda yapılan kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan takviye malzemelerinden biri de B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin olduğu görülmektedir. B<sub>4</sub>C kompozitler genellikle karıştırmalı döküm ve toz metalürjisi yöntemleri ile üretilmektedir. Üretim koşullarına bağlı olarak Mg esaslı B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerinin matrisinde MgB<sub>2</sub> intermetaliklerini oluşmaktadır. Mg esaslı B<sub>4</sub>C kompozitleri düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli, yüksek sertlik değerlerine sahip malzemelerdir. Ayrıca, B<sub>4</sub>C takviyesi Mg matrisinde kararlı davranış sergiler. B<sub>4</sub>C takviyesinin takviye oranı arttıkça Mg alaşımlarının sertlik değerini arttırmakta ve aşınma sırasındaki kütle kaybı miktarının azaltmaktadır. B<sub>4</sub>C partikül takviyeli Mg esaslı kompozitler havacılık ve uzay endüstrilerindeki uygulamalarda tercih edilmeye başlanmıştır [4,7].

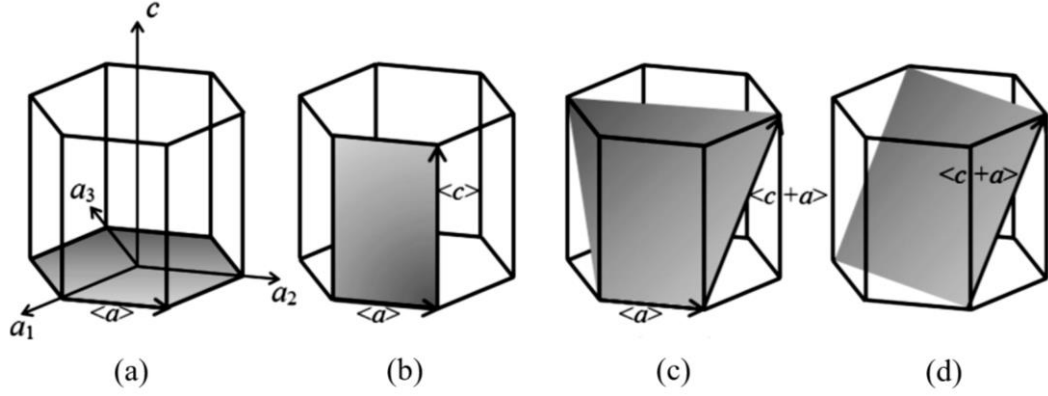
## 2.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA DEFORMASYON

Mg alaşımlarının kübik kafes yapılı metallerin aksine HSP yapıları nedeniyle deforme olma yeteneği sınırlıdır. Kayma mekanizmalarındaki bu sınır normal şartlar altında gevrekliğin artmasına neden olur. Mevcut gevrekliğin azalması ancak yüksek sıcaklıklarda ek kayma mekanizmalarının tetiklenmesiyle gerçekleşebilir. Ayrıca Mg alaşımlarındaki deformasyon mekanizmalarının karakterizasyonu, mekanik özelliklerin durumunu ve normal şartlar altındaki deformasyon miktarını belirleyen bir unsurdur. Von Mises'in plastik deformasyon kriterlerine göre, tek biçimli deformasyonun gerçekleşebilmesi için birbirlerinden bağımsız beş kayma mekanizmasının oluşması gereklidir. Mg'nin HSP kristal yapısında birincil kayma, ikincil kayma ve ikizlenme mekanizmaları dışında herhangi bir kayma mekanizması gerçekleşmez. HSP kristal yapısının oda sıcaklığındaki kayma gerilmeleri, yapısında bulundurduğu piramit ve prizmatik kayma sistemleri diğer taban kayma sistemlerine göre çok daha düşük değerlerde gerçekleşir. Deformasyon ikizlerinin HSP kafes yapısına yeniden uyumunu sağlamasına ve oda sıcaklığındaki deformasyon derecesinin daha fazla gerçekleşmesine rağmen, temel kayma sistemleri dış uzamayı tam olarak karşılayamaz. Ek olarak, Mg alaşımlarındaki tane sınırı kayması yüksek sıcaklıklarda deformasyonun ana nedenidir [13,27].

### 2.6.1. Magnezyum Alaşımlarının Kayma Mekanizmaları

Kayma mekanizması, malzemeye uygulanan kuvvet değerinin malzemenin kritik kayma gerilmesi değerini geçmesi sonucunda, uygulanan kuvvet düzlemi boyunca kristal yapının kalıcı deforme olma durumudur. Mg matrisinde meydana gelen kayma mekanizmaları Şekil 3.5 'te sunulmuştur. Kritik kayma gerilmesi malzemenin malzemeye değişmekle birlikte, Mg matrisin minimum kafes direnci sıkı paket yapının taban düzlemine göre belirlenir. Dolayısıyla Mg alaşımlarına uygulanan oda sıcaklığındaki plastik deformasyon proseslerinde matris yapısında genellikle Şekil 3.5 (a)'da sunulan taban kayma mekanizmalarının meydana gelir. Ayrıca kritik kayma gerilmesinin sadece taban düzlemi boyunca olması Mg alaşımlarının deformasyon kapasitesini ve şekillendirilebilirliğini sınırlamaktadır. Ek olarak sıcaklığın

arttırılmasıyla Mg matrisinde Şekil 3.5 (b), (c) ve (d) 'de gösterilen prizmatik ve piramidal kayma mekanizmaları gerçekleşebilir.



Şekil 2.5. Mg alaşımlarının kayma mekanizmaları; a) taban kayma, b) prizmatik kayma, c) birincil piramidal kayma, d) ikincil piramidal kayma.

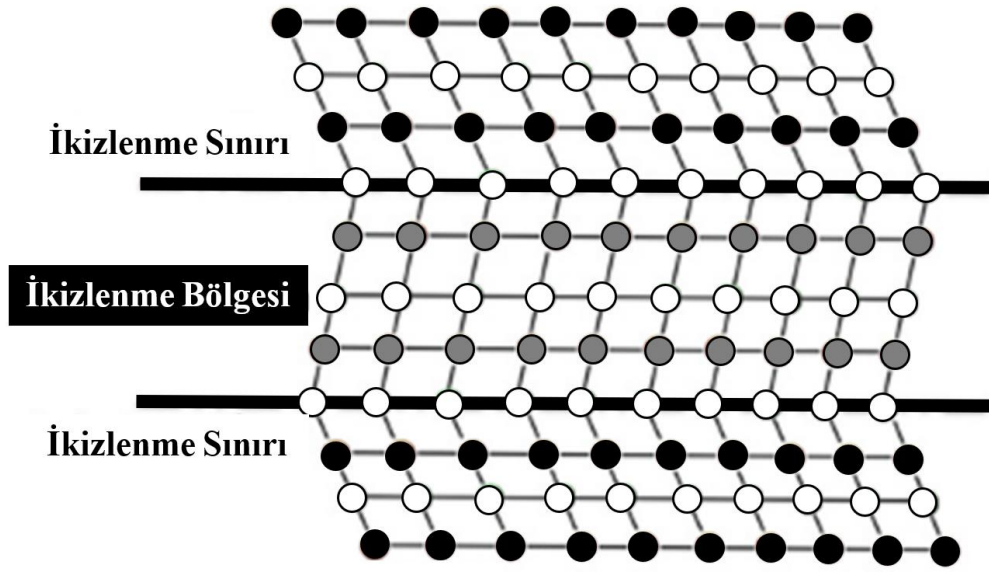
### 2.6.2. Magnezyum Alaşımlarında İkizlenme Mekanizması

Malzemelerin kafes yapısındaki deforme olmuş kristal grupları ile deforme olmamış kristal yapıların simetrik yönelimine ikizlenme denir. Plastik deformasyon kaynaklı kayma yer değiştirmesi, atomların düzenini aynalama simetrisi oluşacak şekilde zorlar. Dolayısıyla ikizlenme tarafından üretilen toplam birim deformasyon miktarı sınırlıdır ve temelde ikizlenme yönüne bağlıdır. Malzemenin kafes yapısının yeniden uyumu ile bir miktar kayma aktifliğine neden olabileceği ve plastisiteyi güçlendirebileceği literatürde raporlanmıştır. İkizlenme mekanizması dislokasyon yığılmaları engeller ve tane küçültücü etkiye sahiptir. Kristal yapıların belirli bir bölgesinde gerçekleşen ikizlenme mekanizması şeması Şekil 3.6'da sunulmuştur [10,27].

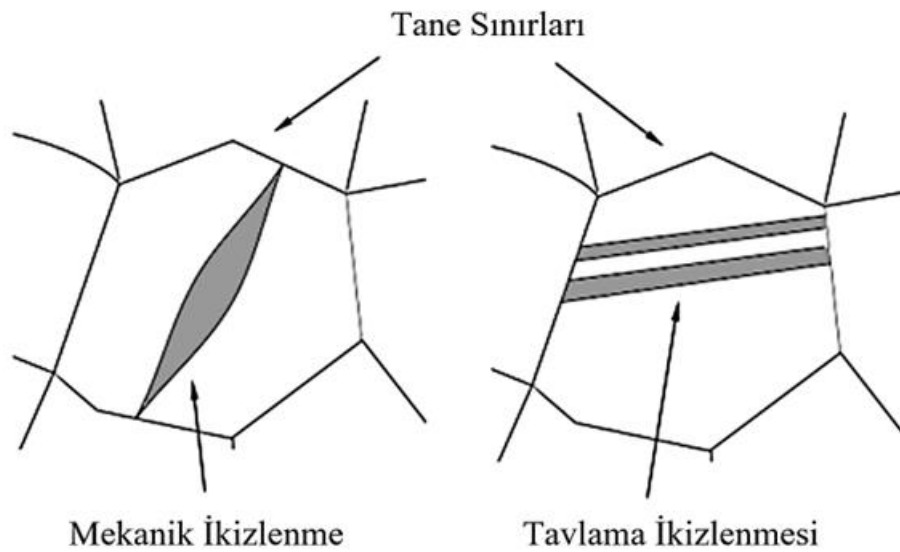
Kristal yapılardaki ikizlenme mekanizmaları yaygın olarak tavlama işlemi sırasında veya mekanik etkiler ile meydana gelir. Tavlama ikizlenme mekanizmaları malzemelerin tavlama prosesinde yeniden kristal oluşumu sırasında ortam koşullarından kaynaklı olarak kristal yapının büyüme düzlemi değişim göstermesiyle oluşur. Mekanik etkiyle oluşan ikizlenme mekanizmaları malzemelere kalıcı şekil verme işlemleri sırasında uygulanan yüksek kuvvetler sonucu oluşur. Tavlama ve mekanik ikizlenme mekanizmalarının mikroskop altındaki görüntüleri şematik olarak



Şekil 3.7’de sunulmuştur. Başta Mg alaşımlar olmak üzere HSP kristal yapıları metallere mevcut kayma sistemlerinin sayısı, kübik kristal yapıları metallere göre az olduğundan, ikizlenme mekanizmaları Mg matrisinin deformasyonunda önemli bir mekanizma haline gelmektedir. İkizlenme için gereken kritik kayma gerilmesi değeri, prizmatik ve piramidal düzlemlerinden düşüktür. Bu durum, ikizlenmenin HSP malzemelerde düşük sıcaklıklarda ve yüksek deformasyon hızlarında meydana gelmesini açıklamaktadır [10].



Şekil 2.6. İkizlenme mekanizmasının şematik gösterimi.



Şekil 2.7. İkizlenme tiplerinin şematik gösterimi.

## 2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YENİDEN KRİSTALLEŞME

Mekanik iyileştirme için önemli faktörlerden biri tane inceltmedir. Ekstrüzyon, haddeleme gibi termomekanik prosesler sırasında mikro yapının yeniden kristalleşmesinin tane incelmesini sağlar. Malzeme dinamik etkiler altındayken meydana gelen yeniden kristalleşmeye dinamik yeniden kristalleşme (DRX), deformasyon sonrası meydana gelen yeniden kristalleşmeye ise statik yeniden kristalleşme denir. DRX oluşumunda tane büyüme hızı ve çekirdeklenme hızı belirleyici rol oynarken statik yeniden kristalleşmede dislokasyonların biriktirdiği termal enerji belirleyicidir [10,13,28,29].

Dislokasyonların giderilmesi ve düzenlenmesi, deformasyonlar sırasında malzemenin depolanan enerjisini azaltmak için uygulanan standart metotlardır. Bu metotların uygulanması malzeme yumuşama niteliklerinin arttığı ve gerinimsiz mikro yapıların meydana geldiği bir dinamik geri kazanımdır. Mg alaşımlarının kalıcı deformasyon prosesleri sırasında gerçekleşen temel kristalleşme mekanizması DRX'tir. Matris içerisinde meydana gelen kayma mekanizmaları tane sınırları ile sınırlandığında, HSP kafes yapısında dinamik düzenlenme başlar ve daha küçük tanelerin oluşumuna yol açar. DRX, Mg alaşımlarında herhangi bir kayma sırasında çekirdeklenmenin olmasını sağlayabilir ve oluşan tanelerin boyutuna bağlı olarak kayma mekanizmalarına sebep olabilir. Ayrıca Mg matrisinde gerçekleşen DRX, tane boyutlarını küçülttüğü, mekanik ve işlenebilirlik özellikleri iyileştirdiği literatürlerde rapor edilmiştir [13,28,29].

## BÖLÜM 3

### DELİK DELME İŞLEMİ VE TERMİNOLOJİSİ

Delik delme, yanal yüzeyleri kesici takımlar kullanılarak iş parçasının belirli bir kısmından veya tamamından talaş kaldırarak silindirik kanal oluşturma prosesidir. Delik delme proseslerinde, delik açılma işlemine ek olarak delik büyütme, raybalama, fatura açma gibi uygulamalar da gerçekleştirilebilir. Havacılık, uzay gibi birçok endüstriyel uygulamalarda birleştirme işlemlerinin vidalama, perçinleme gibi yöntemlerle gerçekleştirilmesi iş parçası yüzeyinde delik açılmasını gerektirir. Delik delme işlemleri, günümüz endüstriyel uygulamalarında talaşlı imalat yöntemlerinin yaklaşık %33'lük kısmını kapsayan yaygın bir yöntemdir [30].

Delik delmek için kullanılan kesici takımlara matkap adı verilir ve genellikle iş parçalarından yüksek sertlik değerine sahip malzemelerden üretilmiştir. Delme işlemi sırasında kaldırılan talaş, iş parçasına ve matkap yüzeyine zarar vermeden uzaklaştırılması gerekmesinden dolayı matkapların yanal yüzeylerinde farklı geometrilerde kanallar bulunur. Bu kanal geometrileri delik çapı, tolerans, delik derinliği ve iş parçasının malzemesine göre düz veya helis şeklinde değişiklik gösterebilir. Zaman ve maliyet kazanımı sağladığı için endüstriyel uygulamalarda genellikle helisel matkaplar tercih edilmektedir [30–32].

Delik delme proseslerinde dönme ve ilerleme hareketleri ile matkabın atalet kuvvetleri artırılarak iş parçasından talaş kaldırılması sağlanır. Bu işlem sırasında matkabın kesici yüzeyi ile talaş arasında oluşan reaksiyon kuvvetleri, tek ağızlı kesici takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerindeki reaksiyon kuvvetlerine benzer şekildedir. Teorik olarak delik delme işlemi tornalama ve frezeleme işlemlerine benzese de delik delmede talaş kaldırması ve boşaltılması kritik öneme sahiptir. Ayrıca diğer talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak matkabın iş parçasından atılan talaş hacminin fazlalığı, iki kesme yüzeyinin kullanılması gibi başka farklılıklar da bulunmaktadır.

Ek olarak açılan deliğin boyu ( $l$ ) ile deliğin çapı ( $d$ ) oranlandığında çıkan sonuç 3 katından az ise bu tip deliklere kısa delik, 4-10 kat aralığında olan deliklere normal delik, 10 katından büyük olanlara ise uzun delik tanımlaması yapılır. Delik derinliği ne kadar uzunsa işlemi kontrol etmek ve talaş kaldırmak bir o kadar zor olur [30,31]

Kesme hızı ( $V_c$ ) ve ilerleme hızı ( $V_f$ ), delik delmedeki en önemli parametrelerdir ve kesme işlemi sırasında meydana gelen sıcaklık ve kesme kuvvetlerini doğrudan etkilemekte olup matkabin performansını belirleyen unsurlardır. Delme işlemi sırasında meydana gelen talaş oluşumu, talaşın tahliyesi gibi durumlar kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklığını, deliğin yüzey kalitesini ve ölçü tamlığını direkt olarak belirleyici etkilere sahiplerdir [31].

Delik delme proseslerinde delik derinliğine ve iş parçasının mukavemet değerlerine bağlı olarak sürtünme kuvveti sıcaklık oluşumunu tetikler. Sıcaklık artışı, kullanılan kesici takımın kırılmasına, yüzey deformasyonlarına, üretim kaybına ve kusurlu ürün üretimine sebep olduğu için sıcaklık etkilerine dikkat edilmesi gereklidir. Ayrıca, delik delme proseslerinde delme işlenebilirliği düşük olan malzemeler oluşan sürtünme ve sıcaklığın etkisiyle matkabin kesici yüzeylerinde aşınma ve deformasyon mekanizmaları sebep olur. İşlem sırasındaki hatalar, delik delme uygulamalarının genellikle son proses olmasından dolayı ürün kaybına ve maliyetlerin artmasına yol açar. Bu olumsuz etkilerin sonucu olarak, sanayi uygulamalarında gerçekleştirilen delme işlemlerinde sıfır hata, yüksek kalite ve yüksek güvenilirlik beklentisi oluşmaktadır [30,31].

### **3.1. DELİK DELME İŞLEMİNİN MEKANİĞİ**

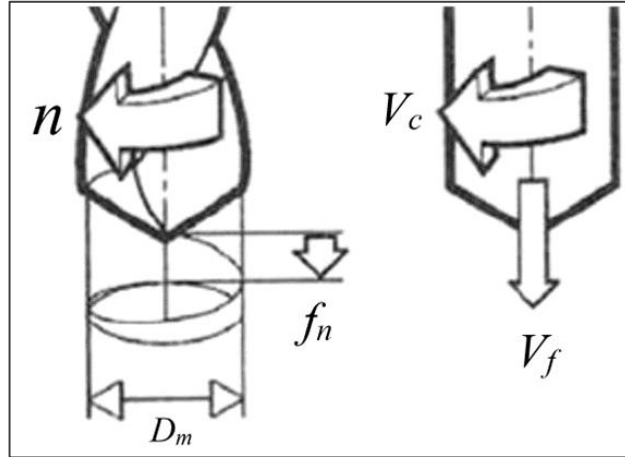
Delik delme proseslerinde dönme ve ilerleme hareketleri birlikte gerçekleşmesi sonucunda matkabin kesici yüzeylerindeki atalet kuvvetleri artarak iş parçasının akma dayanımı aşacak gerilme yüzeyleri oluşur. Akma dayanımının aşılmaya başladığı birim zamanda iş parçası yüzeyinden birim parça ayrılarak kopmaya yani talaş oluşmaya başlar. İşlem sırasındaki dönme hareketi iş parçası yüzeyinde kesme kuvvetleri oluştururken ilerleme hareketi yüzeyden kopan birim parçanın sürekliliğini sağlamış olur [32,33].

Delik delme proseslerinde kesme parametreleri dönme hareketine göre belirlenir ve matkabın dönme esnasındaki devir sayısından ( $n, dev/dak$ ) türetilir. Delme esnasında birim zamanda iş parçası yüzeyinden kopan birim parça miktarına ise kesme hızı ( $V_c, m/dak$ ) denir. Bir başka deyişle matkap çapı ( $D_m, mm$ ) olarak bilinen kesici yüzeyin en uç noktasının dönme esnasında oluşturduğu çevresel hıza kesme hızı denir. Kesme hızı teorik ifadesi Eşitlik 3.1 'de verilmiştir [33].

$$V_c = (\pi \cdot D_m \cdot n) / 1000 \quad (3.1)$$

İlerleme hızı ( $V_f, mm/dak$ ), matkabın iş parçasına göre birim zamanda ilerleme miktarıdır. Delik delme işlemlerinde ilerleme hareketi ile dönme hareketi aynı anda gerçekleştiğinden bir devirde gerçekleşen ilerleme miktarı da hesaplanabilir ve devir başına ilerleme ( $f_n, mm/dev$ ) olarak tanımlanır. İlerleme hızının devir başına ilerleme değerine göre ifadesi Eşitlik 3.2 'de verilmiştir. Ek olarak delik delme parametreleri Şekil 3.1 'de sunulmuştur [33].

$$V_f = f_n \cdot n \quad (3.2)$$



Şekil 3.1. Delik delme parametreleri.

Delik delme işlemlerinde kesici yüzeylerin oluşturduğu talaş kesit alanı değerlerini hesaplamak mümkündür. Matkabın bir kesme yüzeyi için kaldırdığı (deforme olmamış durumdaki) talaş kesit alanı değeri, kesici kenar uzunluğu ( $b, mm$ ) ve talaş kalınlığı ( $h, mm$ ) çarpımına eşittir ve Eşitlik 3.3 'te formülü verilmiştir. Ayrıca talaş kesit alanı

matkap yarıçapı ( $D_m/2$ ) ile ilerleme miktarının ( $f_n$ ) çarpımı ile de bulunabilir ve teorik ifadesi Eşitlik 3.4 'teki gibidir. Kesici yüzeylerin kaldırdığı deforme olmamış durumdaki talaş kesit alanları ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ), kesici yüzey sayısı ile çarpılmasıyla (matkap için 2) birim zamandaki kaldırılan toplam talaş kesit alanı ( $A$ ) değeri bulunur ve teorik ifadesi Eşitlik 3.5 'te verilmiştir [33].

$$A_1 = A_2 = b \cdot h \quad (3.3)$$

$$A_1 = A_2 = f_n \cdot (D_m/2) \quad (3.4)$$

$$A = A_1 + A_2 = f_n \cdot D_m \quad (3.5)$$

Delik delme işlemlerinde iş parçası, matkap malzemesinin özellikleri, kesme yüzeyinin geometrik elemanları, ilerleme ve kesme hızı değerlerine bağlı olarak oluşan bileşke hız vektörü doğrultusunda şekillendirilir. Bu şekillendirme işleminde delme kuvveti ve delme momentinin etkileri, iş malzemesinin özgül kesme direncine ( $k_c$ ) bağlı olarak ortaya çıkar. Delme kuvveti, her kesme yüzeyinde meydana gelen kuvvet bileşenlerinin toplamıdır. Geometrik simetri nedeniyle, matkap kesme yüzeylerinde X eksenini yönündeki radyal kuvvetlerin toplamı sıfırdır. Bunun sonucunda matkap kesme yüzeylerinde sürtünme kuvvetlerinin neden olduğu esas kesme kuvveti ( $F_c = F_y$ ), ilerleme reaksiyon kuvveti ( $F_f = F_z$ ) ve delme reaksiyon momenti ( $M_T$ ) oluşur [33,34].

Esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) malzemenin özgül kesme direnci ( $k_c$ ) ile kaldırılan talaş kesit alanının ( $A$ ) çarpımına eşittir ve Eşitlik 3.6 'da verilmiştir. Özgül kesme direnci değerleri genellikle matkap malzemelerinin cinsine göre oluşturulan kataloğlardan elde edilir. Esas kesme kuvveti üzerinde matkap malzemesinin cinsi ( $k_T$ ), kesici kenar etkin talaş açısı ( $k_g$ ), aşınma etkileri ( $k_a$ ) ve kesme hızı ( $k_{vc}$ ) faktörleri de etki eder. Bahsi geçen etkilere kayaklı katsayılar yaklaşık 0,95~1,1 değer aralığında olmalarından dolayı genellikle dikkate alınmazlar. Bu etkiler dikkate alınacaksa esas kesme kuvveti Eşitlik 3.7 'deki gibi hesaplanır [33,34].

$$F_c = k_c \cdot A \quad (3.6)$$

$$F_c = k_c \cdot k_T \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_{vc} \cdot A \quad (3.7)$$

Matkap kesici yüzeyleri simetrik olması sebebiyle her bir kesme yüzeyinde aynı büyüklükte esas kesme kuvvetleri oluşur. Teorik olarak esas kesme kuvvetlerinin kesici yüzeyin orta noktasında oluştuğu kabul edilir. Dolayısıyla esas kesme kuvvetinin kesici yüzeye uzaklığı  $D_m/4$  değerindedir. Bir kesme yüzeyinde oluşan moment değeri esas kesme kuvvetinin kesici yüzeye olan uzaklığının çarpımı ile hesaplanır. Tüm kesici yüzeylerdeki kesme momentini hesaplamak için kesme yüzey sayısı ( $z$ , adet) çarpılması gerekir. Sürtünme etkileri ihmal edilirse, matkabin kesme yüzeylerinde oluşan delme momenti ( $M_D$ ,  $N.mm$ ) değeri, kesme yüzey sayısı, esas kesme kuvveti ve esas kesme kuvvetinin kesici yüzeye uzaklığının çarpımı ile bulunur ve formül Eşitlik 3.8 'deki gibidir. Delik delme işlemi sırasında matkap ile iş parçası arasındaki sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu reaksiyon kuvvetleri de sürtünme momenti ( $M_\mu$ ,  $N.mm$ ) oluşturur. Toplam delme momenti ( $M_T$ ,  $N.mm$ ), delme momenti ( $M_D$ ) ile sürtünme momentinin ( $M_\mu$ ) toplamına eşittir ve Eşitlik 3.9 'da verilmiştir [33].

$$M_D = (z \cdot F_c \cdot D_m) / 4 \quad (3.8)$$

$$M_T = M_D + M_\mu \quad (3.9)$$

Sürtünme momenti, matkap ve iş parçasının birbirleriyle oluşturduğu reaksiyon kuvvetleri, temas alanı, sıcaklık değişimi değerleri ile oluşturulan sürtünme kuvveti üçlü grafiksel eğrilerinden elde edilir. Delik delme işlemlerinde kullanılan matkabin uç açısıyla helis açısındaki değişim matkap kesici yüzeylerinin temas yüzey alanlarını değiştireceği için sürtünme kuvvetleri dolayısıyla da sürtünme momentleri değişir. Matkap çapı ( $D_m$ ) ve helis açısı ( $\omega$ ) değerleri sabitlenip matkap uç açısı ( $\epsilon$ ) büyürse kesme yüzey alanı azalacağından sürtünme kuvvetleri düşer. Aynı durum matkap çapı ( $D_m$ ) ve uç açısı ( $\epsilon$ ) sabitlenip ise helis açısı ( $\omega$ ) azalması durumunda da gerçekleşir [32,33].

### 3.2. MATKAP YÜZEYLERİNDE AŞINMA MEKANİZMALARI

Delik delme prosesi matkap ile iş parçasının yüksek teması ile gerçekleşen bir yöntemdir. Bu yüksek temas sonucu iş parçasında talaş oluşumu sağlanırken her kesici takımında olduğu gibi matkap yüzeylerinde de farklı reaksiyon kuvvetleri sonucu

deformasyonlar gerçekleşir. Kesici kenarın kalıcı deformasyonu sonucunda matkabın kesici yüzeylerinde malzeme kaybı yaşamasının yanı sıra kesici kenar geometrisinde istenmeyen değişikliklere neden olan unsurlar aşınma olarak tanımlanır. Matkap, ilk kesme geometrisi değiştirildiği andan itibaren talaşı etkili bir şekilde çıkarma ve yüksek kaliteli işlenmiş yüzeyler üretme yeteneğinin bir kısmını kaybeder. Takım aşınmasının takım üzerinde, azalan kesme kenarı mukavemeti, artan takım kuvvetleri ve güç tüketimi, artan kesme sıcaklıkları, yüzey kaplamasının bozulması, parça boyutsal hassasiyet kaybı ve nihayetinde azalan üretkenlik dahil olmak üzere olumsuz etkileri vardır. Sonuç olarak matkaplarda oluşan aşınmaların önemli ölçüde azaltılması ve düzenlenmesi gerekir [34].

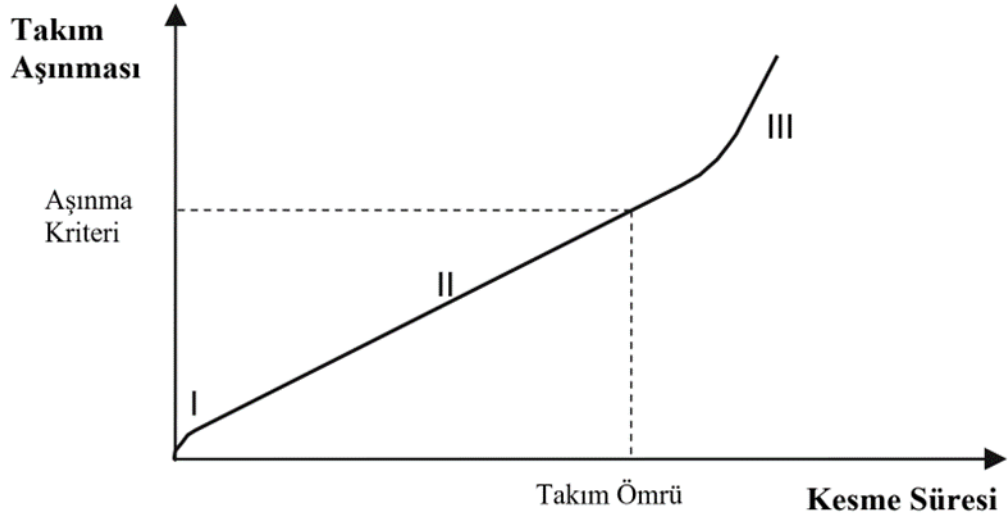
Matkap yüzeyinde farklı etkilerden kaynaklı olarak farklı aşınma mekanizmaları gerçekleşir. Aşınma mekanizmalarının türleri, kesici yüzeylerde gerçekleşen kırılma ve kopma mekanizmalarının büyüklüklerini etkileyen ve dolayısıyla matkabın kullanım ömrünü belirleyen unsurlardır. Matkap yüzeylerinde deformasyona sebep olan aşınmalar yüksek sürtünme kuvveti, yüksek iş parçası mukavemeti veya ani sıcaklık artışı kaynaklı kesici yüzey yumuşamasından kaynaklanabilir. Bir başka deyişle matkaplar mekanik, ısıl, kimyasal veya abrasif etkiler altında deforme olur. Ayrıca matkap yüzeyindeki boşaltma kanallarının yetersizliği sonucu talaş tahliyesinin gerçekleşmemesi, derin talaş derinliği, darbeli veya titreşimli kesme işlemlerinin gerçekleşmesi ve delik delme işlemlerinin fazlalığı gibi unsurlarda matkap yüzeylerinde aşınma mekanizmalarının oluşmasına sebep olabilir [33,34].

Matkap aşınması, abrasif aşınma, difüzyon aşınma, erozif aşınma, korozif aşınma ve kırılma dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalar veya süreçler yoluyla meydana gelen karmaşık bir olgudur. Abrasif aşınma, takım yüzeyi ile iş parçası arasındaki yüksek kesme gerilmesi altında matkap yüzeyine girinti yapan ve yüzeyde mikro oluklar oluşturan iş parçasındaki sert partiküller ile ilişkilidir. Difüzyon aşınması, yüksek sıcaklıklar ve yüksek gerilme koşulları altında atom gruplarının kesici takımdan iş parçasına göçü veya bunun tersi ile alakalıdır. Erozif aşınma, serbest aşındırıcı partiküllerin sıvı bir ortamda taşınması sonucu oluk açma veya kesme eylemiyle ilgili olarak abrasif aşınmaya benzer bir etkinin oluşumudur. Korozif aşınma, matkap yüzeyine kimyasal bileşiklerin etkisi ile oluşur ve esas olarak yeterli yüksek kesme



sıcaklıkları altında oksidasyon tepkimesinin oluşumu ile gerçekleşir. Kırılma aşınması (yontma, yontulma) ve delaminasyon aşınması, kırılma malzemelerde takım yüzeyine enine ve paralel mikro çatlakların başlaması, yayılması ve birleşmesi ile meydana gelir ve bu durum da matkap yüzeyinden partiküllerin veya daha büyük tanelerin koparılmasına yol açar. Yukarıda belirtilen tüm aşınma mekanizmaları, belirli bir kesme koşulları altında benzer şekilde davranmaz, birden fazla aşınma mekanizması gerçekleşebilir ve aralarında etkileşimler oluşabilir. Bu aşınma mekanizmalarının göreceli etkileri, kesme sıcaklıklarının, kesme kuvvetlerinin ve iş parçası işleme özelliklerinin işlevlerine göre belirlenir [33].

Kesme yüzeyi, Şekil 3.2 'de gösterildiği gibi, çok sayıda aşınma mekanizmasının kümülatif etkisi nedeniyle ideal kesme koşullarında kesme süresi boyunca kademeli olarak bozulur. Keskin kenardaki zayıf noktaların neden olduğu yüksek oranlarda ilk keskin köşe kırılması ve kesici kenar aşınması meydana gelmeye başlar (Bölge I). Daha sonra kesici kenar stabilize edilir ve takım malzemesinin kademeli olarak uzaklaştırılmasıyla (Bölge II) aşınma, kesici kenar geometrisinin işlevsiz hale geldiği ve hızlı veya katastrofik aşınmanın yerleştiği bir noktaya (Bölge III) kadar ilerler. Eşit aşınmaya karşılık gelen Bölge II, kesici kenarın kullanım ömrünü temsil eder [33].



Şekil 3.2. Takım aşınmasının aşamaları: (I) ilk kopma; (II) aşamalı uniform aşınma; (III) hızlandırılmış veya katastrofik aşınma [33].

## BÖLÜM 4

### LİTERATÜR BİLGİSİ

#### 4.1. ZK60 ALAŞIMI LİTERATÜR TARAMASI

Ma vd., nadir toprak elementlerinin ZK60 alaşımlarının mikro yapısı ve çekme mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Mikro yapı karakterizasyon analizleri sonucunda, ZK60 alaşımının mikro yapısında  $Mg_2Zn_3$  intermetalik fazının oluştuğunu belirlemişlerdir. Sıcak ekstrüzyon sırasında dinamik yeniden kristalleşmenin meydana geldiği ve mikro yapının rafine edildiği açıkça doğrulanmışlardır. Ek olarak, ekstrüze ZK60 alaşımının ortalama tane boyutunun yaklaşık 20  $\mu m$  olarak hesaplamıştır. Deneysel çalışmaları sonucunda ZK60 alaşımının çekme mukavemetinin 290 MPa olduğunu ve artan ekstrüzyon sıcaklığı ile ZK60 alaşımının nihai dayanım ve akma dayanımının düştüğü sonuçlarına ulaşmışlardır [9].

Mukai vd., hekzagonal sıkı paket kristal yapıları nedeniyle kırılğan özellik gösteren saf Mg ve ZK60 alaşımı için dinamik yükleme altında çekme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Döküm ZK60 alaşımına 310 °C'de ekstrüzyon işlemi uygulamışlardır. Yaptıkları tane boyutu ölçme işlemlerinde ekstrüze ZK60 alaşımının ortalama tane boyutu 2  $\mu m$  olarak hesaplamışlardır. Mevcut çalışmaları sonucunda, ince taneli ZK60 alaşımının yüksek sünekliğe sahip olmasının nedeninin mekanik ikiz sınırlarında makroskobik çatlama olmamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca ZK60 alaşımının ağırlık başına absorpsiyon enerjisinin, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından iki kat daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [35].

Galiyev vd., ZK60 (Mg-%5,8 Zn-%0,65 Zr) alaşımındaki plastik deformasyon ve dinamik yeniden kristalleşme (DRX) mekanizmalarını, 150-450 °C aralığındaki sıcaklıklarda ve farklı gerinim hızlarındaki basma testleri ile incelemiştir. alışmalarında, DRX mekanizmalarının sıcaklıkla değişen iş deformasyonu mekanizmalarına bağlı olduğu göstermişlerdir. Düşük sıcaklıktaki DRX yapılarını ikizlenme, bazal kayma ve dislokasyon kayması ile ilişkilendirmişlerdir. İki sınırın yakınında yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip alanlarda ikizlenme ve ilerleyici kafes dönüşlerinin, dengede olmayan tane sınırları olan ince tanelerin oluşumuyla sonuçlandığı bildirilmiştir. Tane oluşum mekanizmasının, düşük sıcaklıklarda Mg ve Mg alaşımlarının plastik deformasyonu için tipik olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca ara sıcaklık aralığında (200-250 °C) sürekli DRX gözlemlemiş ve bunun Friedel-Escaig mekanizması nedeniyle kapsamlı çapraz kayma ile ilişkilendirildiğini bildirmişlerdir. Ek olarak, düşük sıcaklıklarda belirgin olmayan iş yumuşaması sergilerken yüksek sıcaklıklarda iş yumuşamasının daha belirginleştiğini rapor etmişlerdir [28].

Kaibyshev, DRX yoluyla Mg ve Mg alaşımlarında tane inceltmeyi incelemiştir. Mg ve alaşımlarındaki ana DRX mekanizmaları, çekirdeklenme sürecini kontrol eden çalışma deformasyon mekanizmalarıyla yakından ilişkili olduğunu ve bu nedenle DRX oranını, DRX tane boyutunu ve malzeme içindeki yeniden kristalleşmiş tanelerin dağılımını güçlü bir şekilde etkilediğini rapor etmiştir [29].

Kevorkijan vd. mevcut araştırmalarında, ince B<sub>4</sub>C partiküllerinin yüksek fraksiyonlarını (hacimce %30+) içeren Mg-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin üretiminde basınçsız sızma potansiyelini göstermeyi amaçlamışlardır. Üretilen kompozitlerin mikro yapılarını ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Mg matrisindeki B<sub>4</sub>C takviye partiküllerinin hacim oranının artması, elastisite modülünü yaklaşık %30 ve %0,2 çekme-basma akma mukavemetinde yaklaşık %20 artış sağladığı sonucuna ulaşmışlardır [36].

Jiang vd., toz metalürjisi tekniği ile ürettikleri hacimce %10, %15 ve %20 B<sub>4</sub>C takviyeli Mg matrisli kompozitleri incelemişlerdir. Yapmış oldukları XRD analizleri sonucunda Mg/B<sub>4</sub>C kompozitlerinin yapısında MgO ve MgB<sub>2</sub> intermetaliklerini tespit

etmişlerdir. Sertlik testlerinde %20 B<sub>4</sub>C takviyeli Mg kompozitinin sertlik değerini 133,3 HB bulmuşlardır. Aşına testlerinde ise B<sub>4</sub>C takviyesinin takviye oranı arttıkça aşınma sırasındaki kütle kaybı miktarının azaldığını raporlamışlardır. Ayrıca aşınma yüzeylerinin SEM incelemeleri sonucunda, B<sub>4</sub>C takviyelerinin bulunduğu noktalarda çentikli oluklar oluşturduğunu belirtmiştir. Çalışmalarında kompozitlerin sertlik ve aşınma direncinin döküm Mg külçelerinden daha yüksek olduğunu ve B<sub>4</sub>C partikül takviye oranının artması ile mekanik özelliklerin yükseldiğini raporlamışlardır [37].

Behnamian vd., çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak farklı takviye oranlarında B<sub>4</sub>C ve karbon nanotüp ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımı numunelerin pin-on-disk aşınma davranışını incelemiştir. Mikro yapı incelemelerinde kompozit numunelerin yapısında gözenekliliğin bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Matristeki gözenekliliğin oluşmasını takviye malzemelerinin matris içindeki tekdüze dağılımına ve  $\pi$ -elektron sisteminde oluşan Van der Waals kuvvetleri ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca mikro yapısal gözlemler sonucunda iyi ıslanabilirlik nedeniyle B<sub>4</sub>C partiküllerinin Mg matrisi ile uyumluluğunu doğrulamışlardır. ZK60 matrisi içindeki B<sub>4</sub>C partikülleri için yeniden kristalleşme davranışı, tane sınırlarında dislokasyon yığılmalarını önemli ölçüde desteklediğini ortaya çıkarmışlardır. XRD analizlerinde ise B<sub>4</sub>C takviyesinin Mg matrisle uygun şartlar sonucu gevrekliği arttıran intermetalik fazlar oluşturabildiğini vurgulamışlardır. Deneysel çalışmalarında, B<sub>4</sub>C takviyesinin ZK60 alaşımının sertlik değerlerini yüksek oranda arttırdığını gözlemlemişlerdir. Mg matrisinin mukavemetindeki plastik seviyeye kadar olan artışın, dislokasyonların oluşumuna ve tane incelmeye dayalı Hall-Patch etkisinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. B<sub>4</sub>C takviyesinin ZK60 alaşımının aşınma değerlerini iyileştirdiğini ve B<sub>4</sub>C takviye oranının artmasıyla kompozitlerin aşınma davranışının daha da yükseldiği açıkça belirtmişlerdir. Ek olarak numunelerin aşınmış yüzeyleri, düşük yükleme şartlarında aşınma ve plastik deformasyon mekanizmalarının, yüksek yükleme şartlarında ise delaminasyon yüzey hasarı ve oksidasyon aşınmasının baskın olduğunu gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [38].

Gu vd., B<sub>4</sub>C partiküllerinin ZK60 matrisindeki oksidasyon davranışını, 650-800 °C'de izotermal ısıtma sırasındaki ağırlık değişiklikleri ölçülerek incelemiştir. B<sub>4</sub>C takviyesinin, ZK60 alaşımının matrisinde kararlı bir yapıda olduğunu belirtmişlerdir.

Mikro yapı karakterizasyon çalışmalarında, ısıtılma maruz kalan B<sub>4</sub>C partiküllerinin oksidasyonunun amorf B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ara tabakasını ürettiğini bulmuşlardır. Oksidasyon tabakasının ZK60 kompozitinin arayüzey reaksiyonuna, mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etki ettiğini bildirmişlerdir. Ayrıca çubuk benzeri MgB<sub>2</sub> intermetalik granül MgO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşikleriyle Mg matrisi arasındaki reaksiyon nedeniyle oluştuğu rapor etmişlerdir. Ek olarak MgB<sub>2</sub> intermetalik bileşiğinin hem takviyeler hem de matris arasındaki yakın bağı, Mg matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin ana nedeni olduğu sonucuna ulaşmışlardır [8].

Tayebi vd., ekstrüzyon ve çökelme sertleştirilmesi uygulanmış ZK60 alaşımı ve SiC whiskers takviyeli ZK60/SiC<sub>w</sub> kompozitinin sürünme testi özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları mikro yapı incelemeler sırasında, düşük gerilme değerlerinin deformasyon ikizlerine neden olduğu ve tane incelmesinin tane sınırı kayma mekanizmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, yüksek gerilme değerlerindeki tane kayma mekanizmalarının, taban düzlemlerindeki ikiz yoğunluğundaki artışın sebep olduğu birincil kayma mekanizması yerine ikincil kayma mekanizması olarak değişmiş olduğunu belirtmektedirler [17].

Chua vd. mevcut araştırmalarında farklı boyutlardaki SiC takviyeli AZ91 kompozitlerinin mekanik özellikleri incelenmişlerdir. Akma ve nihai çekme gerilmeleri, SiC takviyesinin boyutundaki artışla birlikte bir düşüş gösterdiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında ek olarak 400°C ile 30°C arasındaki termal şokun mekanik özellikler üzerindeki etkisini de araştırmışlar ve termal şok döngülerinin sayısı ile akma geriliminde ve kırılmaya kadar uzamada bir azalma olduğu sonucuna ulaşmışlardır [39].

Yue vd. ZK60/SiC kompozitlerine lazer yüzey işleme uygulanmasının korozyon direncine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, ZK60 matrisli SiC ile güçlendirilmiş kompozitlerdeki ana korozyonun nedenini kaba ötektik fazdan ve lokalize galvanik korozyondan kaynaklandığını bildirmişlerdir [40].

Kumar vd. sürtünme karıştırma işleminin SiC partikül takviyeli ZK60 kompozitleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ürettikleri ZK60 alaşımının akma mukavemetini

169 MPa, nihai maksimum çekme mukavemetini 236 MPa ve sertlik değerini 75HV olarak hesaplamışlardır [41].

Kumar vd. ayrıca ZK60/SiC<sub>p</sub> kompozit alet pimi profillerinin mikroyapı özellikleri üzerindeki ana etkilerini araştırmıştır. Çalışmalarının sonucunda sertlik artışı ve daha iyi aşınma direnci elde etmesinin ana nedenin daha küçük tanelerin oluşumu ve dispersiyon kuvvetlendirmesinden dolayı olduğunu rapor etmişlerdir [14].

Zhu vd., ekstrüze edilmiş ZK60 alaşımının ekstrüzyon yönüne dik ve paralel yönleri boyunca farklı pH değerlerinde (pH 4, 7,4 ve 9) kuru ve simüle edilmiş vücut sıvısında (SBF) pin-on-disk aşınma davranışı özelliklerini incelemiştir. Mikro yapı karakterizasyon testleri sonucunda ekstrüze ZK60 magnezyum alaşımının tane boyutunun 8-50 µm aralığında değiştiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında pH değerinin numunelerin aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak EDS analizleri sonuçlarında ekstrüze ZK60 alaşımının aşınmış yüzeylerinde yüksek seviyelerde Mg ve O elementleri ve az miktarda Zn elementleri olduğunu tespit etmişlerdir. Aşınma kalıntılarındaki bol miktardaki O elementi sayesinde, oksidatif aşınmanın meydana geldiğini doğrulamışlardır. Aşınma testleri sonuçlarında, abrasif aşınma ve oksidatif aşınmanın kuru ortamda ana aşınma mekanizmaları olduğunu ve aşınmış yüzeyin korozyona uğramış kısımları beyaz parçacıklar ve çatlaklarla kaplandığını rapor etmişlerdir [42].

Guo vd., lazer şokla dövmenin ZK60'ın tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini ve aşınma mekanizmalarını incelemiştir. Mevcut çalışmalarının sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün 0,32 µm 'den 9,3 µm 'ye yükseldiğini, mikrosertliğin %39 arttığını, tane sayısının 1045'ten 1461'e çıktığını ve aşınma oranının maksimum %17,6 azaldığını bildirmişlerdir. Herhangi bir işlem uygulanmamış ZK60 alaşımının aşınma testlerin sonucunda adeziv aşınma ve oksidasyon aşınma mekanizması orijinal numunenin ana mekanizmaları olduğunu belirtmişlerdir [43].

Nieh vd., hacimce %17 SiC partikül takviyeli ZK60 kompozitinin süper plastik özelliklerini incelemiştir. Üretilen kompozitin ince bir mikro yapıya sahip olduğu (tane boyutu ~0,5 µm) ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olduğu ifade edilmiştir. İnce mikro

yapının bir sonucu olarak, ürettikleri kompozit numune çok yüksek gerinim hızında ( $\sim 1 \text{ s}^{-1}$ ) süper plastiklik (%350 kopma uzaması) sergilediği gözlemlenmiştir. ZK60 matris yapısındaki SiC takviyesinin, yüksek sıcaklıklarda kompozitin mikro yapısını açıkça iyileştirip stabilize edebildiğini ifade etmişlerdir. Deneysel gözlemler sonucunda ZK60/SiC/17p'deki süper plastik deformasyon, tane sınırı difüzyon mekanizmaları tarafından barındırılan tane sınırı kaymalarından biri olduğu sonucuna ulaşmışlardır [44].

Cai vd., Zn elementinin döküm Mg-Zn alaşımlarının (AZ61, AZ91 ve ZK60) mikro yapı, mekanik özelliği ve korozyon davranışı üzerindeki etkileri çekme testi, daldırma testleri ve elektrokimyasal değerlendirmeler kullanarak incelemiştir. Buldukları mevcut sonuçlara göre, Mg-Zn alaşımlarının mikro yapısının birincil  $\alpha$ -Mg matrisinden ve tane sınırı boyunca dağılmış Mg-Zn intermetalik fazından oluştuğunu bildirmişlerdir. Hacimce %5 Zn ilavesine sahip Mg-Zn alaşımlarının mekanik performanslarındaki iyileşme, ince tane güçlendirme, katı çözümlü güçlendirme ve ikinci faz güçlendirmeye karşılık geldiği sonucuna ulaşmışlardır. Ek olarak, potansiyodinamik polarizasyon testi, Zn elementinin Mg alaşımlarının yüzeyinde koruyucu bir film oluşumu üzerindeki yararlı etkisini gösterdiğini ancak Mg-Zn alaşımının en iyi korozyon önleme özelliğini sergilediğini belirtmişlerdir [45].

Mostaed vd., ZK60 alaşımı tane boyutunun mekanik özelliklere, asimetrik davranışa ve düşük sıcaklıktaki süper plastikliğe etkisini incelemiştir. Mevcut çalışmalarında, ekstrüzyon fiber dokusunun kademeli olarak daha yüksek yoğunluk ve Schmid faktörü ile kayma düzlemleri boyunca yeni ve daha yoğun bir yapıya dönüştüğünü bildirmiştir. Oda sıcaklığında çekme testleri sonuçlarına göre, kırılma uzamasının ve akma asimetrisinin tane boyutundan bağımsız olarak taban doku oryantasyonundan güçlü bir şekilde etkilendiğini analiz etmişlerdir. Ayrıca 200 °C'deki çekme testleri, akma geriliminin önemli ölçüde tane boyutuna bağlı olduğuna ve kırılma uzamasını tane boyutunun belirlediği sonucuna ulaşmışlardır [46].

Cheng vd., haddelenmiş AZ31, AZ91, AM60 ve ZK60 alaşımlarının korozyon davranışlarını 1 mol/L sodyum klorür çözeltisi kullanarak incelemiştir. Daldırma ve potansiyodinamik polarizasyon testlerinin sonuçlarına göre, dört malzemenin

korozyon direncini ZK60>AM60>AZ31>AZ91 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca korozyon testleri sonuçlarına göre ZK60 alaşımının korozyon modellerinin lokalize korozyon olduğunu ve ikinci faz partikülleri ile matrisin oluşturduğu galvanik çiftlerin, lokalize korozyonunun ana kaynağı olduğunu raporlamışlardır [47].

Chang vd. ekstrüze ZK60 ve AZ31/ZK60 bimetel kompozit malzemelerin mikro yapı karakterizasyon analizleri ve mekanik özellikleri üzerinde çalışmıştır. Çalışmalarının sonucunda ZK60 eriyiğinde eş eksenli kaba ve ince tanelerden oluştuğunu raporlamışlardır. Döküm ZK60 numunesinin mikroyapısının optik mikroskop görüntülerinde ikincil fazların tane sınırlarında biriktiğini gözlemlemişlerdir. Ekstrüze ZK60 numunesinin mikro yapı karakterizasyon analizlerinde DRX yapısı olan homojen eş eksenli taneler gözlemlemişler ve ortalama tane boyutu ~18,2 µm olarak hesaplamışlardır. Deneysel çalışmalarındaki tüm numunelerin basma testleri sonucu elde edilen grafiklerde akma mukavemetinin belirgin olmadığı ve gevrek kırılmanın gerçekleştiğini belirtmişlerdir [48].

#### **4.2. DELME İŞLENEBİLİRLİĞİ LİTERATÜR TARAMASI**

Köklü vd., farklı ekstrüzyon oranlarında ürettikleri AZ31 alaşımlarının delme işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında, itme kuvveti, delik yüzey kalitesi ve talaş özellikleri kriterlerine göre değerlendirme yapmışlardır. İtme kuvveti ve delik kalitesinin ekstrüzyon oranı ve kesme parametrelerine bağlı olduğunu raporlamışlardır. En yüksek itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini ekstrüzyon oranı 3,55 olan AZ31 alaşımında ölçmüşlerdir ve bunun mekanik özelliklerdeki iyileşme ile doğru orantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Ek olarak ekstrüzyon oranının artmasıyla talaş boyu ve delik yüzey kalitesi önce artıp sonra azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [49].

Bhowmick vd., dökme Mg alaşımı olan AM60'ın kuru ve minimum miktarda yağlama (MQL) ile delinmesi incelemişlerdir. Kuru delme sırasında takım ömrü, aşırı Mg matrisin kopması ve matkaba yüzeyine yapışması nedeniyle 80 delikten az olduğunu belirtmişlerdir. MQL kullanılan işlemlerde Mg yapışmasını ve talaş çapağı oluşumunu azaldığını, takım ömrünün arttığını, ortalama tork ve itme kuvvetlerinin azaldığını



raporlamışlardır. Ayrıca kuru delme işleminin, sıcaklığını artışına, sertlik değerinin azalmasına delik çevresinde büyük plastik gerinimlerin oluşmasına neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ek olarak matkap ucuna yumuşak Mg transferi nedeniyle belirgin bir yerleşik kenarların oluştuğunu ve bunun tork ve itme kuvvetini arttığını ifade etmişlerdir [50].

Wang vd., döküm AZ91 alaşımının kuru delme işlemi sırasında çelik matkap yüzeyinde oluşturdukları aşınma mekanizmalarını değerlendirdiler. Çalışmalarında, beş aşınma bölgesine bölünmüş bir aşınma haritası belirlediler. Çalışmalarının sonucunda, başlıca aşınma mekanizmalarının, adhezif, abrasif ve difüzyon aşınması olduğunu tespit ettiler. Böylece, aşınma haritasına dayalı olarak, beklenen takım aşınmasını en aza indirmek için kesme parametrelerini seçmek mümkün kılmışlardır [51].

Gariboldi, yapmış olduğu çalışmada AM60B alaşımının kuru delme işlenebilirliği ve yüzey aşınmalarını incelemiştir. AM60B alaşımının kuru delme işlemlerinde, Mg partiküllerinin matkap yüzeyine aşırı yapışması nedeniyle tüm takımların kullanım ömrünün sona erdiğini belirtmiştir. Ayrıca farklı ilerleme hızları değerlerinin, matkap üzerindeki Mg yapışmasının başlangıcını ve ilerlemesini ve aynı zamanda delik çıkış yüzeyi kalitesini değiştirdiğini gözlemlemiştir. Yapmış olduğu delik delme testleri sonucunda, uzun takım ömrünü garanti eden ve aynı zamanda deliklerde iyi bir yüzey kaplaması sağlayan optimum bir ilerleme hızı aralığı olduğunu göstermiştir [52].

Bhowmick vd., hidrojene olmayan elmas benzeri karbon (NH-DLC) kaplı HSS matkaplar kullanılarak döküm AZ91 alaşımının kuru delme ve suyla yağlama sırasındaki delme işlenebilirliği davranışını incelemiştir. Kaplamalı matkaplarda, delme işlemin sırasında yüksek sıcaklığın (271 °C) neden olduğu kaplama bozulmasının bir sonucu olarak matkap ucu aşınması gözlemlendi. Çalışmalarının sonucunda, matkapların delme torkunu ve sıcaklığını düşürmesi sebebiyle suyla yağlama işleminin takım ömrünü artırdığını raporlamışlardır. Ek olarak AZ91 iş parçası kaplanmış ve kaplanmamış matkaplar kullanılarak yapılan kuru delme sırasında yeniden kristalleşme yaşadığını gözlemlemiştir [53].

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE METOT

#### 5.1. GENEL BAKIŞ

Bu çalışmada, ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin delme işlenebilirliği araştırılmıştır. ZK60 alaşımı, beş yeni metal matrisli kompozit üretmek için SiC ve B<sub>4</sub>C partikül takviyeleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Üretilen yeni kompozitler sırasıyla ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C şeklindedir. Üretim için yarı katı sıcaklıkta karıştırmalı döküm yöntemi tercih edilmiştir. Karıştırmalı döküm işlemi sırasında takviye malzemelerinin erimiş ZK60 matrisi içerisine homojen dağılımını sağlamak için yarı katı sıcaklıkta karıştırma yöntemi kullanılmıştır. Üretilen ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitleri sırasıyla homojenleştirme ve ekstrüzyon işlemleri uygulanmıştır. Üretimi tamamlanan ZK60 alaşımının ve ZK60 kompozitlerinin yoğunluk ölçümü, mikroyapı karakterizasyon analizleri, korozyon testi, mekanik testleri, delik delme ve sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada B<sub>4</sub>C ve SiC takviyelerinin ZK60 alaşımını güçlendirmek için birlikte kullanılabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, ZK60 matrisli yeni güçlendirilmiş kompozitlerinin kritik uygulamalar için alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

#### 5.2. ZK60 ALAŞIMI VE ZK60 KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ

##### 5.2.1. Karıştırmalı Döküm

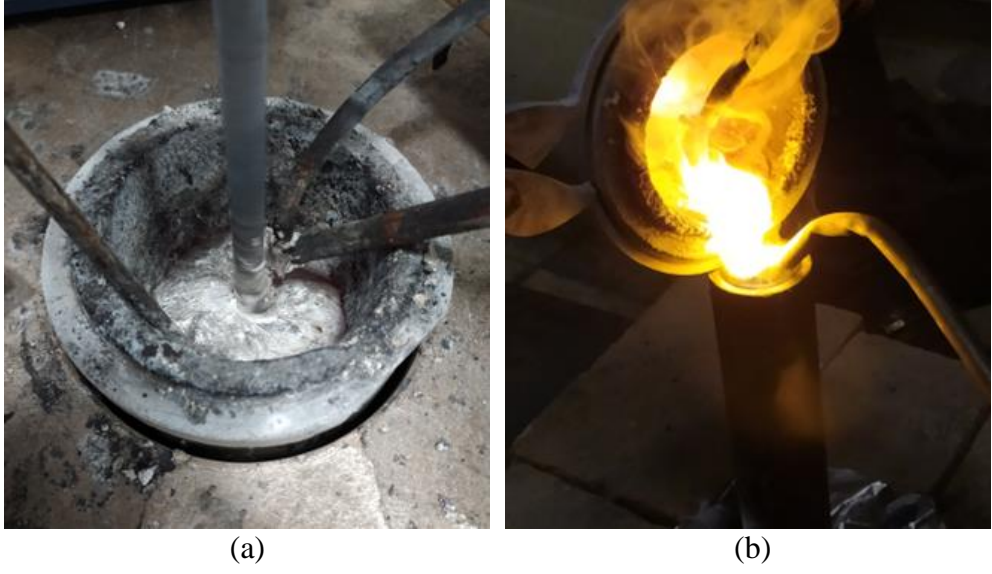
Bu çalışma kapsamında ZK60 alaşımına ağırlıkça %5SiC, %10SiC, %5B<sub>4</sub>C, %10B<sub>4</sub>C ve %5SiC+%5B<sub>4</sub>C ilave edilerek beş adet güçlendirilmiş kompozit üretilmiştir. ZK60 alaşımının içeriği %93,5 Mg, %6 Zn ve %0,5 Zr elementlerinden oluşmaktadır ve alaşım matrisini oluşturacak külçeler eritmeden önce bu oranlara göre hazırlanmıştır.

Kompozit üretiminde kullanılan SiC takviyesinin boyutu 70  $\mu\text{m}$  ve B<sub>4</sub>C takviyesinin boyutu 40  $\mu\text{m}$ 'dir (Çizelge 5.1) ve her ikisi de partikül takviye malzemeleridir. Deney malzemelerinin üretiminde indüksiyon ocağı, çelik potalar ve demir silindirik döküm kalıbı kullanılmıştır.

Üretimin ilk aşamasında saf Mg, Zn ve Zr külçeleri 660°C'de indüksiyon ocağında eritilerek ZK60 alaşımı oluşturulmuştur. Erimiş ZK60 alaşımının sıcaklığı daha sonra yaklaşık 450°C olan yarı katı sıcaklığa düşürüldü. ZK60 eriyiği ile takviyelerin yoğunluk farkına (Çizelge 2.1 ve Çizelge 5.1) rağmen tamamen homojen olması için eriyik içerisine takviye malzemeleri kademeli olarak eklenmiştir. ZK60 alaşımına takviyeler eklenirken, karışım mekanik bir karıştırıcı ile 200 rpm dönme hızında karıştırıldı. Ancak ZK60 matrisine 450°C 'de sadece SiC takviyeleri eklenebildi. B<sub>4</sub>C takviyesinin eklenmesi sırasında, erimiş ZK60 yarı katı fazdan sıvı faza dönüştü. Bu nedenle B<sub>4</sub>C takviye edilirken ZK60 alaşımının sıcaklığı 350°C 'ye düşürülmüştür. İstenilen takviye malzemeleri ilave edildikten sonra yarı katı sıcaklıklarda (SiC için 450°C, B<sub>4</sub>C için 350°C) 30 dakika karıştırma işlemine devam edilmiştir. Üretimin son aşamasında eriyik karışımlar 750°C döküm sıcaklığında 10 dakika dinlenmeye bırakılmıştır. Eritme, karıştırma ve bekletme işlemleri sırasında pota atmosferi %99CO<sub>2</sub>+%1SF<sub>6</sub> gazı ile korunmuştur. SF<sub>6</sub>, Sülfür Hekzaflorür bileşiğinin ticari adıdır. Eriyikler dinlenmeye bırakılırken koruyucu gaz atmosferi yanında eriyik yüzeyi NaCl+KCl+MgCl<sub>2</sub> tuz karışımı ile kaplanmıştır. Bekletme işleminin ardından eriyikler metal kalıplara dökülerek 250 mm boyunda 35 mm çapında silindirik kompozit numuneler elde edildi. Üretim işlemleri Şekil 5.1 'de, dökümü tamamlanan ZK60 alaşımının görüntüsü Şekil 5.2 'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Üretimde kullanılan SiC ve B<sub>4</sub>C takviyelerinin özellikleri.

Özellikler	SiC	B <sub>4</sub> C
Tane boyutu	70 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,16	2,52
Termal İletkenlik (W/mK)	39-120	29
Termal Genleşme Katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)	3,4	5-6
Elastisite Modülü (GPa)	400-448	450-470



Şekil 5.1. Üretim işlemlerinin görüntüleri: a) yarı katı sıcaklıkta karıştırma, b) döküm



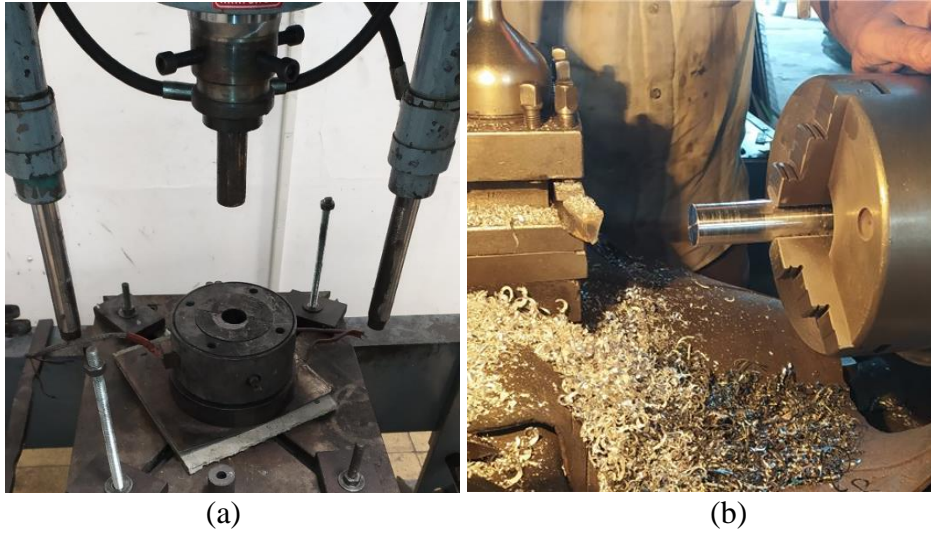
Şekil 5.2. Döküm işlemi tamamlanmış ZK60 alaşımının görüntüsü.

### 5.2.2. Homojenleştirme Isıl İşlemi

Döküm sonrası yapıda ekstrüzyon sırasında ikincil fazlar oluşabilir ve mikro segregasyonlar oluşabilir. Bu olumsuz durumların giderilmesi ve kararlı matris yapı elde edebilmek için üretilen tüm numunelere homojenleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Döküm kalıbından çıkarılan ingotlar varsa döküm çekilme kısımları kesilmiştir. Bu işlemden sonra tüm döküm ingotları alüminyum folyoya sarılıp kum karışımı ( $\text{SiO}_2$ +Grafit) içine gömülmüş ve  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 24 saat boyunca ısıl işlem uygulanmıştır.

### 5.2.3. Ekstrüzyon İşlemi

Standart bir üretimin olabilmesi için homojenleştirilmiş tüm ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozit ingotları tornada 40 mm boyunda 30 mm çapında kesilerek ekstrüzyon işlemine hazır hale getirilmiştir. Ekstrüzyon sırasında ısıl farklılık olmaması için ekstrüzyon işlemi öncesi tüm numuneler MoS<sub>2</sub> bazlı spreyci yağlayıcı ile yağlanıp ısıl işlem fırınında ısıtılmıştır. Ekstrüzyon işlemi 30 ton ve 400 mm.strok kapasiteli hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işleminde yapılan hazırlıklar Şekil 5.3'te sunulmuştur. Ekstrüzyon kalıpları hidrolik prese bağlı rezistanslar ile ısıtılırken kalıp sıcaklıkları ise termokupl yardımıyla kontrol altında tutulmuştur. Ekstrüzyon işlemi uygulanacak ingotlar ısıl farkın oluşmaması için kalıp içerisine alındıktan sonra 10 dakika bekletilmiştir. Tüm koşullar hazır olduğunda ekstrüzyon işlemleri 250 °C sıcaklıkta ekstrüzyon hızında gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işlemleri ile 40 mm boy 30 mm çapa sahip ingotlar yaklaşık 75 mm boyunda 20 mm çapında ekstrüzyon numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Ekstrüzyon işlemi öncesi: a) ekstrüzyon düzeneği, b) numune hazırlığı.

### 5.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ

Üretim tamamlanmasının ardından ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri için Arşimet Prensibi kullanılmıştır. Arşimet prensibi, malzemenin kuru havadaki ağırlık değerinin sudaki

oluşan ağırlık farkına oranı ile malzemenin yoğunluğunun su yoğunluğuna ( $1 \text{ g/mm}^3$ ) oranının eşit olduğunu ifade eder. Bu teorik ifade Eşitlik 5.1 'te verilmiştir [54].

$$\rho/\rho_{su} = w_{hava}/(w_{hava} - w_{su}) \quad (5.1)$$

Bu bağlamda Arşimet Prensibi uygulamak için ilk önce ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitleri 20 mm çap uzunluğu değiştirilmeden 10 mm boyunda kesilmiştir. Kesilen yoğunluk ölçüm numunelerinin 0,0001 g hassasiyet değerine sahip hassas terazide (Şekil 5.4) kuru ve ıslak ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sonrası elde edilen veriler Excel uygulamasında listelenmiş ve hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Hazırlanan numunenin sudaki ağırlığının hassas terazide ölçümü.

#### 5.4. MİKRO YAPI KARAKTERİZASYONU

Üretilen ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin XRD faz analizleri, optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleme, SEM-EDX-MAP analizleri, korozyon testi, sertlik testi, basma testleri, aşınma testi, delik delme testi ve sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Bu kısımda incelenen kompozitlerinin XRD faz analizleri, optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleme, SEM-EDX-MAP analizlerinden bahsedilecektir. Ayrıca mikro yapı karakterizasyon analizlerinde Gibbs serbest enerji değerlerinin hesabı, tane boyutu hesabı gibi analizler de yapılmıştır.

### 5.4.1. XRD Faz Analizi

Üretilen ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinden sadece ekstrüze ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerine XRD faz analizleri uygulanmıştır. Literatür bilgeleri doğrultusunda, ZK60 alaşımının ana matris olması ve ZK60+%5SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C numunelerinin yapısında oluşabilecek fazların aynıları ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinde de oluşacağı için numune seçim tercihleri bu şekilde yapılmıştır. Ekstrüze ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinden XRD faz analizlerinde kullanılmak üzere 5 mm boyunda 10 mm çapında numuneler hazırlanmıştır. XRD faz analizleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM-XRD Laboratuvarı bünyesinde bulunan Rigaku Ultima IV X-Ray Kırınım Spektrometresi (10°-90° tarama açısı, 3 derece/dak tarama hızı) kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen XRD kırınım pikleri laboratuvar bilgisayarlarına kayıtlı standart faz kartları ile karşılaştırılması sonucu oluşan fazlar belirlenmiş ve tablo haline getirilmiştir.

#### 5.4.1.1. Fazların Gibbs Değerlerinin Hesabı ve Termokimyasal Çözümleme

Üretimi tamamlanan ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin içeriğini oluşturan elementler, üretim işlemleri sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Yüksek sıcaklık, elementlerin aktifliğini arttırarak kimyasal tepkimelere neden olur ve bu durum termokimyasal tepkime olarak tanımlanır. Termokimyasal tepkimelerin anlaşılabilmesi için üretimi yapılan numunelerin matrislerinde hangi kimyasal tepkimelerin gerçekleştiğini bilmek ve sıcaklık değişimine göre Gibbs serbest enerji ( $\Delta G$ ) değerlerinin hesaplanması gerekir. Gibbs serbest enerjisi ( $\Delta G$ ) Eşitlik 5.2 'teki ifade ile hesaplanır. Kimyasal tepkimelerin Gibbs serbest enerjilerinin hesaplanması, kimyasal tepkimenin oluşma aktifliği ve intermetlik bileşiklerin oluşumu ile ilgili bilgi verir. Gibbs serbest enerjinin değerinin negatif değerde ve çok düşük olması bu kimyasal tepkimenin aktifliğini ve gerçekleşme eğiliminde olduğunu gösterir [37].

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte ( $\Delta H$ ) ifadesi entalpi değişimini, ( $\Delta S$ ) entropi değişimini ve ( $T$ ) sıcaklık değerini ifade eder. Entalpi değişimi ( $\Delta H$ ), reaktantların entalpi değerinin ( $H_r$ ) reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin entalpi değerinden ( $H_p$ ) çıkarılmasıyla bulunur ve formülasyonu Eşitlik 5.3 'teki verilmiştir. Benzer şekilde entropi değişimi ( $\Delta S$ ), reaktantların entropi değerinin ( $S_r$ ) reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin entropi değerinden ( $S_p$ ) çıkarılmasıyla bulunur ve formülü Eşitlik 5.4 'teki gibidir.

$$\Delta H = H_p - H_r \quad (5.3)$$

$$\Delta S = S_p - S_r \quad (5.4)$$

Bu çalışmada, yapılan XRD faz analizleri sonucunda tespit edilen intermetalik bileşiklerin hangi kimyasal tepkimeler sonucunda oluştuğunu anlayabilmek için bu çalışma yapılmıştır. Çalışmalarda öncelikle numunelerin yapısında oluşabilecek kimyasal tepkimeler literatür bilgileri ışığında belirlenmiştir. Belirlenen kimyasal tepkimelerin 0-1000 °C sıcaklıkları arasındaki Gibbs serbest enerji değerleri hesaplanmış ve Gibbs değeri en düşük olan kimyasal tepkimeler listelenmiştir. Ek olarak listelenen kimyasal tepkimelerin 0-1000 °C sıcaklığı arasındaki Gibbs serbest enerjilerindeki değişim değerleri grafik haline getirilmiştir.

#### 5.4.2. Mikro Yapı Görüntüleme

Üretilen döküm, homojenleştirme ve ekstrüzyon işlemleri uygulanmış ZK60 alaşımı ve ekstrüze ZK60 kompozitlerinin yüzey görüntüleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM-Metalografi Laboratuvarı bünyesinde bulunan Nikon marka ters metalurjik optik mikroskop ile yüzey görüntüleri alınmıştır. Mikro yapı yüzey görüntülemeleri için 10 mm kalınlığında numuneler kesilmiştir. Kesilen numuneler epoksi kalıplara alınıp yüzeyleri 400-2500 grit aralığındaki zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra zımparalanmış yüzeyler, 3 µm saf sulu alümina çözeltilisi kullanılarak parlatma keçesi ile parlatılmıştır. Numunelerin parlatılmış yüzeyleri 100 ml etil alkol, 6 gr pikrik asit, 10 ml damıtılmış saf su ve 5 ml asetik asitten oluşan bir pikrik çözelti ile dağlanmışır. Döküm ve homojenleştirilmiş ZK60 alaşımının yüzey görüntüleri 200X büyütmede alınırken ekstrüze ZK60 alaşımı



ve ZK60 kompozitlerinin yüzey görüntüleri 1000X büyütme değeri kullanılmıştır. Optik mikroskop ile alınan yüzey görüntüleri yine laboratuvar bünyesinde bulunan Clemex görüntü analizi yazılımı ile bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.

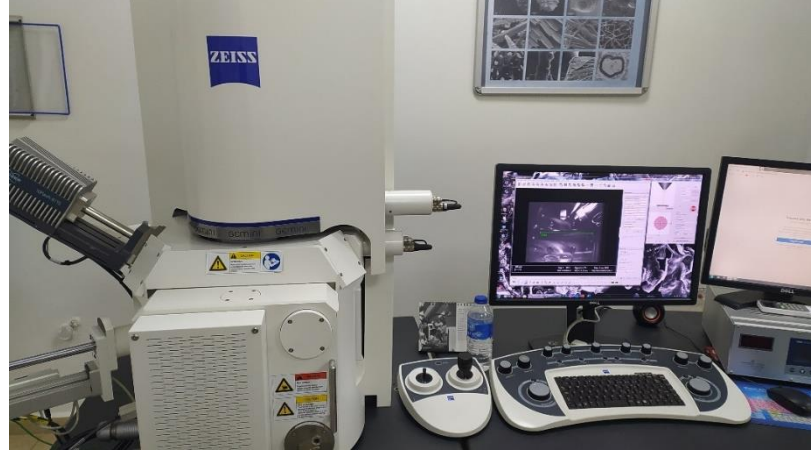
#### **5.4.2.1. Tane Boyutu Hesabı**

Yüzey görüntülemeleri için hazırlanmış numuneler tane boyutlarının hesaplanması için ayrıca Carl Zeiss marka optik mikroskop kullanılarak görüntülenmiştir. Yüzey görüntüleri Mikrotest Kameram uygulaması aracılığıyla bilgisayar ortamına kaydedilmiştir ve yine bu uygulamanın ASTM E112 Grain Size modülü kullanılarak ortalama tane boyutları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda 20 adet ölçüm ortalaması alınarak yapılmıştır ve standart sapma değerleri de kaydedilmiştir. Burada hesaplanan standart sapma değerleri alınan yüzey görüntüsündeki tane boyutlarının aralığını ifade etmektedir.

#### **5.4.3. SEM-EDX Analizleri**

SEM-EDX-MAP mikro yüzey analizleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM-Metalografi Laboratuvarı bünyesinde bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri sonrasında numune yüzeylerindeki oluşan ikizlenmelerin, takviye malzemelerinin ve oluşan intermetalik bileşiklerin dağılımını görüntüleyebilmek için 2000X büyütme değerinde SEM yüzey görüntülemeleri yapılmıştır. SEM analizlerinde mikro yapı yüzey görüntülemeleri için hazırlanmış olan ZK60 alaşımı ve bazı ekstrüze ZK60 kompozitleri kullanılmıştır. İkizlenme oluşumlarının net görüntülenebilmesi için sadece ekstrüze ZK60 alaşımının SEM görüntüsü alınmıştır. Takviye malzemelerinin ve intermetalik bileşiklerin görüntülenebilmesi için ise ekstrüze ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin SEM görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin matrisindeki takviye elemanları ve intermetaliklerin hangi elementler içerdiğini belirlemek için SEM görüntülerinden EDX analizleri yapılmıştır. SEM-EDX

analizlerinin yapıldığı taramalı elektron mikroskobu düzeneği Şekil 5.5 'te sunulmuştur.



Şekil 5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) düzeneği.

## 5.5. KOROZYON TESTİ

Mikro yapı karakterizasyon çalışmaları sonrasında döküm ZK60 alaşımı, ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin potansiyodinamik polarizasyon (üç elektrotlu) korozyon testleri uygulanmıştır. Test öncesinde 10 mm kalınlığında numuneler kesilmiştir. Kesilen numunelere, dışı yalıtılmış bakır tel sarılmıştır. Daha sonra numuneler, bir yüzeyleri korozyon yüzeyi olacak şekilde açık bırakılarak epoksi kalıba alınmıştır. Korozyon testinin uygulanacağı yüzeylerin pürüzsüz ve düzgün olabilmeleri için 1200 grit zımpara ile zımparalanmıştır ve korozyon yüzeyleri  $0,25 \text{ cm}^2$  dairesel boşluk kalacak şekilde su geçirmez bant ile yalıtılarak tüm numuneler korozyon testlerine hazır hale getirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon testleri Gamry DC105 potansiyostat/galvanostat yazılımı aracılığıyla bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) eğrileri,  $\pm 0,25 \text{ Volt}$  aralığında  $1 \text{ mV.s}^{-1}$  tarama hızında taranarak oluşturularak korozyon akım yoğunluğu ( $i_{\text{kor}}, \mu\text{A/cm}^2$ ), korozyon potansiyel ( $E_{\text{kor}}, \text{V}$ ) ve korozyon hızı ( $\text{mm/y}$ ) değerleri analiz edilmiştir. Grafit çubuk, doymuş kalomel elektrot ve hazırlanan numuneler sırasıyla karşı elektrot, referans elektrot ve çalışma elektrotu olarak kullanılmıştır. Test solüsyonu, tuzlu saf su (%3,5 NaCl) çözeltisidir ve tüm korozyon testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelere üçer defa korozyon testleri

uygulama yapılmıştır. Elde edilen korozyon akım yoğunluğu ve korozyon potansiyel verilerinin ortalama değerleri alınmıştır. Korozyon deneyleri sonrasında hasar mekanizmalarının belirlenmesi için korozyon yüzeyine SEM ve XRD faz analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen bilgiler Ellingham diyagramına göre yorumlanmıştır. Ellingham diyagramı metal oksit bileşik oluşum tepkimeleri hakkında bilgi veren bir diyagramdır [55,56]. Kompozitlerde oluşan oksit fazlarının Ellingham diyagramı HSC Chemistry yazılımında oluşturulmuştur.

## 5.6. SERTLİK TESTİ

Üretimi yapılan ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin sertlik değerleri Numunelerin sertlik değeri, bir Brinell sertlik cihazında 187,5 *N* yük ve 2,5 *mm* çapında bir top kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için 10 *mm* kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Sertlik testleri, hazırlanan her numuneye beşer defa uygulanmıştır ve iz çapları ölçülerek ortalama Brinell sertlik değerleri hesaplanmıştır. Sertlik testlerinin gerçekleştiği Brinell sertlik cihazında yapılan sertlik ölçümlerinden örnek görüntü Şekil 5.6 'da sunulmuştur.

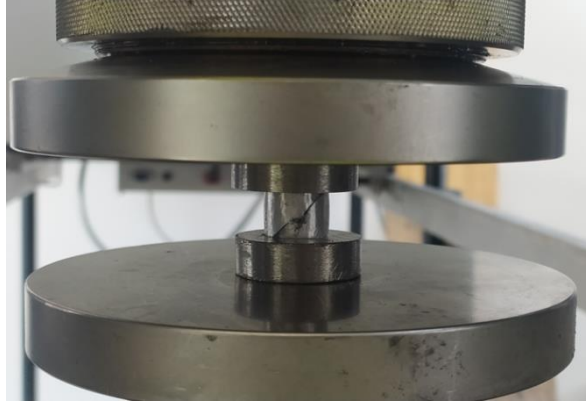


Şekil 5.6. Brinell sertlik ölçüm testi.

## 5.7. BASMA TESTİ

Mukavemet değerlerinin belirlenmesi dışında delik delme sonlu elemanlar analizlerinde üretilen ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin malzeme modeli oluşturulacağı için basma hızı 0,5 *mm/dk* olan 20°C sıcaklıkta basma testi

yapılmıştır. Basma testleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM-Statik Test Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zwick/Roell Z600 Çekme-Basma-Eğme testleri cihazında belirledikleri test standartlarında yapılmıştır. Basma testleri standartlara uygun şekilde, kısa basma numunesi ölçülerinde (1:1 oran), boyu 10 mm ve çapı 10 mm olan silindirik numuneler hazırlanmıştır. Basma testleri için her numuneden üçer adet olmak üzere toplam 18 adet test numunesi hazırlanmıştır. Basma testleri esnasında gerinme ve gerilme değerleri bilgisayar ortamına aktararak mukavemet grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca basma testi sonrasında delik delme sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere diğer eksenlerde oluşan gerinme ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Ek olarak basma testleri sonrasında numunelerin kırılan yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmalarının belirlenmesi için SEM ve MAP analizleri yapılmıştır. Basma testi uygulamasından örnek görüntü Şekil 5.7 'de sunulmuştur.



Şekil 5.7. Basma testi uygulaması.

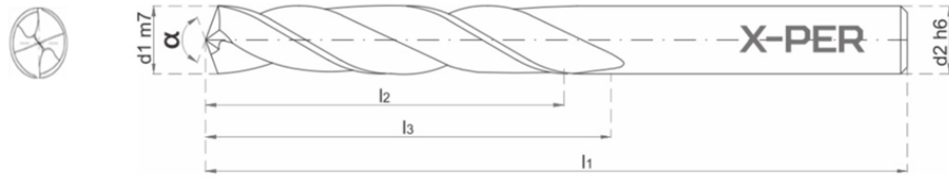
## 5.8. AŞINMA TESTİ

Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin aşınma testleri, kuru ortamda, oda sıcaklığında, bilgisayar kontrollü ve yük hücreli ileri-geri aşınma test cihazı sisteminde uygulanmıştır. Aşınma testleri, toplam 600 m kayma mesafesi için 0,05 m/s kayma hızında ve 20 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Karşı yüzey, kuru aşınma testinde 6 mm çapında 100Cr6 kalite çelik bilyedir. Hazırlanan numuneler 10 mm boyunda 20 mm çapında boyutlarındadır. Numune yüzeyleri 400–1200 grit zımpara ile zımparalanıp, etil alkol ile temizlenerek aşınma testi için hazırlandı. Testler temiz bir yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde her 150 m kayma mesafesinde

0,0001 g hassasiyetli terazi ile kütle kayıpları ölçülmüştür. Test işlemi sırasında yük hücresi tarafından ölçülen sürtünme kuvveti verilerinden kompozitlerin sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca, aşınma testlerinin ardından, kompozitlerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için detaylı SEM ve MAP analizleri yapılmıştır.

## 5.9. DELİK DELME TESTİ

Üretilip ekstrüze edilen numunelerine delme işlenebilirlik kapasitelerinin belirlenebilmesi için üç farklı ön açı değerine sahip matkaplar ile delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Matkaplar Karcan Kesici Takım San. Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Delik delme testlerinde kullanılan matkap ön açısı  $100^\circ$ ,  $118^\circ$  ve  $138^\circ$  ve helis açısı  $30^\circ$  sabit değere sahip matkaplardır. Matkaplar soğutma deliksiz, tungsten karbür malzemeden üretilmiş, 6 mm çapında, 5d kesme derinliği özelliklerine sahiptir. Matkap teknik resmi Şekil 5.8 'de sunulmuştur. Şekil 5.8 'deki teknik resime göre matkap ölçüleri Çizelge 5.2 'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Delik delme testlerinde kullanılan matkapların teknik resmi.

Çizelge 5.2. Teknik resmi verilen matkapların ölçüleri (Şekil 5.8).

Matkap Çapı ( $d_1$ )	Matkap Uzunluğu ( $l_1$ )	Kesme Uzunluğu ( $l_2$ )	Kanal Uzunluğu ( $l_3$ )	Ön Açı ( $\alpha$ )	Helis Açısı ( $\omega$ )
6	82	41	44	$100^\circ / 118^\circ / 138^\circ$	$30^\circ$

Delik delme testleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine İmalat Laboratuvarı bünyesinde bulunan Etasis VL 1000 CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Delme işleminin hassas ve hatasız yapılabilmesi için matkaplar hidrolik tutucu ile sabitlenmiştir. Delik delme testleri için ekstrüze ZK60 alaşımı ve

ZK60 kompozitlerinden 10 mm boyunda 20 mm çapında numuneler kesilmiştir ve yüzeyleri kabaca temizlenmiştir. Delme işlemleri oda sıcaklığında kuru hava ortamında, 1000/1250/1500 dev/dak olmak üzere üç farklı devir sayısında ve sabit 0,075 mm/dev devir başına ilerleme değerinde gerçekleştirilmiştir. Delme işlemlerinde her bir numuneye sabit devir başına ilerleme değerinde üç farklı devir sayısında ve üç farklı matkap ön açısı için hızı için 3 farklı açıdaki matkaplar ile toplam 9 adet delik delme işlemi uygulanmış olup toplamda ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitleri numunelerine (6 farklı malzeme) toplamda 54 adet delik delme testi yapılmıştır. Delme işlemi parametreleri Çizelge 5.3 'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Delik delme, tek seferde, kademersiz ve numuneyi boydan boya delectek şekilde uygulanmıştır ve delme işlemleri sırasında oluşan kesme kuvveti ve kesme momenti değerleri yük hücreli bir dinamometre ile ölçülerek yazılım ile bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Delme işlemleri sırasında termal kamera kullanılarak sıcaklık testler sırasında numunelerin sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Testler sonrasında optik mikroskop ile makro düzeyde talaş yüzeyi, delik yüzeyi, delik geometrisi, delik çıkışında oluşan çapaklar ve matkap yüzeyi görüntüleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işleme ek olarak delme işlemi sonrasında delik yüzeylerinin ve oluşan talaşların mikro düzeyde SEM görüntülemeleri yapılmıştır.

Çizelge 5.3. Delik delme test parametreleri.

Parametreler	I	II	III
Devir sayısı ( $n$ , dev/dak)	1000	1250	1500
Devir başına ilerleme ( $f_n$ )	0,075	0,075	0,075
Numune kalınlığı (t)	10	10	10
Matkap uç açısı ( $\alpha$ )	100°, 118°, 138°	100°, 118°, 138°	100°, 118°, 138°
Helis açısı ( $\epsilon$ )	30°	30°	30°

## 5.10. DELİK DELME SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

### 5.10.1. Malzeme Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar analizleri tamamen simüle edilebilmesi için öncelikle ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin malzeme özellikleri hesaplanmıştır. Üretilen

malzemelerin yoğunluk, elastik-mekanik özellikler ve plastik-mekanik özellikler belirlenmiştir. Yoğunluk ve elastik-mekanik özellikler (elastisite modülü ve Poisson's oranı) Arşimet Prensibi ve basma testleri ile elde edilmiştir. Delik delme testlerinin simülasyonunda en önemli malzeme bilgisi şüphesiz malzemenin plastik-mekanik özellikleridir. Bu özellikler, delik delme testlerinde kullanılan iş parçasının işlem sırasında yüzeyden kopan parçaların kopma mekanizmalarını belirleyen temel özelliktir. Bu özelliğin belirlenebilmesi için öncelikle Johnson-Cook malzeme modeli ve Ductile Damage (sünek hasar) modellerinin hesaplamaları yapılmıştır. Bu modeller süneklik, elastik/plastik gerinim miktarı, gerinim hızını (strain rate), plastik sertleşme miktarı gibi malzemenin birçok mekanik özelliğini matematiksel olarak ifade eder. Johnson-Cook malzeme modelinin denklemi Eşitlik 5.5 'te verilmiştir. Basma testleri 20 °C sıcaklıkta, herhangi bir sıcaklık etkisi olmadan yapıldığı için Eşitlik 5.6 'ya göre  $\dot{T}$  katsayısı sıfırdır. Bu sebepten dolayı Johnson-Cook denklemi Eşitlik 5.7 'deki son halini alır.

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \cdot (1 - \dot{T}^m) \quad (5.5)$$

$$\dot{T} = \begin{cases} T < T_r & ; & 0 \\ T_r < T < T_e & ; & \frac{T-T_r}{T_r-T_e} \\ T_e < T & ; & 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \quad (5.7)$$

Burada,  $\sigma$  ifadesi gerilme değeri,  $A$  akma mukavemeti,  $B$  gerinim sertleşmesi değeri (strain-hardening),  $\varepsilon$  gerinim değeri,  $n$  gerinim sertleşmesi üssü (strain-hardening exponent),  $C$  gerinim hızı sabiti,  $\dot{\varepsilon}$  gerinim hızı,  $T$  deneyin gerçekleştiği sıcaklık,  $T_r$  oda sıcaklığı değeri,  $T_e$  ergime sıcaklığı değeri ve  $m$  sıcaklık etkisi katsayısıdır.

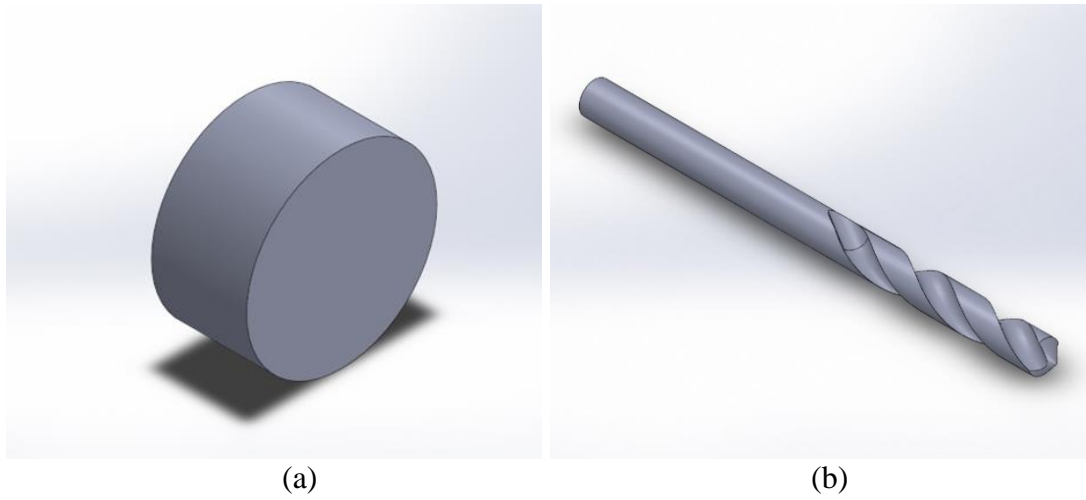
Ductile Damage modeli için basma testleri verilerinden ortalama kırılma gerinimi (fracture strain) ve gerilme üç eksenliliği (stress triaxiality) değerlerinin belirlenmesi gerekmiştir. Ortalama kırılma gerinimi, basma testlerindeki maksimum gerilme değerine karşılık gelen gerinim değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Gerilme üç eksenliliği ise Eşitlik 5.8 'de verilen ifadeye göre hesaplanır.

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3 \cdot \sqrt{0,5 \cdot [(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) + (\sigma_3^2 - \sigma_1^2)]}} \quad (5.8)$$

Burada,  $\sigma^*$  gerilme üç eksenliliğini,  $\sigma_m$  ortalama gerilme değerini,  $\sigma_{eq}$  eşdeğer Von-Mises gerilmesi değerini,  $\sigma_1$  x-eksenindeki gerilme değerini,  $\sigma_2$  y-eksenindeki gerilme değerini ve  $\sigma_3$  z-eksenindeki gerilme değerini ifade etmektedir. Bu değerler basma testleri esnasında belirlenmiştir.

### 5.10.2. Sonlu Elemanlar Modeli

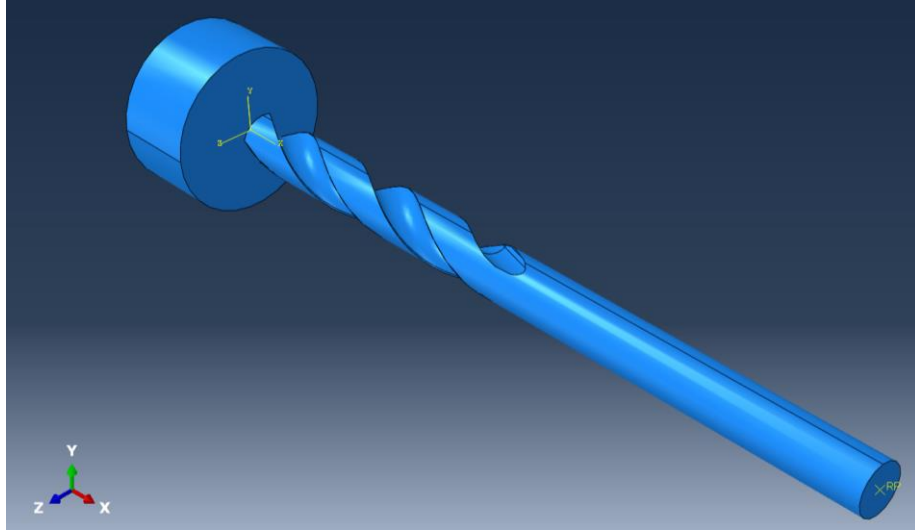
Üretilen ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin delme işlenebilirliği kapasitelerini bilgisayar ortamında incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizini simüle etmek için DS Simulia ABAQUS paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli oluşturulmadan önce numune ve matkapların üç boyutlu geometrik modelleri hazırlanmıştır. Delik delme testlerinde kullanılan 10 mm boy 20 mm çap ölçülerindeki numune ve özellikleri Çizelge 5.2 'de verilen matkapların üç boyutlu geometrik modelleri Dassault Systèmes SolidWorks paket programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan numune ve matkap örnekleri Şekil 5.9 'da verilmiştir. Üç boyutlu çizimler ABAQUS paket programında kullanılabilmesi için step uzantısı olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.9. Üç boyutlu tasarımların örnek görüntüleri: a) numune; b) matkap.



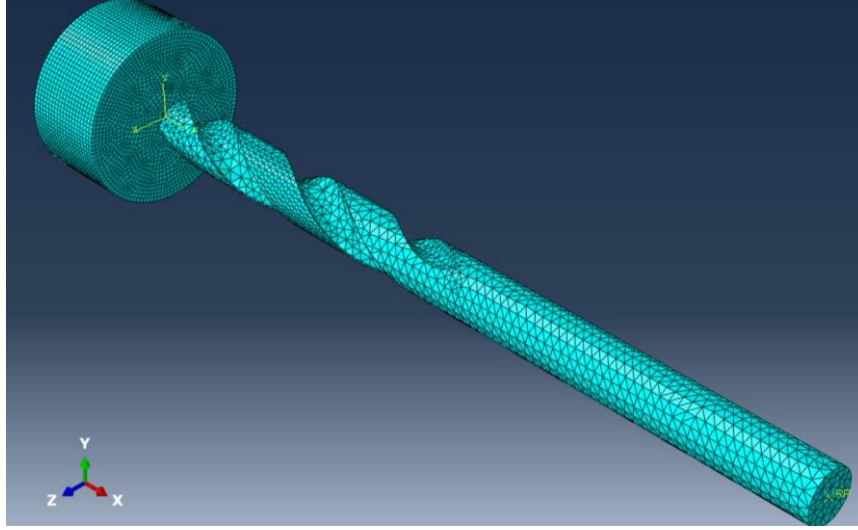
Geometrik modelleri hazırlanan numune ve matkaplar deneysel çalışmalar doğrultusunda, sırayla ABAQUS paket programına aktarılmıştır. Aktarma işlemlerinde SI birimi kullanıldığı için tüm sonlu elemanlar analizleri bu birime göre modellenmiştir. Programa aktarılan numune ve matkabın ilk olarak belirlenen malzeme özellikleri ile malzeme kütüphanesi oluşturuldu. Daha sonra numune ve matkabın malzeme özellikleri atanmıştır. Kullanılan matkaplar standart tungsten karbür matkaplar olduğu için matkap özellikleri katalogdan belirlenmiştir. Matkabın malzeme kütüphanesine kaydedilen yoğunluğu  $15000 \text{ kg/m}^3$ , elastisite modülü  $80 \text{ GPa}$ , Poisson's oranı  $0,22$ , iletkenlik katsayısı  $46 \text{ W/mK}$  ve özgül ısı  $203 \text{ J/kgK}$  olarak alınmıştır. Matkabın plastik deformasyon değerleri bilinmediği için geometrik şekil plastik deformasyona dirençli, rijit malzeme olarak ayarlanmıştır. Numune ve matkabın malzeme atamaları bittikten sonra montaj işlemlerine geçilmiştir. Numune ile matkabın uç noktasının teması sağlanacak şekilde model hazırlanmıştır ve matkabın arka noktasına bir referans noktası (RP) atanmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinin montajına göre matkabın ilerleme doğrultusu x-ekseni olacak şekilde ayarlanmıştır ve modelin montaj görüntüsü Şekil 5.10 'da sunulmuştur.



Şekil 5.10. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinin montaj görüntüsü.

Geometrik modellerin montaj işlemlerinden sonra numune ve matkaba mesh oluşturma işlemine geçilmiştir. Mesh işlemlerinde numuneye altı yüzlü (kübik, Hexahedron-dominated) birim eleman atanmıştır ve birim elemanların boyutu  $0,0005 \text{ m}$ 'dir. Matkaplara ise dört yüzlü (piramidal, tetrahedron) birim eleman atanmıştır ve

birim elemanların boyutu 0,001 m'dir. Birim eleman boyutları olarak girilen bu değerler, ön çalışmalar sonucunda hızlı ve doğru yaklaşım uygulanmasını sağlayan optimum değer olduğuna karar verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin birim eleman ağı örülmüş (mesh) hali Şekil 5.11 'de sunulmuştur.



Şekil 5.11. Sonlu elemanlar modelinin mesh ağı görüntüsü.

Mesh işlemlerinin ardından sonlu elemanlar modelinin deney sınır şartları oluşturulmaya başlanmıştır. Öncelikle delik delme işlemlerini oluşturacak analiz tipi belirlenmiştir. Delik delme testlerinde hareket sonu delme işlemi ve sıcaklık oluşumu gerçekleştiği için ABAQUS programının Dynamic/disp-temp/Explicit analiz tipi seçilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için delik delme parametrelerinin girdisi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde delik delme testlerinden farklı olarak x-ekseni doğrultusunda yer çekimi ivmesi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ile numune ve matkabın ilk sıcaklık değeri ( $20^\circ\text{C}$ ) girdileri girilmiştir. Delik delme testlerindeki tüm parametreler ve sınır şartlarının eksiksiz olarak ayarlandığı doğrulandıktan sonra deneysel olarak gerçekleştirilen 54 adet testin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda itme kuvveti (thrust force), delme momenti ve sıcaklık değerlerini veri olarak kaydedilerek grafiklere dönüştürülmüştür.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üretim aşamaları ve deneysel yöntemleri bahsedilen ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin yoğunluk ölçümü, mikroyapı karakterizasyon analizleri, korozyon testi, mekanik testleri, delik delme ve sonlu elemanlar analizleri sonrası elde edilen verileri sunmaktadır.

#### 6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 güçlendirilmiş kompozitlerinin ortalama kuru ağırlık (g), ortalama yaş ağırlık (g) ve yoğunluk değerleri ( $g/cm^3$ ) Çizelge 6.1 'de sunulmuştur. SiC takviye malzemesinin yoğunluğunun B<sub>4</sub>C takviyesinin yoğunluğundan yüksek olduğu Çizelge 5.1 'de görülmektedir. Bunun sonucu olarak ZK60 alaşımının yoğunluğunu ZK60 alaşımına eklenen SiC takviyesi B<sub>4</sub>C takviyesine göre daha fazla arttırmıştır.

Çizelge 6.1. Hesaplanan kuru ağırlık, yaş ağırlık ve yoğunluk değerleri.

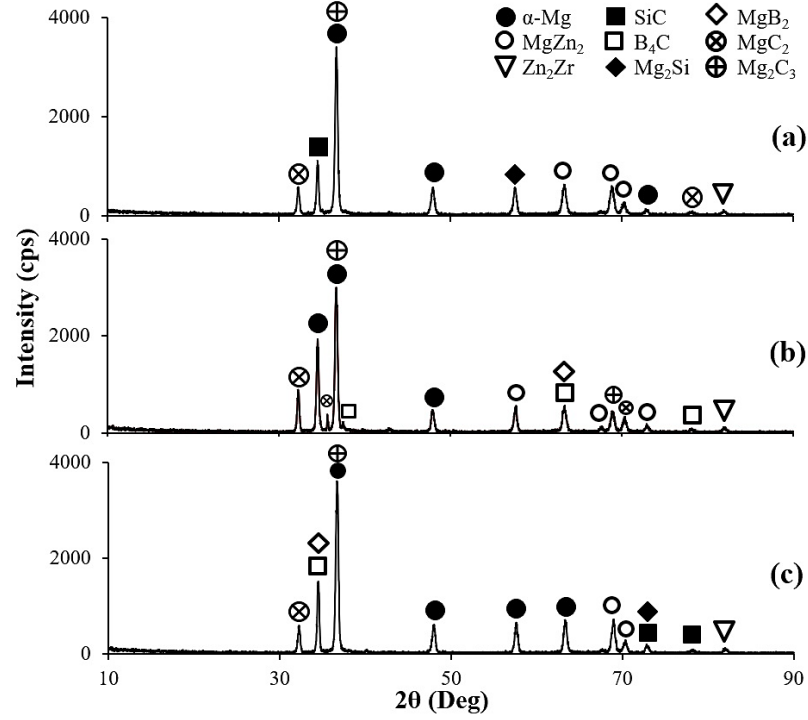
Numune İsmi	Ortalama Kuru Ağırlık (g)	Ortalama Yaş Ağırlık (g)	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )
ZK60	4,007	1,785	1,804
ZK60+%5SiC	5,313	2,424	1,839
ZK60+%10SiC	4,705	2,172	1,858
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	4,967	2,245	1,825
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	4,713	2,137	1,829
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	4,972	2,257	1,831

## 6.2. MİKRO YAPI KARAKTERİZASYONU SONUÇLARI

### 6.2.1. XRD Faz Analizleri Sonuçları

ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozit numunelerin XRD faz analizlerinin sonuçları Şekil 6.1 'de faz grafikleri olarak gösterilmektedir. Üretim sırasında homojen ve kararlı ikili intermetalik faz yapılarının oluşmasının sağlandığı belirlenmiştir. XRD faz ölçümlerinde tüm numunelerin yapısında  $\alpha$ -Mg ve takviye malzemelerinin fazlarının yanı sıra MgZn<sub>2</sub>, Zn<sub>2</sub>Zr, MgC<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetalik fazlarına rastlanmıştır. Bu intermetalik fazlarına ilave olarak SiC takviyeli kompozitlerin yapısında Mg<sub>2</sub>Si intermetalitiği ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerde MgB<sub>2</sub> intermetalik fazlarının olduğu da tespit edilmiştir. Tüm XRD faz analizi sonuçları incelendiğinde ana fazların  $\alpha$ -Mg ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> olduğu görülmektedir. Bu durum takviye malzemelerinden Mg<sub>2</sub>Si ve/veya MgB<sub>2</sub> intermetalikleri oluşumu sırasında kopan C elementinin Mg elementi ile yüksek oranda bileşik oluşturma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ek olarak Zn<sub>2</sub>Zr intermetalitiğinin oluşumunun gerçekleştiği ancak tüm XRD fazlarında çok küçük bir değerde bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Cai vd. çalışma sonuçlarında [45], Zn içeren Mg alaşımlarının mikro yapısının birincil  $\alpha$ -Mg matrisinde dağılmış Mg-Zn intermetalik fazından oluştuğunu ifade etmiştir. Ma'nın çalışmasına göre [9], ZK60 alaşımının mikro yapısında oluşan Mg-Zn bileşiğinin Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub> intermetalitiği olduğunu belirlemişlerdir. Bu tez çalışmasında Ma'dan [57] farklı olarak ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin tamamının matrisinde MgZn<sub>2</sub> intermetalitiği tespit edilmiştir. Ayrıca Wang'ın çalışmalarının sonuçlarıyla paralel olarak, ZK60 alaşımına SiC takviyesi sonrasında ZK60 alaşımının matrisinde Mg<sub>2</sub>Si intermetalitiğinin oluşmaktadır. Ek olarak Jiang [37] ve Gu'nun [8] çalışmaları ile benzer olarak ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesi sonrası ZK60 kompozitlerinin yapısında yoğun MgB<sub>2</sub> intermetalitiği oluşmuştur.



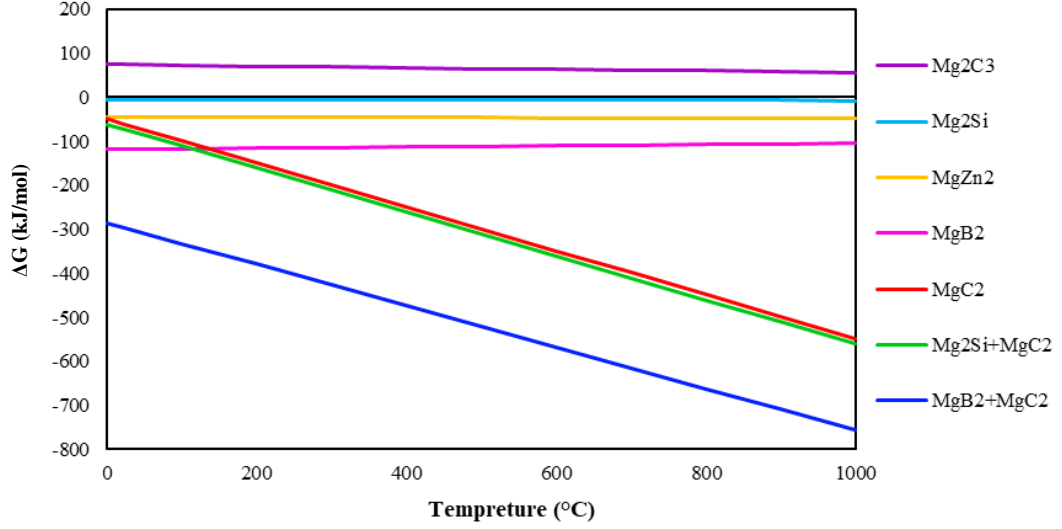
Şekil 6.1. XRD faz analizi sonuçları: a) ZK60+%10SiC, b) ZK60+%10B<sub>4</sub>C, c)ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C

### 6.2.1.1. Fazların Gibbs Değerlerinin Sonuçları ve Termokimyasal Çözümleme

XRD faz analizleri sonucunda, üretilen kompozitlerin iç yapısında bulunan elementler, çoğunlukla MgZn<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si, MgB<sub>2</sub>, MgC<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetalik bileşikler oluşurma eğiliminde olduğu anlaşılmıştır. Eşitlik 6.1-7 'de verilen kimyasal tepkimeler bu intermetaliklerin oluşum tepkimeleridir ve Gibbs serbest enerji değerlerine göre hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerlerin sıcaklık değerine göre değişimini ifade eden Gibbs serbest enerji değişim grafiği Şekil 6.2 'de sunulmuştur. Şekil 6.2 'ye göre, 1000°C'ye kadar herhangi bir sıcaklık değeri için en düşük Gibbs serbest enerjisi değerinin sırasıyla MgB<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>Si bileşiğine aittir. Bu durum ZK60 matrisine eklenen B<sub>4</sub>C veya B<sub>4</sub>C+SiC takviyeleri bulunduran kompozitlerde ilk oluşacak bileşiğin Eşitlik 6.5 tepkimesi sonucu MgB<sub>2</sub>+MgC<sub>2</sub> intermetalliği olduğu anlamına gelmektedir. Ancak üretilen kompozitin yapısında B<sub>4</sub>C takviyesi bulunmuyorsa oluşacak intermetalik bileşik Eşitlik 6.4 sonucunda Mg<sub>2</sub>Si+MgC<sub>2</sub> intermetalikleridir. Ek olarak Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetalığının 1000°C'ye kadar olan herhangi bir sıcaklıktaki Gibbs serbest enerjisi

pozitif değerdir. Bu durum XRD fazlarında rastlanan  $Mg_2C_3$  bileşiğinin üretim işlemleri sırasında düzensiz katılaşma sonucunda oluştuğu düşünülmektedir [55,56,58].



Şekil 6.2. Gibbs serbest enerji değişim grafiği.

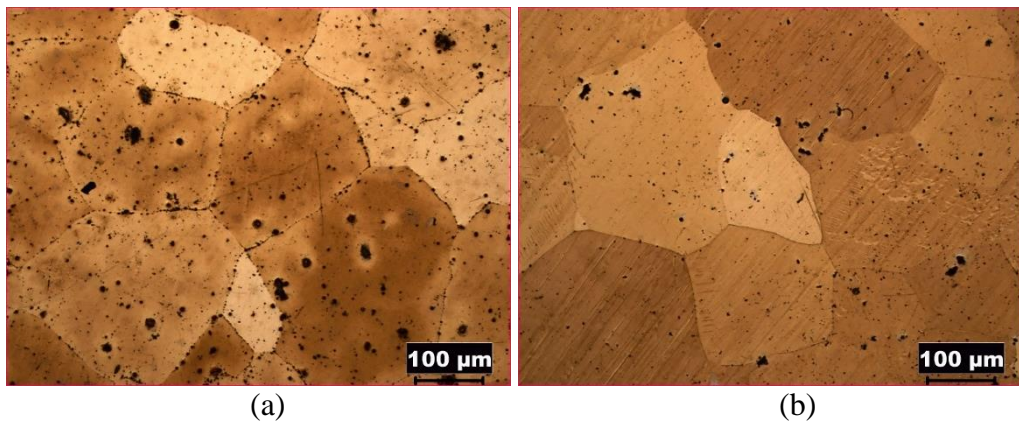


### 6.2.3. Mikro Yapı Görüntüleme

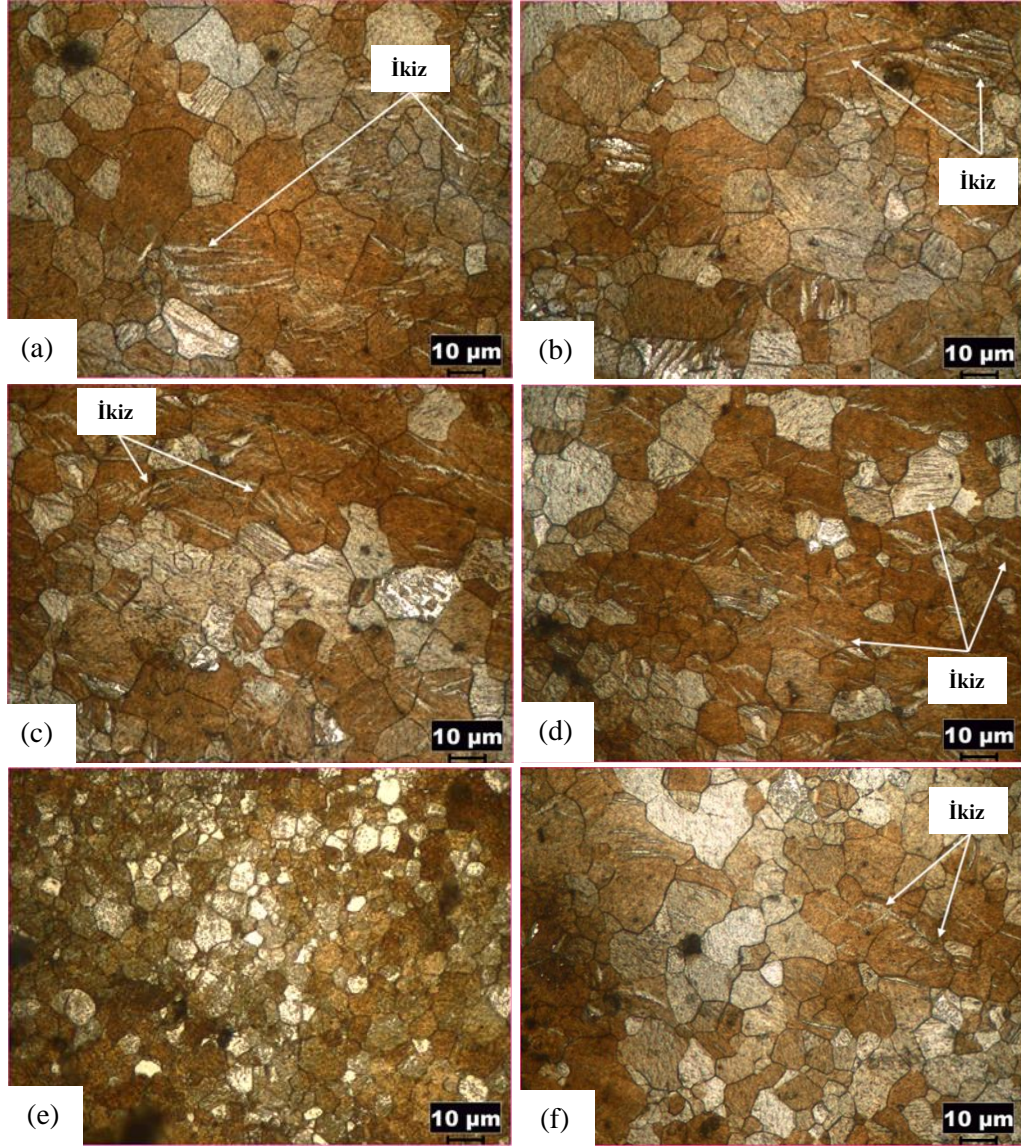
Üretim sonrasında matris içerisinde meydana gelen intermetalikler, deformasyon mekanizmaları ve DRX hakkında bilgi edinebilmek amacıyla optik mikroskop yüzey incelemeleri yapılmıştır. İncelemeler, tüm numunelerin enine kesit yüzeyi boyunca ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Döküm ve homojenleştirme işlemleri uygulanan ZK60 alaşımının 200X büyütmede optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.3'te sunulmuştur. Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin 1000X yüzey görüntüleri ise Şekil 6.4 'te sunulmuştur. Mikro yapı incelemeleri sonucunda döküm

ve homojenleştirme işlemleri uygulanan ZK60 alaşımı yüzeyinde herhangi bir ikizlenme meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Ancak ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozit numunelerinin tamamının yüzeyinde deformasyon ikizlenmeleri belirlenmiştir. Ayrıca ekstrüzyon işlemi uygulanmış numunelerin incelemeleri sırasında mikro yapılardaki tanelerde şiddetli DRX oluşarak şekil bozulmaları ve küçülmelerin meydana geldiği görülmüştür.

Ma [9] ve Chang [48] çalışmalarında sıcak ekstrüzyon sırasında ZK60 alaşımının matrisinde DRX ve ikizlenmelerin meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu tez çalışmasında da Ma ve Chang ile benzer şekilde ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinde DRX ve ikizlenme mekanizmaları belirlenmiştir. Galiyev'in elde ettiği sonuçlara göre [28], 150-450 °C sıcaklık aralığındaki oluşan DRX yapıları ve ikizlenmeler Friedel-Escaig mekanizması sonucu kapsamlı çapraz kayma ile ilişkilidir. Buna ek olarak Kaibyshev [29], Mg ve alaşımlarındaki ana DRX mekanizmalarının, çekirdeklenme sürecini kontrol eden deformasyon mekanizmalarıyla yakından ilişkili olduğunu ve bu nedenle DRX oranını, DRX tane boyutunu ve malzeme içindeki yeniden kristalleşmiş tanelerin dağılımını güçlü bir şekilde etkilediğini bildirmiştir. Tayebi [17], ekstrüze ZK60 alaşımlarında SiC takviyesinin düşük gerilme değerlerinin deformasyon ikizlerine neden olduğu ve tane incelmesinin tane sınırı kayma mekanizmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Behnamian ise [38], ZK60 matrisi içindeki B<sub>4</sub>C partiküllerinin DRX oluşumunu, ikizlenmeleri ve tane sınırlarında dislokasyon yığılmalarını önemli ölçüde belirginleştirdiğini ifade etmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgilerle örtüşmektedir.



Şekil 6.3. ZK60 alaşımı görüntüleri: a) döküm, b) homojenleştirilmiş.



Şekil 6.4. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B<sub>4</sub>C, e) ZK60+%10B<sub>4</sub>C, f) ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunelerinin mikro yapı görüntüleri.

### 6.2.3.1. Tane Boyutu Hesabı

1000kX büyütmede ASTM E112 standardına göre ortalama tane boyutu ölçüm sonuçları Çizelge 6.2 'de verilmiştir. En büyük tane boyutuna sahip numune, ortalama tane boyutu 251,00 µm olan döküm ZK60 numunesidir. Döküm ZK60'ın standart sapma sonuçlarına göre tane boyutlarının 110-274 µm aralığında değiştiği gözlemlendi. En küçük tane boyutlarına sahip numuneler, ortalama tane boyutları 3,00 µm olan %5B<sub>4</sub>C ve %10B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerdir. Ancak, ZK60+%5B<sub>4</sub>C'nin standart sapma sonucu, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinden farklıdır. Standart sapma sonuçları,



%5B<sub>4</sub>C takviyeli numune için 2,00 ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli numune için 1,00'dir. Buna göre ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin tane boyutunun 2 µm standart sapma ile 1-5 µm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin tane boyutunun 1 µm standart sapma ile 2-4 µm arasında değiştiği bulunmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre tane boyutu en küçük olan numunelerin %5 B<sub>4</sub>C ve %10 B<sub>4</sub>C ekstrüze-takviyeli kompozitler olduğu anlaşılmıştır. Ekstrüze edilen tüm numunelerin tane yapısı incelendiğinde tanelerin genellikle eş boyutlu olduğu görülmektedir. Üretilen kompozitlerde tane boyutu farklılıklarının nedeni, eklenen takviye malzemelerinin ZK60 matris mikroyapısında tane inceltme etkisine sahip olmasıdır. XRD sonuçlarında belirlendiği gibi B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin mikro yapısında B<sub>4</sub>C takviye elemanının çözünmesi ZK60 matrisindeki SiC takviyesine göre daha fazladır. Bu, matristeki B atomlarının difüzyonunun bir çekirdeklenme etkisi yaratmasına neden olur. Sonuç olarak, B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş kompozitlerin tane boyutu, SiC ile güçlendirilmiş kompozitlerden daha küçüktür.

Ekstrüze ZK60 alaşımının boyutu Mukai'nin [35] yaptığı çalışmada 2 µm, Ma'nın [9] yaptığı çalışmada 20 µm, Chang'ın [48] çalışmasında 18 µm ve Zhu'nun çalışmasında [42] 8-50 µm aralığında hesaplanmıştır. Bu çalışmada ZK60 alaşımının ve ZK60 esaslı kompozitlerin ölçülen tane boyutları literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

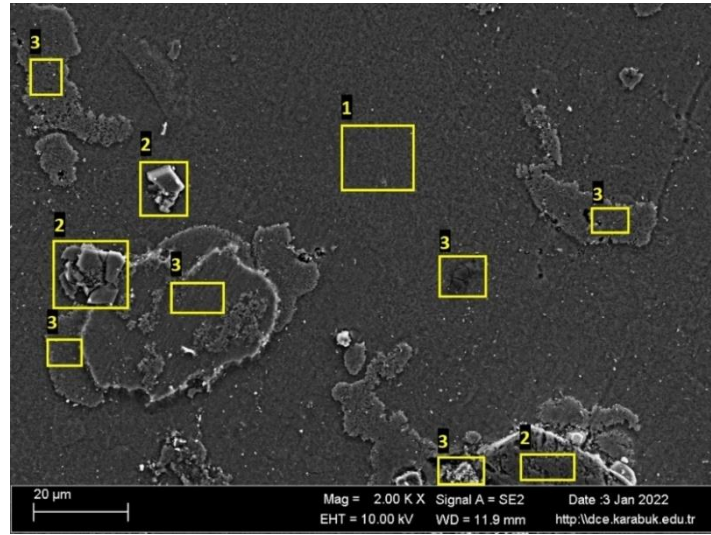
Çizelge 6.2. ASTM E112 tane boyu ölçümler tablosu.

Numune	ASTM Tane Boyu Numarası	Ortalama Tane Uzunluğu (µm)	Standart Sapma
ZK60 (döküm)	2,0	192	82
ZK60 (homojenleştirme)	1,0	251	46
ZK60 (ekstrüze)	11,0	8	3
ZK60+5%SiC	12,5	5	2
ZK60+10%SiC	12,5	5	2
ZK60+5%B <sub>4</sub> C	13,5	3	2
ZK60+10%B <sub>4</sub> C	13,5	3	1
ZK60+5%SiC+5%B <sub>4</sub> C	12,0	6	3

#### 6.2.4. SEM-EDX Sonuçları

Bu kısımda, ayrıntılı mikro yapı incelemesi için ZK60+%10SiC, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit numunelerin 2000X büyütülmüş SEM mikrografları sunulmuştur. Bu mikrograflarda sarı renk ile seçilen bölgelerin EDX analizleri yapılmıştır.

Çizelge 6.3 'teki veriler Şekil 6.5 'te SEM mikrografı sunulan ZK60+%10SiC kompozitinin EDX sonuçlarını göstermektedir. 1 Numaralı bölgeler sırasıyla %85,01, oranında Mg elementi içermektedir. 1 numaralı bölgelerin içeriği, bu bölgenin ana matris ( $\alpha$ -Mg) olduğunu kanıtlar. Şekil 6.5 'teki 2 Numaralı alanlarda %50,51 oranında Si ve %42,35 oranında C elementleri içermektedir. Bu içerikten, bu bileşimin SiC takviyesini gösterdiği anlaşılmaktadır. Mikrografta 3 numara ile gösterilen bölgelerin %43,225 oranında Mg, %24,03 oranında Si ve %31,535 oranında C içerdiği görülmüştür. Bu içerik, Şekil 6.1 'deki XRD faz yanıt grafiğinden görüldüğü gibi, bu bölgenin Mg<sub>2</sub>Si, MgC<sub>2</sub> ve/veya Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetaliklerine sahip olduğu sonucuna varmıştır.

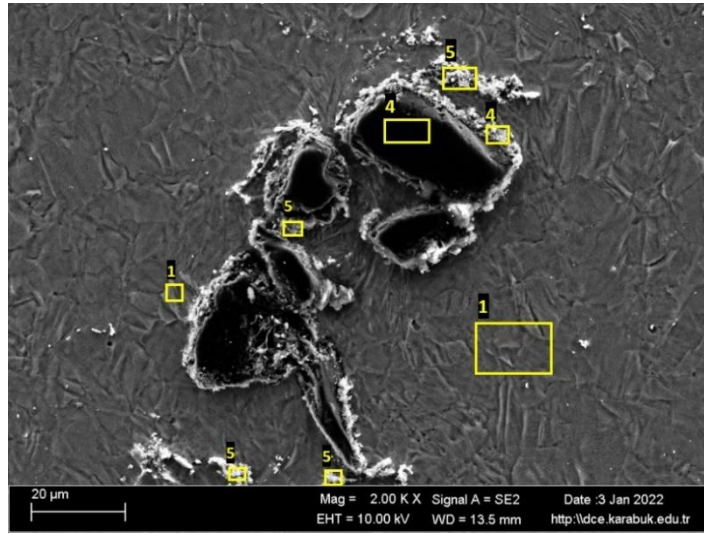


Şekil 6.5. ZK60+10%SiC numunesinin SEM mikrografı.

Çizelge 6.3. ZK60+10%SiC numunesinin EDX sonuçları.

Numune	Spektrum Kodu	Spektrum Adı	Mg	Zn	Zr	Si	C	B
ZK60+10%SiC	1	$\alpha$ -Mg	85,01	0,05	0,70	0,39	13,86	-
	2	SiC	5,88	0,36	0,92	50,51	42,35	-
	3	İntermetalik	43,225	0,09	1,12	24,03	31,535	-

ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozit numunenin SEM mikrografı Şekil 6.6 'da sunulmaktadır. Şekil 6.6 mikrografında 1 numara ile gösterilen alanda sırasıyla %72,36 oranında Mg, %12,00 oranında C ve %15,13 oranında B elementlerinin olduğu görülmüştür. 1 numaralı alanın içeriği, bu bölgenin  $\alpha$ -Mg olduğunu gösterir. 4 numara ile gösterilen bölgelerin %28,69 oranında C ve %67,02 oranında B olduğu analiz edildi. Sonuç olarak bu bölgenin B<sub>4</sub>C olduğu sonucuna varılmıştır. 5 Numaralı bölgelerin %38,97 oranında Mg, %5,29 oranında Zr, %26,51 oranında C ve %28,90 oranında B içerdiği ve bu bölgelerin MgB<sub>2</sub>, MgC<sub>2</sub> ve/veya Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub>'ü içerdiği analiz edilmiştir.

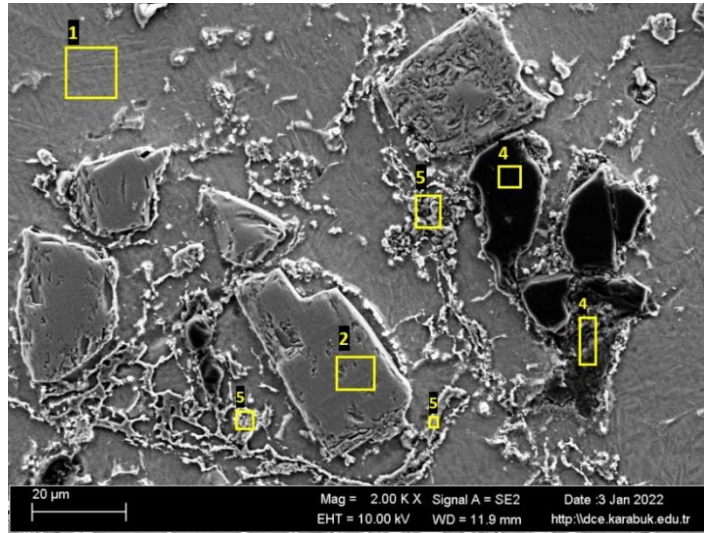


Şekil 6.6. ZK60+10%B<sub>4</sub>C numunesinin SEM mikrografı.

Çizelge 6.4. ZK60+10%B<sub>4</sub>C numunesinin EDX sonuçları.

Numune	Spektrum Kodu	Spektrum Adı	Mg	Zn	Zr	Si	C	B
ZK60+10%B <sub>4</sub> C	1	$\alpha$ -Mg	72,36	0,07	0,46	-	12,00	15,13
	4	B <sub>4</sub> C	4,06	0,00	0,24	-	28,69	67,02
	5	İntermetalik	38,97	0,34	5,29	-	26,51	28,90

ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin SEM mikrografı Şekil 6.7 'de sunulmaktadır. Şekil 6.7 görüntüsünde 1 numaralı bölgeler %66,38 oranında Mg, %15,61 oranında C ve %16,76 oranında B içeriyordu. Kompozit matrisin yüksek Mg içeriği nedeniyle bu bölgelerin  $\alpha$ -Mg fazı olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 6.7 'de 2 numara ile gösterilen bölgelerde %40,94 oranında Si, %46,18 C ve %12,19 oranında B elementleri tespit edilmiştir. Bu nedenle, 2 numaralı bölgelerin içerik yüzdesi, bu bölgelerin SiC parçacıkları olduğunu gösterir. Şekil 6.7 'de 4 numaralı alanlarda %15,35 oranında Mg, %42,89 oranında C ve %41,28 oranında B olduğu ve bu alanların B<sub>4</sub>C takviyesi olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 6.7 'deki 5 numaralı bölgeler %48,16 Mg, %23,19 C ve %23,13 B içeriyordu. Dolayısıyla, bu alanların MgB<sub>2</sub>, MgC<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetaliklerini gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.7. ZK60+5%SiC+5%B<sub>4</sub>C numunesinin SEM mikrografı.

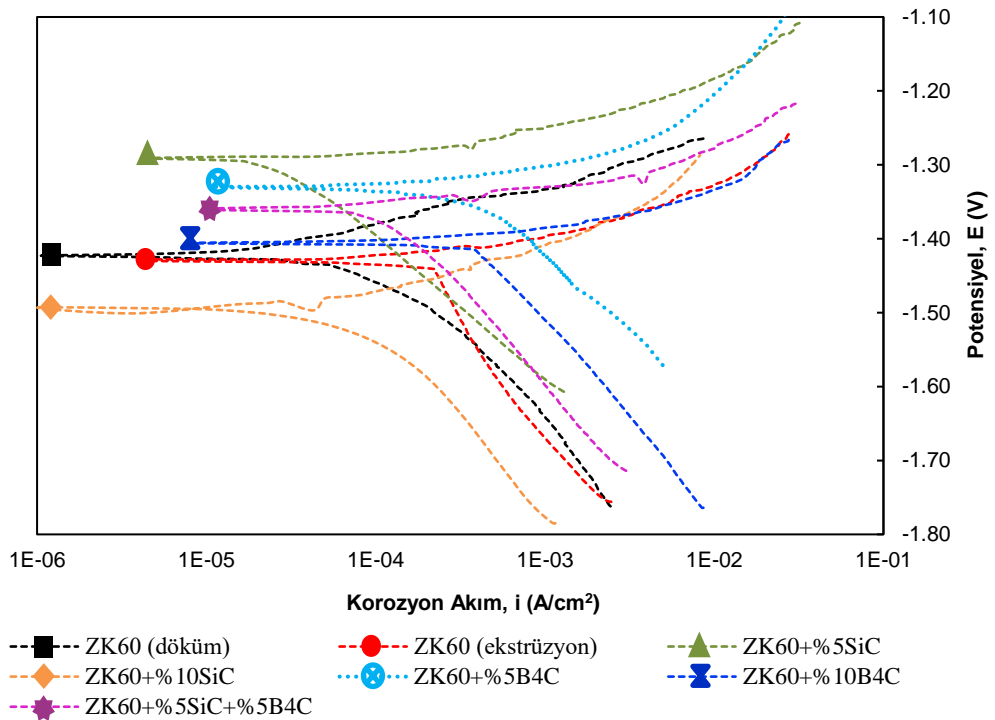
Çizelge 6.5. ZK60+5%SiC+5%B<sub>4</sub>C numunesinin EDX sonuçları.

Numune	Spektrum Kodu	Spektrum Adı	Mg	Zn	Zr	Si	C	B
ZK60+5%SiC+5%B <sub>4</sub> C	1	$\alpha$ -Mg	66,38	0,39	0,48	0,38	15,61	16,76
	2	SiC	0,49	0,00	0,20	40,94	46,18	12,19
	4	B <sub>4</sub> C	15,35	0,00	0,40	0,09	42,89	41,28
	5	İntermetalik	48,16	0,29	4,61	0,62	23,19	23,13

XRD Analiz sonuçlarından Şekil 6.5 'te 3 Numara ile gösterilen bölgelerdeki  $Mg_2Si$ ,  $MgC_2$  ve  $Mg_2C_3$  intermetaliklerinin matris içinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 6.6 'da 5 numara ile gösterilen alanlarda  $MgB_2$ ,  $MgC_2$  ve  $Mg_2C_3$  intermetaliklerinin Mg matrisi ve  $B_4C$  partikül sınırlarında oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 6.7 'de ise 5 Numara ile gösterilen bölgelerde,  $MgB_2$ ,  $MgC_2$  ve  $Mg_2C_3$  intermetaliklerinin tüm matrisi oluşturduğu ortaya çıktı. Ayrıca matris ile takviyelerin sınır bölgelerinde SiC ve  $B_4C$  takviyeleri intermetalik bileşikler oluşturmuştur. Bu gözlemler sonucunda SiC takviyesinin oluşturduğu intermetaliklerin Mg matris içerisine dağıldığı  $B_4C$  takviyesinin oluşturduğu intermetalikler ise Mg matris ile takviye malzemesi arasında düşük miktarda yığılmalara sebep olduğu sonucuna varılabilir.

### 6.3. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

Şekil 6.8 'de potansiyodinamik polarizasyon logaritmik eğrisi, Çizelge 6.6 'da ise bu grafikten hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ( $i_{kor}$ ), korozyon potansiyelleri ( $E_{kor}$ ) ve korozyon hızı  $mm/y$  cinsinden verilmiştir.



Şekil 6.8. Potansiyodinamik polarizasyon logaritmik eğrisi.

Çizelge 6.6. Korozyon testi sonuçları.

Numune	$E_{kor}$ (V)	$\dot{I}_{kor}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Total (mm/y)
ZK60 (döküm)	-1,420	77,80	1,90
ZK60 (ekstrüzyon)	-1,430	214,00	5,21
ZK60+%5SiC	-1,290	34,30	0,88
ZK60+%10SiC	-1,490	51,90	1,41
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	-1,330	56,60	1,43
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	-1,490	291,00	7,71
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	-1,360	158,00	4,27

Korozyon testleri sonucunda döküm ZK60 ve ekstrüze ZK60 numunelerinin  $E_{kor}$  değerleri birbirlerine yakın ve aktif bölgede çıkmıştır. Ancak  $i_{kor}$  değerleri incelendiğinde ekstrüzyon sonrasında ZK60 alaşımının  $i_{kor}$  değeri artmıştır ve dolayısıyla korozyon hızını arttırmıştır (Çizelge 6.6). Bu artış ekstrüzyon işlemi sırasında meydana gelen DRX etkisi sonucu meydana gelen yüksek tane sınırı gerilmeleri ve dislokasyon yığılmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir [28,59].

Çizelge 6.6 'da SiC takviyeli kompozitlerin  $E_{kor}$  değerleri -1,290 ve -1,490 V 'dir. Döküm ZK60 numunesi esas alındığında  $E_{kor}$  değeri %5SiC takviyeli kompozitte pozitif yönde artmaktayken %10SiC takviyeli kompozitte azalmaktadır. SiC takviyeli kompozitlerin  $i_{kor}$  değerleri ve korozyon hızları birbirlerine yakın ölçülmüştür. SiC takviyesi ZK60 matrisinde tane inceltme etkisi sebebiyle ekstrüzyon işleminin korozyon değerlerindeki dezavantajlı durumları ortadan kaldırmış ve her iki numunede de korozyon direncini arttırmıştır. SiC takviyesi Mg alaşımlarında Mg<sub>2</sub>Si intermetalik fazı oluşturması nedeniyle korozyon değerlerini iyileştirdiğini ve korozyon hızını düşürdüğü düşünülmektedir [60,61]. Ancak takviye oranlarındaki artış korozyon direncini olumsuz etkilemiştir.

B<sub>4</sub>C takviyeli numuneler incelendiğinde %5 B<sub>4</sub>C ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin  $E_{kor}$  değerleri -1,330 ve -1,490 V ölçülmüştür. Bu kompozitlerde de SiC takviyeli numunelerle benzer durum ortaya çıkmıştır ve  $E_{kor}$  değeri takviye miktarı artmasıyla artmıştır. %5 B<sub>4</sub>C ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerinin  $i_{kor}$  değerleri ise sırasıyla 56,60 ve 291,00  $\mu A/cm^2$ 'dir. B<sub>4</sub>C takviyesi Mg-B<sub>4</sub>C taneleri sınırında MgB<sub>2</sub> intermetalik fazı oluşturması nedeniyle korozyon değerlerini iyileştirmekte özellikle  $E_{kor}$  değerini pozitif yönde arttırmaktadır. Ancak B<sub>4</sub>C takviye oranındaki artış

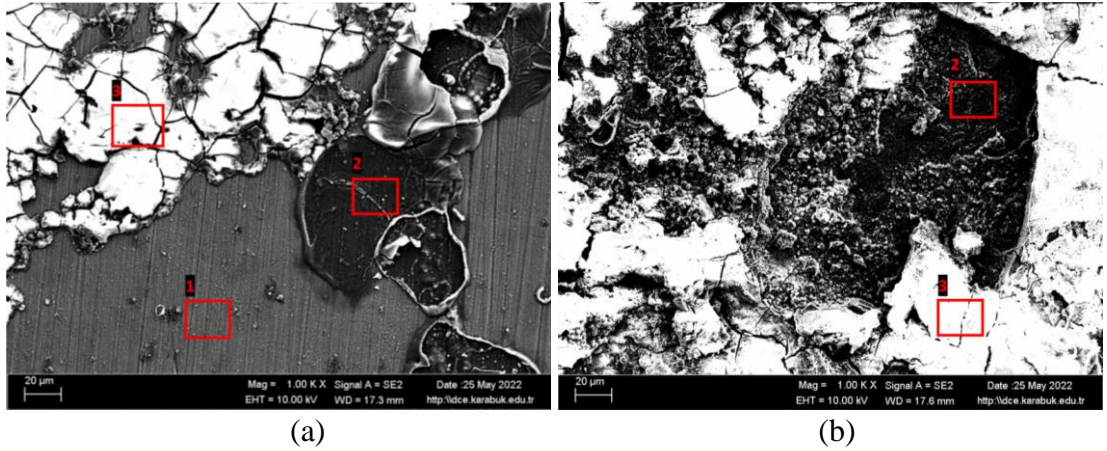
aglomerasyon oluşumuna ve matris içerisinde daha fazla çözülmüş B elementinin bulunmasına sebep olduğu düşünülmektedir [8]. B elementi, elektron ilgisi sebebiyle Mg-B tane sınırlarındaki intermetalik yoğunluğunu arttırmaktadır [8,58]. Bunun sonucu olarak takviye miktarı artışı zayıflatıcı gerilmelere ve  $i_{kor}$  değerinde ve korozyon hızında artışa sebep olmuştur. Döküm ZK60 esas alındığında ağırlıkça %5B<sub>4</sub>C takviyesi korozyon direncini artırırken %10 B<sub>4</sub>C takviyesi korozyon direncini olumsuz etkilemiştir. Ek olarak SiC ile B<sub>4</sub>C takviyeli numuneler karşılaştırıldığında SiC takviyesinin korozyon direncini arttırıcı etkisi B<sub>4</sub>C takviyesine göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Son olarak %5SiC+%5B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin  $E_{kor}$  değeri -1,360 V ve  $i_{kor}$  değeri 158,00  $\mu A/cm^2$  ölçülmüştür. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunesinin  $E_{kor}$  değeri döküm ZK60, ZK60+%10SiC ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerine kıyasla daha katodiktir. Ağırlıkça %10 takviye elemanı bulundurmasına rağmen %5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin  $E_{kor}$  değerindeki iyileşme yapısındaki Mg<sub>2</sub>Si intermetalikleri sebebiyle olduğu düşünülmektedir [8,60,61]. %5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunesinin  $i_{kor}$  değeri döküm ZK60 ve ZK60+%10SiC numunelerinin  $i_{kor}$  değerlerine kıyasla yüksektir.  $i_{kor}$  değerindeki bu artış MgB<sub>2</sub> intermetaliklerinin takviye elemanlarının tane sınır bölgelerinde oluşmasından ve matris yapısında çözülmüş B elementinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan ekstrüze ZK60 ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C esas alındığında ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunesinin  $i_{kor}$  değeri düşmüştür. Bu düşüş SiC takviyesinin tane inceltici etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin korozyon direncinde kısmi iyileşmeler meydana gelmiştir.

### 6.3.1. Korozyon Yüzeyleri SEM İncelemeleri

Potansiyodinamik polarizasyon testi sonrası numunelerin korozyon yüzeyi görüntüleri SEM ile incelenmiştir ve Şekil 6.9 'da aşırı durumdaki SiC ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.9 'da verilen SEM görüntülerinde 1 numaralı alan korozyona uğramamış katodik yüzeyleri, 2 numaralı alan korozyon sonrası çukurlaşma meydana gelen anodik yüzeyleri ve 3 numaralı alan ise korozyon etkisindeki oksit tabakasını göstermektedir. ZK60 matrise SiC takviyesi sonrasındaki

korozyon yüzeyleri (Şekil 6.9 (a)), korozyon çukurlarının yanı sıra ekstrüzyon işlemi sırasında meydana gelen tane sınırlarındaki çatlakların derinleşmesi ile de korozyonun ilerlediğini göstermiştir. ZK60 matrise B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin korozyon SEM görüntüsünde (Şekil 6.9 (b)), korozyona uğramamış (katodik) yüzeyin bulunmadığı görülmüştür. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 'deki SEM görüntüleri incelendiğinde B<sub>4</sub>C takviyesi sonrasında oluşan intermetalik bileşiklerin Mg – B<sub>4</sub>C tane sınırlarında meydana gelmiştir. Tane sınırında oluşan intermetalikler kompozit içyapısında zayıflatıcı gerilmeler meydana getirmektedir. Dolayısıyla B<sub>4</sub>C takviyesi kompozitlerin iç gerilmelere maruz kalan tanelerin genişleyerek korozyon yüzeyinde kuvvetli korozyon hasarının meydana geldiğini ve katodik yüzeylere de zarar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlarla benzer olarak Yue [40] ve Cheng [47] yaptıkları çalışmalarında, ZK60 alaşımının ve ZK60 kompozitlerinde gerçekleşen korozyon modellerinin lokalize korozyon olduğunu ve ikinci faz partikülleri ile matrisin oluşturduğu galvanik çiftlerin, lokalize korozyonunun ana kaynağı olduğunu raporlamışlardır.

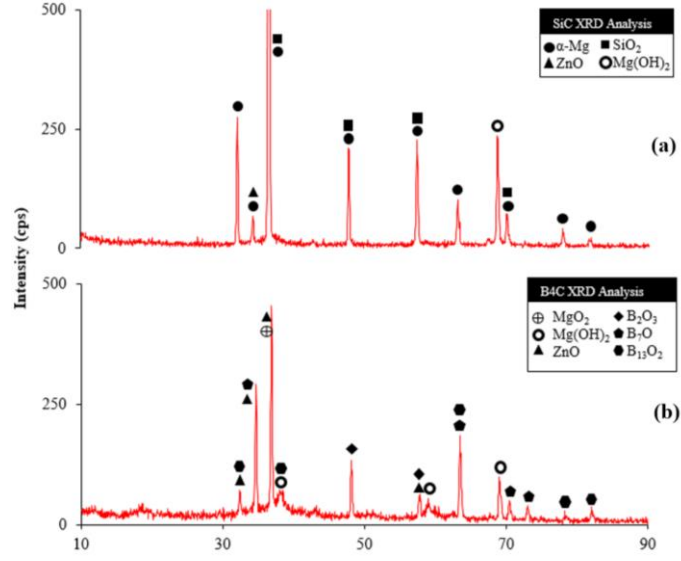


Şekil 6.9. a) ZK60+%10SiC b) ZK60+%10B<sub>4</sub>C numunelerinin 1000X büyütmedeki korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.

### 6.3.2. Korozyon Yüzeylerinin Faz Analizleri

ZK60+%10SiC ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerin oksit tabaka faz içeriğinin belirlenebilmesi için XRD analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 6.10 'da sunulmuştur.



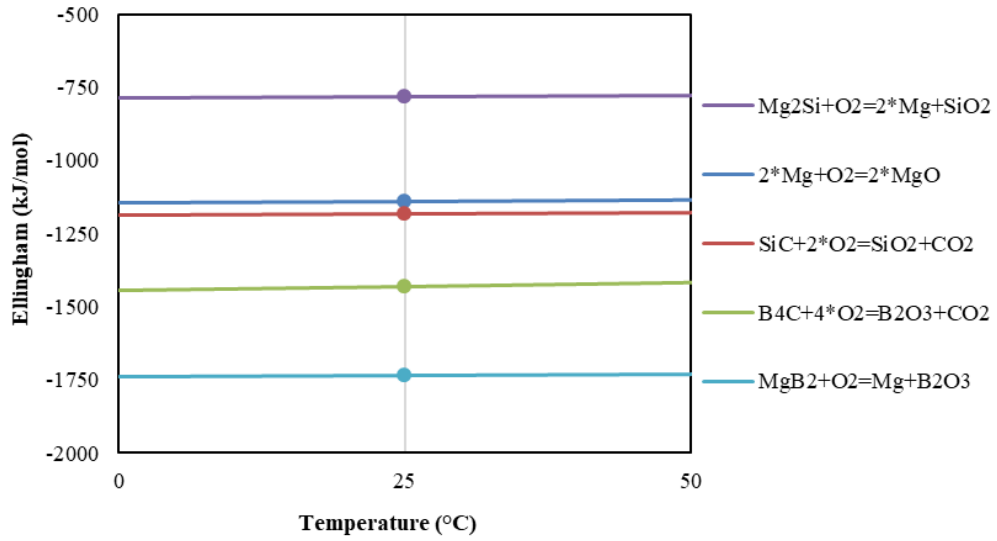


Şekil 6.10. Korozyon yüzeyi XRD analizi: a) ZK60+%10SiC, b) ZK60+%10B4C

SiC takviyeli kompozitin oksit tabakasında yüksek oranlarda  $\alpha$ -Mg, SiO<sub>2</sub> ve düşük oranlarda ZnO ve Mg(OH)<sub>2</sub> fazlarına rastlanmıştır. B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin oksit tabakasında ise yüksek oranlarda bor bileşikleri olan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>7</sub>O ve B<sub>13</sub>O<sub>2</sub> fazlarına rastlanmıştır. Bu fazlara ilave olarak B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin oksit tabakasında MgO<sub>2</sub>, ZnO ve Mg(OH)<sub>2</sub> fazları da bulunmaktadır.

Oksit tabakanın XRD analizlerinde tespit edilen oksit bileşiklerinin  $\alpha$ -Mg, SiC, B<sub>4</sub>C, Mg<sub>2</sub>Si ve MgB<sub>2</sub> yapılarından oluştuğu düşünülmektedir ve oluşum tepkimeleri aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur [56,58]. Bu kimyasal bileşiklerinin bir oksit bileşik oluşturma istekliliklerini gösteren Ellingham diyagramı Şekil 6.11 'de sunulmuştur.





Şekil 6.11. Kimyasal tepkimelerin oksit bileşik oluşturma istekliliklerini gösteren Ellingham diyagramı.

Ellingham diyagramı incelendiğinde oksit bileşik oluşturma istekliliği en düşük değer  $Mg_2Si$  intermetalik bileşiği iken en yüksek  $MgB_2$  intermetalik bileşiği olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak, bu durum SiC takviyeli kompozitlerin korozyon özelliklerinin iyileştirirken  $B_4C$  takviyesinin ZK60+%5 $B_4C$ , ZK60+%10 $B_4C$  ve ZK60+%5SiC+%5 $B_4C$  takviyeli kompozitlerin korozyon özelliklerinin kötüleşmesini açıklamaktadır. SiC takviyeli kompozitin oksit tabakasının XRD analizleri sonucunda yüksek oranda  $SiO_2$  ve  $\alpha$ -Mg fazlarının bulunması korozyonun Si elementi içeren bileşiklerde ( $SiC$  ve  $Mg_2Si$ ) meydana geldiğini ve bu bileşiklerin Mg matrisinin oksijen ilgisini azaltıp oksijene karşı koruyarak korozyon direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır. SiC takviyeli kompozitlerinde,  $Mg_2Si$  bileşiği Gibbs oluşum serbest enerjisi en yüksek bileşikken (Şekil 6.2) korozyon ortamında oksijen ilgisi en düşük bileşik (Şekil 6.11) olması bu durumu desteklemektedir [56,58,61]. Ek olarak SiC takviye oranının artması ile meydana gelen korozyon özelliklerindeki düşük orandaki olumsuz etkilerin Mg ile SiC tane sınırlarındaki zayıflatıcı gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

$B_4C$  takviyeli kompozitin oksit tabakasının XRD analizleri sonucunda  $B_7O$  ve  $B_{13}O_2$  fazlarının yanı sıra çok yüksek oranda  $B_2O_3$  fazının bulunması, B içeren bileşiklerin ( $B_4C$  ve  $MgB_2$ ) oksijen ilgisinin yüksek olduğunu ve bu bileşiklerin Mg matrisini oksijene karşı korumayıp korozyon direncini düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

İlaveten Şekil 6.11 'deki Ellingham diyagramında  $MgB_2$  ve  $B_4C$  bileşiklerinin yüksek oksijen ilgisine sahip olması, Şekil 6.9 (b)'deki yoğun oksit tabakanın bulunması ve korozyon yüzeyinde katodik alana rastlanmaması bu durumu desteklemektedir. Ek olarak oksit tabakada  $MgO_2$  bileşiğinin oluşumu  $B_4C$  takviyesinin Mg matris yapısında korozyondan koruyucu bileşikler veya tabakalar oluşturmadığını ve B elementinin yüksek elektron ilgisi sebebiyle korozyon direncini düşürdüğünü göstermiştir.

#### 6.4. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI

Çizelge 6.7, ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerin Brinell sertlik ölçümlerinin sonuçlarını göstermektedir. Ekstrüze ZK60 alaşımının sertlik değeri 67,87 HB 'dir.  $ZK60+5SiC$ ,  $ZK60+10SiC$ ,  $ZK60+5B_4C$ ,  $ZK60+10B_4C$  ve  $ZK60+5SiC+5B_4C$  kompozitlerinin sertlik değerleri sırasıyla 73,92 HB, 85,29 HB, 96,41 HB, 115,30 HB ve 97,31 HB olarak bulundu. Jiang'ın çalışması ile benzer olarak [37],  $ZK60+10B_4C$  kompozitinde maksimum sertlik 115,30 HB olarak ölçülmüştür. Buna göre %10  $B_4C$  takviyesi ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımının sertliği, takviyesiz ZK60 alaşımına göre 1,7 kat artmaktadır. ZK60 alaşımına göre  $ZK60+5SiC$ ,  $ZK60+10SiC$ ,  $ZK60+5B_4C$  ve  $ZK60+5SiC+5B_4C$  kompozitlerinin sertlik değerlerinin 1.09, 1.26, 1.42 ve 1.43 kat arttığı hesaplanmıştır.

$ZK60+10B_4C$  takviyeli kompozitin sertlik artışları,  $ZK60+10SiC$  kompozite göre %35 daha fazladır. %5SiC ve %5 $B_4C$  takviyeleri arasında sertlik arttırıcı etkiler karşılaştırıldığında,  $B_4C$  takviyesinin sertlik arttırıcı etkisi SiC takviyesine göre %30 daha fazla olmuştur.  $B_4C$ , SiC takviyesinden daha sert olduğu için ekstrüzyon işleminde SiC takviyesinden daha fazla dislokasyon aglomerasyonuna neden olur. Ekstrüzyon işlemi sırasında SiC parçacıkları yapı içinde kırılır ve dağılır. Bununla birlikte,  $B_4C$  partikülleri SiC partiküllerine göre daha düşük bir oranda kırılır ve dağılır. Ayrıca Behnamian'ın yaptığı çalışmaya göre [38], ZK60 alaşımının ve kompozitlerindeki sertlik değerlerindeki artışın, dislokasyonların oluşumuna ve tane incelmeye dayalı Hall-Patch etkisinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.7. Brinell sertlik ölçüm sonuçları.

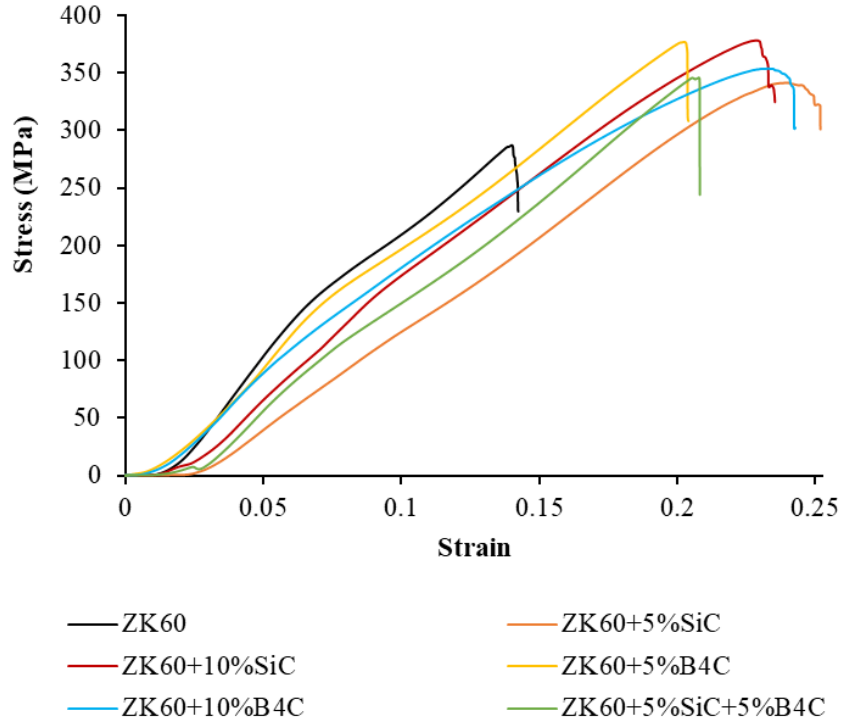
Numune	Ortalama Sertlik Değeri (HB)	Bağlı Artış
ZK60	67,87	1,00
ZK60+5%SiC	73,92	1,09
ZK60+10%SiC	85,29	1,26
ZK60+5%B <sub>4</sub> C	96,41	1,42
ZK60+10%B <sub>4</sub> C	115,30	1,70
ZK60+5%SiC+%5B <sub>4</sub> C	97,31	1,43

## 6.5. BASMA TESTLERİ SONUÇLARI

Şekil 6.12, ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin basma testleri sonucunu göstermektedir. Bu sonuçlardan elde edilen maksimum basma mukavemeti değeri Çizelge 6.8 'de sunulmaktadır. ZK60 alaşımının hesaplanan maksimum basma mukavemeti değeri 287,23 MPa idi. En yüksek basma gerilmesi ZK60+%10SiC kompozitte 378,00 MPa olarak analiz edilmiştir. ZK60+%5SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin maksimum basma mukavemeti değerleri 341,42 MPa, 377,0 MPa, 353,75 MPa ve 345,87 MPa olarak gözlemlendi. Test sonuçları, %10 SiC takviyesi ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımının basma dayanımının, takviyesiz ZK60 alaşımına göre %32 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Takviyesiz ZK60 alaşımının basma mukavemeti ile karşılaştırıldığında, ZK60+%5SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin basma dayanımları sırasıyla %19, %31, %23 ve %20 artmıştır.

ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC kompozitlerinin basma dayanımı ile karşılaştırıldığında, %5B<sub>4</sub>C takviyesi, %5SiC takviyesinden %10,42 daha fazla basma dayanımını artırdı. Ancak ZK60+%10SiC kompozitin basma dayanımı, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitin basma dayanımı ile karşılaştırıldığında, %10SiC takviyesinin, %10 B<sub>4</sub>C takviyesine göre %6,5 daha fazla basma dayanımını arttırdığı görülmüştür. Basma testi sonuçlarına göre %5B<sub>4</sub>C eklenmesi, %5B<sub>4</sub>C+%5SiC eklenmesinden daha etkilidir. B<sub>4</sub>C yüzdesi %10'a yükseldiğinde, bu iyileştirme etkisi tersine döner ve basma dayanımını azaltır. Sonuç olarak, %10 B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş

ZK60 alaşımının basma dayanımı, %5 B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımının basma dayanımından %6,17 daha düşüktür. Test sonuçları, %10 SiC ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımının basma dayanımının, %5 SiC ile takviyeye kıyasla ZK60 alaşımının basma dayanımını %10,80 artırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.12. Basma testi sonuçları.

Çizelge 6.8. Maksimum basma mukavemeti değerleri.

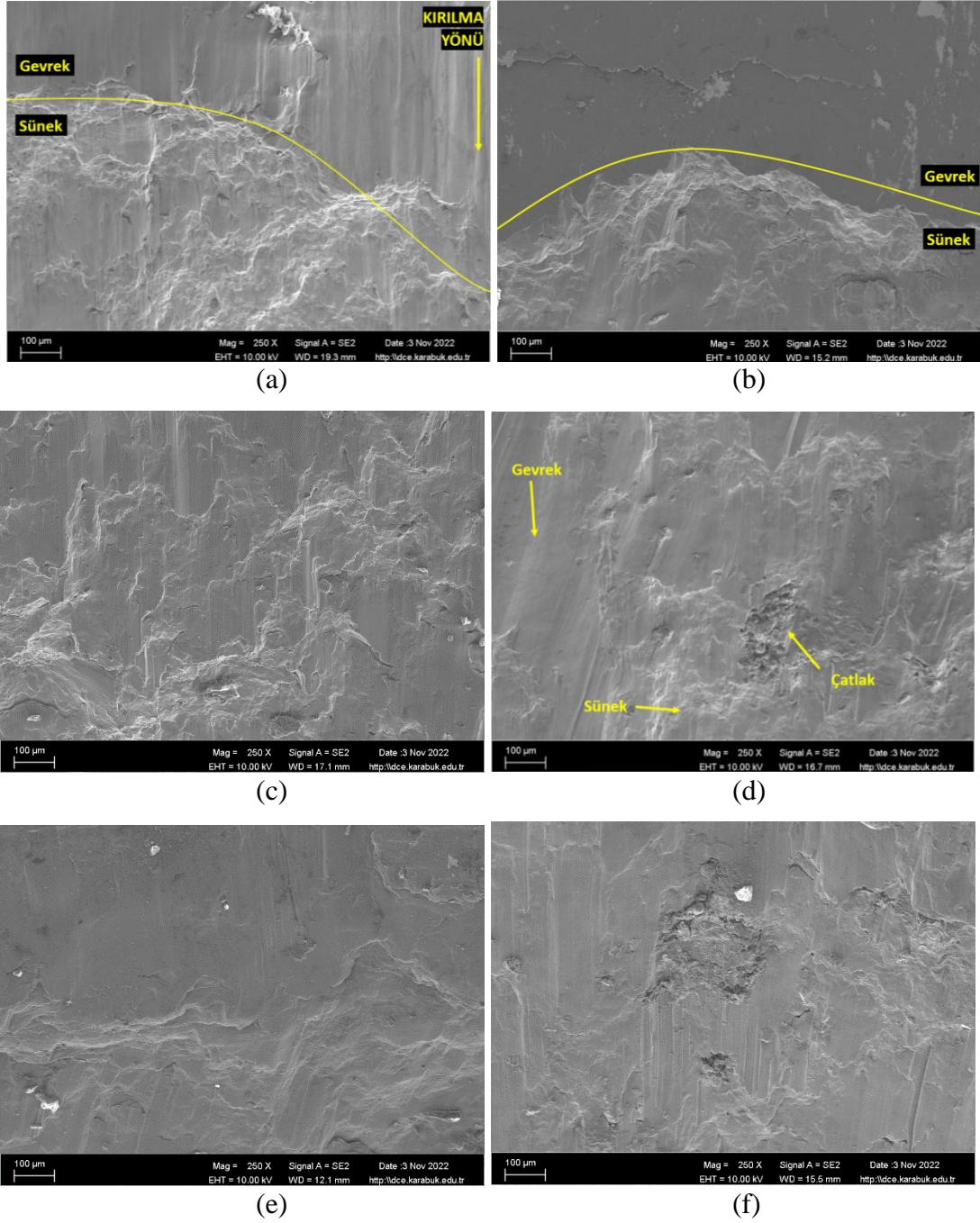
Numune	Maksimumu Basma Mukavemeti (MPa)
ZK60	287,23
ZK60+5%SiC	341,42
ZK60+10%SiC	378,30
ZK60+5%B <sub>4</sub> C	377,00
ZK60+10%B <sub>4</sub> C	353,75
ZK60+5%SiC+%5B <sub>4</sub> C	345,87

### 6.5.1. Kırılma Yüzeylerinin SEM İncelemeleri

Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin basma testi sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.13 'te sunulmaktadır. ZK60 alaşımı kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü (Şekil 6.13 (a)) incelendiğinde matris içerisinde herhangi bir malzeme birikmesi veya yığılma kaynaklı kırılmanın olmadığı ve çoğunlukla sünek kırılmanın olduğu görülmüştür. Numunenin bazı bölgelerinde, kırılma yönü boyunca, kırılmanın gevrek olarak başlayıp bir geçiş bölgesi sonrası sünek olarak devam ettiği belirlenmiştir. Ayrıca ekstrüze ZK60 alaşımının SEM mikrografı incelemeleri gevrek bölgede sürekli klivaj kırılma mekanizmasının gerçekleştiğini, sünek bölgelerde ise katmalı kayma kırılma mekanizmalarının oluştuğunu göstermiştir.

Kırılma mekanizmalarındaki değişimin, ekstrüzyon sonrası yeniden kristalleşmesi kaynaklı olduğu ve basma gerilmeleri sırasında elastik deformasyonun plastik deformasyonla birlikte gerçekleşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca incelemeler sonucunda numune orta bölgelerindeki yüksek deformasyon oluşumu, gevrek kırılma grafiği ve basma testi grafik trend çizgilerinin düşük eğime sahip olmasını da açıklamaktadır. ZK60+%5SiC kompozit numunesinin SEM mikrografı incelemelerinde ise ZK60 alaşımı ile aynı özellikleri gösterirken ZK60+%10SiC kompozitlerinin sünek kırılma mekanizmalarının çok daha arttığı görüldü. Ek olarak, ZK60+%10SiC kompozitinin intermetalik bileşiklerin matris içerisinde yayılmasının sünekliliği arttırdığı ve basma mukavemet değerini iyileştirdiği sonucuna varılabilir.

ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin tamamında şiddetli gevrek kırılmaların yanı sıra az miktarda sünek kırılmalar da mevcuttur. Bu numunelerin kırılma mekanizmalarının yanı sıra diğer numunelerden farklı olarak tane sınırlarında çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Bunun, matris ile B<sub>4</sub>C takviye malzemesi sınır bölgesinde biriken intermetaliklerin yoğun dislokasyon yığılmaları oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

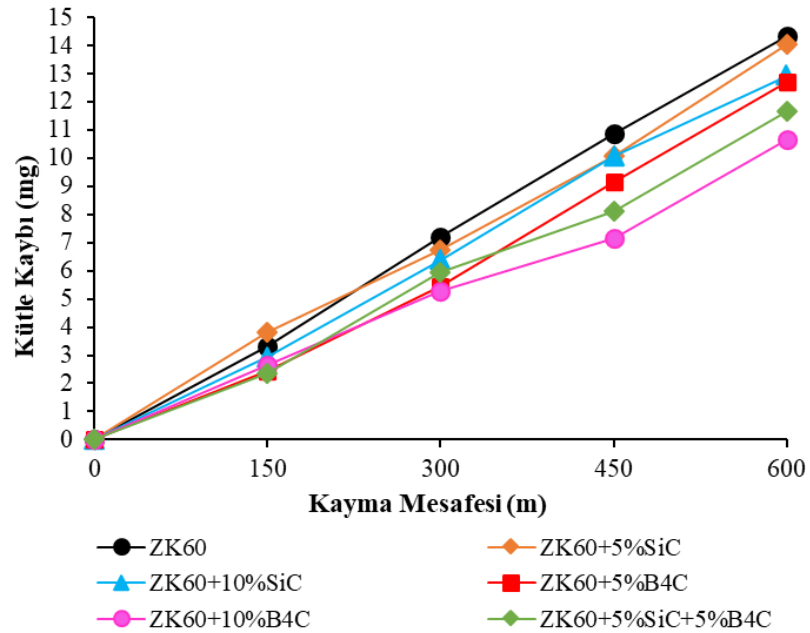


Şekil 6.13. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B<sub>4</sub>C, e) ZK60+%10B<sub>4</sub>C, f) ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunelerinin 250X büyütme basma yüzeyi SEM mikrografları.

## 6.6. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

Şekil 6.14, ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin kuru aşınma testi sonuçlarını göstermektedir. Aşınma testi sonuçlarından hesaplanan aşınma oranları Çizelge 6.9'da verilmiştir. 600 m kayma mesafesindeki en yüksek kütle kaybı, takviyesiz ZK60

alaşımında 14,33 mg olarak ölçülmüştür. En düşük kütle kaybı ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinde 10,67 mg olmuştur. ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin kütle kayıpları sırasıyla 14,03 mg, 12,80 mg, 12,73 mg ve 11,67 mg olarak ölçüldü. Aşınma testi sonuçları, %10 B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımının kütle kaybının, ZK60 alaşımına göre %25,54 daha az olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ZK60+%5SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin kütle kayıpları, takviyesiz ZK60 alaşımına göre sırasıyla %2,09, %10,98 ve %8,56 daha azdır. %5 SiC takviyeli ZK60 alaşımının kütle kaybı, %5 B<sub>4</sub>C takviyeli ZK60 alaşımının kütle kaybı ile karşılaştırıldığında, %5 B<sub>4</sub>C takviyeli ZK60'ın kütle kaybı, %5 SiC takviyeli ZK60'a göre %9,26 daha azdır. Ayrıca, ZK60+%10SiC kompozitinin ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin kütle kaybı ile karşılaştırıldığında, %10B<sub>4</sub>C takviyesi, %10SiC takviyesine kıyasla kütle kaybını %16,64 oranında azaltmıştır. Kuru aşınma testi sonuçları, %5SiC+%5B<sub>4</sub>C eklenmesinin, %5B<sub>4</sub>C eklenmesinden daha etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile paralel olarak, Jiang vd. yaptıkları çalışmaların sonuçlarına göre [37], aşınma testlerinde ise B<sub>4</sub>C takviyesinin takviye oranı arttıkça aşınma sırasındaki kütle kaybı miktarının azalmaktadır. Ayrıca Kumar'a göre [1], SiC takviyesi eklenen ZK60 alaşımında yüksek aşınma direnci elde etmesinin ana nedenin daha küçük tanelerin oluşumu ve dispersiyon kuvvetlendirmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.14. Aşınma testi kütle kaybı grafiği.

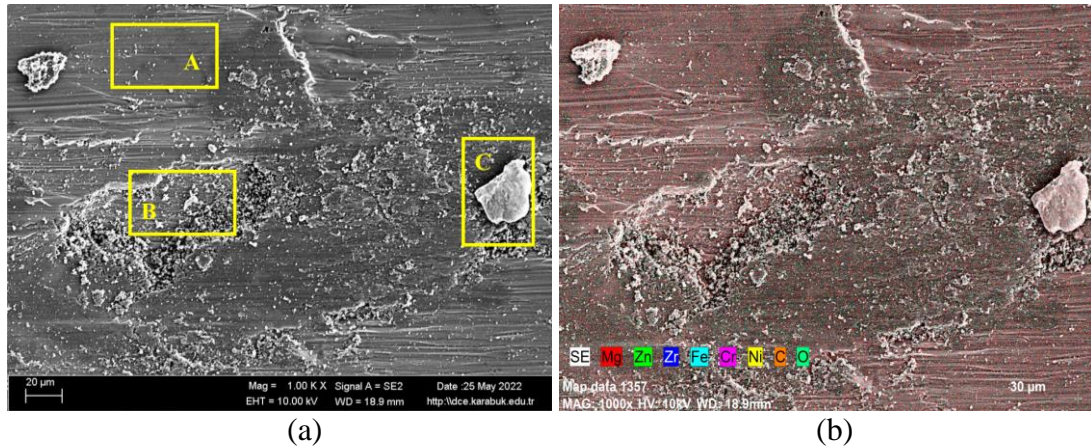


Çizelge 6.9. Aşınma oranı sonuçları.

Numune	Aşınma Oranı ( $\times 10^{-5}$ g/m)
ZK60	2,39
ZK60+5% SiC	2,29
ZK60+10% SiC	2,17
ZK60+5% B <sub>4</sub> C	2,15
ZK60+10% B <sub>4</sub> C	1,71
ZK60+5% SiC+% 5B <sub>4</sub> C	1,90

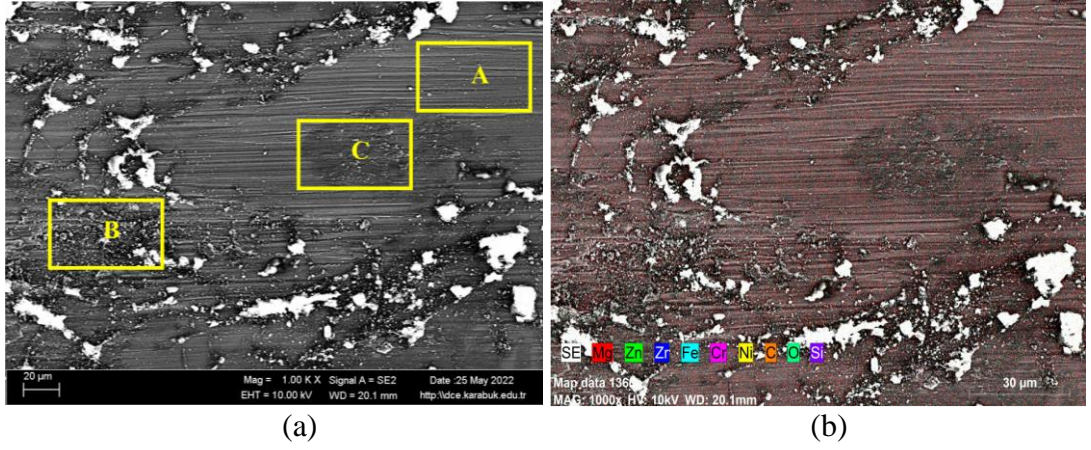
### 6.6.1. Aşınma Yüzeylerinin SEM-MAP İncelemeleri

Şekil 6.15 (a), ZK60 alaşımının 600 m kayma sonrasında 1000X büyütmede SEM görüntüsünü sunmaktadır. Şekil 6.15 (a) 'daki SEM görüntüsünün taranmış öğelerinin elementel MAP analizi sonuçları Şekil 6.15 (b)'de sunulmaktadır. SEM mikrografında A ile gösterilen dikdörtgen bölge, az miktarda şiddetli abrasif aşınma mekanizmasını göstermektedir. Buna karşılık, B ile gösterilen dikdörtgen bölge, şiddetli adhezif aşınma mekanizmasını ortaya koymaktadır. C Bölgesi, aşınma sırasında yüzeyden/yüzeğe yapışmış ve kopmuş kalıntıları göstermektedir. Elementel MAP analiz görüntülerinden aşınma yüzeyinde yüksek oranda Mg ve O olduğu anlaşılmaktadır. Yüzeyden kopan ve yüzeğe yapışan birikintiler, aşınmış ZK60 alaşımının yüzeyinde oluşan Mg-O tabakasının aşınma direncini iyileştirmedini göstermektedir.



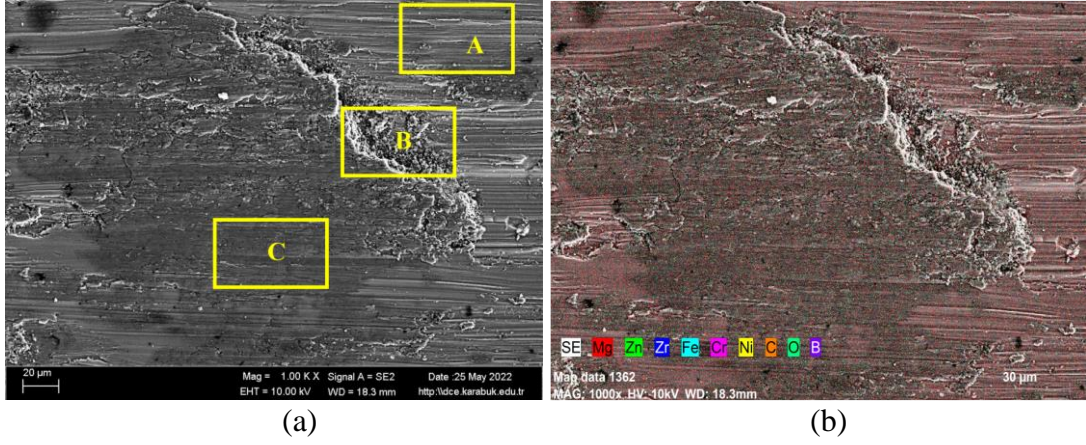
Şekil 6.15. Ekstrüze ZK60 alaşımının a) SEM, b) MAP görüntüleri.

Şekil 6.16 (a), 600 m kayma sonrasında 1000X büyütmede ZK60+%10SiC takviyeli kompozitin SEM mikrografını göstermektedir. Şekil 6.16 (b), Şekil 6.16(a) 'daki SEM mikrografının taranan öğelerinin elementel MAP analizi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 6.16 (a) 'daki A Bölgesi, hafif abrasif aşınma mekanizmasını ortaya koyarken, B Bölgesi hafif adhezif aşınma mekanizmasını gösterir. Elementel MAP analiz görüntülerine göre aşınma yüzeyinde yüksek oranda Mg ve O olduğu analiz edilmiştir. Şekil 6.15 (a) 'da gösterilen yapışkan aşınma bölgeleriyle karşılaştırıldığında, Şekil 6.16 (a) 'da B ile gösterilen yapışkan aşınma bölgeleri daha büyük ve daha koruyucudur. Aşınma mekanizmasında delaminasyon yoktur.



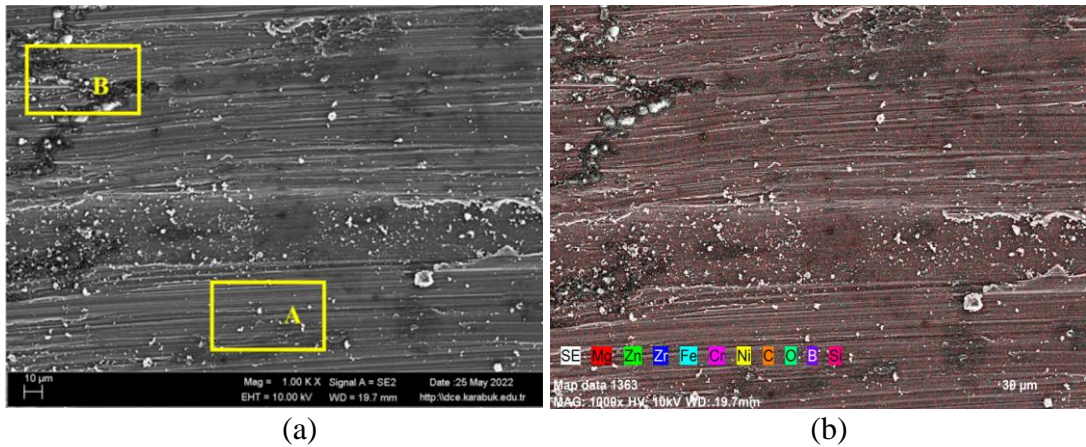
Şekil 6.16. ZK60+%10SiC numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.

Şekil 6.17 (a), 1000X büyütmede ZK60+%10B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin aşınmış yüzeyinin SEM mikrografını göstermektedir. Şekil 6.17 (b), Şekil 6.17 (a) 'daki SEM mikrografının taranmış öğelerinin elementel MAP analizi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 6.17 (a)'da A ile gösterilen dikdörtgen alan lineer hafif abrasif aşınma mekanizmasını gösterirken, B ile gösterilen dikdörtgen alan yoğun adhezif aşınma mekanizmasını göstermektedir. Şekil 6.17 (b)'de verilen elementel MAP analiz sonuçlarına göre aşınma yüzeyinde yüksek oranda Mg ve O olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla aşınma testi sırasında yüzeyde oluşan yüksek Mg ve O içeren oksit tabakası ZK60+%10B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin aşınma direncini iyileştirmiştir.



Şekil 6.17. ZK60+%10B<sub>4</sub>C numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.

Şekil 6.18 (a), 1000X büyütmede ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C'nin aşınmış yüzeyinin SEM mikrografını sunar. Şekil 6.18 (a) 'daki taranmış öğelerin elementel MAP analizi sonuçları Şekil 6.18 (b) 'de gösterilmektedir. A Bölgesi hafif abrasif aşınma mekanizmasını gösterirken, B Bölgesi adhezif aşınma mekanizmasını gösterir. Şekil 6.18 (b)'de verilen elementel MAP analiz görüntülerine göre aşınma yüzeyinde yüksek oranda Mg ve O olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 6.18 (a)'da B ile gösterilen diğer yapışkan aşınma bölgelerinde yaygın olarak bulunmaları ve kompozitin yüzeyini aşınmaya karşı korumalarıdır. Bununla birlikte, delaminasyon son derece az miktarda meydana geldi.



Şekil 6.18. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunesinin a) SEM, b) MAP görüntüleri.

## 6.6.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Tablo 6.10, tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayılarını göstermektedir. Aşınma testleri sırasında yük hücresi ile 150 *m* aralıklarla sürtünme kuvvetleri ölçülmüştür. Sürtünme katsayıları ölçülen sürtünme verileri ile hesaplanmıştır. Buna göre ZK60 alaşımının sürtünme katsayısı 0,1742 olarak hesaplanmıştır. İncelenen numuneler arasında ZK60 alaşımının en yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+5%SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin hesaplanan sürtünme katsayıları 0,1039, 0,1004, 0,1032, 0,1256 ve 0,1238 idi. , sırasıyla. En düşük sürtünme katsayısı %5 B<sub>4</sub>C ile güçlendirilmiş ZK60 alaşımında 0,1004 olarak hesaplanmıştır.

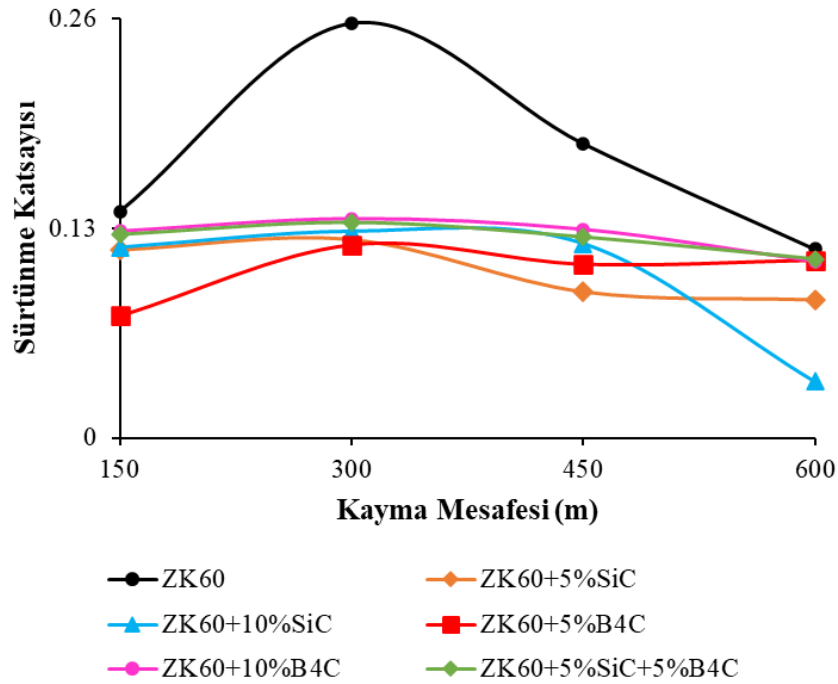
Şekil 6.19, 150 *m* ile 600 *m* arasındaki kayma mesafesi boyunca sürtünme katsayısındaki değişimi karşılaştırır. Genel olarak, ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin ortalama sürtünme katsayısı düşerken, 150 *m* kayma mesafesi başına sürtünme katsayısı ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinde hafifçe yükseldi. Sonuçlar, ZK60 alaşımının sürtünme katsayısının 150 *m* 'de 0,1404 olduğunu ve bunun 300 *m* 'de 0,2568'e önemli ölçüde yükseldiğini gösterdi. Bu değer 300 ile 600 *m* arasında düşüş eğilimi gösterir; ZK60 alaşımının sürtünme katsayısı 450 *m* 'de 0,1824 ve 600 *m* 'de 0,1170 idi. Şekil 6.19 'da ZK60+%5SiC kompozitinin sürtünme katsayısının 150 *m* 'de 0,1167 olduğu görülmektedir. %5SiC takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı toplam kayma mesafesi boyunca marjinal olarak değişmiş ve 300 *m* 'de 0,1231'e çıkmıştır. Daha sonra sürtünme katsayısı değeri 450 *m* 'de 0,0906'ya ve 600 *m* 'de 0,0855'e düşmüştür. Sonuçlar, ZK60+%10SiC kompozitinin sürtünme katsayısının 150 *m* 'de 0,1181 olduğunu gösterdi. 300 *m* 'de 0,1280'e yükselen katsayı değeri, 450 *m* 'de 0,1204'e hafif bir düşüş göstermiştir. Ayrıca, katsayı değeri 450 *m* ile 600 *m* arasında keskin bir düşüş eğilimi göstererek 0,0349'a düşmüştür. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin sürtünme katsayısı 150 *m* 'de 0,0755 idi. Katsayı değeri 300 *m* 'de 0,1195'e çıkarken, 450 *m* 'de 0,1076'ya düşmüştür. Diğer örneklerin aksine ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitin sürtünme katsayısı 600 *m* 'de artarak 0,1101 olmuştur. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin sürtünme katsayısının 150 *m* 'de 0,1281 olduğu ve 300 *m* 'de 0,1358'e çıktığı hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısı değeri, kesirli olarak 450 *m* 'de 0,1292 'ye ve 600 *m* 'de 0,1092 'ye düşmüştür. Sonuçlar, ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin sürtünme

katsayısının 150 m 'de 0,1262 olduğunu göstermektedir. 300 m 'de 0,1337 'ye yükselirken, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin sürtünme katsayısı 450 m ve 600 m kayma mesafesinde sırasıyla 0,1246 ve 0,1107 'ye düşmüştür.

Aşınma testi sonuçları, kayma hareketi devam ederken yüzeyde oksit tabakalarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça oksit tabakaları yükselir ve sürtünme katsayıları birbirine yaklaşır. Şekil 6.19 'da görüldüğü gibi ZK60 alaşımında 300 m 'de oksit tabakalarının birikmesinden dolayı sürtünme katsayısında artış olduğu değerlendirilmektedir. Sonuç olarak en yüksek oksidasyon SiC takviyeli kompozit malzemede görülmektedir.

Çizelge 6.10. Hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri.

Numune	Sürtünme Katsayısı, $\mu$
ZK60	0,1742
ZK60+5%SiC	0,1039
ZK60+10%SiC	0,1004
ZK60+5%B <sub>4</sub> C	0,1032
ZK60+10%B <sub>4</sub> C	0,1256
ZK60+5%SiC+5%B <sub>4</sub> C	0,1238

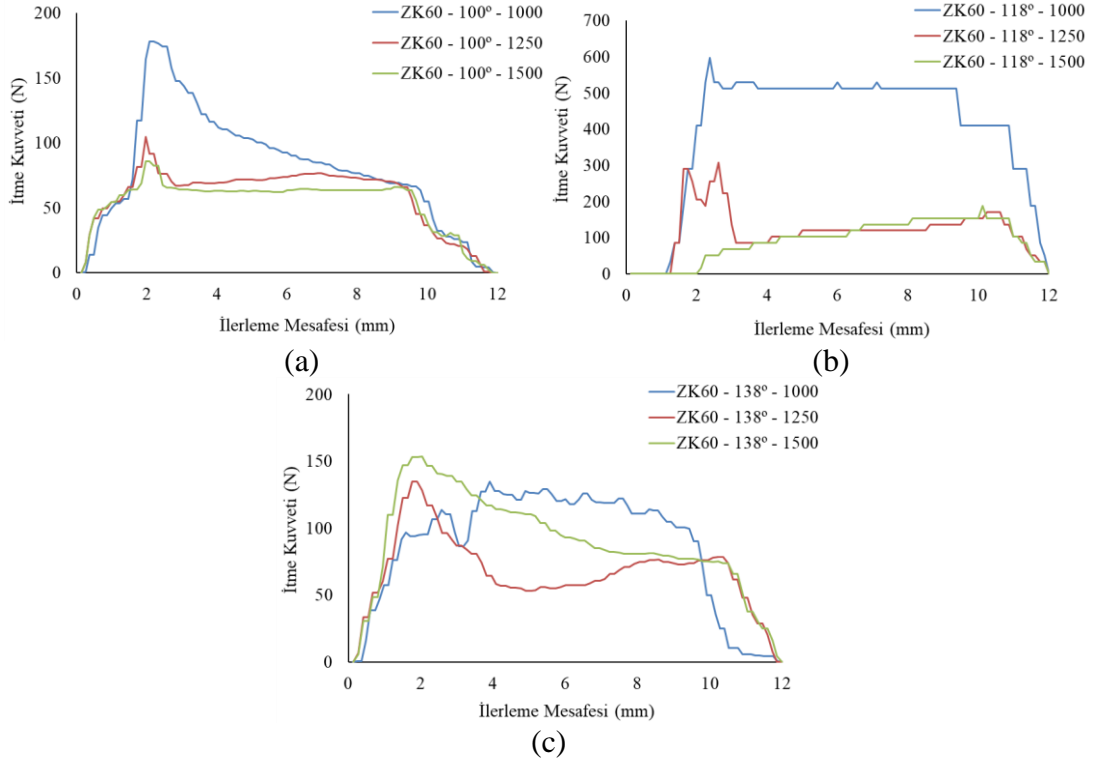


Şekil 6.19. Sürtünme katsayısı değişim grafiği.

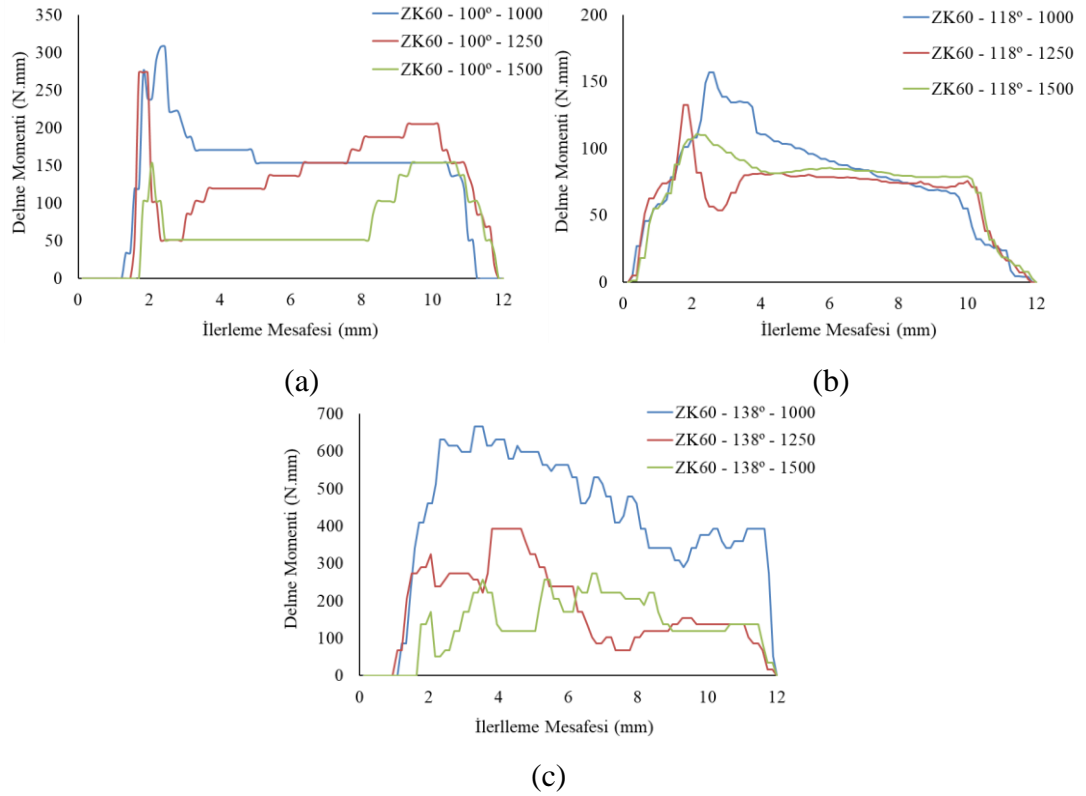
## 6.7. DELİK DELME TESTİ SONUÇLARI

Bu çalışmada ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine delik delme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda numunelerin reaksiyon kuvvetleri sonucu oluşan matkabın itme kuvveti ( $N$ ) ve delme momenti ( $N.mm$ ) verileri kaydedilmiştir. Veriler numune yüzeyinden itibaren matkap diğer yüzeyden çıkacak şekilde 12 mm ilerleme mesafesine ( $mm$ ) göre kaydedilmiştir. Tüm numunelere dokuzar adet toplamda 54 test uygulanmıştır.

ZK60 alaşımının delik delme parametrelerinde göre elde edilen ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.11 'de listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.20'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.21'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60 alaşımına uç açısı  $100^\circ$  olan matkap ile delik delinirken 1000 *dev/dak* devir sayısında diğer devir sayılarına göre en yüksek ortalama itme kuvveti (82,56  $N$ ) ve ortalama delme momenti (158,40  $N.mm$ ) değerine ulaşılmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde delme sıcaklığı 34-38  $^\circ C$  aralığında gerçekleşmiştir. İkinci olarak, uç açısı  $118^\circ$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 76,81  $N$  iken ortalama delme momenti değeri 435,80  $N.mm$  çıkmıştır. Bu test sonucunda elde edilen en yüksek reaksiyon kuvvetleri  $100^\circ$  uç açısına sahip matkap test değerleri ile benzer şekilde, 1000 *dev/dak* devir sayısında gerçekleşmiştir. Ancak bu test sırasında maksimum delme sıcaklığı 45,2  $^\circ C$  sıcaklığına ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı  $138^\circ$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1500 *dev/dak* devir sayısında 89,01  $N$  iken ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında 448,88  $N.mm$  çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 43,80  $^\circ C$  olarak ölçülmüştür. ZK60 alaşımına uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda devir sayısı değeri arttıkça delme momentinin düşme eğiliminde olduğu, genellikle itme kuvvetinin arttığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin  $25^\circ C$  ( $20^\circ C$ 'den  $45^\circ C$ 'ye) yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.20. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.



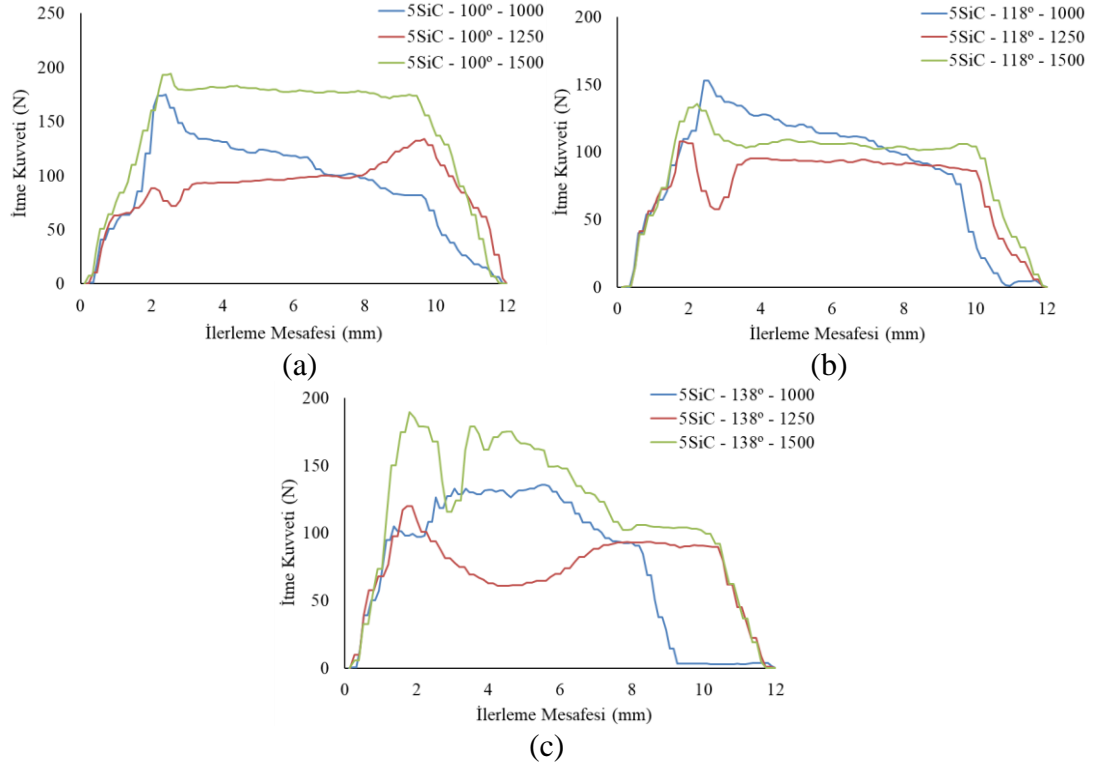
Şekil 6.21. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.

Çizelge 6.11. ZK60 alaşımının delik delme testleri sonuçları.

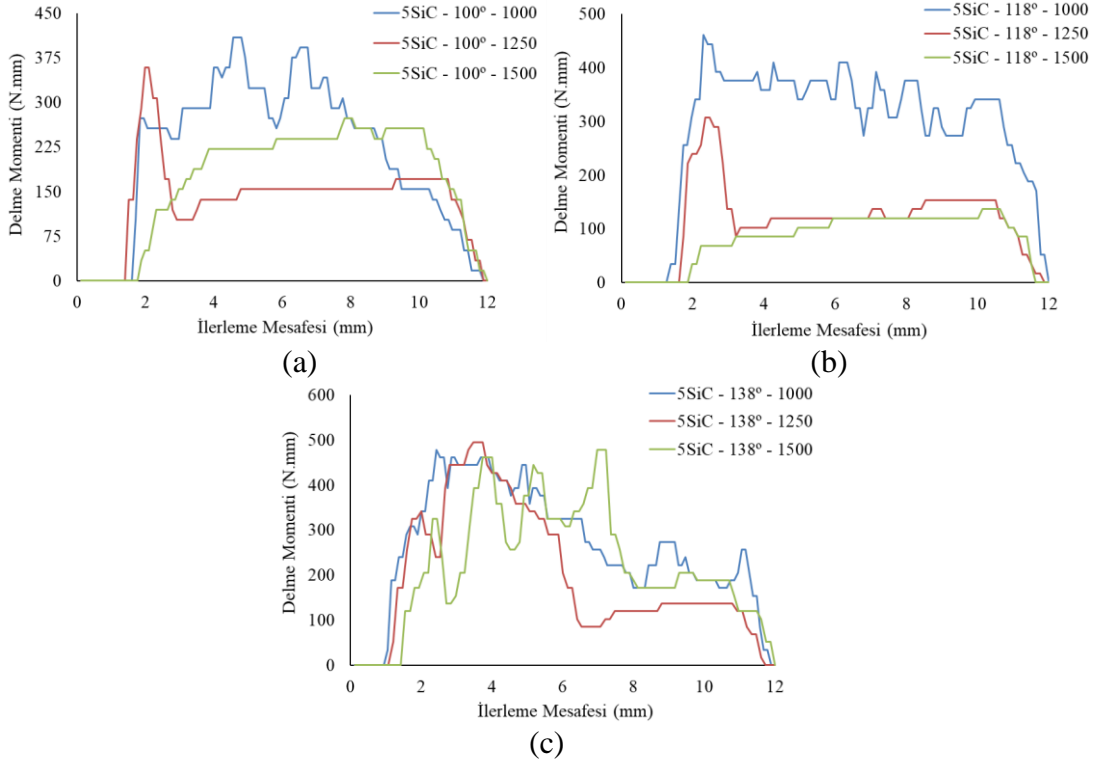
Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60	100	1000	82,56	158,40	34,00
		1250	61,58	138,19	37,00
		1500	53,64	77,65	37,50
	118	1000	76,81	435,80	36,80
		1250	65,93	129,14	41,20
		1500	70,74	108,77	45,20
	138	1000	85,95	448,88	33,50
		1250	67,60	188,24	34,70
		1500	89,01	154,56	43,80

ZK60+%5SiC kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.12 'de listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.22'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.23 'te sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%5SiC kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1500 *dev/dak* devir sayısında 141,51 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında 241,83 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 53,20 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1500 *dev/dak* devir sayısında 88,89 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında 314,61 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 54,40 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1500 *dev/dak* devir sayısında 114,86 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında 284,74 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 52,20 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5SiC kompozitine uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda, ZK60 alaşımı ile paralel olarak devir sayısı değeri arttıkça, delme momentinin düştüğü, itme kuvvetinin arttığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 100° uç açısında 1500 devir sayısında 54,4°C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.





Şekil 6.22. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.

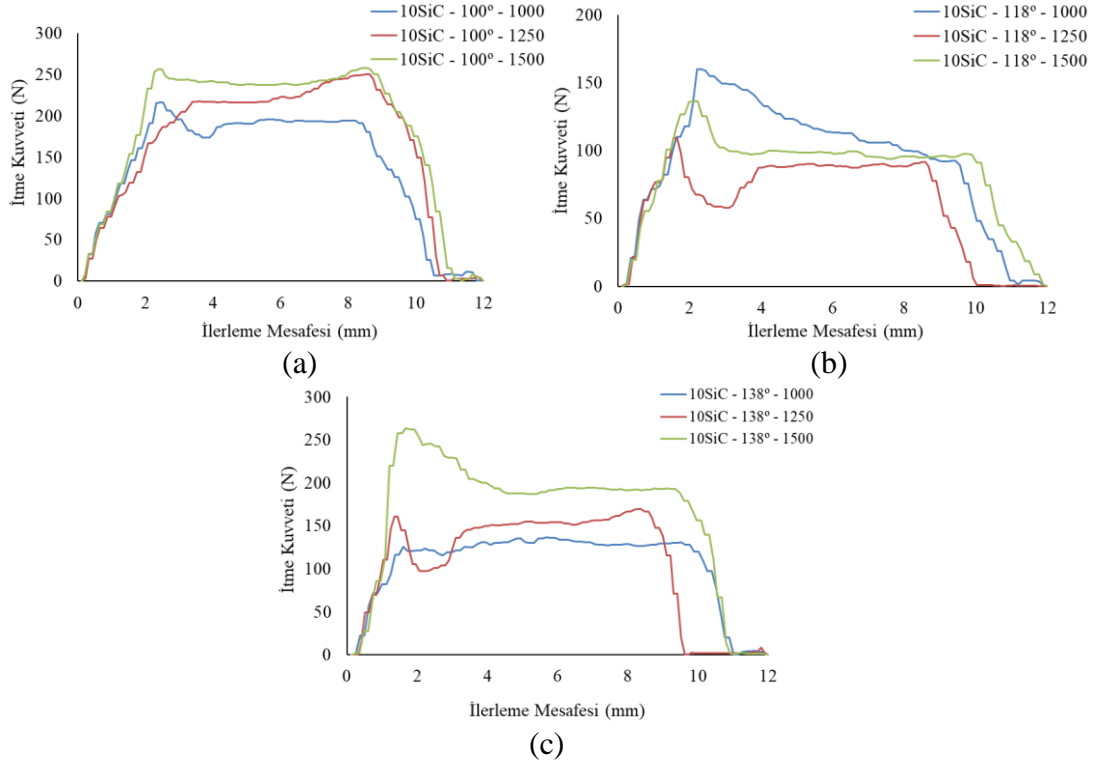


Şekil 6.23. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.

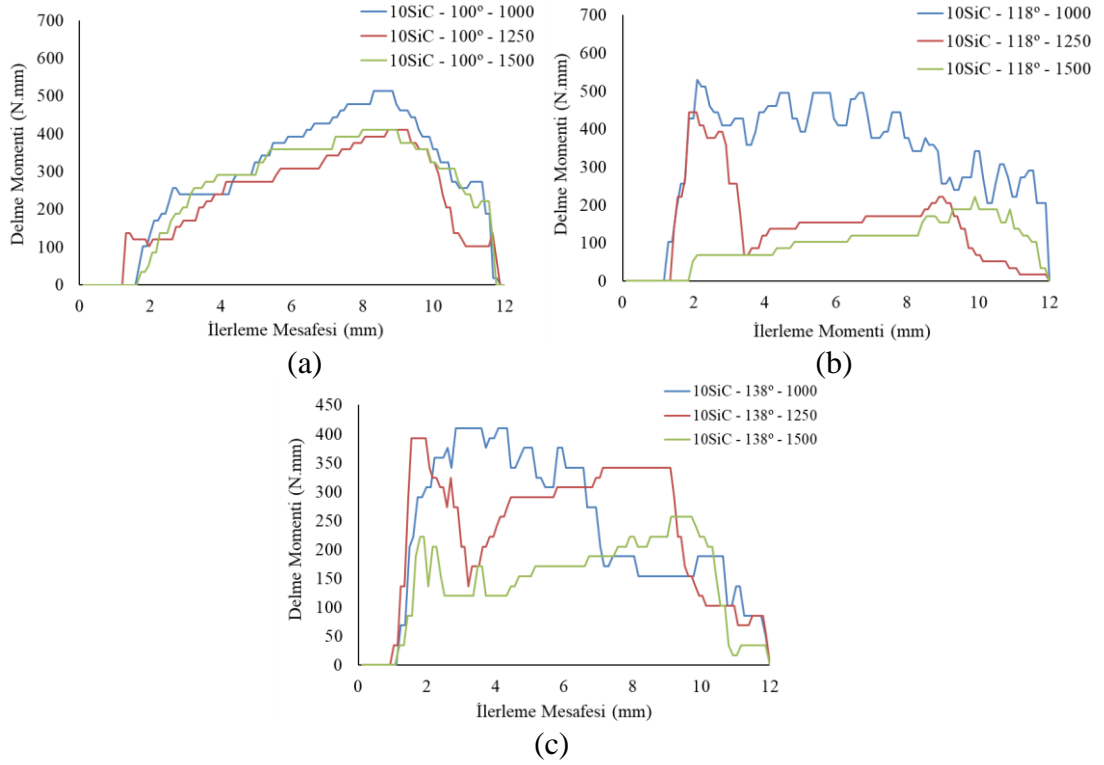
Çizelge 6.12. ZK60+%5SiC kompozitinin delik delme testleri sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı ( $\epsilon$ )	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
ZK60+%5SiC	100	1000	89,57	241,83	43,10
		1250	86,59	151,26	47,10
		1500	141,50	95,63	53,20
	118	1000	84,17	314,61	41,20
		1250	73,63	130,97	45,80
		1500	88,89	99,89	54,40
	138	1000	97,89	284,74	39,80
		1250	74,21	219,23	47,00
		1500	114,86	206,25	52,20

ZK60+%10SiC kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momentini ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.13 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.24 'te ve delme momentini-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.25 'te sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%10SiC kompozitinin uç açısı  $100^{\circ}$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $192,28 \text{ N}$  iken ortalama delme momentini değeri  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $324,08 \text{ N.mm}$  çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $85^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı  $118^{\circ}$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $94,28 \text{ N}$  iken ortalama delme momentini değeri  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $360,39 \text{ N.mm}$  çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $49^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı  $138^{\circ}$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $174,01 \text{ N}$  iken ortalama delme momentini değeri  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $246,34 \text{ N.mm}$  çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $60,20^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. ZK60+%10SiC kompozitine uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda, ZK60 alaşımı ve ZK60+%5SiC kompoziti ile paralel olarak devir sayısı değeri arttıkça, delme momentinin düştüğü, itme kuvvetinin arttığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık  $100^{\circ}$  uç açısında  $1500 \text{ devir sayısında } 85^{\circ}\text{C}$ 'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.24. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

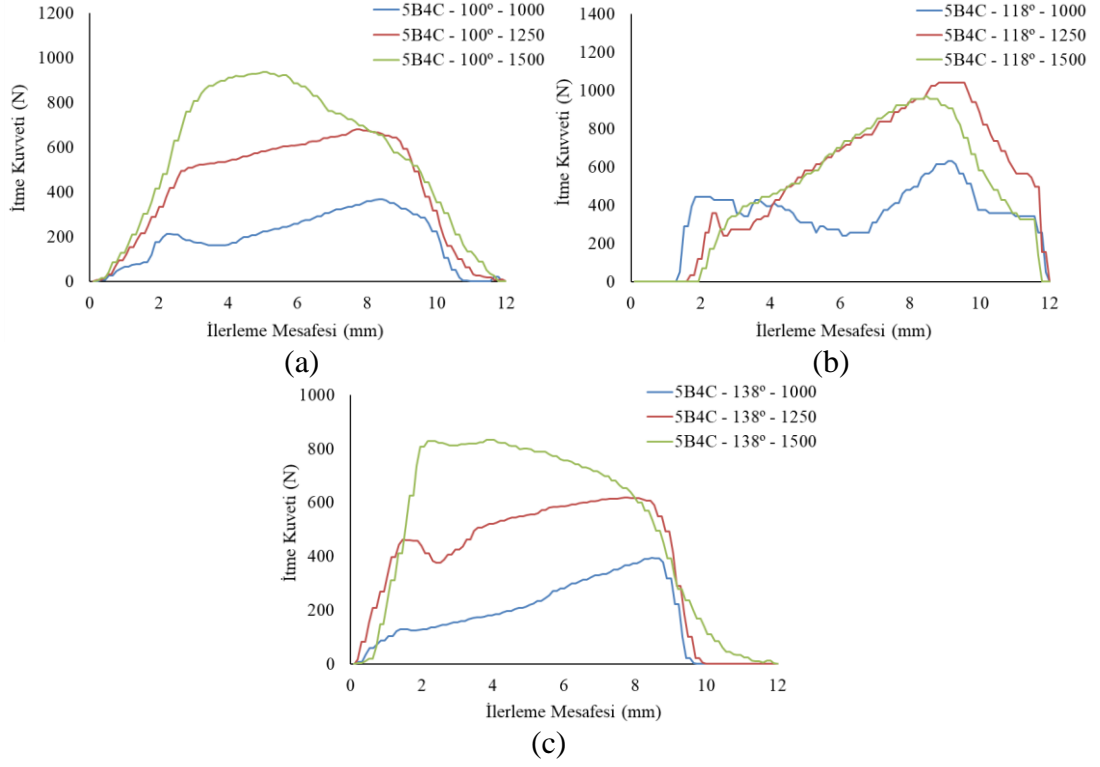


Şekil 6.25. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

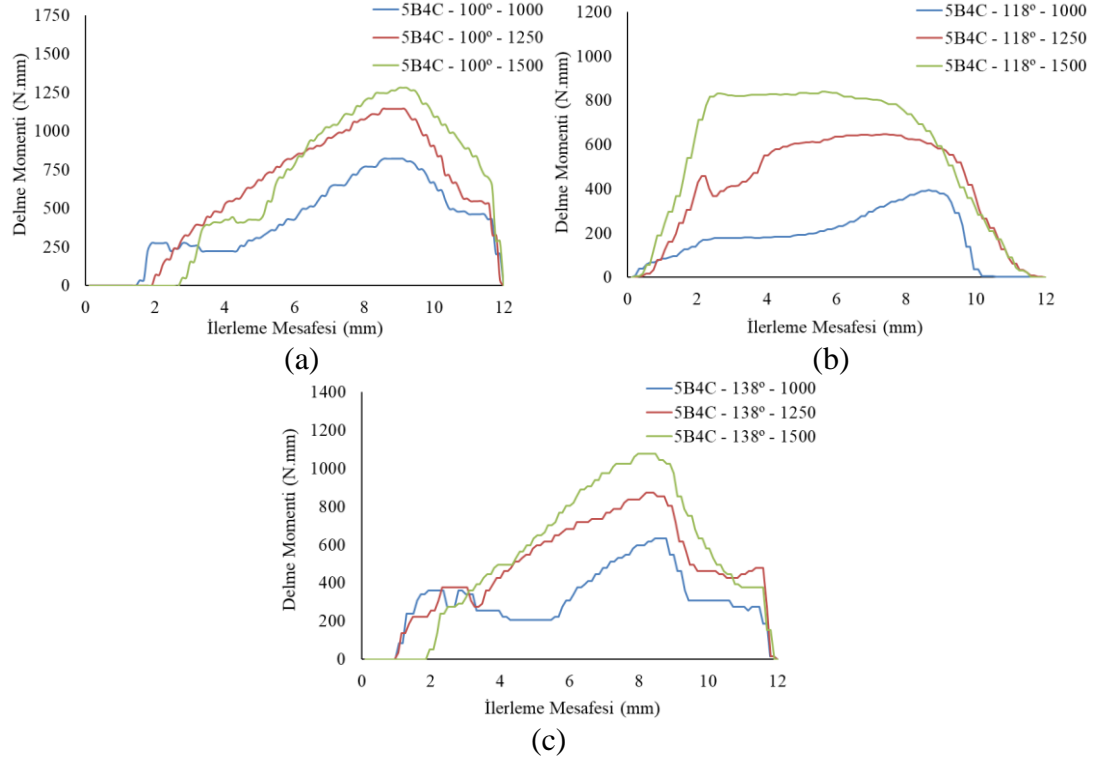
Çizelge 6.13. ZK60+%10SiC kompozitinin delik delme testleri sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı ( $\epsilon$ )	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
ZK60+%10SiC	100	1000	138,27	324,08	52,70
		1250	174,23	250,43	81,70
		1500	192,28	297,17	85,00
	118	1000	91,57	360,39	40,30
		1250	72,23	159,58	46,30
		1500	94,28	112,94	49,50
	138	1000	103,76	246,34	40,20
		1250	109,48	241,58	42,40
		1500	174,01	153,12	60,20

ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.14 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.26 'da ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.27 'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 551,34 *N* ve 805,36 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı yine 1500 *dev/dak* devir sayısında 149 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 558,02 *N* ve 691,49 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 129 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 500,56 *N* ve 633,18 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 144 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda, ZK60 alaşımı, ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC numunelerinden farklı olarak devir sayısı değeri arttıkça, ortalama delme momenti, ortalama itme kuvveti ve maksimum delme sıcaklığı değerlerinde şiddetli artış gerçekleşmiştir. Bu testler sırasında delme sıcaklığı 100°C 'den fazla artış göstermiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.26. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

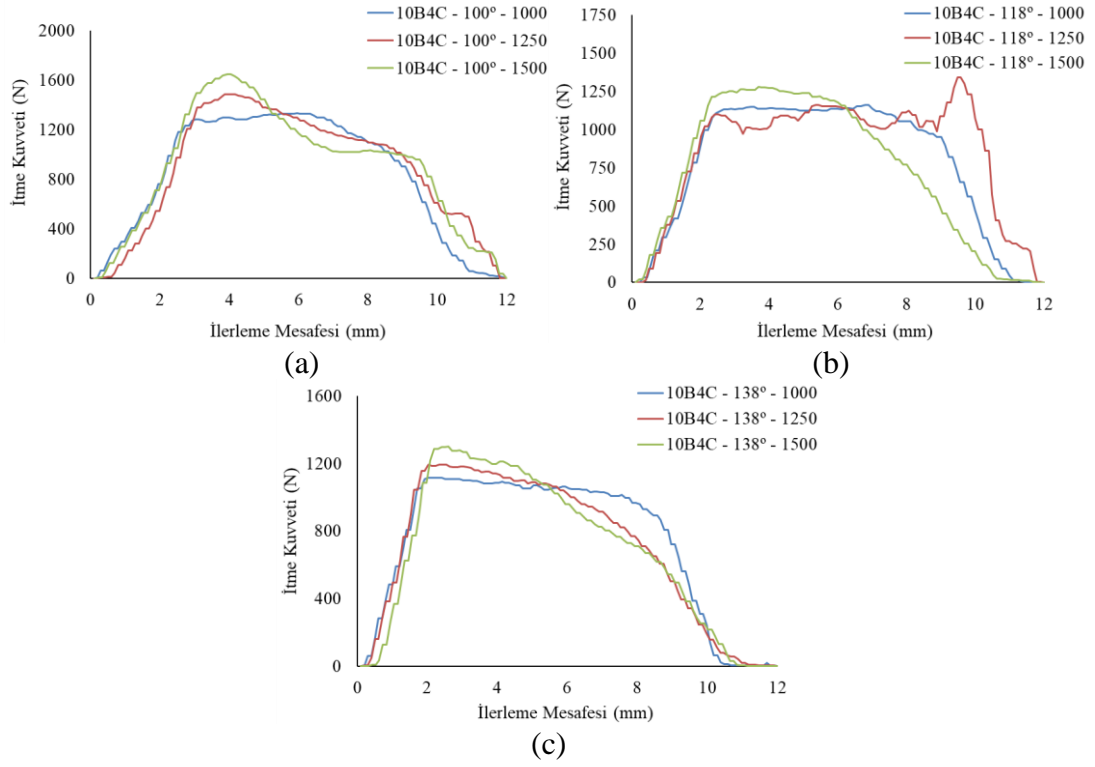


Şekil 6.27. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

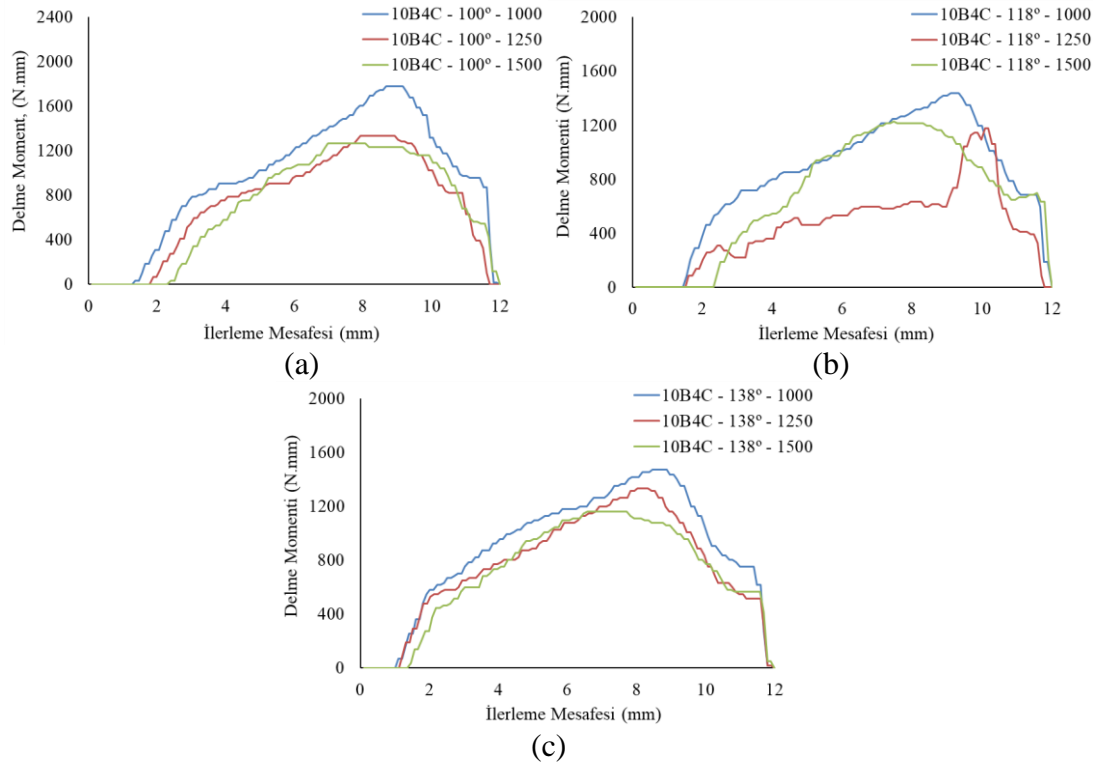
Çizelge 6.14. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin delik delme testleri sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	100	1000	187,60	461,38	77,10
		1250	434,50	737,59	124,00
		1500	551,34	805,36	149,00
	118	1000	180,80	379,78	64,00
		1250	416,76	622,71	105,00
		1500	558,02	691,49	129,00
	138	1000	169,93	333,54	70,80
		1250	374,52	515,50	89,00
		1500	500,56	633,18	144,00

ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.15 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.28 'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.29 'da sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 895,86 *N* ve 877,94 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı yine 1500 *dev/dak* devir sayısında 165 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 859,19 *N* ve 921,61 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 107,30 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken n yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 885,99 *N* ve 985,44 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 146 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda, ZK60+%5B<sub>4</sub>C numunesi ile benzer olarak devir sayısı değeri arttıkça, ortalama delme momenti, ortalama itme kuvveti ve maksimum delme sıcaklığı değerlerinde şiddetli artış gerçekleşmiştir. Bu testler sırasında delme sıcaklığı 120°C'den fazla artış göstermiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.28. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.



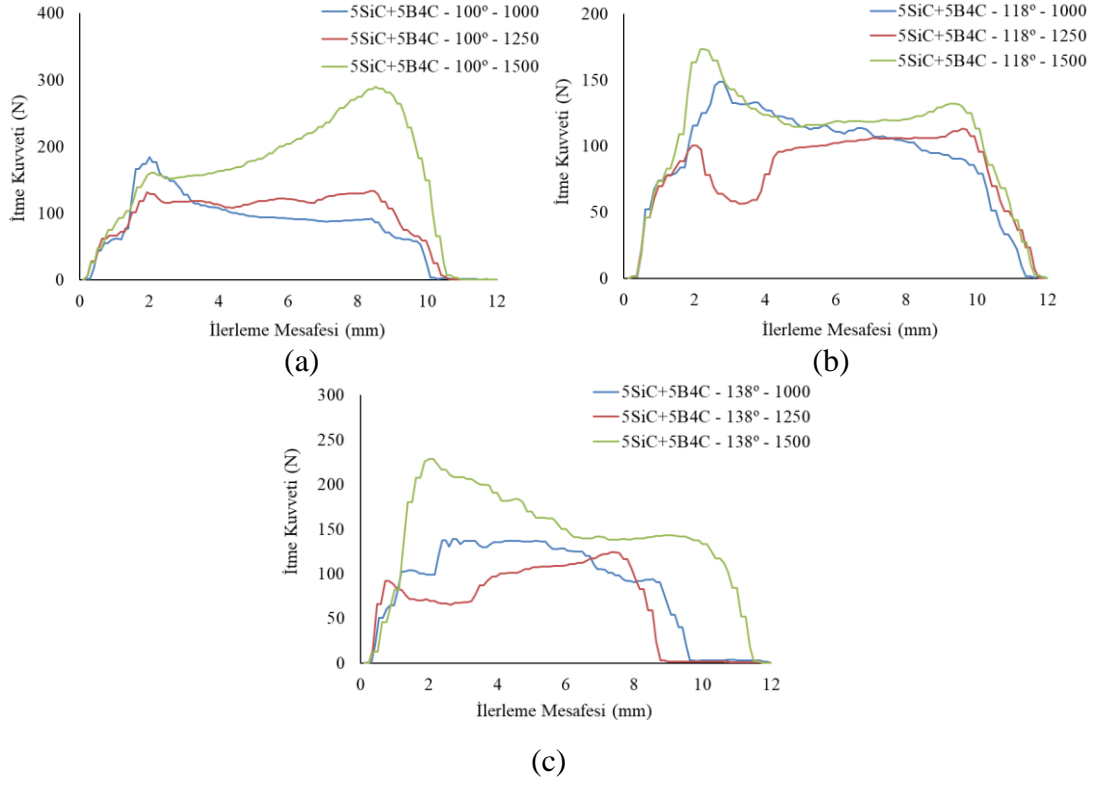
Şekil 6.29. ZK60+%10B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

Çizelge 6.15. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin delik delme testleri sonuçları.

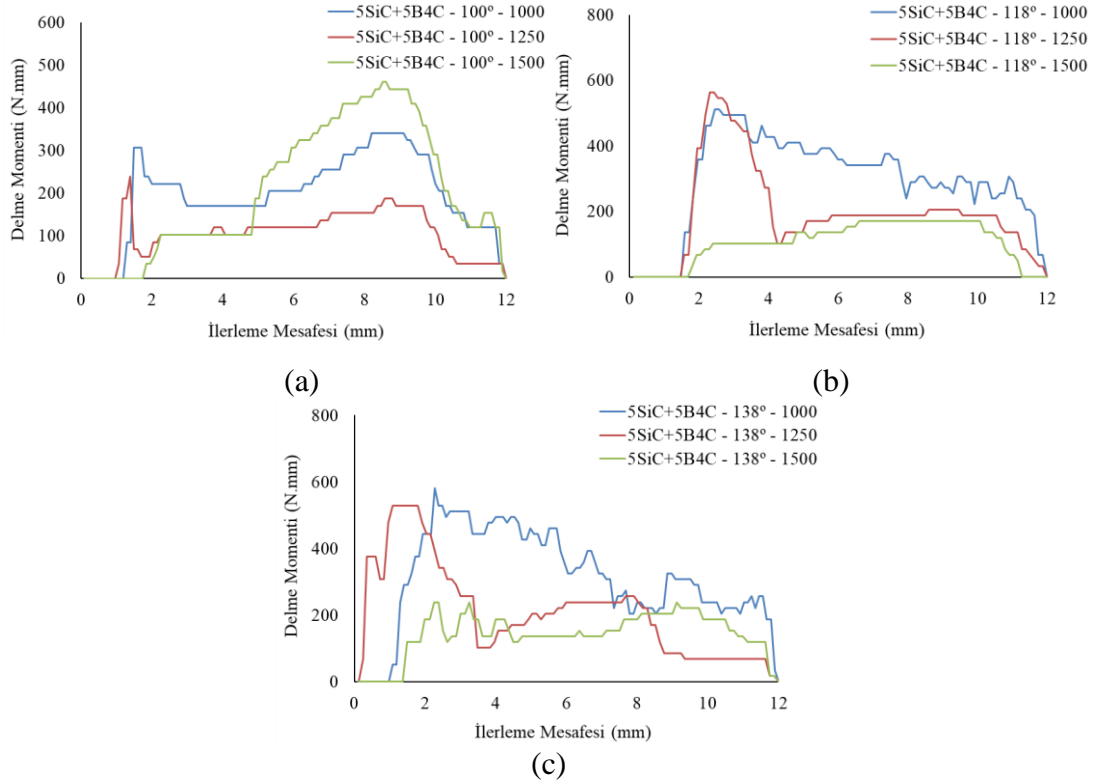
Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	100	1000	837,73	1071,37	125,00
		1250	873,39	870,30	135,00
		1500	895,86	877,94	165,00
	118	1000	777,92	917,73	102,00
		1250	852,66	722,29	74,70
		1500	859,19	921,61	107,30
	138	1000	733,46	951,22	98,70
		1250	700,80	822,59	94,50
		1500	885,99	985,44	146,00

ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.16 'da listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.30 'da ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.31 'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 173,52 *N* ve 235,50 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı yine 1500 *dev/dak* devir sayısında 60 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 104,71 *N* ve 329,13 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 61,80 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 143,43 *N* ve 357,84 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 57 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet delik delme testi sonucunda, ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C numunelerinden farklı olarak benzer olarak devir sayısı değeri arttıkça, ortalama delme momenti, ortalama itme kuvveti ve maksimum delme sıcaklığı değerlerinde şiddetli artış gerçekleşmiştir. Ancak ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin delme değerleri diğer B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere göre daha normal seviyelerde kalmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.





Şekil 6.30. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı uç açlarına göre itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.



Şekil 6.31. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı uç açlarına göre delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

Çizelge 6.16. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin delik delme testleri sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	100	1000	94,50	213,98	45,50
		1250	100,54	122,56	59,50
		1500	173,52	235,50	60,60
	118	1000	95,06	309,13	42,30
		1250	81,46	216,54	44,10
		1500	104,71	329,64	61,80
	138	1000	104,98	333,04	40,50
		1250	88,29	209,68	43,70
		1500	143,43	357,84	57,00

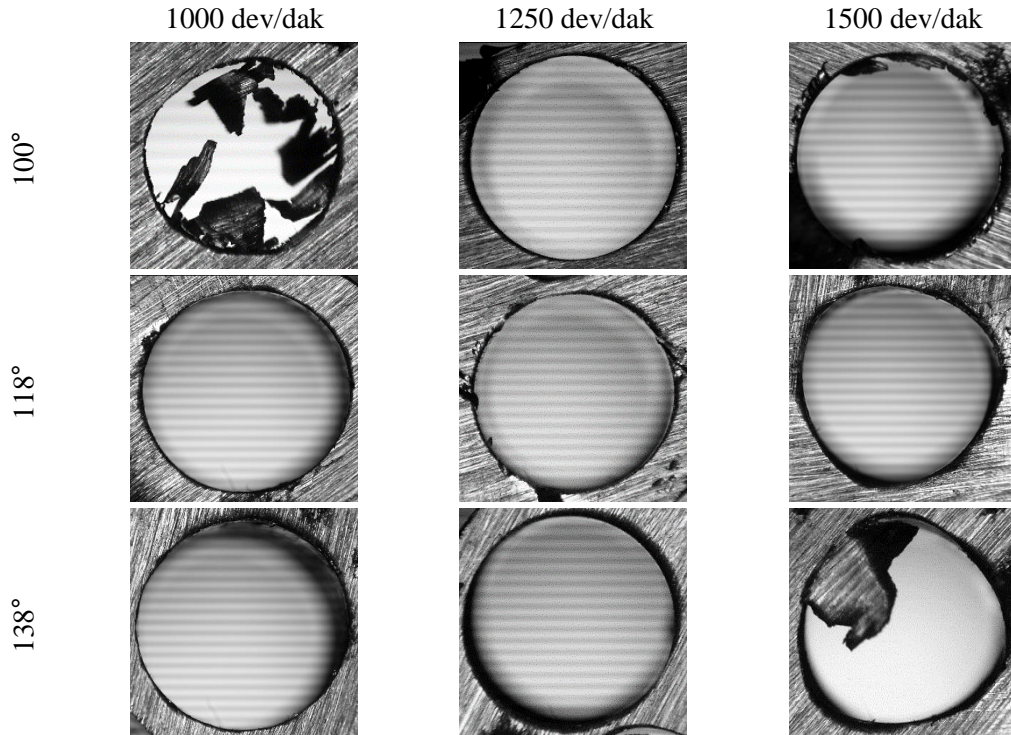
Yapılan delik delme testleri sırasında ölçülen itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık parametreleri karşılaştırıldığında önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin 3 farklı matkap uç açısı ve 3 farklı devir sayısı değerleri sonucu elde edilen genel ortalama itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık ortalamaları Çizelge 6.17 'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre SiC ve B<sub>4</sub>C takviye malzemelerinin matris içine ağırlıkça eklenme oranlarının artması sıcaklık değerlerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesinin eklenmesi delme sıcaklığını 2 kattan fazla arttırdı, malzeme yumuşamasına sebep olarak itme kuvveti ve delme momenti değerlerini olumsuz olarak etkiledi. Ancak ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesine ek SiC takviyesinin de eklenmesi B<sub>4</sub>C takviyesinin olumsuz özelliklerinin ortadan kalkmasına ve delik delme parametrelerinin normal seviyelere düşmesini sağlamış ve delme işlenebilirliğini geliştirmiştir.

Çizelge 6.17. Delik delme testleri genel ortalama değerleri.

Numune	Genel İtme Kuvveti (N)	Genel Delme Momenti (N.mm)	Genel Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60 alaşımı	72,65	204,40	39,19
ZK60+%5SiC	94,59	193,82	47,09
ZK60+%10SiC	127,79	238,40	55,37
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	374,89	575,62	105,77
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	824,11	904,50	116,47
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	109,61	258,66	50,56

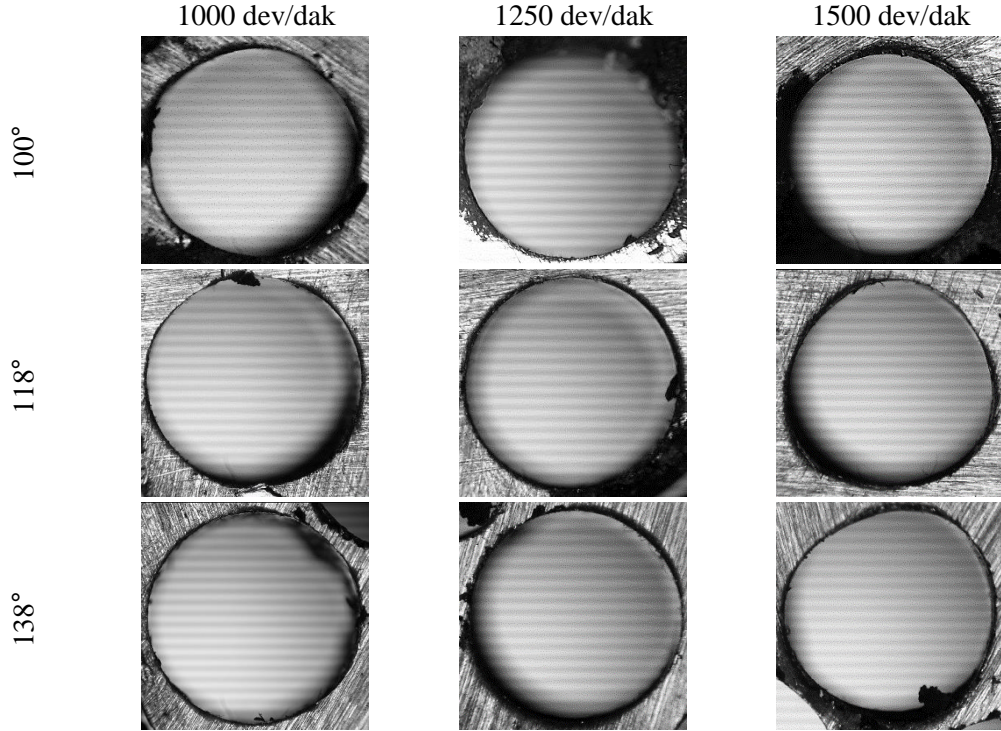
### 6.7.1. Matkap Çıkış Yüzeyi Geometrisi ve Çapak Oluşumu İncelemeleri

Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine delik delme testleri sonrasında matkap çıkış yüzeyi geometrisi ve çıkış yüzeylerinde çapak oluşumu gerçekleşmiştir. Bunlar, üretilen numunelerin delik kalitesini, delik delme kapasiteleri ve delme işlenebilirliklerinin değerlendirilebilmesi için önemli kriterlerdir. ZK60 alaşımının matkap çıkış yüzeyi geometrisi ve çapak oluşumu Şekil 6.32 'de sunulmuştur. Şekil 6.32 incelendiğinde  $100^\circ$  uç açısında 1000 dev/dak devir sayısı parametreleri kullanılarak delinen delikte matkap çıkış yüzeyi geometrisinde kesme yüzeyinin tam gelişmemesinden kaynaklı olarak şekil bozukluğu ve yoğun çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Devir sayısının artması bu kusurları gidermiştir. Ayrıca  $118^\circ$  uç açısında tüm devir sayısı değerlerinde çapak oluşumu gözlemlenmezken 1500 dev/dak devir sayısında geometrik bozukluk oluşmuştur. Benzer şekilde,  $138^\circ$  uç açısının oluşturduğu çıkış yüzeyleri  $118^\circ$  olan çıkış yüzeyleri ile benzer özellik göstermiştir.



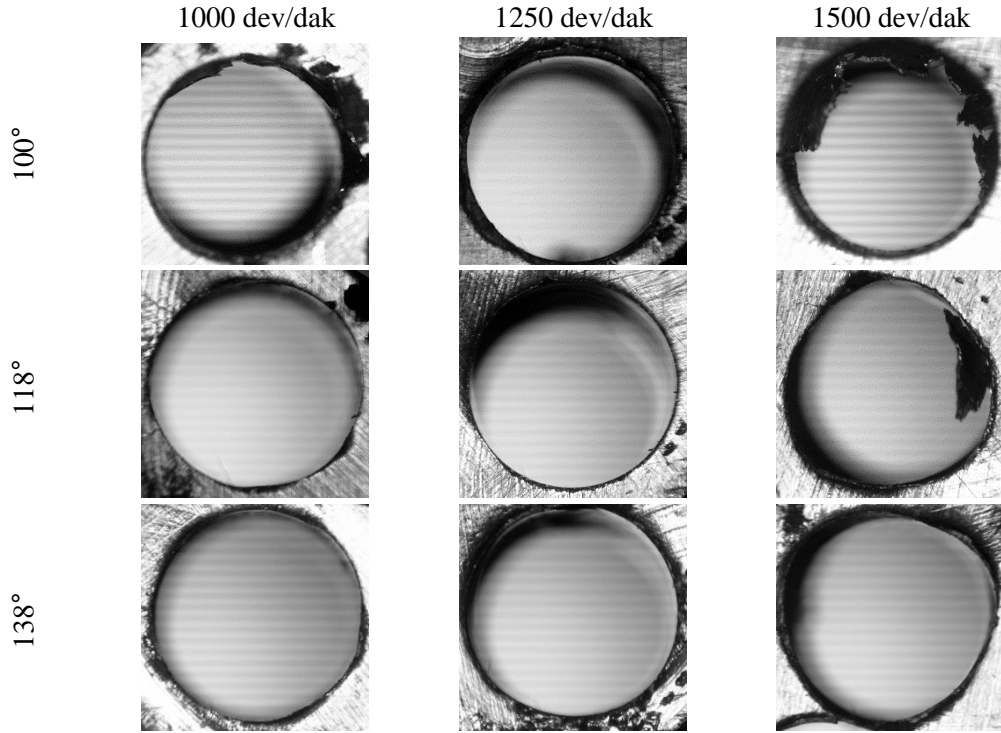
Şekil 6.32. ZK60 alaşımı matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.

ZK60+%5SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi geometrisi ve çapak oluşumu görüntüsü Şekil 6.33 'te sunulmuştur. Şekil 6.33 incelendiğinde 118° uç açısında 1500 dev/dak ve 118° uç açısında 1500 dev/dak parametrelerinde sadece delik geometrisinde bozulma gözlemlenmiştir. Diğer tüm deliklerde geometri bozulması yoktur ve çapak oluşumu minimal düzeyde kalmıştır.



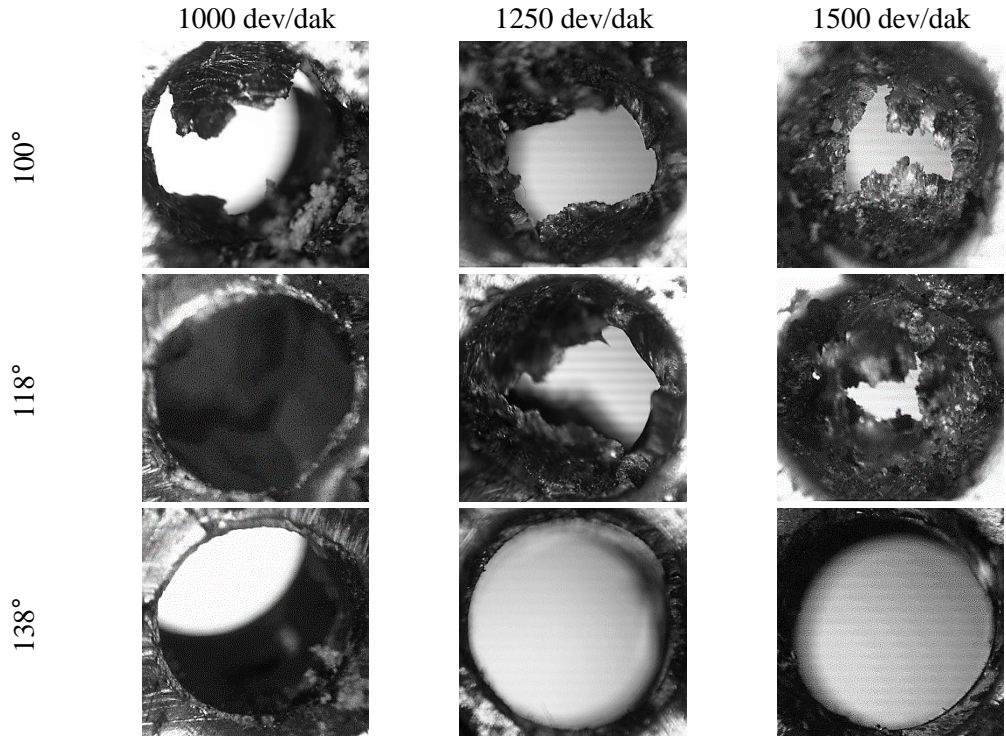
Şekil 6.33. ZK60+%5SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.

ZK60+%10SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi geometrisi ve çapak oluşumu görüntüsü Şekil 6.34 'te sunulmuştur. Şekil 6.34 incelendiğinde 138° uç açısında 1500 dev/dak parametresinin matkap çıkış yüzeyi geometrisinde bozulma gözlemlenmiştir. Ayrıca diğer tüm deliklerde geometri bozulması olmasa bile kusurlar ve çapak oluşumu başlamıştır. Ek olarak 100° uç açısında 1500 dev/dak parametrelerinin yüksek sıcaklık oluşturması malzeme yumuşaması kaynaklı çapak oluşumuna sebebiyet vermiştir.

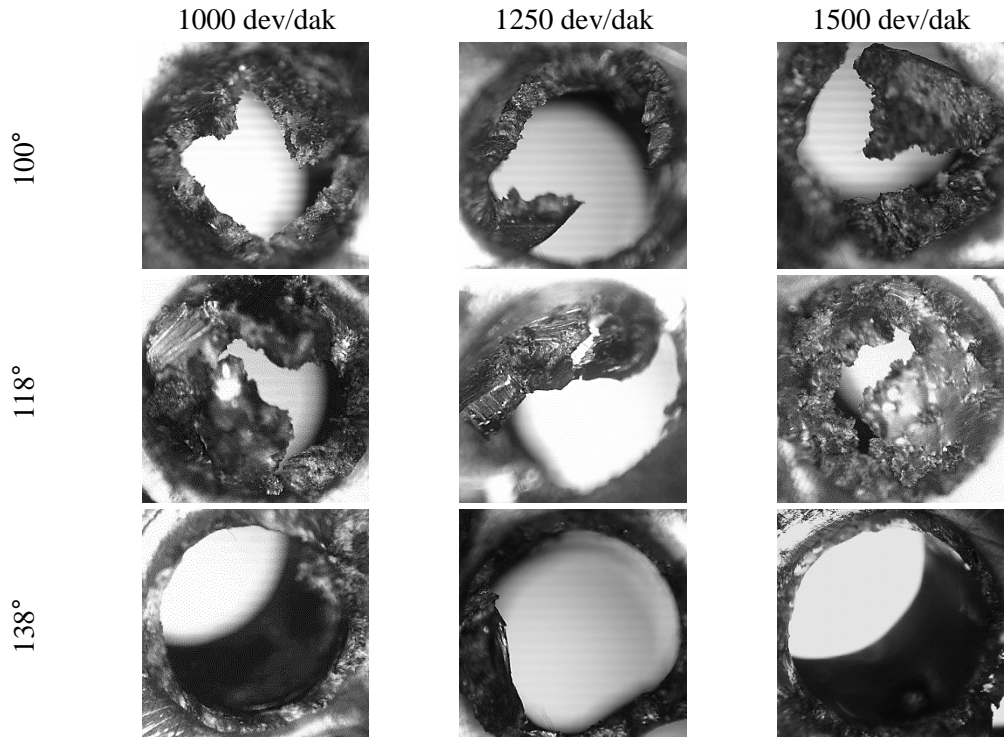


Şekil 6.34. ZK60+%10SiC kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.

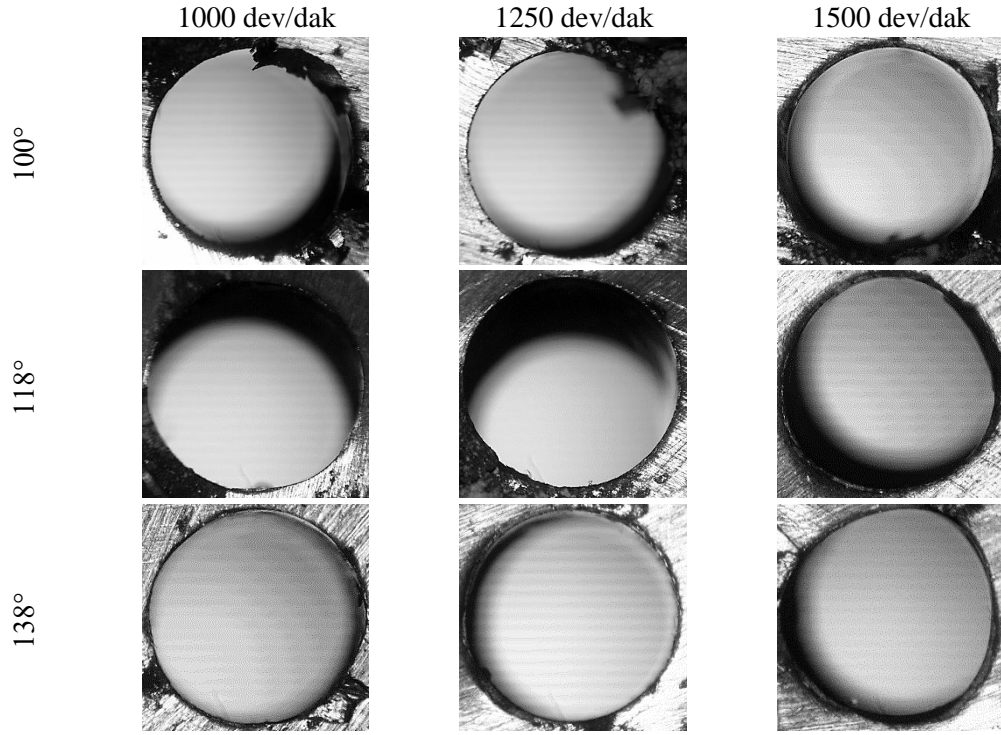
ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinin matkap çıkış yüzeyi geometrisi ve çapak oluşumu görüntüsü sırasıyla Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 'da sunulmuştur. İki kompozite delinen delikler incelendiğinde, matkap ile delik delinmiş olsa da tüm matkap uç açısı ve devir sayısı parametrelerinde matkap çıkış yüzeyi geometrisinde ciddi bozulmalar gerçekleşmiştir. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin delik delme testlerinde genel olarak ortalama 105°C ye ulaşması ve aynı sıcaklık artışı etkisinin ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinde de ortalama 116°C olarak gerçekleşmesi test sırasında delik yüzeyindeki malzemenin yumuşayarak kısmi sıcak deformasyona uğramasına sebep olmuştur. Dolayısıyla matkap çıkış yüzeylerinde ciddi malzeme birikmesi meydana gelmiştir. Bu iki numuneden farklı olarak yüzey geometrisi Şekil 6.37'de sunulan ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinde sıcaklık değerlerinin ZK60 alaşımı düzeylerine düşmesi sıcaklık nedeniyle malzeme yumuşamasına ve matkap çıkış geometrisinde çapak oluşmamasını sağlamıştır. Ancak ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitini delirken 138 uç açısı ve 1500 dev/dak parametrelerinin kullanılması titreşim kaynaklı geometrik kusur oluşturmuştur.



Şekil 6.35. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.



Şekil 6.36. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.



Şekil 6.37. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin matkap çıkış yüzeyi görüntüsü.

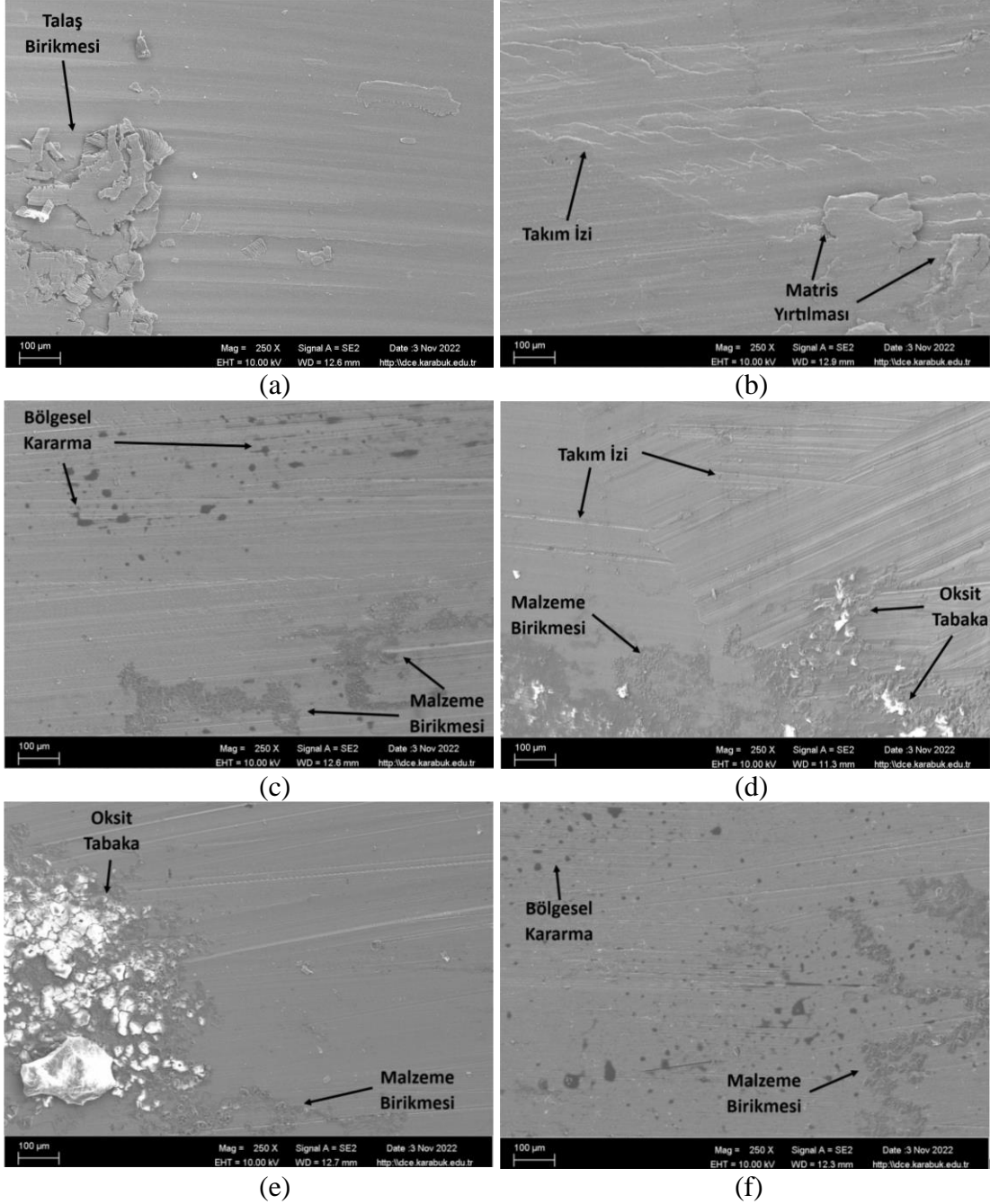
### 6.7.2. Delik İç Yüzeylerinin SEM İncelemeleri

Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine delik delme testleri sonrasında matkap uç açısı 100 ve 1000 dev/dak parametreleri kullanılarak açılan deliklerin iç yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. SEM mikrografları Şekil 6.38 'de sunulmuştur.

Yapılan incelemelerde ZK60 alaşımının delik iç yüzeyinde (Şekil 6.38 (a)) az miktarda talaş birikmesi gerçekleşmiştir ve bunun dışında herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. ZK60+%5SiC kompozitinin SEM mikrografı olan Şekil 6.38 (b) 'de ise belirgin takım izinin yanı sıra matris yırtıklarının olduğu görülmüştür. ZK60 alaşımı ve ZK60+%5SiC kompozit yüzeyinde gerçekleşen etkilerin abrasif etkilerden kaynaklanmaktadır.

ZK60+%10SiC ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin mikrografları olan Şekil 6.38 (c) ve (f) 'de matris yüzeyinde bölgesel kararmaların yanı sıra delme esnasında sıcaklık artışı kaynaklı malzeme birikmesi gözlemlenmiştir. Matristeki bu yapıların sıcaklık artışına bağlı yoğun adhezif etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Son olarak ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinin mikrografları olan Şekil 6.38 (d) ve (e) incelendiğinde farklı eksenli takım izlerinin yanı sıra adhezif etkilerden kaynaklı olarak biriken malzemenin 100°C üzerine çıkan delme sıcaklıklarının etkisiyle oksit tabaka oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır.

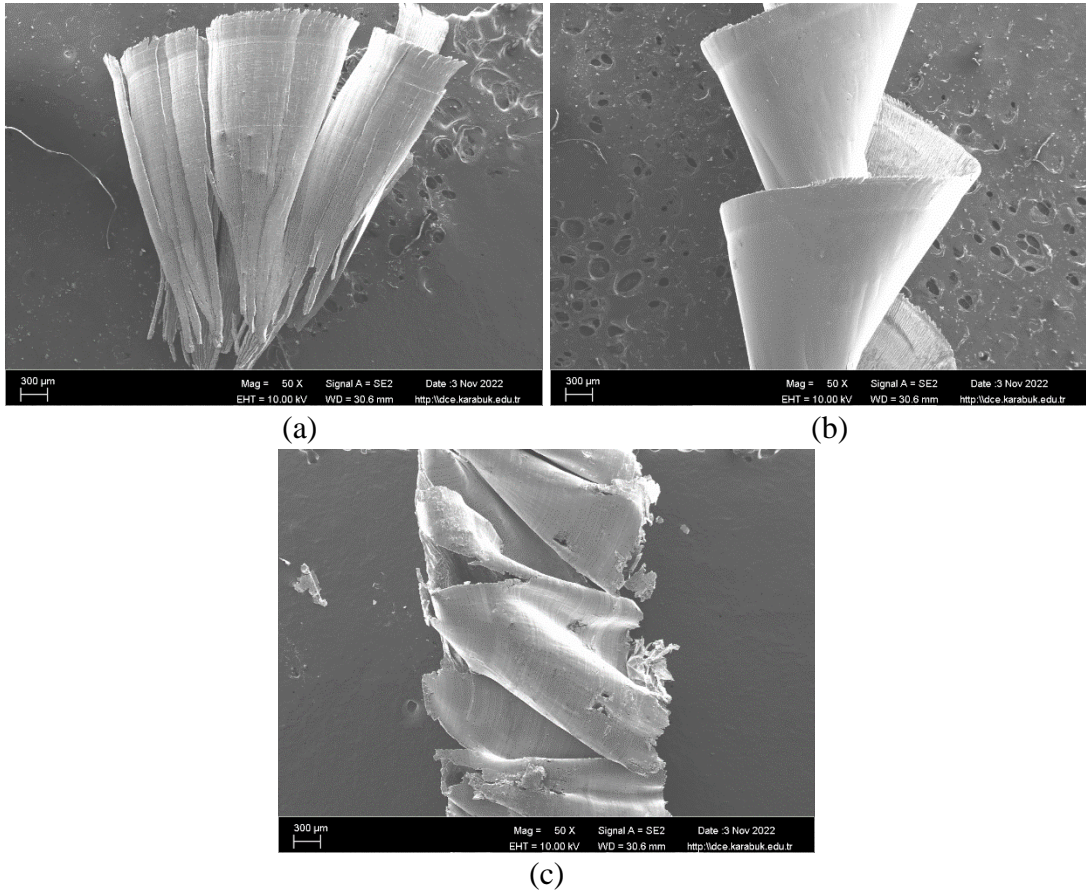


Şekil 6.38. a) Ekstrüze ZK60, b) ZK60+%5SiC, c) ZK60+%10SiC, d) ZK60+%5B<sub>4</sub>C, e) ZK60+%10B<sub>4</sub>C, f) ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C numunelerinin 250X büyütme delik iç yüzeyi SEM mikrografları.



### 6.7.3. Talaş Yapılarının SEM İncelemeleri

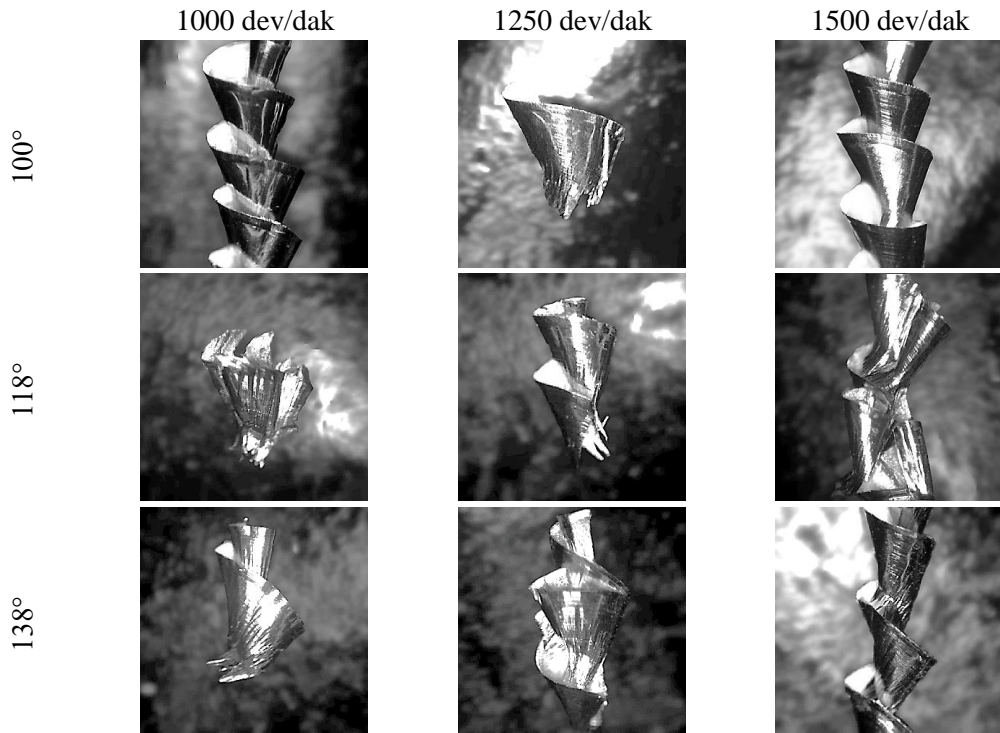
Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine delik delme testleri sırasında testere dişli kırık kısa talaş, testere dişli sürekli uzun talaş ve sürekli yığılma şeklinde 3 tip talaş yapısı oluşmuştur. Yapılan incelemelerde farklı parametrelerden kaynaklı olarak her numune de birden fazla talaş formu görülmüştür. Yapılan ayrıntılı talaş incelemelerinde testere dişli kırık kısa talaş formu periyodik olmayan bir delik delme işlemini belirtirken testere dişli sürekli uzun talaş formu periyodik bir delik delme işlemini ile ilgilidir. Sürekli yığılma şeklinde gerçekleşen talaş tipi ise periyodik olmayan ve yüksek gerilme yığılmalarının oluştuğunu ifade eder. Delik delme testleri sırasında oluşan 3 tip talaşın SEM görüntüleri Şekil 6.39 'da sunulmuştur.



Şekil 6.39. Delik delme testleri sırasında oluşan talaş tipleri: a) testere dişli kırık kısa talaş, b) testere dişli sürekli uzun talaş, c) sürekli talaş yığılması.

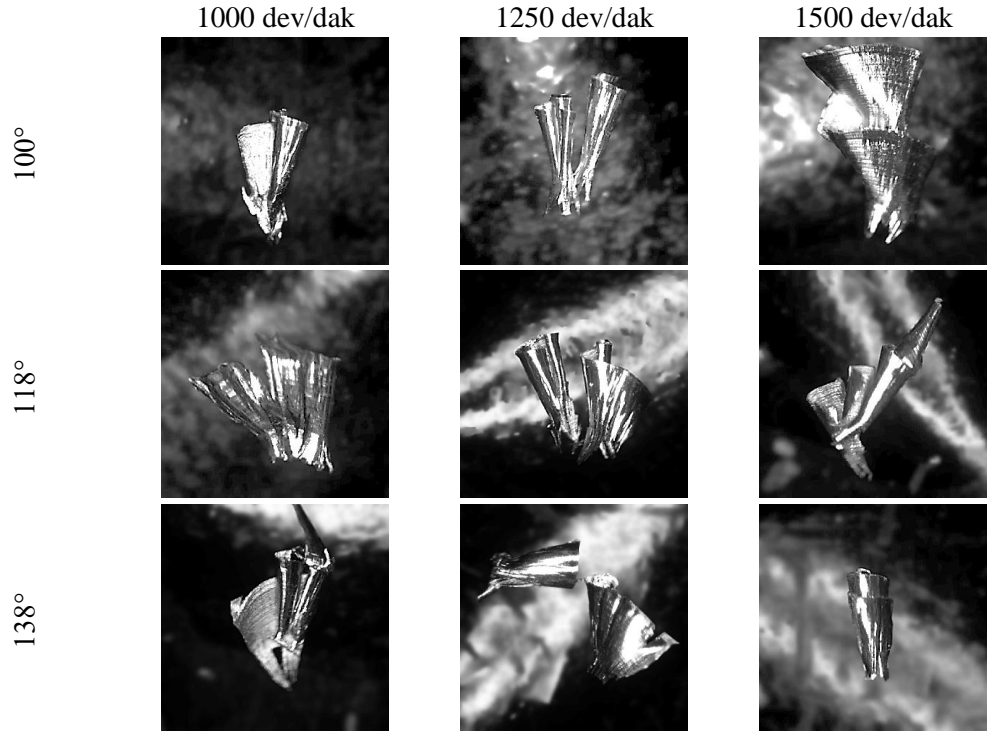
Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerine uygulanan delik delme işlemleri farklı parametrelerden kaynaklı olarak bir numune için birden fazla talaş formunun

oluşmasına sebep olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda tüm talaş formlarının optik mikroskop görüntüleri kaydedilmiştir. ZK60 alaşımının farklı matkap uç açısı ve devir sayısına göre oluşan talaş formları Şekil 6.40'ta sunulmuştur. Sunulan görüntülerde ZK60 alaşımı 100° uç açısında testere dişli sürekli uzun talaş formu oluşturmaya eğilimliken 1250 dev/dak delme parametresinde testere dişli kırık kısa talaş formu oluşturma eğilimi göstermektedir. Bu durum ekstrüze ZK60 alaşımının delik delme testlerinde gerçekleşen birim malzeme deformasyonu sırasında iş parçasının periyodik yüklere kısmen maruz kaldığını göstermektedir.

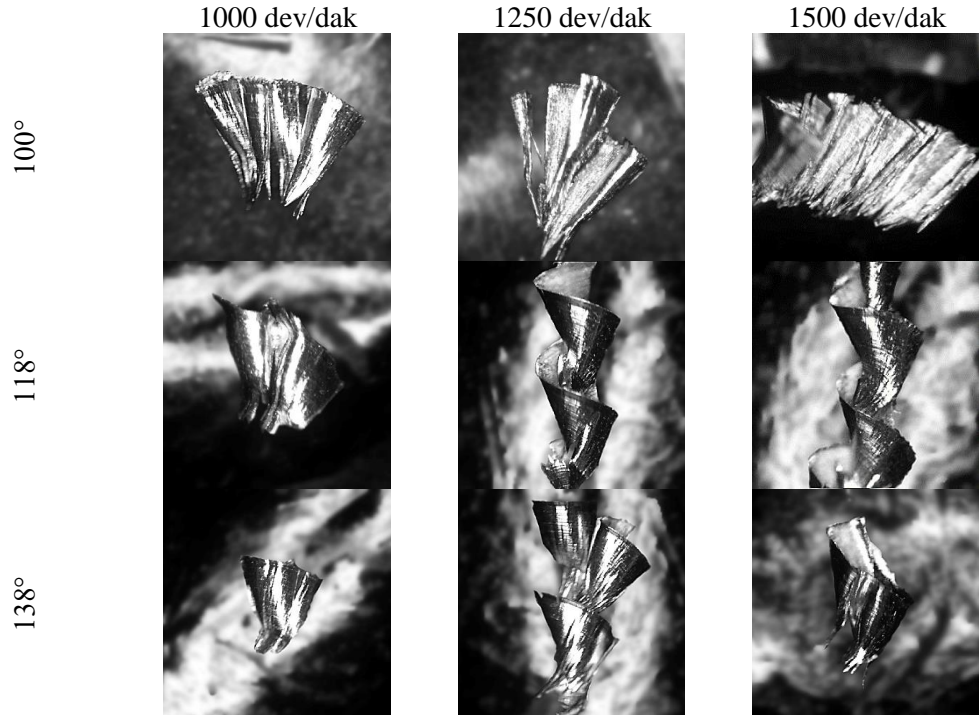


Şekil 6.40. ZK60 alaşımının farklı parametrelerdeki talaş formları.

ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinin her ikisinin de testere dişli kırık kısa talaş formu oluşturma eğiliminde olduğu belirlenmiştir ve talaş görüntüleri sırasıyla Şekil 6.41 ve Şekil 6.42'de sunulmuştur. Ancak ZK60+%10SiC kompozitinde 100° uç açısı 1500 dev/dak parametreleri sürekli talaş yığılmasına neden olmuştur. ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinin genel olarak testere dişli kırık kısa talaş formunu oluşturmaları delik delme testlerinde gerçekleşen birim malzeme deformasyonu sırasında iş parçasının periyodik yüklere maruz kalmadığını ve malzemenin sünek olduğunu göstermektedir.



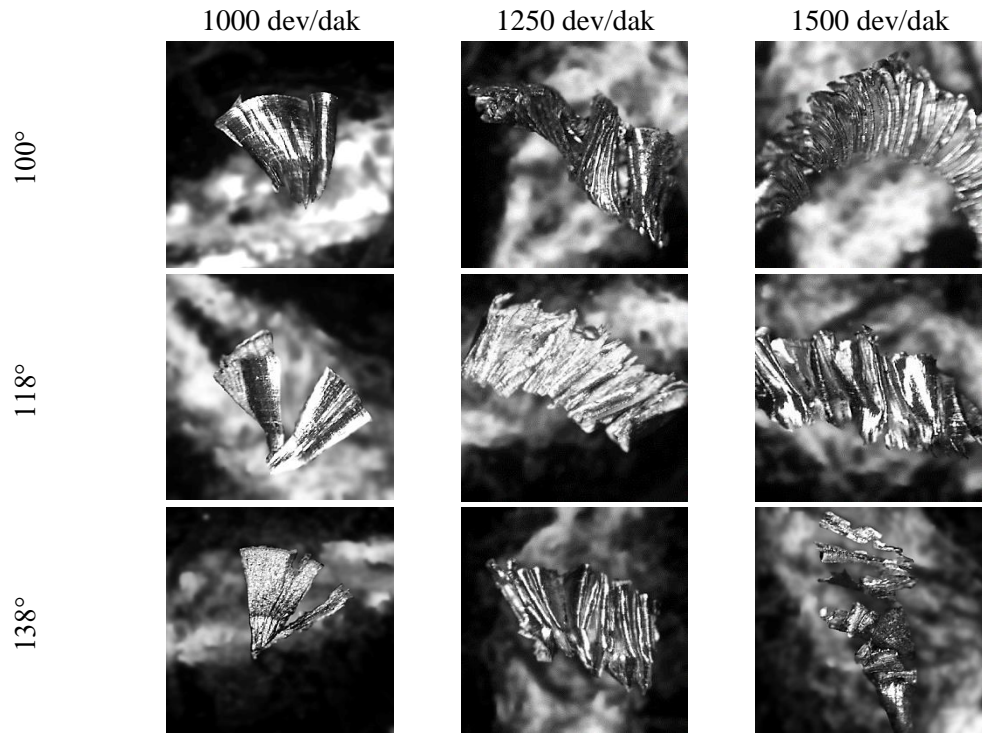
Şekil 6.41 ZK60+%5SiC kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.



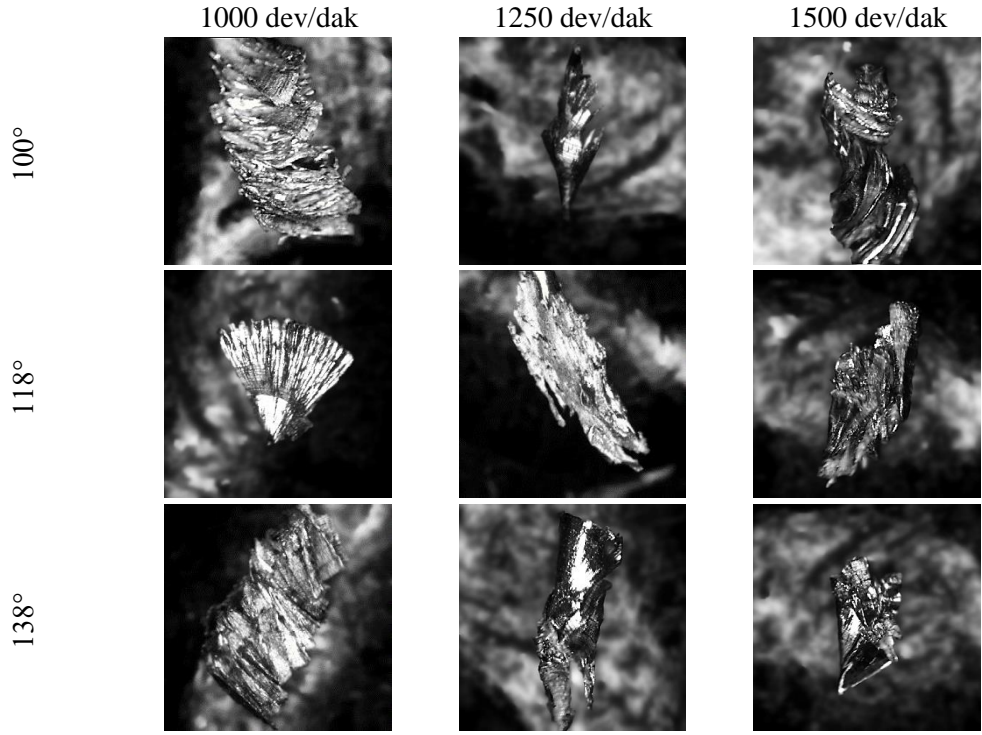
Şekil 6.42. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.

ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinin her ikisinin de sürekli yığılma şeklinde talaş oluşturma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda bu talaş formunun çok yüksek delme sıcaklığı sonucunda oluşan malzeme yumuşaması sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca meydana gelen malzeme yumuşaması matkap yüzeyine tutunması sonucunda periyodik olmayan delme kuvvetlerine sebebiyet verdiği düşünülmektedir. ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinin farklı parametrelerde oluşan talaş formlarının mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.43 ve 6.44 'te sunulmuştur.

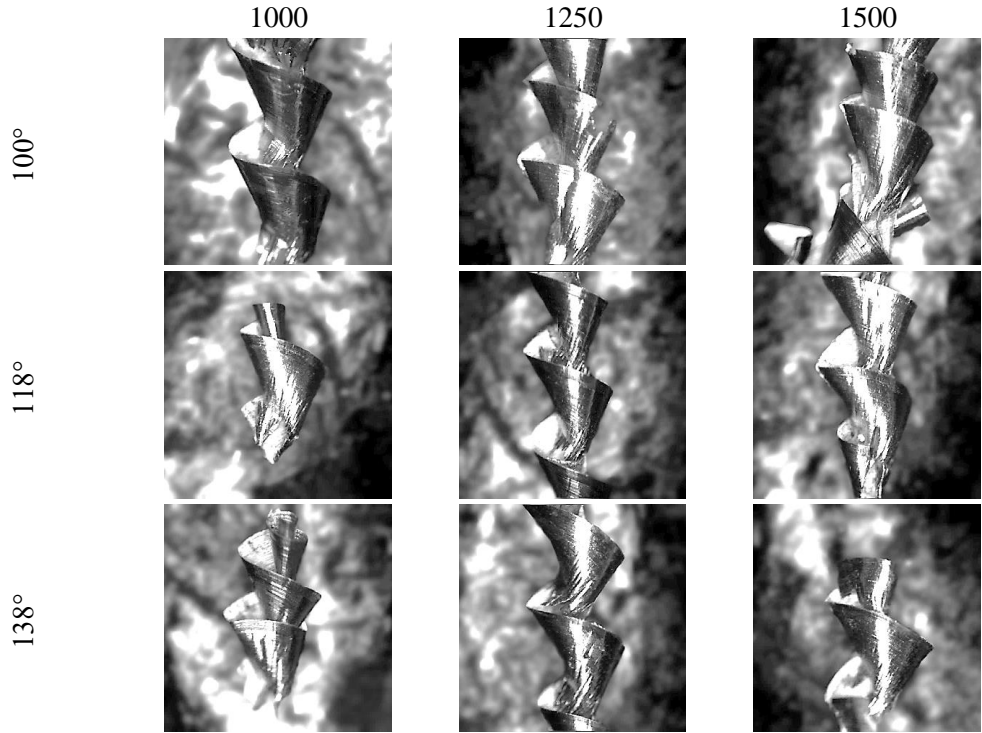
Son olarak, incelemelerde ZK60+5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin tüm delme parametrelerinde testere dişli sürekli uzun talaş formunu oluşturma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir ve talaşların mikroskop görüntüleri Şekil 6.45'te sunulmuştur. ZK60+5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin talaş formlarının bu şekilde olması delik delme sırasında gerilme yığılmalarının olmadığını ve periyodik bir delme kuvvetlerinin oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6.43. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.



Şekil 6.44. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.



Şekil 6.45. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı parametrelerdeki talaş formları.

## 6.8. DELİK DELME SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI

### 6.8.1. Johnson-Cook ve Ductile Damage Sonuçları

Sonlu elemanlar analizleri tamamen simüle edilebilmesi için öncelikle ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin malzeme özelliklerini tanımlamak Johnson-Cook malzeme modeli ve Ductile Damage (sünek hasar) modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.18 'de, Ductile Damage hesaplamaları sonucunda elde edilen veriler ise Çizelge 6.19 'da listelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalar sırasında hesaplanan yoğunluk değerleri ve sürtünme katsayıları da malzeme modeli modelini oluşturmada kullanılmıştır.

Çizelge 6.18. Johnson-Cook hesabı sonuçları.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Gerinme Sertleşmesi (MPa)	Gerinim Sertleşmesi Katsayısı	Gerinim Hızı Katsayısı
	A	B	n	C
ZK60	103,56	647,29	0,289	0,012
ZK60+%5SiC	110,89	656,75	0,324	0,012
ZK60+%10SiC	132,97	708,60	0,324	0,012
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	126,39	943,63	0,287	0,012
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	140,51	678,74	0,287	0,012
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	120,18	890,64	0,290	0,012

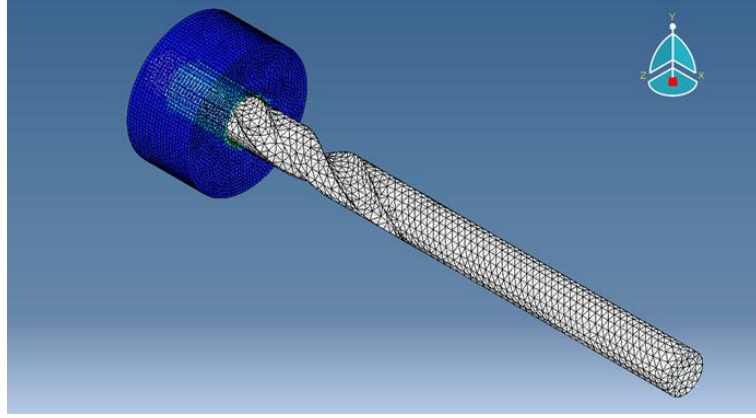
Çizelge 6.19. Ductile Damage hesap sonuçları.

Malzeme İçeriği	Kırılma Gerinimi	Gerilme Üç Eksenliliği	Gerinme Hızı (s <sup>-1</sup> )
ZK60	0,1514	0,3216	6x10 <sup>-4</sup>
ZK60+%5SiC	0,1957	0,3183	6x10 <sup>-4</sup>
ZK60+%10SiC	0,1767	0,3298	6x10 <sup>-4</sup>
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	0,1865	0,3266	6x10 <sup>-4</sup>
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	0,1797	0,3293	6x10 <sup>-4</sup>
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	0,1809	0,3274	6x10 <sup>-4</sup>

### 6.8.2. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

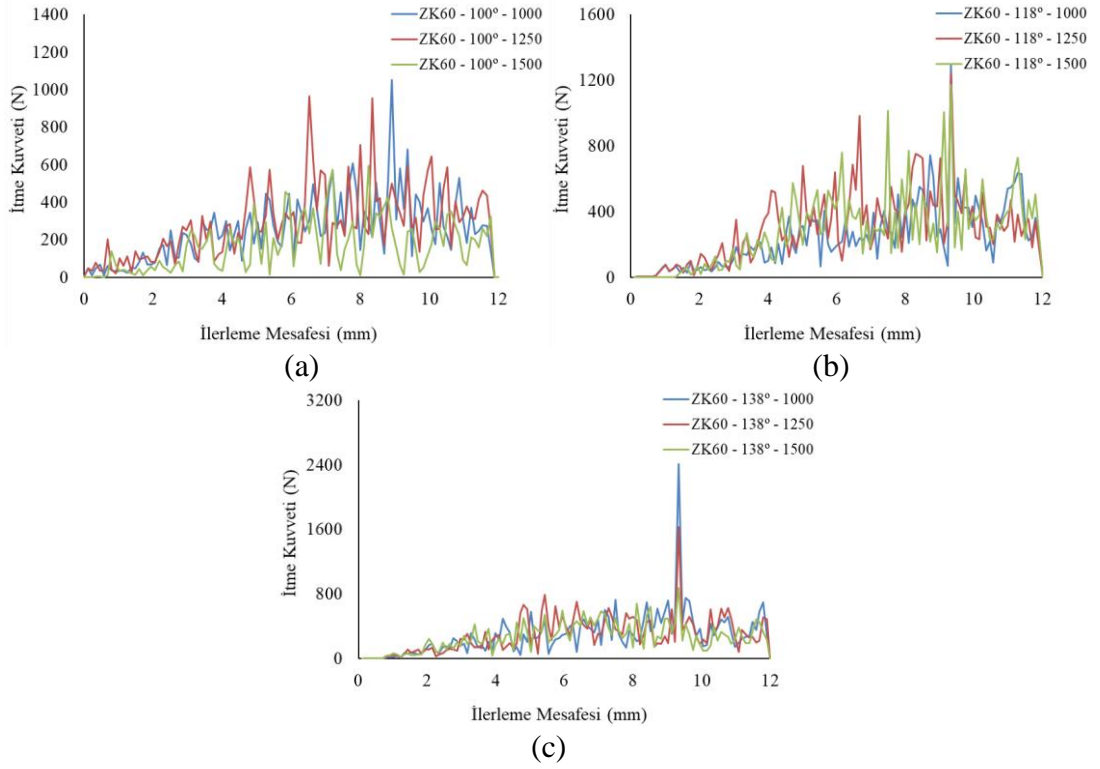
Bu çalışmada, üretilen ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin delme işlenebilirliği kapasitelerini bilgisayar ortamında, DS Simulia ABAQUS paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi (SEA) yapılmıştır. Analizler sonucunda

modellenen numunelerin reaksiyon kuvvetleri sonucu oluşan matkapın itme kuvveti ( $N$ ) ve delme momenti ( $N.mm$ ) verileri kaydedilmiştir. Veriler numune yüzeyinden itibaren matkap diğer yüzeyden çıkacak şekilde 12 mm ilerleme mesafesine ( $mm$ ) göre kaydedilmiştir. Tüm numunelere dokuz adet toplamda 54 test uygulanmıştır. Örnek sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 6.46 'da gösterilmektedir.

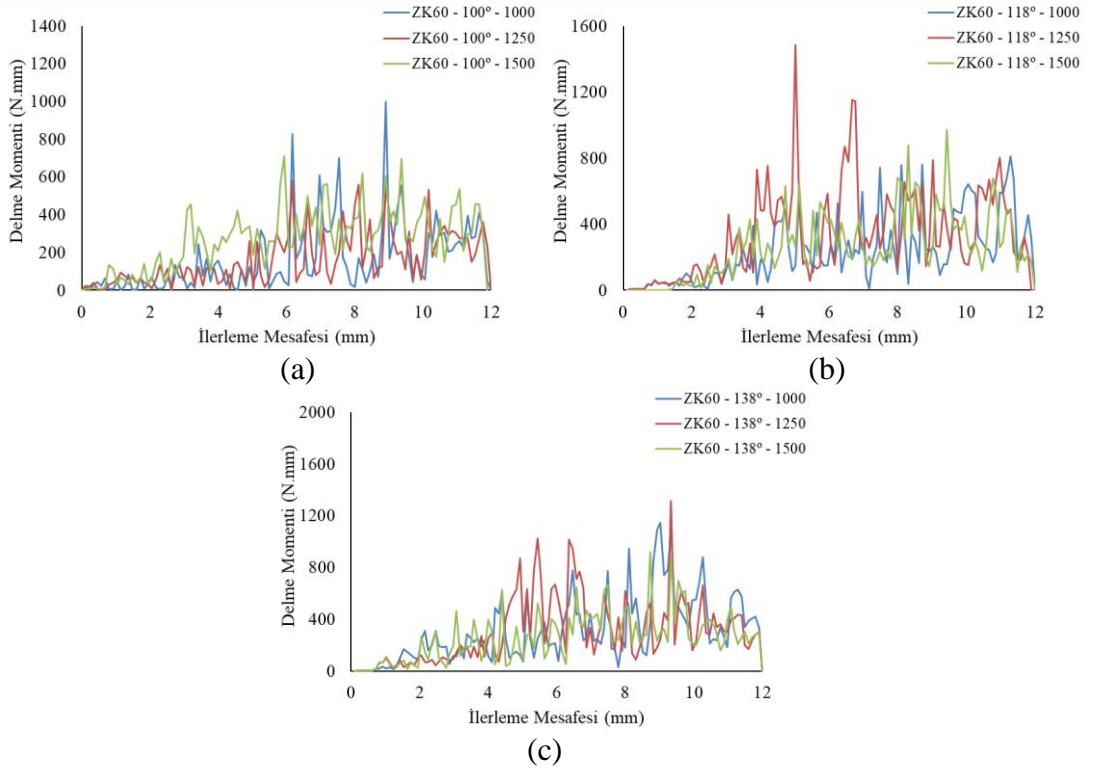


Şekil 6.46. Sonuçlandırılmış sonlu elemanlar analizi örnek test.

ZK60 alaşımının ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6. 'de listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.47'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.48'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60 alaşımına uç açısı  $100^\circ$  olan matkap ile delik delinirken  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında diğer devir sayılarına göre en yüksek ortalama itme kuvveti  $284,63 N$  ve ortalama delme momenti  $176,94 N.mm$  değerine ulaşılmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde delme sıcaklığı  $28-32^\circ C$  aralığında gerçekleşmiştir. İkinci olarak, uç açısı  $118^\circ$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti  $1250 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $290,17 N$  iken ortalama delme momenti değeri  $1500 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $290,37 N.mm$  çıkmıştır. Bu test sırasında maksimum delme sıcaklığı  $32,64^\circ C$ 'ye ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı  $138^\circ$  olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında sırasıyla  $291,94 N$  ve  $309,12 N.mm$  çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı  $1000 \text{ dev/dak}$  devir sayısında  $36,84^\circ C$  olarak ölçülmüştür. ZK60 alaşımına uygulanan 9 adet sonlu elemanlar analizleri sonucunda devir sayısı değeri arttıkça itme kuvveti ve delme momenti değerlerinin genellikle düşme eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.47. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .



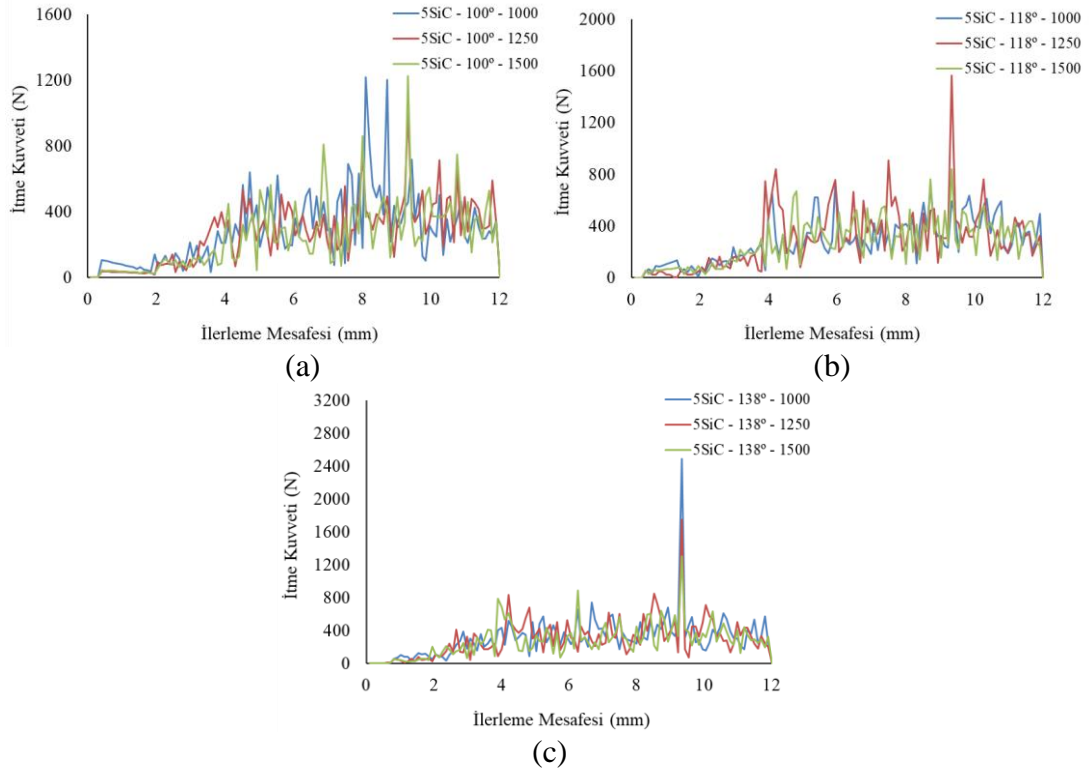
Şekil 6.48. ZK60 alaşımının farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138° .



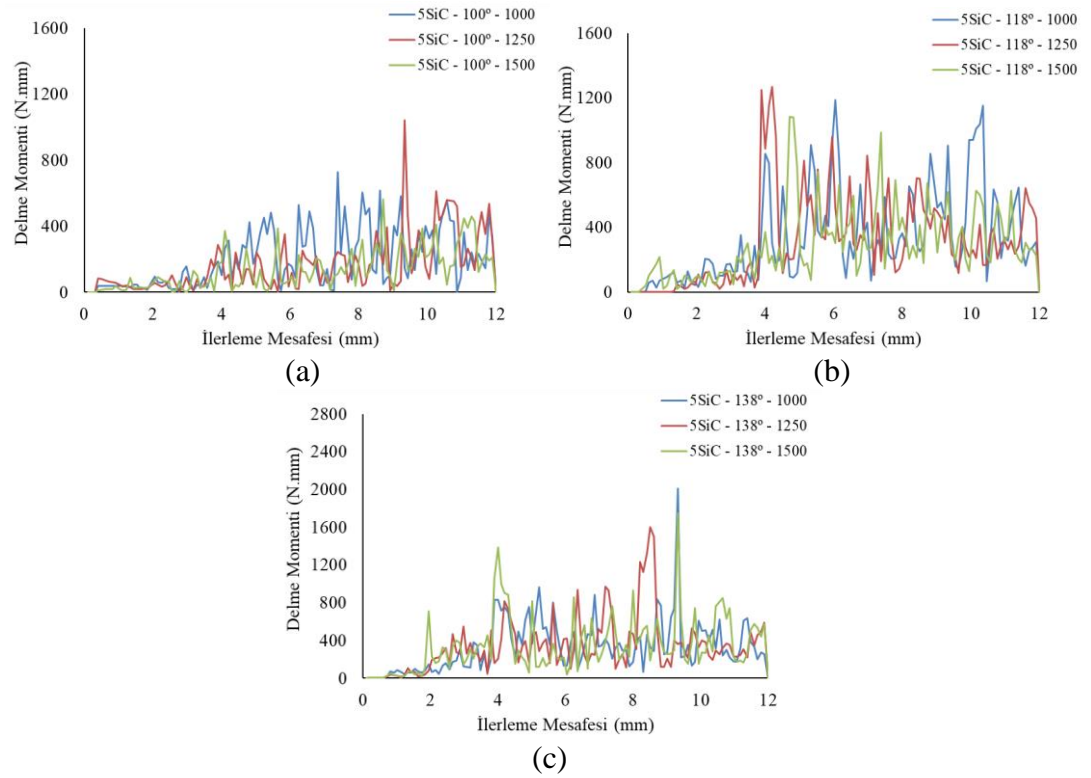
Çizelge 6.20. ZK60 alaşımının SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60	100	1000	284,63	176,94	32,61
		1250	267,22	163,33	31,33
		1500	246,81	133,79	28,80
	118	1000	276,97	144,27	29,20
		1250	290,17	173,41	32,64
		1500	267,36	290,37	34,05
	138	1000	291,94	309,12	36,84
		1250	291,02	305,71	34,70
		1500	266,56	260,09	35,09

ZK60+%5SiC kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.21 'de listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.49'da ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.50 'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%5SiC kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1250 *dev/dak* devir sayısında 279,94 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında 265,02 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 35,85°C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1250 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 88,89 *N* ve 333,08 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 45,01 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1000 *dev/dak* devir sayısında 308,04 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında 346,66 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 ve 1500 *dev/dak* devir sayısında 48,9 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5SiC kompozitine uygulanan 9 adet SEA sonucunda, devir sayısı değeri arttıkça, itme kuvvetinin düştüğü, delme momentinin arttığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 138° uç açısında 1250 ve 1500 devir sayısında 48,9°C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.49. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.

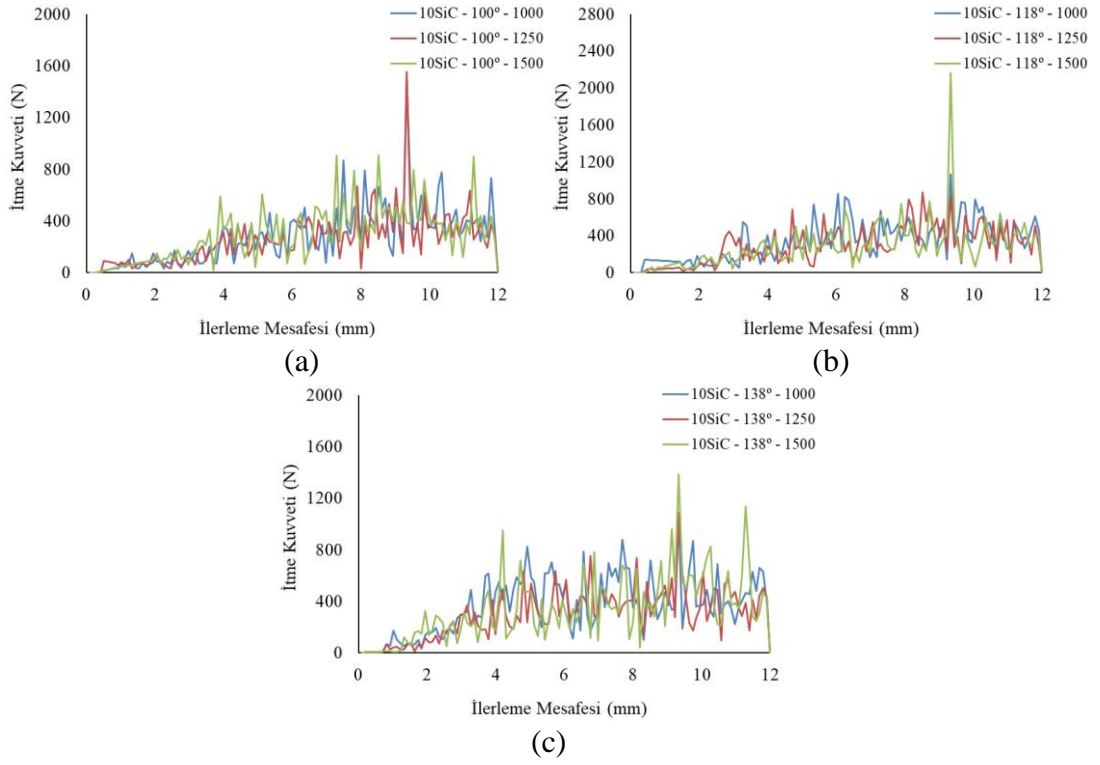


Şekil 6.50. ZK60+%5SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.

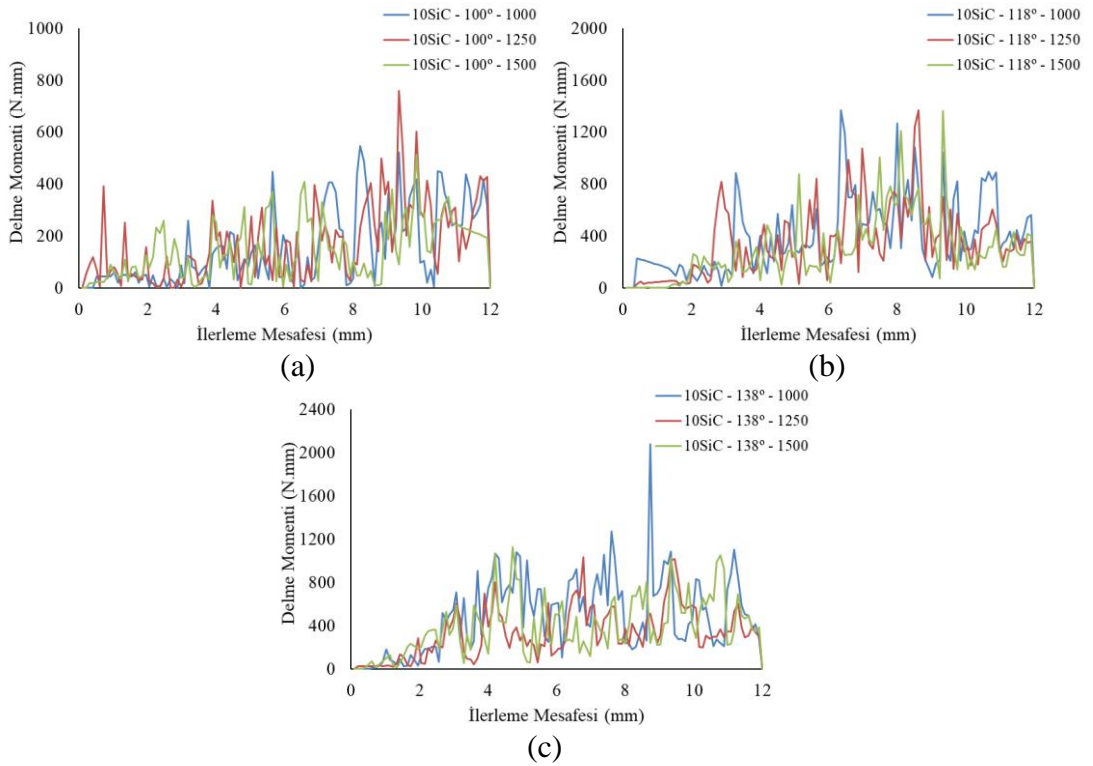
Çizelge 6.21. ZK60+%5SiC kompozitinin SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%5SiC	100	1000	249,59	159,80	41,05
		1250	279,94	161,63	41,22
		1500	164,74	265,02	45,85
	118	1000	241,55	237,83	43,96
		1250	296,62	333,08	44,90
		1500	281,40	263,49	45,01
	138	1000	308,04	331,08	47,99
		1250	292,61	340,47	48,96
		1500	275,36	346,66	48,94

ZK60+%10SiC kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.22 'de listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.51'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.52 'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%10SiC kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1500 *dev/dak* devir sayısında 288,16 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1250 *dev/dak* devir sayısında 173,10 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 42,46°C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 335,62 *N* ve 387,17 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 51,76 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve delme momenti 1000 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 363,62 *N* ve 489,54 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 52,15 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%10SiC kompozitine uygulanan 9 adet SEA sonucunda, ZK60+%5SiC kompoziti ile paralel olarak devir sayısı değeri arttıkça, itme kuvvetinin düştüğü, delme momentinin arttığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 138° uç açısında 1250 devir sayısında 52,15°C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.51. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

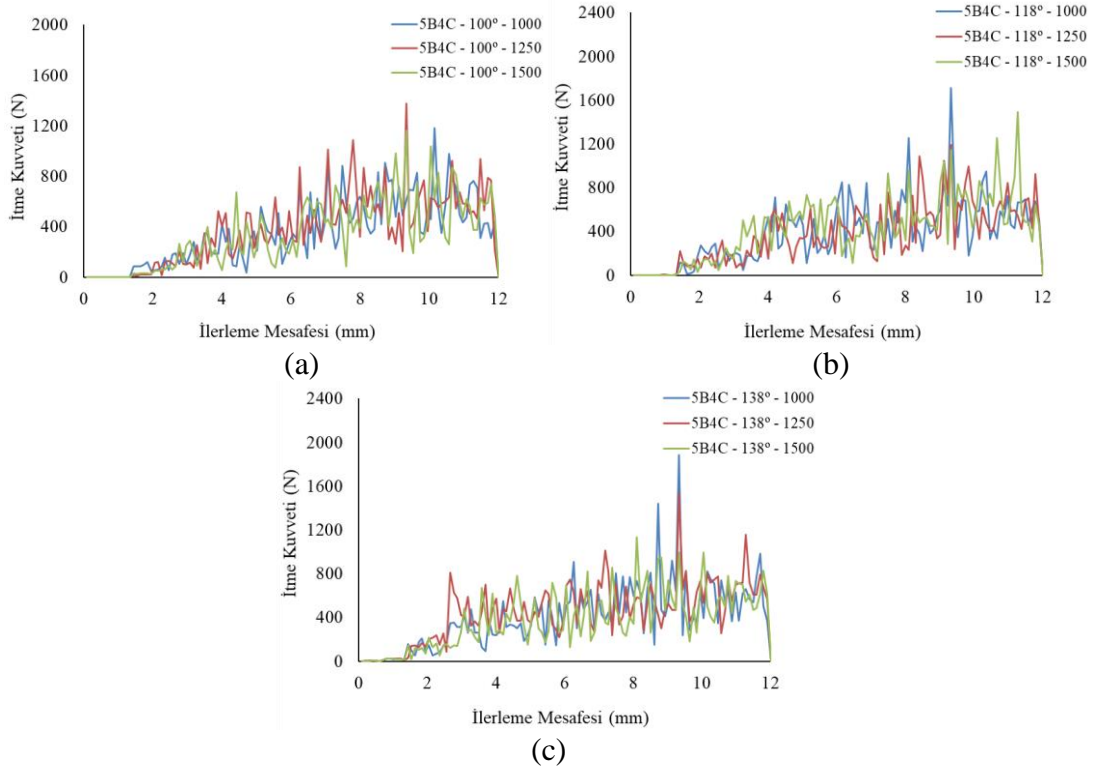


Şekil 6.52. ZK60+%10SiC kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

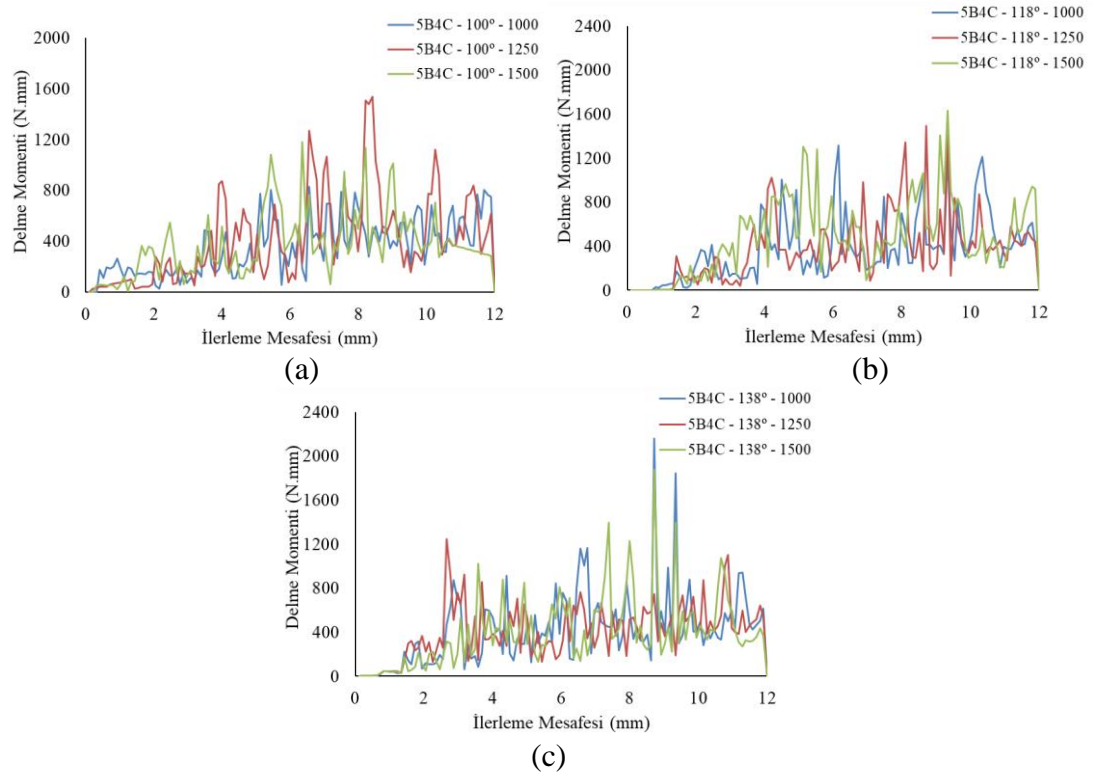
Çizelge 6.22. ZK60+%10SiC kompozitinin SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı ( $\epsilon$ )	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
ZK60+%10SiC	100	1000	277.02	157.45	40.99
		1250	251.21	173.10	42.46
		1500	288.16	166.37	41.49
	118	1000	335.62	387.17	51.76
		1250	294.67	349.77	49.03
		1500	284.50	294.31	45.71
	138	1000	363.62	489.54	51.01
		1250	299.05	328.10	52.15
		1500	337.74	389.91	41.63

ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.23 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.53'te ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.54 'te sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1250 *dev/dak* devir sayısında 371,20 *N* ve 414,26 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 53,08 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 422,01 *N* ve 480,63 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 53,65 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1250 *dev/dak* devir sayısında 447,62 *N* ve ortalama delme momenti 1000 *dev/dak* devir sayısında 418,74 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 53,65 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet SEA sonucunda, devir sayısı değeri arttıkça, itme kuvvetinin ve delme momentinin önce artıp sonra azaldığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 118° uç açısında 1500 devir sayısında 53,65 °C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.53. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

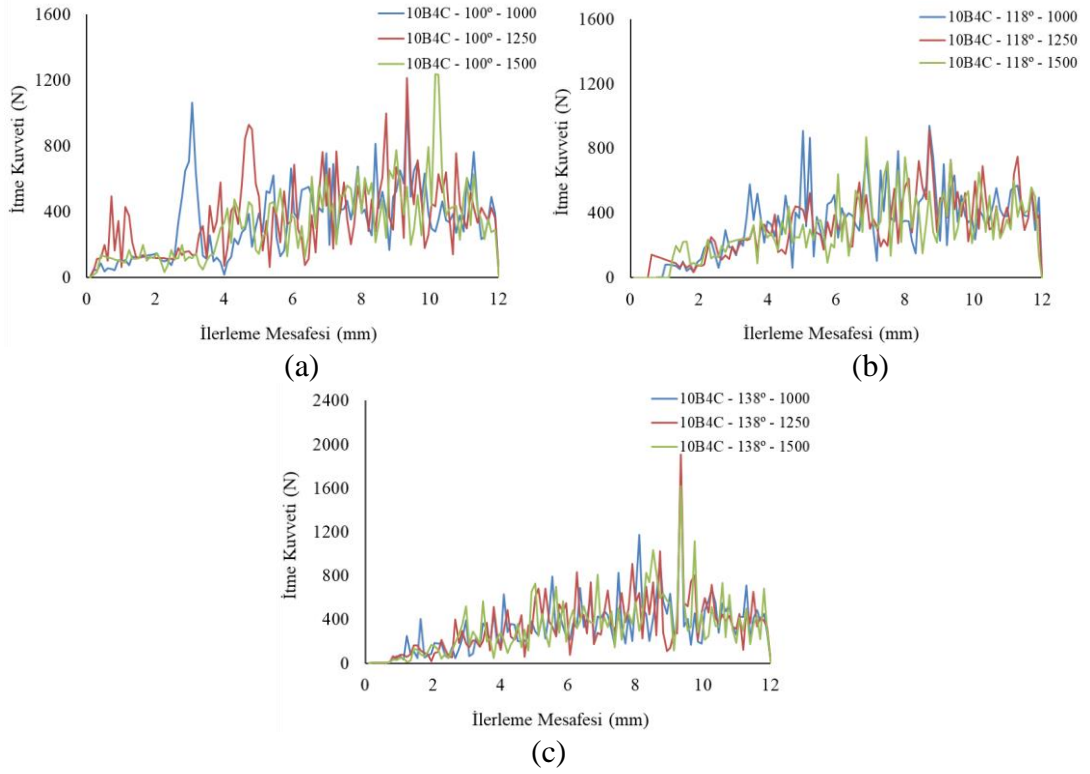


Şekil 6.54. ZK60+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

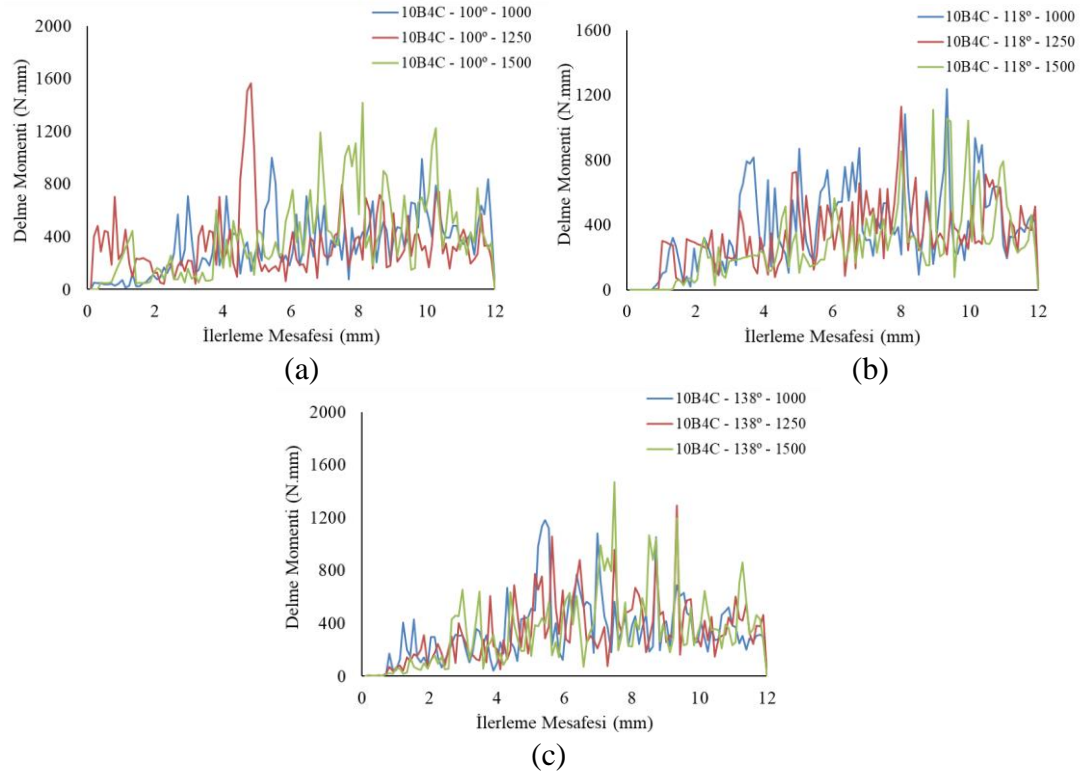
Çizelge 6.23. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	100	1000	350,73	351,53	48,92
		1250	371,20	414,26	53,08
		1500	340,72	367,61	50,12
	118	1000	382,12	372,09	50,37
		1250	369,98	369,95	49,78
		1500	422,01	480,63	53,65
	138	1000	401,03	418,74	52,49
		1250	447,62	407,73	53,11
		1500	382,59	399,37	49,05

ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.24 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.55'te ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.56 'da sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1250 *dev/dak* devir sayısında 356,72 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında 386,10 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 50,62 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1000 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 330,00 *N* ve 381,30 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 51,66 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti 1250 *dev/dak* devir sayısında 341,32 *N* iken ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında 344,68 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1000 *dev/dak* devir sayısında 48,70 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet SEA sonucunda, ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompoziti ile benzer olarak devir sayısı değeri arttıkça, itme kuvvetinin ve delme momentinin önce artıp sonra azaldığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 118° uç açısında 1000 devir sayısında 51,66 °C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.55. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.



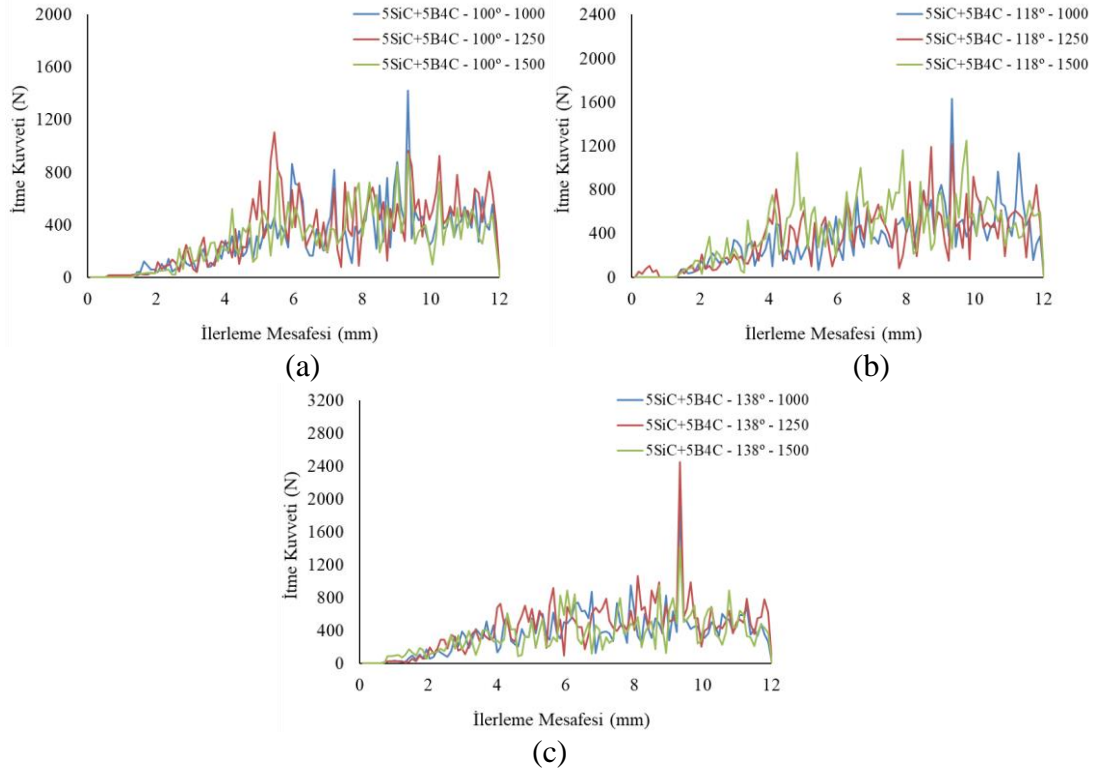
Şekil 6.56. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°, c) 138°.



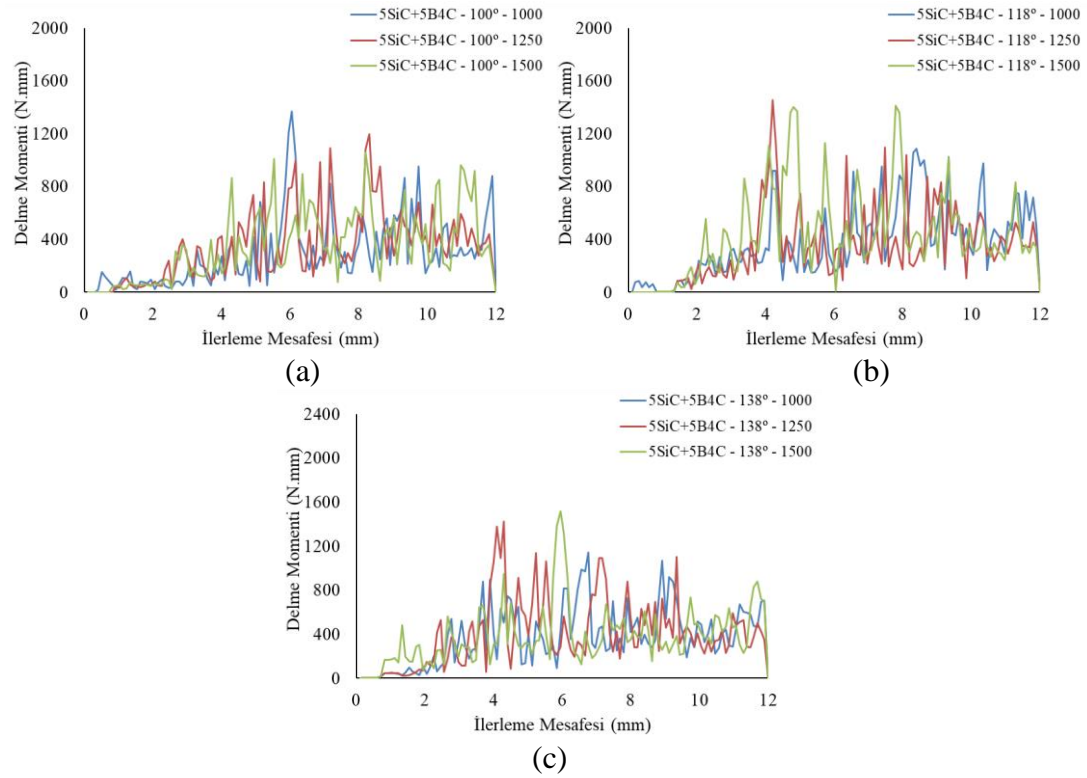
Çizelge 6.24. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinin SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	100	1000	338,62	341,25	49,06
		1250	356,72	343,23	49,97
		1500	323,40	386,10	50,62
	118	1000	330,00	381,30	51,66
		1250	308,32	332,90	48,57
		1500	294,56	280,00	47,08
	138	1000	326,78	340,98	48,70
		1250	341,32	332,94	47,74
		1500	330,12	344,68	47,63

ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin ortalama itme kuvveti, ortalama delme momenti ve maksimum delme sıcaklığı değerleri Çizelge 6.25 'te listelenmiştir. Ayrıca itme kuvveti-ilerleme mesafesi Şekil 6.57'de ve delme momenti-ilerleme mesafesi grafiği Şekil 6.58 'de sunulmuştur. İlk olarak, ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin uç açısı 100° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1250 *dev/dak* devir sayısında 345,79 *N* ve 349,70 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 38,88 °C olarak ölçülmüştür. İkinci olarak, uç açısı 118° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1500 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 420,26 *N* ve 433,23 *N.mm* çıkmıştır. Testler sırasında maksimum delme sıcaklığı 1500 *dev/dak* devir sayısında 40,96 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Son olarak, uç açısı 138° olan matkap ile delik delinirken en yüksek ortalama itme kuvveti ve ortalama delme momenti değeri 1250 *dev/dak* devir sayısında sırasıyla 426,50 *N* ve 400,08 *N.mm* çıkmıştır. Üç farklı devir sayısında yapılan testlerde ise maksimum delme sıcaklığı 1250 *dev/dak* devir sayısında 40,67 °C olarak ölçülmüştür. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitine uygulanan 9 adet SEA sonucunda, devir sayısı değeri arttıkça, itme kuvvetinin ve delme momentinin önce artıp sonra azaldığı ve maksimum delme sıcaklığı değerinin yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testler sırasında en yüksek sıcaklık 118° uç açısında 1500 devir sayısında 40,96 °C'dir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.57. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA itme kuvveti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.



Şekil 6.58. ZK60+%5SiC+%5B4C kompozitinin farklı uç açlarına göre SEA delme momenti değişim grafikleri: a) 100°, b) 118°,c) 138°.

Çizelge 6.25. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin SEA sonuçları.

Numune	Matkap Uç Açısı (ε)	Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama İtme Kuvveti (N)	Ortalama Delme Momenti (N.mm)	Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	100	1000	294,68	293,81	37,67
		1250	345,79	349,70	38,88
		1500	290,19	347,62	37,61
	118	1000	338,03	375,00	38,01
		1250	355,60	345,90	37,77
		1500	420,26	433,23	40,96
	138	1000	360,62	379,71	39,04
		1250	426,50	400,08	40,67
		1500	345,21	381,48	38,20

Yapılan delik delme sonlu elemanlar analizi (SEA) sonucunda ölçülen itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık parametreleri karşılaştırıldığında önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin 3 farklı matkap uç açısı ve 3 farklı devir sayısı değerleri sonucu elde edilen genel ortalama itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık ortalamaları Çizelge 6.26 'da sunulmuştur. Bu sonuçlara göre SiC takviye malzemelerinin matris içine ağırlıkça eklenme oranlarının itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık parametreleri değerlerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşı B<sub>4</sub>C takviyesinin matris içerisine eklenme oranı itme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık değerlerinde küçüğe sebep olmuştur. Ayrıca ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesinin eklenmesi delme sıcaklığını 1,5 kattan fazla arttırdı. Ek olarak ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesine ek SiC takviyesinin de eklenmesi B<sub>4</sub>C takviyesinin olumsuz özelliklerinin ortadan kalkmasına ve delik delme parametrelerinin normal seviyelere düşmesini sağlamış ve delme işlenebilirliğini geliştirmiştir.

Çizelge 6.26. SEA genel ortalama değerleri.

Numune	Genel İtme Kuvveti (N)	Genel Delme Momenti (N,mm)	Genel Maksimum Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60 alaşımı	275,85	217,45	32,80
ZK60+%5SiC	265,54	271,01	45,30
ZK60+%10SiC	303,51	303,97	46,25
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	385,33	397,99	51,20
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	327,76	342,60	49,00
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	352,99	367,39	38,75

### 6.8.3 Sonlu Elemanlar Analizi ve Delik Delme Testlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada ekstrüze ZK60 alaşımı ve ZK60 kompozitlerinin delme işlenebilirliğinin belirlene bilmesi için delik delme testleri ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda numunelerin reaksiyon kuvvetleri sonucu oluşan matkabın itme kuvveti, delme momenti ve delme sıcaklığı değerleri kaydedilip yorumlanmıştır.

Çizelge 6.27. Deneysel ve SEA delik delme sonuçları.

Numune	Deneysel İtme Kuvveti (N)	SEA İtme Kuvveti (N)	Deneysel Delme Momenti (N.mm)	SEA Delme Momenti (N.mm)	Deneysel Delme Sıcaklığı (°C)	SEA Delme Sıcaklığı (°C)
ZK60 alaşımı	72,65	275,85	204,40	217,45	39,19	32,80
ZK60+%5SiC	94,59	265,54	193,82	271,01	47,09	45,30
ZK60+%10SiC	127,79	303,51	238,40	303,97	55,37	46,25
ZK60+%5B <sub>4</sub> C	374,89	385,33	575,62	397,99	105,77	51,20
ZK60+%10B <sub>4</sub> C	824,11	327,76	904,50	342,60	116,47	49,00
ZK60+%5SiC+%5B <sub>4</sub> C	109,61	352,99	258,66	367,39	50,56	38,75

Ekstrüze ZK60 alaşımının SEA itme kuvveti değeri, deneysel itme kuvvetinin yaklaşık 4 katı çıkmıştır. Buna karşı SEA delme momenti ve sıcaklık değerleri ile deneysel delme momenti ve sıcaklık değerleri birbirlerine çok yakın değerde çıkmıştır (Çizelge 6.27). ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinde de durum benzerdir. İki kompozitinde SEA itme kuvvetleri ile deneysel delme testleri arasında yaklaşık 3 kat fark varken delme momenti ve sıcaklık değerleri neredeyse aynıdır. ZK60 alaşımı ve ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinde deneysel delik delme testlerinde düşük itme kuvvetleri değerlerinin, üretilen numunelerin basma testlerinde yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bahsi geçen 3 numuneler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, ekstrüzyon işlemi sonucunda tane küçülmesi ve yeniden kristalleşme etkilerinin numunelerin yüksek oranda dayanım, süneklik ve delme işlenebilirliği kapasitelerinde artış sağlanmıştır.

ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin Çizelge 6.27 'deki değerleri incelendiğinde deneysel itme kuvveti ile SEA itme kuvveti ortalama değerleri arasındaki fark %2,5'tir. Buna

karşı deneysel delme momenti, SEA delme momentinden 1,5 kat; deneysel delik delme testlerinde oluşan delme sıcaklığı, SEA delik delme sıcaklığından 2 kat yüksek değerde çıkmıştır. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinden farklı olarak, ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozit numunesi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda deneysel itme kuvveti değeri SEA itme kuvveti değerinden 2,5 kat; deneysel delme momenti değeri SEA delme momenti değerinden 2,6 kat yüksek değerde çıkmıştır. Ek olarak ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinde de deneysel delme sıcaklığı değeri SEA delme sıcaklığı değerinden 2,5 kattan fazla artış göstermiştir. ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinin deneysel delik delme verilerinin yüksek çıkmasının ana nedenlerinin B<sub>4</sub>C takviyesinin yüksek sertlik değeri ve üretim esnasında oluşan yüksek kararlılığa sahip intermetalik bileşiklerin matris içerisinde yayılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinde ise delik delme çalışmalarındaki sonuçlar ZK60 alaşımı ile benzerdir. Bu kompozitte deneysel itme kuvveti değeri SEA itme kuvveti değerinden 3,2 kat daha düşüktür. Ayrıca SEA delme momenti değeri deneysel delme momenti değerinden 1,42 kat daha yüksektir. Ek olarak deneysel delme sıcaklığı, SEA delme sıcaklığından 12° C yüksek çıkmıştır. Yapılan çalışmalar, ZK60 alaşımına B<sub>4</sub>C takviyesine ek olarak SiC takviyesinin eklenmesi B<sub>4</sub>C takviyesi nedeniyle oluşan yüksek sıcaklık ve malzeme yumuşaması etkilerini gidermiştir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, ZK60 alaşımına farklı oranlarda SiC, B<sub>4</sub>C ve SiC+B<sub>4</sub>C partikül takviyeleri eklenerek fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ileri malzeme standartlarına uygun kompozit malzemeler üretilmesi ve üretilen bu malzemelerin delme işlenebilirliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. ZK60 matrisli kompozitlerin üretim proseslerinde, yarı katı sıcaklıkta karıştırmalı döküm yöntemi, homojenleştirme ve ekstrüzyon prosedürleri uygulanmıştır. Üretimi tamamlanan ekstrüze ZK60 alaşımı ve kompozitlerinin mikroyapı karakterizasyonu, mekanik özellikleri, korozyon özellikleri ve delme işlenebilirliklerinin ayrıntılı olarak araştırıldığı bu çalışma sonucunda;

1. Yapılan testler sonucunda, üretilen numunelerin yoğunlukları SiC ve B<sub>4</sub>C takviyelerinin yoğunluklarına bağlı olarak yaklaşık %3 artmıştır.
2. Ayrıntılı XRD analizi, MgZn<sub>2</sub> ve Zn<sub>2</sub>Zr intermetaliklerinin tüm kompozitlerde mevcut olduğunu göstermektedir.
3. ZK60+%5B<sub>4</sub>C ve ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitlerinde ise MgB<sub>2</sub>, MgC<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetaliklerinin oluştuğu ve sadece B<sub>4</sub>C partikülü etrafında kümelenildiği görülmüştür. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitte ise Mg<sub>2</sub>Si, MgB<sub>2</sub>, MgC<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>C<sub>3</sub> intermetaliklerinin çoğunluğunun ana matris içinde dağıldığı, bir kısmının da SiC ve B<sub>4</sub>C takviye partikülleri etrafında kümelenildiği görülmektedir. B<sub>4</sub>C partikülü etrafındaki kümelenme, SiC partikülü etrafındaki kümelenmeden daha fazladır. Bunun nedeni, B elementinin Si elementinden daha yüksek reaksiyon eğilimine sahip olmasıdır.

4. Mikro yapı karakterizasyonu sonuçlarına göre, ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC takviyeli kompozitlerde  $Mg_2Si$ ,  $MgC_2$ ,  $Mg_2C_3$  intermetaliklerinin ana matriste homojen olarak dağıldığı görülmüştür.
5. Ekstrüze edilmemiş ZK60 alaşımının tane boyutu 251  $\mu m$  iken, ekstrüze ZK60 alaşımının tane boyutu 8  $\mu m$ 'ye düşmüştür. Ekstrüzyon işlemi uygulanan ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozit numunelerinin ASTM E112 standardına göre ortalama tane boyutları sırasıyla 5, 5, 3, 3 ve 6  $\mu m$ 'dir.
6. Ekstrüzyon işlemi yüksek tane sınırı gerilmeleri ve dislokasyon yığılmaları sebebiyle ZK60 alaşımının korozyon hızını arttırmıştır. B<sub>4</sub>C takviyesinin oluşturduğu intermetalik fazlar Mg-B<sub>4</sub>C fazları arasında gelişerek korozyon direncini düşürmüştür.
7. ZK60 matrisinde, SiC takviyesinin korozyon direncini arttırmadaki etkisi B<sub>4</sub>C takviyesine göre daha fazladır.
8. Yapılan korozyon yüzeyi görüntülemeleri sonrası SiC ilaveli kompozitlerde korozyon çukurları oluşurken B<sub>4</sub>C ilaveli kompozitlerde yüksek korozyon hasar yüzeyi oluşmuştur.
9. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin korozyon testi sonuçlarına göre SiC takviyesi, B<sub>4</sub>C takviyesinin ZK60 matrisindeki olumsuz etkileri giderdiği görülmüştür.
10. Sertlik testlerinde, ekstrüze ZK60 alaşımının sertlik değeri 67.87 HB ölçülmüştür. Güçlendirilmiş ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin sertlik değerleri sırasıyla 73.92, 85.29, 96.41, 115.30 ve 97.31 HB olarak ölçüldü. Buna sonuçlara göre ZK60 alaşımının sertlik değeri maksimum %69,9 artış göstermiştir. Yapılan sertlik testleri sonucunda B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin sertlik artışına etkisi SiC takviyesinden daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

11. ZK60 alaşımının maksimum basma gerilmesi 287,23 MPa olarak hesaplanmıştır. En yüksek basma gerilmesi 378,00 MPa olarak ZK60+%10SiC takviyeli kompozitte görülmektedir. Ekstrüze ZK60 alaşımının basma mukavemeti ile karşılaştırıldığında, ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin basma dayanımları sırasıyla %18,86, %31,25, %23,15 ve %20,41 artmıştır.
12. ZK60 alaşımı ve ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C'nin aşınma kütle kayıplarına göre hesaplanan aşınma oranları kompozitler sırasıyla  $2,39 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ ,  $2,29 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ ,  $2,17 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ ,  $2,15 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ ,  $1,71 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ ,  $1,90 \times 10^{-5} \text{ g/m}$ 'dir. Bu değerlere göre, yapılan takviyeler sonucunda ZK60 alaşımının aşınma kütle kaybı %28 azaltılmıştır.
13. ZK60 alaşımının sürtünme katsayısı 0,1742 olarak hesaplanmış ve incelenen malzemeler arasında sürtünme katsayısı en yüksek olan malzeme olduğu görülmüştür. Diğer takviyeli ZK60+%5SiC, ZK60+10%SiC, ZK60+5%B<sub>4</sub>C, ZK60+10%B<sub>4</sub>C ve ZK60+5%SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin sürtünme katsayıları sırasıyla (0,1039), (0,1004), (0,1032), (0,1256) ve (0,1238) olarak hesaplanmıştır. Aşınma testleri sırasında kopan partiküller yağlayıcı etkilere neden olmuştur.
14. ZK60 alaşımının aşınma yüzeylerinde abrasif ve adhezif aşınma mekanizmalarına rastlanmıştır ve aşınma mekanizmalarının çoğunluğunun abrasif olduğu gözlemlenmiştir. ZK60+%5SiC, ZK60+%10SiC, ZK60+%5B<sub>4</sub>C, ZK60+%10B<sub>4</sub>C ve ZK60+5%SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitlerinin aşınma mekanizmalarında da abrasif ve adhezif yüzeylere rastlanmıştır ancak aşınma mekanizmalarının çoğunluğunun adhezif olduğu gözlemlenmiştir.
15. Ekstrüze ZK60 alaşımının SEA itme kuvveti değeri, deneysel itme kuvvetinin yaklaşık 4 katı çıkmıştır. Buna karşı SEA delme momenti ve sıcaklık değerleri ile deneysel delme momenti ve sıcaklık değerleri birbirlerine çok yakın değerdedir.



16. ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinde SEA itme kuvvetleri ile deneysel delme testleri arasında yaklaşık 3 kat fark varken delme momenti ve sıcaklık değerleri neredeyse aynıdır.
17. ZK60 alaşımı, ZK60+%5SiC ve ZK60+%10SiC kompozitlerinde deneysel delik delme testlerinde düşük itme kuvvetleri değerlerinin, üretilen numunelerin basma testlerinde yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir.
18. ZK60+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin deneysel itme kuvveti ile SEA itme kuvveti ortalama değerleri arasındaki fark %2,5'tir. Buna karşı deneysel delme momenti, SEA delme momentinden 1,5 kat; deneysel delme sıcaklığı, SEA delik delme sıcaklığından 2 kat yüksek değerde çıkmıştır.
19. ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozit numunesi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda deneysel itme kuvveti değeri SEA itme kuvveti değerinden 2,5 kat; deneysel delme momenti değeri SEA delme momenti değerinden 2,6 kat yüksek değerde çıkmıştır. Ek olarak ZK60+%10B<sub>4</sub>C kompozitinde de deneysel delme sıcaklığı değeri SEA delme sıcaklığı değerinden 2,5 kattan fazla artış göstermiştir.
20. ZK60+%5SiC+%5B<sub>4</sub>C kompozitinin deneysel itme kuvveti değeri SEA itme kuvveti değerinden 3,2 kat daha düşüktür. Ayrıca SEA delme momenti değeri deneysel delme momenti değerinden 1,42 kat daha yüksektir. Ek olarak deneysel delme sıcaklığı, SEA delme sıcaklığından 12° C yüksek çıkmıştır.
21. Çalışma sonuçlarına göre, ekstrüzyon işlemi sonucunda tane küçülmesi ve yeniden kristalleşme etkilerinin numunelerin yüksek oranda dayanım, süneklik ve delme işlenebilirliği kapasitelerinde artış sağlanmıştır.
22. B<sub>4</sub>C takviyesinin yüksek sertlik değeri ve üretim esnasında oluşan yüksek kararlılığa sahip intermetalik bileşiklerin matris içerisinde yayılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

23. Bu çalışmada yapılan mikroyapı karakterizasyon analizleri, mekanik testler, korozyon testi, deneysel delik delme testi ve delik delme sonlu elemanlar analizleri sonucunda SiC ve B<sub>4</sub>C takviyeleri ZK60 alaşımına birlikte eklenmeleri durumunda birbirlerinin olumsuz etkilerini iyileştirdiği sonucuna ulaşılıştır.

## KAYNAKLAR

1. Vignesh Kumar, M., Padmanaban, G., and Balasubramanian, V., "Role of tool pin profiles on wear characteristics of friction stir processed magnesium alloy ZK60/silicon carbide surface composites", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 51 (2): 140–152 (2020).
2. Askeland, D. R., "The Science and Engineering of Materials, Second SI Edition", 2. Ed., *Chapman & Hall*, London, 1–272 (1991).
3. Kainer, K. U.; B. L. M., "Magnesium Alloys and Their Applications", *Magnesium Alloys and Their Applications*, *Wiley*, Weinheim, 1–816 (2000).
4. Kainer, K. U., "Metal Matrix Composites", *Metal Matrix Composites Edited by Karl U. Kainer Metal Matrix Composites. Custom-Made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, *Wiley*, Grünstadt, 1–325 (2006).
5. Deuis, R. L., Subramanian, C., and Yellup, J. M., "Abrasive wear of aluminium composites - A review", *Wear*, 201 (1–2): 132–144 (1996).
6. Rahmani, K. and Majzoobi, G. H., "The effect of particle size on microstructure, relative density and indentation load of Mg-B4C composites fabricated at different loading rates", *Journal Of Composite Materials*, 54 (17): 2297–2311 (2020).
7. Bansal, N. P., "Handbook of Ceramic Composites", *Kluwer Academic Publishers*, New York, 1–565 (2005).
8. Gu, M., Wu, Z., Jin, Y., and Koçak, M., "Interfacial reaction and microstructure in a ZK60-based hybrid composite", *Journal Of Materials Science*, 35 (10): 2499–2505 (2000).
9. Ma, C., Liu, M., Wu, G., Ding, W., and Zhu, Y., "Tensile properties of extruded ZK60-RE alloys", *Materials Science And Engineering A*, 349 (1–2): 207–212 (2003).
10. Handbook, C. A. I., "ASM Metals Handbook, Volume 09 Metallography and Microstructures Handbook", *ASM International*, 2733 (2004).
11. Aaronson, H. I., "Asm Metals Handbook, Vol 09 Metallography and Microstructure", 9. Ed., *ASM International, The Materials Information Company*, Ohio, 1–1627 (1992).

12. Luo, A. and Pekguleryuz, M. O., "Cast magnesium alloys for elevated temperature applications", *Journal Of Materials Science*, 29 (20): 5259–5271 (1994).
13. Kainer, K. U., "Magnesium – Alloys and Technology", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG AA, *Wiley*, Geesthacht, 1–293 (2003).
14. Polmear, I. J., "Magnesium alloys and applications", *Materials Science And Technology (United Kingdom)*, 10 (1): 1–16 (1994).
15. Barber, L. P., "Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys By", *Spectrum*, (2004).
16. Y.C Lee, A. K. D. and D. H. S., "Grain refinement of magnesium", *Magnesium Technology*, 247–254 (2000).
17. Tayebi, M., Najafi, H., Nategh, S., and Khodabandeh, A., "Creep Behavior of ZK60 Alloy and ZK60/SiCw Composite After Extrusion and Precipitation Hardening", *Metals And Materials International*, 27 (10): 3905–3917 (2021).
18. Clark, J. B. and Rhines, F. N., "Central region of the Mg-Zn phase diagram", *Jom*, 9 (4): 425–430 (1957).
19. Sun, M., Easton, M. A., Stjohn, D. H., Wu, G., Abbott, T. B., and Ding, W., "Grain refinement of magnesium alloys by Mg-Zr master alloys: The role of alloy chemistry and Zr particle number density", *Advanced Engineering Materials*, 15 (5): 373–378 (2013).
20. Robson, J. D. and Paa-Rai, C., "The interaction of grain refinement and ageing in magnesium-zinc-zirconium (ZK) alloys", *Acta Materialia*, 95: 10–19 (2015).
21. Hildebrand, Z. C., Qian, M., StJohn, D. H., and Frost, M. T., "Influence of zinc on the soluble zirconium content in magnesium and the subsequent grain refinement by zirconium", *Magnesium Technology*, 241–245 (2004).
22. Okamoto, H., "Mg-Zr (Magnesium-Zirconium)", *Journal Of Phase Equilibria And Diffusion*, 28 (3): 305–306 (2007).
23. Luo, A. A., "Magnesium casting technology for structural applications", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 1 (1): 2–22 (2013).
24. Bauser, M., Sauer, G., and Siegert, K., "Extrusion - Second Edition", ASM International, 2. Ed., 1–17 (2006).
25. Hunt, W. H. and Herling, D. R., "Aluminum metal matrix composites", *Advanced Materials And Processes*, 162 (2): 39–44 (2004).
26. Seshan, S., Jayamathy, M., Kailas, S. V., and Srivatsan, T. S., "The tensile behavior of two magnesium alloys reinforced with silicon carbide particulates", *Materials Science And Engineering A*, 363 (1–2): 345–351 (2003).

27. Pekguleryuz, M., Kainer, K., and Kaya, A. A., "Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy", *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*, 1–368 (2013).
28. Galiyev, A., Kaibyshev, R., and Gottstein, G., "Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60", *Acta Materialia*, 49 (7): 1199–1207 (2001).
29. Kaibyshev, R., "Dynamic Recrystallization in Magnesium Alloys", *Advances in Wrought Magnesium Alloys*, **Woodhead Publishing Limited**, 186–225 (2012).
30. López De Lacalle, L. N., Fernández, A., Olvera, D., Lamikiz, A., Olvera, D., Rodríguez, C., and Elias, A., "Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts", *Mechanical Systems And Signal Processing*, 25 (7): 2745–2752 (2011).
31. Abele, E., Ellermeier, A., Hohenstein, J., and Tschannerl, M., "Tool length influence on wear behaviour of twisted carbide drills", *Production Engineering*, 1 (1): 51–56 (2007).
32. Williams, R. A., "A study of the drilling process", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering, Transactions Of The ASME*, 96 (4): 1207–1215 (1974).
33. Ahmad, J., "Machining of Polymer Composites", Springer, **Springer US**, Boston, MA, 30–37 (2009).
34. Knight, W. A. and Boothroyd, G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", **CRC Press**, (2019).
35. Mukai, T., Yamanoi, M., Watanabe, H., Ishikawa, K., and Higashi, K., "Effect of grain refinement on tensile ductility in ZK60 magnesium alloy under dynamic loading", *Materials Transactions*, 42: 1177–1181 (2001).
36. Kevorkijan, V. and Škapin, S. D., "FABRICATION AND CHARACTERISATION OF Mg-B4C COMPOSITES", *Association Of Metallurgical Engineers Of Serbia*, 15 (1): 3–18 (2009).
37. Jiang, Q. C., Wang, H. Y., Ma, B. X., Wang, Y., and Zhao, F., "Fabrication of B4C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 386 (1–2): 177–181 (2005).
38. Behnamian, Y., Serate, D., Aghaie, E., Zahiri, R., Tolentino, Z., Niazi, H., and Mostafaei, A., "Tribological behavior of ZK60 magnesium matrix composite reinforced by hybrid MWCNTs/B4C prepared by stir casting method", *Tribology International*, 165 (July 2021): 107299 (2022).

39. Chua, B. W., Lu, L., and Lai, M. O., "Influence of SiC particles on mechanical properties of Mg based composite", *Composite Structures*, 47 (1–4): 595–601 (1999).
40. Yue, T. M., Wang, A. H., and Man, H. C., "Improvement in the corrosion resistance of magnesium ZK60/SiC composite by excimer laser surface treatment", *Scripta Materialia*, 38 (2): 191–198 (1997).
41. Vignesh Kumar, M., Veerappan, A. R., Padmanaban, G., and Balasubramanian, V., "Microstructural Evolution of a Cast ZK60 Mg Alloy/SiCp Surface Composites Induced by Friction Stir Process", *Physics Of Metals And Metallography*, 122 (4): 403–415 (2021).
42. Zhu, T., Yu, Y., Shen, Y., and Xiong, Y., "Wear behavior of extruded ZK60 magnesium alloy in simulated body fluid with different pH values", *Materials Chemistry And Physics*, 262 (September 2020): (2021).
43. Guo, Y., Wang, S., Liu, W., Sun, Z., Zhu, G., and Xiao, T., "Effect of laser shock peening on tribological properties of magnesium alloy ZK60", *Tribology International*, 144 (September 2019): 106138 (2020).
44. Nieh, T. G., Schwartz, A. J., and Wadsworth, J., "Superplasticity in a 17 vol.% SiC particulate-reinforced ZK60A magnesium composite (ZK60/SiC/17p)", *Materials Science And Engineering A*, 208 (1): 30–36 (1996).
45. Cai, S., Lei, T., Li, N., and Feng, F., "Effects of Zn on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Zn alloys", *Materials Science And Engineering C*, 32 (8): 2570–2577 (2012).
46. Mostaed, E., Fabrizi, A., Dellasega, D., Bonollo, F., and Vedani, M., "Grain size and texture dependence on mechanical properties, asymmetric behavior and low temperature superplasticity of ZK60 Mg alloy", *Materials Characterization*, 107: 70–78 (2015).
47. CHENG, Y. liang, QIN, T. wei, WANG, H. min, and ZHANG, Z., "Comparison of corrosion behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium alloys", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 19 (3): 517–524 (2009).
48. Chang, L. L., Su, X. J., Qin, J. L., Su, X. J., and Qin, J. L., "Uneven microstructure in ZK60 alloy as a core of AZ31/ ZK60 composite rods", *Materials Letters*, (2022).
49. Köklü, U., Koçar, O., Morkavuk, S., Giasin, K., and Ayer, Ö., "Influence of extrusion parameters on drilling machinability of AZ31 magnesium alloy", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 236 (5): 2082–2094 (2022).

50. Bhowmick, S., Lukitsch, M. J., and Alpas, A. T., "Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60)", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 50 (5): 444–457 (2010).
51. Wang, J., Liu, Y. B., An, J., and Wang, L. M., "Wear mechanism map of uncoated HSS tools during drilling die-cast magnesium alloy", *Wear*, 265 (5–6): 685–691 (2008).
52. Gariboldi, E., "Drilling a magnesium alloy using PVD coated twist drills", *Journal Of Materials Processing Technology*, 134 (3): 287–295 (2003).
53. Bhowmick, S. and Alpas, A. T., "The role of diamond-like carbon coated drills on minimum quantity lubrication drilling of magnesium alloys", *Surface And Coatings Technology*, 205 (23–24): 5302–5311 (2011).
54. Bierman, J. and Kincanon, E., "Reconsidering Archimedes' Principle", *The Physics Teacher*, 41 (6): 340–344 (2003).
55. Kerti, I. and Toptan, F., "Microstructural variations in cast B4C-reinforced aluminium matrix composites (AMCs)", *Materials Letters*, 62 (8–9): 1215–1218 (2008).
56. Roine, A., "Outokumpu HSC Chemistry for Windows: Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database.", *User's Guide: Outokumpu HSC Chemistry ® For Windows*, (Version 5): 268 (2002).
57. Wang, A. H. and Yue, T. M., "YAG laser cladding of an Al-Si alloy onto an Mg/SiC composite for the improvement of corrosion resistance", *Composites Science And Technology*, 61 (11): 1549–1554 (2001).
58. Haynes, W. M., "CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th Edition", Journal of the American Pharmaceutical Association, *CRC Press*, 1–2666 (2015).
59. Lin, T., Zhou, J. X., Jing, C. N., Liu, Y. T., Zhang, L. L., and Meng, X. Bin, "Improving mechanical properties of ZK60 magnesium alloy by cryogenic treatment before hot extrusion", *High Temperature Materials And Processes*, 39 (1): 200–208 (2020).
60. Gharbi, O. and Birbilis, N., "Clarifying the Dissolution Mechanisms and Electrochemistry of Mg<sub>2</sub>Si as a Function of Solution pH", *Journal Of The Electrochemical Society*, 165 (9): C497–C501 (2018).
61. Ben-Hamu, G., Eliezer, D., and Shin, K. S., "The role of Mg<sub>2</sub>Si on the corrosion behavior of wrought Mg-Zn-Mn alloy", *Intermetallics*, 16 (7): 860–867 (2008).

## ÖZGEÇMİŞ

Hayreddin BOZTAŞ, Karabük Vakıfbank Zübeyde Hanım Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2014 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenimine başlayıp 2020 yılında 2.68 ortalama ile mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.