

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ZA27 ESASLI KOMPOZİT  
MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Onur GÜLER**

**ARALIK 2015**  
**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ZA27 ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN  
ÜRETİLMESİ VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Onur GÜLER**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 12 / 2015**

**Tezin Savunma Tarihi : 29 / 12 / 2015**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Onur GÜLER Tarafından hazırlanan**

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ZA27 ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN  
ÜRETİLMESİ VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08/ 12/ 2015 gün ve 1630 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Hikmet ALTUN**

**Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI**

**Üye : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI**

*H. Altun*  
*H. Çuvalcı*  
*A. Çanakçı*

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Yüksek dayanım/yoğunluk oranı ve üstün tribolojik özellikleriyle tercih sebebi olan çinko-alüminyum alaşımları, en önemli matris malzemelerinden biridir. Büyük taneler içeren kristal yapıyla kıyaslandığında nanokompozit malzemeler ise, yüksek elastik modül, mukavemet, aşınma dayanımı gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda üretimleri ve kullanımları yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada döküm yöntemiyle elde edilen çinko-alüminyum esaslı ZA27 alaşımı öncelikle toz haline getirilmiştir. Daha sonra bu tozlara farklı oranlarda nano boyutlu grafit ve nano boyutlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alümina) tozları ilave edilerek sabit bir mekanik alaşımlama süresi sonunda hibrit nanokompozit (HNK) tozlar hazırlanarak sıcak presleme yöntemiyle aşınma deney numuneleri üretilmiştir. Elde edilen farklı oranlarda nano parçacık içeren metal matrisli hibrit kompozit numunelere aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Bu kapsamda, HNK'lerdeki katkı malzemesi oranlarının tribolojik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Yüksek lisans çalışmam süresince değerli fikirleri, bilgi ve deneyimleri, teşvikleri ve fedakarlığıyla yol gösteren danışman hocam sayın Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI' ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez çalışmama destek veren başta değerli hocam Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI olmak üzere, araştırma görevlileri; Serdar ÖZKAYA, Ramazan DALMIŞ, Müslim ÇELEBİ, Temel VAROL ve Hüseyin İPEK' e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bütün çalışmalarım boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Ö.Faruk YALÇIN ve A.Hasan KARABACAK'a teşekkür ederim. Son olarak hayatımın her anında maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan saygıdeğer aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma 213M276 kod no'lu TÜBİTAK 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Onur GÜLER

Trabzon 2015



## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile ZA27 esaslı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/12/2015

Onur GÜLER

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XV
1. GENEL BİLGİLER .....	2
1.1. Giriş .....	2
1.2. ZA Alaşımaları .....	3
1.2.1. ZA Faz Diyagramı .....	3
1.2.2. Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı.....	4
1.2.3. ZA Alaşımalarının Özellikleri .....	5
1.2.3. ZA Alaşımalarının Fiziksel Özellikleri .....	5
1.2.3.2. ZA Alaşımalarının Mekanik Özellikleri.....	6
1.2.3.3. Çinko-Alüminyum Alaşımalarının Tribolojik Özellikleri.....	7
1.3. Kompozit Malzemeler .....	8
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri .....	9
1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	10
1.3.2.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK) .....	10
1.3.2.1.1. Matris Malzemeleri.....	12
1.3.2.1.2. Takviye Elemanları.....	12
1.3.2.1.2.1. Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	13
1.3.2.1.2.2. Grafit.....	14
1.4. Nanoteknoloji .....	15
1.4.1. Nanokompozitler .....	16
1.4.2. Metal Matrisli Nanokompozitler (MMNK).....	17
1.5. Mekanik Alaşımlama.....	18

1.6.	Toz Metalurjisi (TM).....	21
1.6.1.	Metal Tozların Üretimi .....	21
1.6.2.	Presleme İşlemi.....	23
1.6.3.	Sinterleme İşlemi .....	25
1.6.4.	Sıcak Presleme (SP) İşlemi.....	27
1.6.5.	Son İşlemler .....	28
1.7.	Triboloji .....	28
1.7.1.	Tribolojinin Diğer Bilim Dalları ile İlişkisi.....	29
1.7.2.	Sürtünme.....	30
1.7.3.	Aşınma.....	31
1.7.3.1.	Aşınma Mekanizması Tipleri .....	33
1.8.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı .....	36
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
2.1.	Malzeme .....	40
2.1.1.	ZA27 Alaşımının Dökümü ve Toz Üretimi.....	40
2.1.2.	Takviye Malzemeleri .....	42
2.2.	Mekanik Alaşımlama İşlemleri.....	43
2.3.	Parçacık Boyutu Ölçümleri.....	44
2.4.	Parçacık Morfolojisi ve Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	44
2.5.	Sıcak Presleme İşlemi .....	45
2.6.	Aşınma Numunelerinin Hazırlanması .....	46
2.7.	Aşınma Deneylerinin Yapılışı .....	49
3.	BULGULAR.....	52
3.1.	ZA27 Alaşımının Döküm Yapısı.....	52
3.2.	Matris Tozu ve Katkı Tozlarının Morfolojileri .....	53
3.3.	Hibrit Nanokompozitler (HNK) .....	54
3.3.1.	HNK Tozların MA Sonrası Toz Boyutları .....	54
3.3.2.	HNK Tozların MA Sonrası Morfolojileri.....	55
3.4.	Üretilen Numunelerin İç Yapı İncelemeleri .....	61
3.5.	HNK Numunelerin Sertlik Değerlerinin Karşılaştırılması .....	62
3.6.	HNK Numunelerin Aşınma Yüzeyi Pürüzlülük Kontrolü.....	63
3.7.	ZA27 ve HNK Numunelerin Aşınma Deneyleri .....	64
3.7.1.	ZA27 ve 1. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması .....	64

3.7.1.1.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi .....	64
3.7.1.2.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi .....	67
3.7.1.3.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi .....	70
3.7.2.	ZA27 ve 2. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması .....	73
3.7.2.1.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi .....	73
3.7.2.2.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi .....	76
3.7.2.3.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi .....	79
3.7.3.	ZA27 ve 3. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması .....	82
3.7.3.1.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi .....	82
3.7.3.2.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi .....	85
3.7.3.3.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi .....	87
3.7.4.	ZA27 ve 4. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması .....	90
3.7.4.1.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi .....	90
3.7.4.2.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi .....	93
3.7.4.3.	Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi .....	96
3.8.	Aşınma Yüzeylerinin SEM’de Görüntülenmesi ve Aşınma Mekanizmalarının Belirlenmesi.....	99
3.8.1.	Katkısız ZA27 Alaşımı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	99
3.8.2.	1. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	99
3.8.3.	2. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	103
3.8.4.	3. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	105
3.8.5.	4. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	108
4.	İRDELEME .....	112
5.	SONUÇLAR.....	116
6.	ÖNERİLER.....	118
7.	KAYNAKLAR .....	119

ÖZGEÇMİŞ

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

# MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ZA27 ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Onur GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

2015, 128 Sayfa

Bu çalışmada, ilk olarak döküm yöntemi ile elde edilen ZA27 alaşımından gaz atomizasyonu yöntemi ile ZA27 matris tozları üretilmiştir. Daha sonra, eleme yöntemi ile 63 µm elek altı matris tozları elde edilmiştir. Takviye malzemesi olarak, nano grafit ve alümina (100 nm) tozları kullanılmıştır. Nano-grafit ve alümina tozları ile ZA27 tozlarının karışımından gezegen tipi bilyeli öğütücüde 8 saatlik öğütme sonucu mekanik alaşımlama yöntemi ile hibrit nanokompozit tozlar üretilmiştir. Öğütülen tozlar, 3 saat boyunca 432 °C sıcaklıkta sinterlendikten sonra 350 MPa basınç altında, sıcak presleme yöntemi ile ZA27 ve hibrit nanokompozit numuneler üretilmiştir. Aşınma deney parametreleri olarak; 30 dk deney süresi, 100 dev/dk devir sayısı ve 10 N yük seçilmiştir. Her deneyde, bu parametrelerden ikisi sabit tutulup diğeri değiştirilerek uygulanmıştır. Hacimce %1 grafit ve %4 alümina içeren hibrit nanokompozitlerin iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak sadece düşük yük, düşük hız ve uzun deney süresi koşullarında, hacimce %4 grafit ve %4 alümina takviyeli hibrit nanokompozitlerin en üstün özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Katkısız ZA27 malzemenin aşınma yüzeyleri SEM’de incelenmiştir ve ana aşınma mekanizması olarak adhezif ve tabakalaşma aşınması belirlenmiştir. Hibrit nanokompozitlerde ise alümina oranının artmasıyla ana aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ZA27 Alaşımı, Hibrit Nanokompozit, Mekanik Alaşımlama, Sıcak Presleme, Aşınma ve Sürtünme

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF ZA27 BASED COMPOSITE MATERIALS BY MECHANICAL  
ALLOYING METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR TRIBOLOGICAL  
PROPERTIES

Onur GÜLER

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Hamdullah ÇUVALCI  
2015, 128 Pages

In this study, initially, ZA27 matrix powder was produced from ZA27 alloy which produced via casting by gas atomization method. Then, powders that are 63  $\mu\text{m}$  were obtained by sieving. Nano graphite and alumina powders (100 nm) were used as reinforcing materials. Hybrid nanocomposite powders were produced from mixture of ZA27 matrix powders with the graphite and alumina particles by mechanical alloying method for 8 hour in a planetary type ball mill. ZA27 and hybrid nanocomposite samples have been produced from the milled powders at 350 MPa pressure by hot pressing method after they were sintered for 3 hours at 432  $^{\circ}\text{C}$ . Test period of 30 min, test speed of 100 rev/min and load of 10 N have been chosen as parameters of wear test. While two of these parameters have been kept steady, another one have been changed. It has been determined that hybrid nanocomposites that have content of 1 vol.% graphite and 4 vol.% alumina have good tribological properties. However, it has been understood that hybrid nanocomposites that have 4 vol.% graphite and 4 vol.% alumina content have superior tribological properties under low load, low test speed and long test time conditions. The wear surfaces of unreinforced ZA27 and hybrid nanocomposite samples were investigated in the scanning electron microscope and it has been determined that the main wear mechanism of ZA27 was adhesive type wear and delamination. It has been concluded that the main wear mechanism of hybrid nanocomposites was abrasive type wear with the increasing of alumina content.

**Key Words:** ZA27 Alloy, Hybrid Nanocomposite, Mechanical Alloying, Hot Pressing, Wear and Friction

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı.....	3
Şekil 1.2. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitlerin şematik olarak gösterilmesi. ....	10
Şekil 1.3. Grafit ve grafenin atom dizilimlerinin şematik olarak gösterimi .....	14
Şekil 1.4. Nanokompozitlerin sınıflandırılması.....	16
Şekil 1.5. Nanokompozitlerin mikro yapılarına göre sınıflandırılması.....	17
Şekil 1.6. Mekanik alaşımlama mekanizması .....	19
Şekil 1.7. Gaz atomizasyon ünitesinin şematik gösterimi .....	23
Şekil 1.8. Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisinin gösterilişi.....	24
Şekil 1.9. TM’de presleme kademeleri.....	24
Şekil 1.10. Sinterlemede nokta teması ile başlayıp parçacıklar arası bağ gelişimiyle devam eden iki küre sinterleme modelinin şematik gösterimi .....	26
Şekil 1.11. Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi.....	27
Şekil 1.12. Sürtünme tipleri.....	31
Şekil 1.13. Aşınma sisteminin ana bileşenleri.....	32
Şekil 1.14. Temel aşınma mekanizmaları.....	33
Şekil 2.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması.....	40
Şekil 2.2. Döküm işleminde kullanılan ekipman ve elde edilen döküm parçası.....	41
Şekil 2.3. Döküm işleminde kullanılan alaşım elementleri.....	42
Şekil 2.4. Tozların elenmesinde kullanılan elek.....	42
Şekil 2.5. MA işleminde kullanılan ekipmanlar .....	43
Şekil 2.6. Partikül boyutu ölçüm cihazı.....	44
Şekil 2.7. Toz morfolojisi, içyapı ve aşınma yüzeylerinin incelenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	44
Şekil 2.8. Aşınma numunesi üretimi için kullanılan kalıp elemanlarının teknik resimleri.....	45
Şekil 2.9. Aşınma numunesi üretiminde kullanılan kalıp.....	46
Şekil 2.10. SP işleminde kullanılan ekipmanlar .....	46
Şekil 2.11. Aşınma deneyi numuneleri.....	47

Şekil 2.12. Üretilen aşınma numunelerinin teknik resmi .....	47
Şekil 2.13. Sınıflandırılan aşınma numuneleri .....	48
Şekil 2.14. Numunelerin yüzey pürüzlülüklerin ölçülmesinde ve aşınma miktarlarının belirlenmesi için kullanılan ekipmanlar .....	48
Şekil 2.15. Kullanılan aşınma deney düzeneğinin görüntüsü.....	50
Şekil 2.16. Aşınma deney düzeneği.....	51
Şekil 3.1. ZA27 alaşımının dökümü sonrası gözlemlenen iç yapı .....	52
Şekil 3.2. ZA27 tozlarının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	53
Şekil 3.3. Takviye malzemelerinin 55000X büyütmedeki SEM görüntüleri .....	54
Şekil 3.4. MA sonrası üretilen HNK tozların boyutlarının, alümina ve grafit oranıyla değişimi .....	55
Şekil 3.5. MA ile üretilen HNK tozların düşük ve yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri .....	56
Şekil 3.6. SEM ve EDS incelemeleri.....	61
Şekil 3.7. Dağılım haritalarının görüntülenmesi .....	62
Şekil 3.8. HNK numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması .....	63
Şekil 3.9. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi.....	66
Şekil 3.10. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi.....	66
Şekil 3.11. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi .....	67
Şekil 3.12. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi .....	69
Şekil 3.13. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi .....	69
Şekil 3.14. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi.....	70
Şekil 3.15. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi.....	72
Şekil 3.16. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi.....	72
Şekil 3.17. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi .....	73
Şekil 3.18. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi.....	75



Şekil 3.19. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi.....	76
Şekil 3.20. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi .....	76
Şekil 3.21. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi .....	78
Şekil 3.22. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi .....	79
Şekil 3.23. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi.....	79
Şekil 3.24. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi .....	81
Şekil 3.25. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi .....	81
Şekil 3.26. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi .....	82
Şekil 3.27. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi.....	84
Şekil 3.28. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi.....	84
Şekil 3.29. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi .....	85
Şekil 3.30. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi .....	86
Şekil 3.31. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi .....	87
Şekil 3.32. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi.....	87
Şekil 3.33. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi .....	89
Şekil 3.34. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme kuvvetinin uygulanan yük ile değişimi .....	89
Şekil 3.35. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi .....	90
Şekil 3.36. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi.....	92
Şekil 3.37. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi.....	92

Şekil 3.38. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi .....	93
Şekil 3.39. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi .....	95
Şekil 3.40. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi .....	95
Şekil 3.41. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi.....	96
Şekil 3.42. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi .....	97
Şekil 3.43. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi .....	98
Şekil 3.44. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi .....	98
Şekil 3.45. Katkısız ZA27 numunenin 30 dk deney süresi, 10 N yük ve 250 dev/dk devir sayısı altında aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri .....	99
Şekil 3.46. Yüksek hız altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri .....	101
Şekil 3.47. ZA-1-4 kodlu numunenin 10 N yük, 30 dk deney süresi ve 250 dev/dk devir sayısı altında aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi spektrumlarının şematik olarak gösterilişi .....	102
Şekil 3.48. Yüksek yük altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	104
Şekil 3.49. Yüksek yük altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	107
Şekil 3.50. Uzun sürelerde yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	110

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler .....	4
Tablo 1.2. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri.....	6
Tablo 1.3. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri.....	7
Tablo 2.1. ZA27 Alaşımının ağırlıkça % kimyasal bileşimi .....	41
Tablo 2.2. Aşınma deneyleri için üretilen HNK numuneler.....	50
Tablo 3.1. HNK numunelerin sıcak presleme sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.....	63
Tablo 3.2. HNK numunelerin zımparalama ve parlatma sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.....	64

## SEMBOLLER DİZİNİ

Al:	Alüminyum
BSD:	Brinell sertlik değeri
HNK:	Hibrit nanokompozit
MA:	Mekanik alaşımlama
MMK:	Metal matrisli kompozit
MMNK:	Metal matrisli nanokompozit
MPa:	Mega paskal
nm:	Nanometre
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
SP:	Sıcak presleme
TM:	Toz metalurjisi
ZA-1-1:	Hacimce %1 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-2:	Hacimce %1 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-3:	Hacimce %1 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-4:	Hacimce %1 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-1:	Hacimce %2 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-2:	Hacimce %2 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-3:	Hacimce %2 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-4:	Hacimce %2 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-1:	Hacimce %3 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-2:	Hacimce %3 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-3:	Hacimce %3 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-4:	Hacimce %3 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-1:	Hacimce %4 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-2:	Hacimce %4 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-3:	Hacimce %4 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-4:	Hacimce %4 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
Zn:	Çinko
µm:	Mikrometre

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Son yıllarda dünyada, insanların ihtiyaçları teknolojinin gelişimi ile paralel olarak artmakta ve hatta teknolojik gelişmelerin yolunu açmaktadır. Malzeme üretimi de bu ihtiyaçlardan biri olup sanayinin temel girdisidir. Malzeme bilimindeki gelişmenin hızla devam etmesine karşın yeryüzünde sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri nedeniyle malzeme üretiminin, teknolojinin gelişmesine ayak uyduramayıp, zaman zaman yeterli olmadığı dönemler olmuştur. Uzay araçlarının yapımına geçildiği günümüz dünyasında, bilimin gelişmesi ve çağın yenilikleriyle aynı çizgide günün ihtiyaçlarını karşılayabilecek, mevcut malzemelerden hem ekonomik hem de teknik yönden daha uygun malzemelerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu yüzden, daha ekonomik, daha mukavemetli ve oldukça hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır [1].

Kalay ve bakır, kaymalı yatak malzemelerinin temel alaşım elementlerindedir. Ayrıca bu metallerin, pahalı ve kısıtlı miktarda bulunan metaller olmasından dolayı, araştırmacılar kalaysız veya çok az kalay ve/veya bakır içeren yatak malzemeleri geliştirmesine yönelmişlerdir. Bu nedenle, günümüzde hem ekonomik hem tribolojik yönden geliştirilmeye çalışılan yeni yatak malzemelerinin beyaz metal, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaları planlanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre birçok üstünlüğe sahip oldukları anlaşılmıştır. Aşınma dayanımlarının ve özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, değişik ısı işlemlere elverişli olmaları bu üstün özelliklerin başında gelmektedir [2].

Alaşımın yüzeyinde alüminyum oksit (alümina) ve çinko oksit gibi farklı fazların kolaylıkla oluşabilmesi, çinko-alüminyum alaşımlarının üstün tribolojik özelliklere sahip olmasına olanak tanımaktadır. Çinko oksitin yumuşak bir faz olması bünyeye yağlayıcı bir özellik kazandırırken; alüminyumun sert bir faz olması da, aşınma direncinin yüksek olmasını sağlamaktadır [3]. Buna karşın, ZA (çinko-alüminyum) alaşımlarında 100 °C üzeri sıcaklıklarda, üstün mekanik özelliklerinin düşüş göstermesinden kaynaklanan sorunların

önüne geçmek amacıyla; bu alaşımlara seramik faz katkısı yapılarak yüksek sıcaklık uygulamaları iyileştirilebilir [4].

ZA27 alaşımlarının üstün özellikleri, araştırmacılara; farklı takviye malzemeleri kullanılarak, daha iyi mekanik ve tribolojik özelliklerin elde edilmesi için bu alaşımların güçlendirilmesi konusunda ilham vermiştir. Sonuç olarak, son yıllarda, ZA esaslı metal matrisli kompozitler (MMK), aşınma direnci yüksek ve daha hafif malzemeler olarak kullanılmaktadır. Ayrıca monolitik alaşımlarla kıyaslandığında sahip oldukları avantajların daha fazla olması sebebiyle dikkat çekmektedir [5].

İki veya daha fazla türde takviye içeren ortak bir metal matrisden oluşan kompozit malzemeler hibrit MMK malzemeler olarak adlandırılırlar. Diğer bir deyişle, hibrit MMK malzemeler, en az iki veya daha fazla farklı cins metal matris veya takviye elemanı içeren kompozitlerdir. Hibrit kompozit malzemeler iki fonksiyonlu kompozitler olarak da isimlendirilebilir. Bu malzemelerin özelliklerinin kullanılmadan önce optimize edilmesi gerekir. Örneğin, bir malzeme yüksek sıcaklıkta kullanılacaksa; o malzemenin, hem yüksek sıcaklıkta kullanım esnasında yük taşıma kabiliyetinin iyi olması aynı zamanda da uzun süre kullanılabilme özelliklerine sahip olması gerekir. Bunu amaç edinerek, ilk adım olarak malzemenin yüksek mukavemet kazanması , daha sonra da bu mukavemetini kaybetmemesi beklenir. İstenen bu durumun elde edilebilmesi için mikro yapısı iki işlevli olarak üretilmelidir. Hibrit kompozitlerin üretilme amacı, malzemelerin, istenilen tasarıma uygun olarak özelliklerini iyileştirmek için bir bileşenin olumsuz etkisini farklı bir bileşen ilavesiyle dengelemektir. Örneğin; aşınma ortamında çalışan ve aynı zamanda yüksek ısı iletimi istenen bir bölgede bir MMK malzeme kullanılmak istenirse, malzemenin yüzey ısınmasını ve buna paralel olarak oksitlenmesini ve yük taşıma kabiliyetinin kaybolmasını engellemek gerekir. Bunun için en etkili yöntemlerden biri metal içine hem sürtünmeyi azaltacak bir bileşen ilavesi hem de yük taşıma kabiliyetini arttırıcı bir takviye fazı ilave etmektir. Bütün bunlar göz önüne alındığında, bir Al alaşımına hem grafit partikülleri ve hem de SiC partikülleri ilavesi en elverişli ve kullanışlı bir malzeme özelliği ve mikro yapısı ortaya çıkaracaktır [6].

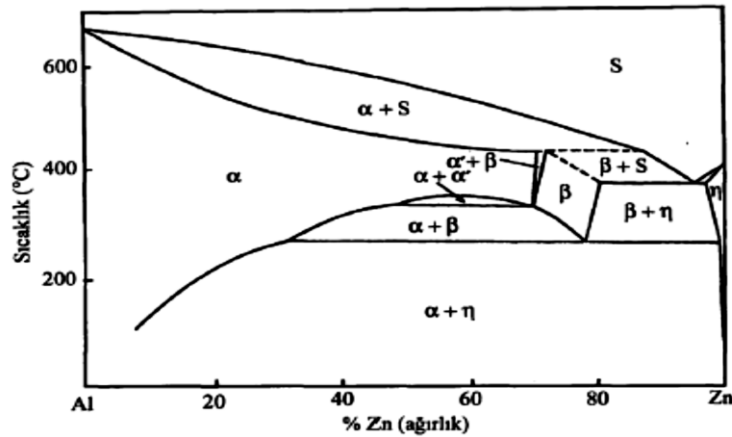
Son yıllarda, kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunu nano boyutlu ve/veya takviye fazı içeren nano kompozitler oluşturmaktadır. Özellikle; otomotiv, uzay ve savunma sanayileri gibi endüstri kollarında üstün performansların elde edilmesi amacıyla, metal matrisli nano kompozitler (MMNK) geliştirilmektedir [7]. Nanokompozitler, mikro kompozitlerle kıyaslandığında, daha üstün

süneklik gösterdiğine dikkat çekilmiş ve sünekliliğin çatlak ilerlemesini ertelemesinden dolayı bu durumun parçanın kullanım ömrünü arttıracakı belirtilmiştir [8]. Bunun yanında, kullanılan nano-boyutlu parçacıkların yüzey alanı ve boy/en oranı değerleri çok yüksek seviyelerde olduğu için bu kompozitlerin mekanik, yanmazlık, ısı ve bariyer özellikleri başarılı bir şekilde geliştirilebilmektedir.

## 1.2. ZA Alaşımları

### 1.2.1. ZA Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum alaşımlarının katılma aralıkları ve ergime sıcaklıkları içerdikleri alüminyum oranına bağlıdır. Çinko-alüminyum faz diyagramı, Şekil 1.1'de verilmiştir. Bu diyagramda, çinkoca zengin faz bölgesi  $\eta$ , alüminyumca zengin faz bölgesi ise  $\alpha$  olarak belirtilmektedir [9]. Alüminyum içerisinde, çinko %80 oranına kadar çözülerek  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$  olarak isimlendirilen, yüzey merkezli kübik yapıya sahip faz bölgelerini meydana getirmektedir [10].



Şekil 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı [11].

Sözü edilen faz diyagramında, 382 °C sıcaklıkta ve %95 Zn bileşim oranında ötektik nokta yer almaktadır. Ötektik dönüşüm sonucunda, yüzey merkezli kübik yapıya sahip  $\beta$  ile birlikte sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip  $\eta$  fazlarından oluşan bir yapı meydana gelmektedir. Alüminyumun  $\eta$  fazı içerisindeki katı çözünürlüğü, ötektik sıcaklık çizgisinde %5 dir. Bu

değer sıcaklık düştükçe azalmakta ve 20 °C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar azalmaktadır.  $\beta$  fazının alüminyumca zengin  $\alpha$  ile çinkoca zengin  $\eta$  fazlarına dönüşmesi, 275 °C den daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir [11]. Çinko-alüminyum faz diyagramında meydana gelen önemli faz dönüşümleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler [11].

Dönüşüm	Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
<b>Ötektik</b> $S \rightleftharpoons \beta + \eta$	<b>95</b>	<b>382</b>
<b>Ötektoid</b> $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$ $\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	<b>78</b> <b>52</b>	<b>276</b> <b>340</b>
<b>Peritektik</b> $\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	<b>71.6</b>	<b>443</b>

### 1.2.2. Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum-bakır faz diyagramlarında, faz dönüşümleri ikili çinko-alüminyum alaşım sistemiyle kıyaslanırsa bu dönüşümlerin çok daha fazla karmaşık olduğu görülmekte ve bu dönüşümlerin tamamlanması uzun sürmektedir. Bunun nedeni olarak;  $\varepsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) gibi metaller arası (intermetalik) bileşiklerin oluşması gösterilmektedir. Faz dönüşümlerini büyük ölçüde yavaşlatan bakır katkısı, aynı zamanda kalıcı bir hacimsel büyümeye yol açmaktadır [12,13]. Zn-Al-Cu alaşımlarında görülen bu hacimsel büyümenin, katılaşma sırasında oluşan yarı kararlı (metastabil) fazların kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda ortaya çıktığı belirlenmiştir [14]. Dörtlü faz dönüşümü olarak bilinen  $\alpha + \varepsilon \leftrightarrow T' + \eta$  reaksiyonu sonucunda %4,5 oranında kalıcı bir hacimsel büyümenin ortaya çıktığı belirlenmiştir [15,17,18,19].



### 1.2.3. ZA Alaşımlarının Özellikleri

#### 1.2.3.1. ZA Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

ZA esaslı alaşımların ısı genleşme, elektriksel iletkenlik ve ısı iletkenlik katsayıları alüminyum alaşımları hariç geleneksel yatak alaşımlarının sözü edilen katsayılarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu belirtilmekte ve bu değerler artan alüminyum oranı ile artmaktadır. Diğer taraftan, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunlukları bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarının yoğunluklarından daha düşüktür [20].

Ayrıca, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunlukları alüminyum oranı arttıkça azalmakta, bu da söz konusu alaşımların birim maliyetini düşürmektedir. Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında katılma sırasında oluşan yarı kararlı fazların, yaşlandırma sırasında kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda önemli ölçüde hacimsel büyüme meydana gelmektedir [21].

İkili çinko-alüminyum denge diyagramından da görüldüğü gibi, alaşımların ergime noktası ve katılma aralığı alüminyum oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Alüminyum oranı arttıkça, alaşımların ergime noktası yükselmekte, katılma aralığı ise daralmaktadır [19,22].

ZA esaslı alaşımların, geleneksel döküm alaşımların çoğundan daha düşük ergime sıcaklığına sahip olması, döküm için enerji sarfiyatını azaltmakta ve döküm gereçlerinin ömrünü artırmaktadır [23].

Tablo 1.2’de ZA alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri verilmiştir [15,24].

Tablo 1.2. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri [15,24]

<b>ALAŞIMLAR</b>						
<b>Fiziksel Özellikler</b>	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
<b>Yoğunluk (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	6,30	6,03	5,0	8,50	8,83	6,94
<b>Katılma Büzülmesi (%)</b>	1,0	1,2	1,3	-----	-----	1,0
<b>Katılma Sıcaklık Aralığı (°C)</b>	404-375	430-380	490-380	1010-855	975-855	1232
<b>Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°K)</b>	23,2	24,1	26,0	18,0	18,0	11,9
<b>Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m°K)</b>	115	116	126	72	59	45
<b>Elektrik İletkenlik Katsayısı (%IACS)</b>	28	28	30	15	12	6

### 1.2.3.2. ZA Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

ZA alaşımları endüstriyel kullanımlarda oldukça dikkat çekmektedir. Bu durum, sahip oldukları üstün akışkanlık, dökülebilirlik ve iyi mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. İlk zamanlarda, aşınma direnci ve yatak özellikleri bakımından ZA-35 gibi ZA alaşımları geliştirilse de araştırma imkanlarının artmasıyla sonraki zaman dilimlerinde ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 gibi değişik alüminyum oranlarına sahip prototip döküm parçalar üretilip geliştirilmiştir.

Tablo 1.3'e bakıldığında, ZA-27 alaşımının yüksek çekme ve akma dayanımı özellikleri ile üstün olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, alüminyum; bakır ve dökme demir gibi döküm alaşımlarıyla sürekli bir rekabet halindedir [25].

Tablo 1.3. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri [15,22,24,26]

<b>ALAŞIMLAR</b>						
<b>Mekanik Özellikler</b>	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	221-255	310-345	414-441	255	240	214
<b>Akma Dayanımı (MPa)</b>	200-210	207-268	372-393	114	124	124
<b>Kopma Uzunluğu (%)</b>	1-2	1,5-2,5	2-3	30	20	-----
<b>Brinell Sertlik Değeri (BSD)</b>	85-90	85-95	110-120	60	65	210
<b>Darbe Dayanımı (J)</b>	13-18	17-22	25-40	15	8	-----
<b>Yorulma Dayanımı (MPa)</b>	103	103	172	-----	-----	-----
<b>Kayma Mukavemeti (MPa)</b>	241	255	270	-----	-----	-----

ZA alaşımları, oda sıcaklıklarında yeterli özelliklere sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin yetersiz olduğu görülmüştür. Ayrıca, 100 °C sıcaklık civarında çekme dayanımlarının ve sürünme dirençlerinin düşüş gösterdiği belirtilmiştir. Düşük ergime sıcaklıkları göz önüne alındığında, özelliklerin olumsuz etkilendiği bu sıcaklık değeri yaklaşık olarak 0,26 T<sub>m</sub> değerine karşılık gelmektedir [25].

### 1.2.3.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özellikleri

ZA esaslı alaşımlar, benzersiz özellik kombinasyonlarıyla, plastik ve çelik malzemelerle yarış halinde olmasının yanında çoğu alüminyum alaşımı, bronz yataklar ve dökme demirlere göre de rekabet halinde olan alternatif malzemelerdir. ZA alaşımlarının dikkate değer bazı özellikleri; yüksek aşınma direnci (kaymalı yataklar ve burçlarda

kullanışlı olması), iyi işlenebilirlik, çeşitli ortamlarda mükemmel korozyon direnci ve yüksek sönümlenme özellikleridir [27].

Bu alaşımlar pek çok uygulamada günümüzde geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaya başlamıştır. Söz konusu alaşımlardan imal edilen yataklar; daha çok düşük hız ve yüksek basıncın olduğu kaymalı yataklarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen günümüzde kullanım alanlarına göre değişik özelliklere sahip alaşımlar geliştirilmektedir [2].

### **1.3. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler, istenen amaç için tek başlarına elverişli özelliklere sahip olmayan farklı iki veya daha fazla malzemenin istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzeme grubudur. Bu malzemelerin bir araya getirilmesindeki amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başlarına sahip olamadığı bir özelliğin elde edilmesidir. Başka bir deyişle, üstün özellikli bir malzeme ortaya çıkarmak ve bunun sağlanmasında içerikteki tüm malzeme özellikleri kullanılarak bir üretim gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Kompozit malzemeler, sıklıkla “çok bileşenli malzeme”, “çok fazlı malzeme”, “donatılı malzeme” ve “pekiştirilmiş malzeme” olarak da bilinir ve ifade edilirler [30].

Kompozit malzemelerde ana yapı yani matris malzemesi olarak genellikle metaller ve alaşımları, seramikler ve polimer malzemeler kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise seramik, karbon, cam, grafit gibi malzemeler tercih edilmektedir. Bazı durumlarda ise ana yapı ile takviye elemanı, aynı malzemenin farklı fazlarından da oluşabilirler. Bu duruma en güzel örnek karbon-karbon kompozitlerdir [31]. Takviye elemanları, geometrilerine göre sürekli ve süreksiz takviye elemanları şeklinde iki şekilde sınıflandırılabilir. Sürekli takviye elemanları elyaf olarak ifade edilir ve bu elemanlar kullanıldıkları kompozitlerde yöne bağlı özellikler görülmesine neden olur. Malzemedeki mekanik ve fiziksel özelliklerin daha iyi olmasını sağlamak için, ana yapı içerisinde takviye elemanlarının düzenli dağılımı olması gerekir. Bunun sağlanamadığı durumlarda, yapı içerisinde zayıf bölgeler oluşur veya ayrışmalar meydana gelebilir. Kompozit malzemelerde istenmeyen bir başka durum ise yapıda istenmeyen süreksizliklerin oluşmasıdır çünkü bu durumda malzemenin özellikleri olumsuz yönde etkilenecektir [32].

Liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırması ve kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olması matrisin diğer önemli görevlerindedir. Ancak; matrisin, yük taşımaya ikinci malzeme olarak katılma durumu, basınç altında kalması halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük oranda matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır. Bir kompozitin kullanım sıcaklığını belirlemede matrisin kullanım sıcaklığına bakılır. Çünkü kompozitin kullanım sıcaklığı matrisin kullanım sıcaklığı ile sınırlanmıştır. Matrislerin çoğu sıvı halde kullanıldığı için viskoziteleri (akışmazlık) de çok önemlidir. Matrislerin diğer önemli özellikleri de, erime noktası, sıcaklık, kütleme süresi gibi fiziksel özelliklerdir [33,34,35].

### 1.3.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin sahip olduğu özelliklerin geliştirilmesiyle üstün özellikler göstermesine ek olarak değişik faydalar da sağlamaktadırlar. Bu avantajlar aşağıda sıralanmıştır [36].

- Kompozit malzemeler yüksek sertliğe sahip olmalarının yanında aynı zamanda daha hafif malzemelerdir.
- Yüksek mukavemet özelliklerine sahiptirler.
- Yorulma dayanımları yüksektir.
- Yüksek termal ve ısı iletkenliğine sahiptirler
- Yüksek aşınma ve korozyon dayanımı gösterirler.
- Kompozitler kullanıldıkları yere göre iletken ya da yalıtkan özellik sergileyebilirler.
- Tasarım ve şekillendirilme kolaylığı sağlarlar [36].

Bu özelliklerin hepsi bir anda sağlanamamasına rağmen uygulanacak yere ve gerekli özelliğe göre bir veya birkaç özellik bir malzemedeki sağlanabilir. İstenen özelliğin elde edilebilmesi için uygun matris ve takviye elemanı, bileşenlerin özellikleri ve uygun üretim tekniği gibi etkenlerin karar verilmesinde dikkat edilmelidir [36].

Kompozit malzemelerin, avantaj sağladığı durumların yanında bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şunlardır;

- Kompozit malzemelerin üretimi oldukça güç ve maliyetleri yüksektir.
- Kopma uzaması daha düşüktür.

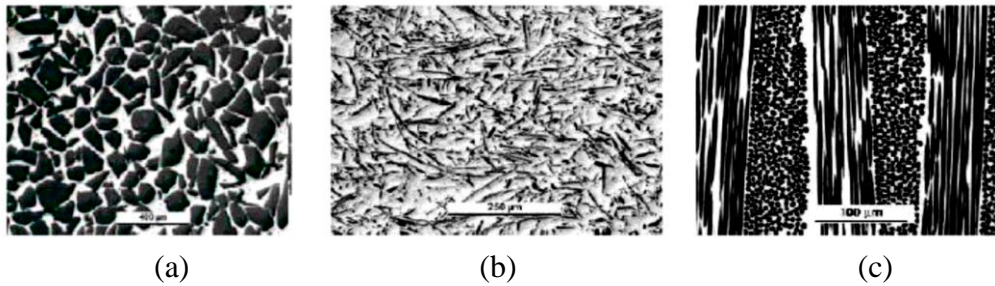
- Geri dönüşümü olmayan malzemelerdir.
- İşlenmesi zor olmakta ve gereken yüzey kalitesi tamamıyla elde edilememektedir [36].

### 1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, yapıları gereği değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. Matris malzemesine göre metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozitler olarak sınıflandırılabilir gibi, takviye malzemesine göre de parçacık takviyeli kompozit malzemeler, elyaf (lif) takviyeli kompozit malzemeler ve tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırma yapmak mümkündür [37].

#### 1.3.2.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi hafif metal ve alaşımların matris işleviyle; karbon, bor ve diğer bazı metallerin elyaf, parçacık, plakacık, kıl-kristal (whisker) yapısında takviye fazını oluşturmasından meydana gelir. Bu karma malzemeler daha üstün mukavemet, aşınma, korozyon, sertlik özellikleriyle nükleer güç ekipmanlarında, gaz türbinlerinde, uzay-havacılık, otomotiv sektöründe kullanılırlar [37]. Şekil 1.2'de takviye malzemesi geometrisine göre bazı metal matrisli kompozitler şematik olarak verilmektedir.



Şekil 1.2. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitlerin şematik olarak gösterilmesi, (a) parçacık takviyeli, (b) kısa fiber takviyeli, (c) sürekli fiber takviyeli [38].

Bu malzemelerin seçiminde hemen hemen hiçbir sınırlama yoktur. Deneysel çalışmalara bakıldığında çok farklı türlerin kullanıldığı göze çarpar. Son 45-50 yıldır MMK'ler ile ilgili pek çok araştırma yapılmış ve literatürde olumlu şekilde yer almıştır. Ancak bunların optimum kullanım şartlarının belirlenmesinde ve pratikte kullanılmasında temel bazı şartlar aranır. Bu şartlar aşağıda verilmiştir:

- a) Yüksek elastiklik modülü,
- b) Yüksek mukavemet,
- c) Yüksek tokluk ve darbe özellikleri,
- d) Yüksek elektrik ve termal iletkenlik,
- e) Isıl şoklar ve sıcaklık değişikliklerine karşı düşük hassasiyet ve iyi sürünme direnci,
- f) Sürekli mükemmel özellik [39].

Metal matrise sürekli fiber takviye ilave edilmesi halinde elde edilen MMK malzemelerin özelliklerinin büyük bir kısmı karışım oranları kanununa göre belirlenirken, kısa fiber veya partikül katkılı metal matrisli kompozitlerde bu durum söz konusu değildir. Metal matrisli kompozitlerde malzeme özellikleri katkı hacim oranı ile uyumlu değişim göstermektedir. Metal matrisin cinsi, takviyenin cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, miktarı, uniform dağılması, kompozitin üretim yöntemi ve işlem parametreleri, mikroyapı içinde oluşan fazlar, matris ile katkının kimyasal uyumluluğu, ek olarak termomekanik ve ısı işleme tabi tutulması gibi bir çok etken metal matrisli kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır [40,41,42].

Sürünme, sabit yük altında malzemenin zaman içinde göstermiş olduğu deformasyondur. Sıcaklık, sürünmeyi arttırıcı bir faktördür. Yüksek sıcaklık uygulamaları için metal matrisli kompozit malzemelerin sürünme özelliği önemlidir. Kısa fiber ve partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, sürünme hızının, takviye hacim oranının artışı ile düştüğü görülmüştür [40,41,43,44,45].

Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin, metal alaşımlarına göre en önemli üstünlüklerinden biri de aşınma özellikleridir. SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC, B<sub>4</sub>C gibi sert partiküller, metal matrisin aşınma direncini arttırırken, grafit partiküller de yağlayıcı özellik sağlarlar. Yapılan çalışmalar, partikül takviyeli Al matrisli kompozitlerde aşınma direncinin, takviye elemanı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. Aşınma direncini etkileyen diğer bir faktör ise matris malzemesinin sertliğidir. Alüminyum ve alaşımları, çelik veya dökme demirle mukayese edildiğinde, genelde daha düşük sertliğe sahiptir. Bu yüzden yoğun aşınmaya maruz kalan yerlerde kullanılmazlar. Takviye elemanı ilavesiyle aşınma

direnci artmakta, bu sayede MMK malzemeler aşınma direncinin önemli olduğu uygulama alanlarında kullanılmaktadır [40,41,43,44,45].

### **1.3.2.1.1. Matris Malzemeleri**

Matris malzemeleri takviye elemanını sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan sürekli fazı meydana getiren ana yapı malzemesidir ve takviye elemanlarını bir arada tutarak birkaç kritik fonksiyonu da yerine getirirler. Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparlarken takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korurlar. Takviye elemanlarından kırılma çatlakların yayılmasını da engellerler ve kayma, basma, akma, sürünme, dielektrik ve termo mekanik özellikleri belirlerler. Kompozit malzemelerde matristen beklenen özellikler başta hafiflik olmak üzere korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye elemanı ile uyumluluğudur [46].

Metal matrisler yüksek dayanımlı, yüksek modüllü, yüksek tokluk ve darbe dayanımı özelliklerine sahip ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyen yapıya sahip malzemelerdir. Ayrıca atmosfer şartlarına karşın korozyon dayanımları oldukça yüksektir [36,47].

Kompozit malzemelerde metal matris olarak düşük yoğunluklu, tokluk ve mekanik özellikleri iyi olan hafif metaller ve alaşımlar kullanılmaktadır. En yaygın metal matris malzemesi olarak; alüminyum (Al) ve alaşımları, Çinko-alüminyum (ZA) alaşımları titanyum ve alaşımları ile magnezyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Bunların dışında nikel, bakır ve gümüş de kullanılmaktadır [48,36].

### **1.3.2.1.2. Takviye Elemanları**

Takviye elemanı, kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. Yükün takviye elemanına iletilmesi için ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanlarının ıslanamaması, ara yüzey bağlarının oluşumunun engellenmesine ve hava oluşmasına neden olur. Dolayısıyla takviye elemanı seçimi ile matris içerisinde yönlendirilme şekilleri ve hacim oranları, kompozitin fiziksel ve mekanik karakteristiklerini etkiler [50,51,52,53]. Takviye elemanı ve matrisin ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşmaması yönünden önemlidir [49].



Genelde takviye malzemesi olarak kullanılan seramik malzemeler; oksitler ( $Al_2O_3$ - Alümina,  $SiO_2$ - Silikon dioksit), nitritler ( $Si_3N_4$ -Silika Nitrit,  $AlN$ -Alüminyum Nitrit) ve karbürlerlerdir ( $SiC$  - Silisyum Karbür,  $TiC$  - Titanyum Karbür). Bunun yanı sıra karbon (C) ve Silisyum (Si) gibi elementsel malzemeler de, takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Kompozit içerisinde yer alacak takviye elemanları, sürekli lif, kırık lif, kedi bıyığı (whiskers), plaka veya düzensiz şekilli olabilir. Takviye elemanın, yapı içerisindeki dağılımı sistemin homojenliğini tayin eder. Bu homojenlik, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemede önemli bir faktördür [54].

#### 1.3.2.1.2.1. Alümina ( $Al_2O_3$ )

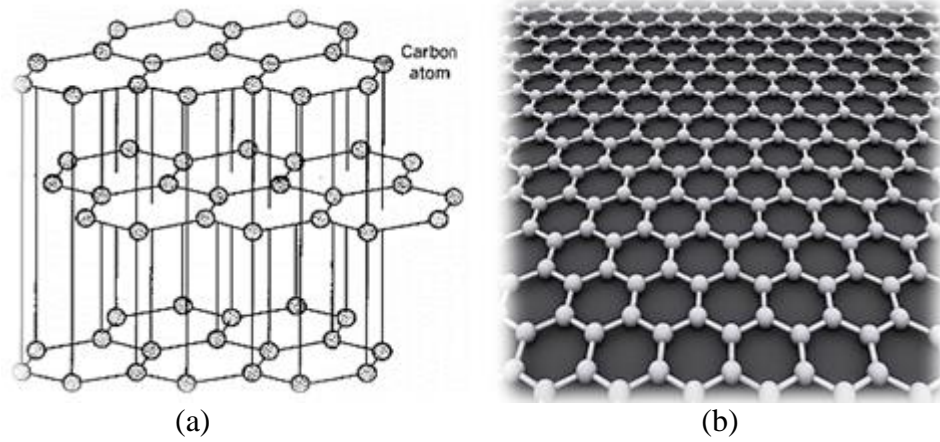
Alümina, kristalografik olarak oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzogonal olarak sarılması ile ifade edilebilir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozdur [55]. Oksit yapıdaki seramik çeşitlerinden biri olan alümina, endüstride genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Kimyasal olarak oldukça kararlı bir yapıda bulunan alüminanın, diğer malzemelerle tepkimeye girme eğilimi düşüktür [56]. Kırılma tokluğu, dayanımı ve rijitliği diğer takviye elemanları kadar iyi olmamasına rağmen, ekonomik olması ve orta seviyede mekanik dayanım ve aşınma dayanımı sağlaması nedeniyle kompozit üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir [57].

Mukavemet ve ergime sıcaklığının yüksek, elektrik iletkenliğinin düşük oluşu, alüminanın; refrakterlerde, elektrik yalıtkanlarında, kesici uçlarda, ısı motorlarında, aşınmaya maruz kalan parçalarda ve kompozit malzemelerde çok geniş kullanım alanı bulmasını sağlar. Alümina özellikle yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluğu ve yüksek sıcaklık dayanımı ile geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak  $1000\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda aşınma hızının yükseldiği bildirilmiştir [58,59].

Erime sıcaklığı  $2050\text{ }^{\circ}C$ 'lerde olup yüksek modüllü alüminyum ile iyi karışım yapabilir. Diğer seramik takviye elemanlarında olduğu gibi oluşturdukları kompozitlerde iyi sürtünme ve aşınma davranışı sergilerler. Bu nedenle fren diski, piston, silindir gömleği gibi otomobil parçalarında çokça kullanılır. Sanayide ise kor renkli ergimiş alümina (yaklaşık %21 kromoksidin elektrik ark fırınlarında sıcak hava vermesi suretiyle saf alüminadan elde edilen yüksek saflıktaki alüminyum oksittir) kullanılır. Ayrıca; ısı işlemleri dövülebilir dökme demirin düzgün taşlanması, yüksek hız çeliğinin silindirik taşlanması, ısı işlem görmüş yüksek hız çeliğinden mamul takımların taşlanması kullanılabilir [60].

### 1.3.2.1.2.2. Grafit

Aynı maddenin değişik kristal biçimlerine allotrop denir. Elmas ve grafit, karbonun allotroplarındır. Elmasta her karbon atomu, dört başka karbon atomuna bağlanarak üç boyutlu katı bir yapı oluşturur; grafitte ise karbon atomları üst üste yığılmış, geniş, yassı levhalar oluşturacak biçimde, iki boyutlu düzlemde birbirlerine bağlanmıştır [61]. Şekil 1.3'te grafit ve grafen atomlarının dizilimleri gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Grafit ve grafenin atom dizilimlerinin şematik olarak gösterimi; (a) Grafitin atom dizilimi, (b) grafen, karbon atomlarının arı peteği şeklinde iki boyutlu olarak dizildiği karbon allotropu [61].

Grafit, tabakalı yapıya sahip olup; tabakalar boyunca yoğunluk oldukça yüksektir ve tabakalara dik doğrultuda yani c doğrultusunda yoğunluk düşmektedir. Takalardaki karbon atomları  $129^{\circ}$  açıyla birbirlerine kuvvetli bir şekilde bağlanırken tabakalar arasında zayıf Van Der Waals tipi bağ yapısı bulunmaktadır. Kayma deneylerinde grafitin tabakalar halinde ince bir film oluşturarak yüzeylere yapıştığı ve bu sayede malzemelerin daha düşük sürtünme katsayısı oluşturduğu belirtilmekte ve ortamda bulunan düşük orandaki su, grafitin yağlayıcı bir ortam oluşturmasını sağlamaktadır [62].

Kayganlığı, yumuşaklığı ve makina parçaları üzerinde uzun müddet yapışabilme özelliği nedeni ile, makina yataklarında yağlama maddesi olarak kullanılabilir. Bu alan için kullanılacak grafitin çok saf olması (en az % 95 grafitleşmiş karbon) ve kuvars gibi sert mineralleri içermemesi gerekir. Bu alan için en uygun grafit türü pul şeklinde olanıdır. Grafit 0,1 – 1  $\mu$  boyutuna öğütüldükten sonra, yağ, su, alkol veya bunlara benzer taşıyıcı bir sıvı içerisinde kolloid hale getirildikten sonra, makina parçasının istenen yerine iletilir. Taşıyıcı

sıvının türüne bağlı olarak, grafit burada kuru veya yaş bir tabaka oluşturur. Kuru tip grafit, motor silindirlerinde, deniz araçlarında ve kimyasal tesislerde; yaş tabaka türü ise, yüksek basınç altında, bilyalı yataklarda kullanılır [63,64].

#### 1.4. Nanoteknoloji

Nano-teknoloji ultra ince/küçük parçaların/malzemelerin kullanım bilimidir. Bir nano metre (1 nm) milimetrenin milyonda birine eşittir ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m} = 10^{-6}\text{ mm}$ ). İnsan saç kılı 80.000 nm kalınlığındadır. Nanobilimi malzemelerin büyük ölçekteki özelliklerinden farklı olarak malzemeleri atomik, moleküler ve makro moleküler ölçekte inceler ve manipüle eder. Parça boyutu incelidikçe birim kütle için yüzey alanı artışı, malzemenin kimyasal reaktivitesini artırır. Bu yüzden nano-malzemeler yakıt hücreleri ve pillerde katalizör görevi görebilmektedir. Parça boyutu incelidikçe kuantum etkisi artar, malzemenin optik, manyetik ve elektriksel özellikleri önemli ölçüde değişir [65].

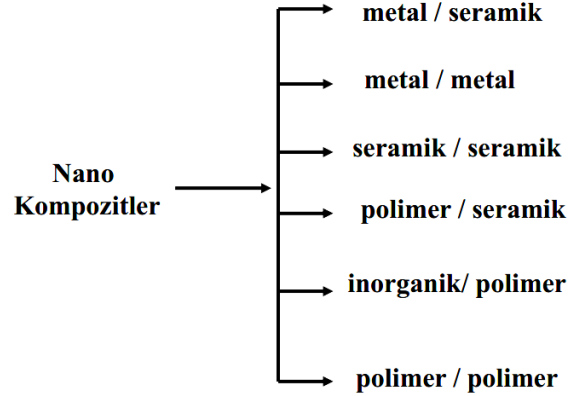
Nanoteknoloji, atomlarla oynayan bir teknolojidir. Atom ve molekülleri tek tek manipüle ederek istenilen yapının oluşturulması ilkesine dayanır. Atomlar ayrı ayrı işleme tabii tutulur. Yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturmaktadır. Nanoteknoloji de bu bağlamda “çok küçük maddelerin teknolojisi” olmaktadır [66, 67,68,69].

Normalde kırılğan bir malzeme olan seramik, tanecik büyüklüğü nanometre değerine indirildiğinde kolaylıkla deforme olup şekillendirilebilmektedir. 1 nm büyüklüğündeki altın tanesi kırmızı renk göstermektedir. Nano büyüklükteki tozlarla takviyelendirilen kompozit malzemeler çok daha yüksek performans değerlerine ulaşmaktadırlar [70].

Bilgisayar yongaları (chip), cd'ler ve mobil telefonların yapımında nano-malzemeler kullanılmaktadır. Nano-malzemelerden üretilen cihazlar daha hızlı, hafif, kuvvetli ve verimli olmaktadır. Nano-teknolojiler sağlık, bilgi teknolojileri (IT) ve enerji depolamada çok büyük potansiyel kullanım olanaklarına sahiptir. İçinde yaşadığımız dünya nano-teknolojilerle çok önemli gelişmeler kaydedecektir. Dünyada gelişmiş devletler ve iş dünyası nano-teknolojiye çok büyük yatırımlar yapmaktadır [71,72,73].

### 1.4.1. Nanokompozitler

Nanoteknolojinin özü, moleküler boyutta çalışarak, moleküler yapısı yenilenmiş büyük yapılar elde etmektir. Malzemelerin nanometrik boyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Nanokompozitler, bir matris içerisinde nanometre büyüklüğünde parçacıkların dağılması ile oluşan malzemelerdir ve Şekil 1.4'te gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadırlar. Nanokompozitlerin malzemeye getirdiği üstünlükler; elastiklik modülünü artırması, ısı direncini artırması, malzemeye gaz sızmasını engellemesi, yanıcılığını azaltması olarak sıralanabilir [74]. Ayrıca, nano ve mikro kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, parçacık boyutunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve azalan parçacık boyutu ile birlikte mukavemet, kopma mukavemeti, sıkıştırma mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerin en iyi derecelere geldiği saptanmıştır [75].



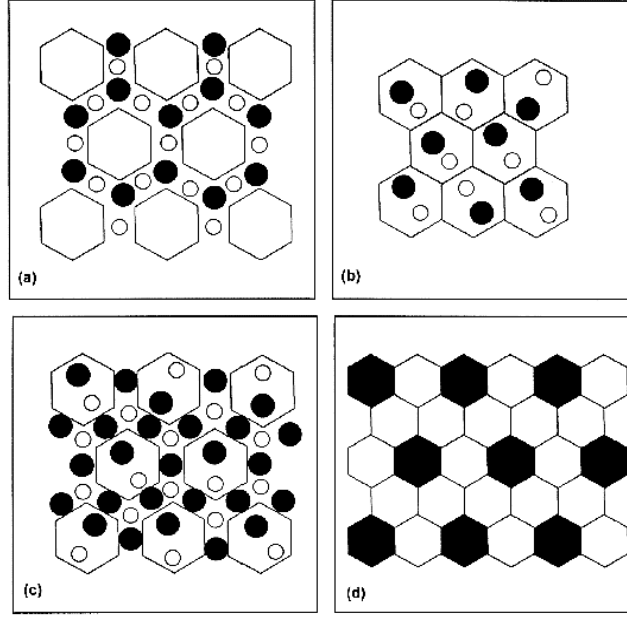
Şekil 1.4. Nanokompozitlerin sınıflandırılması [74].

Nanoboyuttaki tozlar, gelişmiş özelliklere sahip nanokompozitleri oluşturmak üzere seramik, metal ya da polimer gibi malzemeler içinde destekleyici olarak kullanılmaktadır.

Nano toz / Nano toz seramik kompozitler için kullanılacak tozlar;

- Yüksek kimyasal saflık
- Homojen toz boyut dağılımı
- Düşük topaklaşma
- Nano boyutta homojen olarak dağılmış tozların elde edilmesi gerekir [74].

Mikro yapılarına göre ise nanokompozitler, Niihara'ya göre Şekil 1.5'te verildiği gibi tane içi, taneler arası, hibrit ve nano-nano kompozitler olmak üzere dörde ayrılmaktadır.



Şekil 1.5. Nanokompozitlerin mikro yapılarına göre sınıflandırılması; (a) tanelerarası, (b) tane içi, (c) hibrit, (d) nano/nano kompozitler [76].

İlk üç sınıfta sadece takviye elemanı nano boyutlarda iken sonuncu sınıfta hem matris hem de katkı elemanı nano boyutlardadır. Taneler arası nanokompozitlerde (Şekil 1.5 a), nanometrik ölçülerdeki takviye elemanı, mikron mertebesindeki matris fazında tane sınırları boyunca dağılır. Tane içi nanokompozitlerde (Şekil 1.5 b), takviye elemanı kaba matris tanelerinin içinde bulunur, hibrit şeklindeki nanokompozitlerde (Şekil 1.5 c) ise takviye elemanı, hem matris taneleri içinde hem de tane sınırlarında bulunur [76].

#### 1.4.2. Metal Matrisli Nanokompozitler (MMNK)

Nano partikül takviyeli metal matrisli kompozitler, metal matrisli nanokompozit olarak tanımlanır. Nanokompozitler, son yıllarda, çok sayıda işlevsel ve yapısal uygulamalar için umut verici özellikleri sayesinde sürekli araştırılmaktadır. Takviye fazının nano boyuta indirgenmesi sonucunda, dislokasyonlarla partiküllerin etkileşimi önemli hale gelir. Tipik olarak bulunan geleneksel metal matrisli kompozitlere güçlendirici takviyelerin yapılması sonucunda, mekanik özelliklerde kayda değer bir gelişme görülmektedir [77].

MMNK'lerin üretiminde karşılaşılan ana sorun, seramik nano parçacıkların ergimiş metal matrisle ıslanabilirliğinin düşük olmasıdır. Bu durum MMNK'lerin geleneksel döküm

yöntemleriyle üretilmesine izin vermez. Güçlendirme potansiyelinin en uygun kullanımı için toz partiküllerinin matris içine homojen olarak dağılması gereklidir. Tozlar bu yeteneğini kaybederek kümeleşme eğilimi içine girerler. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla birçok üretim metodu öne sürülmüştür [77].

Literatürde, farklı türlerdeki metal matrisler, değişik tiplerdeki nano fazlarla eşlenmiştir. Seramik bileşikler (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, vb.), intermetalik malzemeler ve karbon allotropları; Al, Mg, Cu ve diğer metal ve alaşımlarına katılarak kullanılır. Özelliklerinin önemi, çok yüksek sertlik, mukavemet ve elektriksel iletkenlikle karakterize edilen karbon nanotüplerle tayin edilir. Bu özellikler, temel malzemenin elektriksel ve termal özelliklerini arttırmasının yanında, yüksek mukavemet özelliği de kazandırır. Ayrıca; MMNK'lerin aşınma direnci, sönümlene kapasitesi ve sürünme davranışı gibi diğer mühendislik özelliklerini geliştirme kabiliyetine sahip oldukları belirlenmiştir [77].

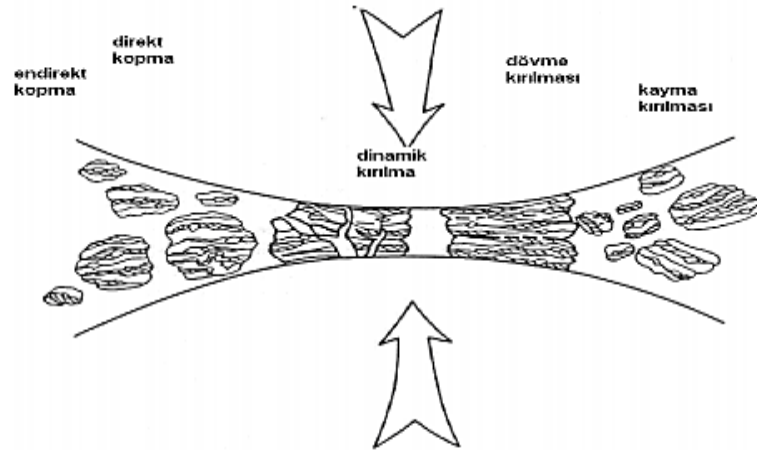
### **1.5. Mekanik Alaşımlama**

Mekanik alaşımlama (MA) ileri malzeme teknolojisi alanında, özellikle uzay sanayisinin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiş yeni üretim tekniklerinden biridir [5,6]. MA son derece ilgi çekici özellikler gösteren bir toz üretim tekniğidir. Otuz üç yıl önce International Nickel Company şirketinde çalışan Benjamin ve arkadaşları tarafından geliştirilen MA, toz parçacıklarının sürekli kaynaklandığı, parçalandığı ve yeniden kaynaklandığı ve yüksek enerjili “top değirmen” ortamında gerçekleşen bir işlemdir. İlk mekanik alaşımlanmış malzemeler öncelikle uçak endüstrisinde kullanımı düşünülerek geliştirilmiştir. İlk ticari başarıyı ise INCONEL MA 754 alaşımı göstermiştir. Bu alaşım 23 yıldan beri askeri uçakların motorlarının sıcak bölgelerinin bir parçası olarak halen kullanılmaktadır [78,79,80,81,82,83].

Mekanik alaşımlama alışlagelmiş metotların aksine tamamen bir katı-hal işlemi olup sert refrakter oksit partiküllerinin yumuşak matris içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamak ve Al, Ti gibi reaktif elementlerin alaşımda bulunmasına müsaade etmektedir. Alaşımlama için değirmene konan metal tozları yüksek hızda çarpışan bilyelerin arasında kalarak birbirine kaynamakta, kırılmakta ve tekrar kaynatarak refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır. Yapının homojenliği; katılan tozun durumu, öğütme süresi, koruyucu atmosfer, bilye çapı ve değirmenin dönme hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Mekanik olarak alaşımlanan tozlar daha sonra birleştirme, sıcak

haddeleme ve yeniden kristalleşme işlemine tabi tutulur ve iri, uzun taneli malzemeler elde edilir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık performansını artırmak için özellikle uzay sanayi ve gaz türbini uygulamaları için geliştirilmiş olmalarına rağmen oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır [84].

MA işlemi üç ayrı aşamada ele alınabilir. Birinci aşamada, öğütme sürecinde oluşan çarpışma (bilye-cidar, bilye-bilye, ve karıştırıcılar-cidar) esnasında arada kalan tozlara darbe enerjisi yüklenir. Bu darbe enerjisi nedeniyle, kırılma sonucu tozlarda oluşan yeni parçalar birbirleriyle kaynaklanır. Böylece, tozların parçacık boyutu alaşımlamanın ilk aşamasında büyür. Bu aşamada parçacık boyutu büyüyerek başlangıçtaki parçacık boyutunun 3 katına kadar çıkabilir. İkinci aşamada, MA süresinin ve deformasyonun artmasıyla tozlardaki deformasyon pekleşmesi ve sertlik artar. Bu aşamada toz parçacıklarında kırılma başlar. Üçüncü aşamada her bir toz parçacığı içerisinde bulunan alaşım tabakalar arasındaki boşluklar azalırken, aynı zamanda bu alaşım tabakalarının sayısı artar. Belli bir süre öğütmenin ardından kararlı hal dengesine ulaşılır. MA'da süre, toz parçacıklarının kararlı hal dengesine ulaşmasında en önemli parametrelerden biridir. Süre, toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanma kararlı hale gelecek şekilde seçilmelidir [85].



Şekil 1.6. Mekanik alaşımlama mekanizması [85].

Şekil 1.6'da görüldüğü gibi iki çelik bilye çarpışırken arasında çok sayıda tozu sıkıştırır. Plastik deformasyona uğramış tozlar yeni yüzeyler oluşturur ve parçacıkların birbiriyle kaynaklanmasına imkan sağlar [86].

Kaynaklanma parçacık boyutunda artışa neden olur. Başlangıç tozları sünek-sünek veya sünek-gevrek malzemeler kullanılmışsa partiküller kaynaklanarak büyüme eğilimlidir. Bu aşamada partiküller başlangıç tozlarının çeşitli kombinasyonlarının katmanlı yapı özelliklerine sahiptir. MA işleminde artan süreyle deformasyon devam eder ve parçacıklar sertleşerek kırılmaya başlar. Kırılan parçacıklar bu mekanizma tarafından üretilir. Eğer sistemde tozlar üzerinde topaklanma etkisi yoksa parçacık boyutunda daha da azalma gözlenir. Sistemde bu aşamada soğuk kaynak üzerinde kırılma eğilimi yüksektir. Bilyelerin çarpışma etkisinin devamıyla parçacıkların boyutunda oldukça fazla incelmeye olur. Sonuç olarak tabakalar arası boşluk azalır ve bir parçadaki tabaka sayısı artar. Artan MA süresine bağlı olarak lameller arası mesafe küçülür ve nano metre boyutuna iner. Son aşamada her partikül bütün başlangıç malzemelerini büyük oranda içermektedir. Nano boyutta malzemelerin üretimi için MA yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [87,88].

MA esnasında, parçacıklar aşırı deformasyona maruz kalır. Bu, dislokasyonlar, boşluklar, istiflenme hataları, artan tane sınırı sayısı gibi çeşitli kristal hatalarının varlığıyla görülür. Bu hata yapısının varlığı, çözen elementlerin matris içersine dağılma kabiliyetini artırır. Ayrıca, inceltmiş yapısal özellikler, difüzyon mesafelerini azaltır. Ek olarak, öğütme esnasındaki sıcaklıkta meydana gelen az miktarda artış, difüzyon davranışına daha fazla yardım eder ve sonuç olarak içerik elementleri arasında doğru alaşımlama olur. Bu alaşımlama nominal olarak oda sıcaklığında olurken, bazen alaşımlamanın yapılabilmesi için mekanik alaşımlanmış tozun yüksek sıcaklıkta tavlanması gerekebilir. Bu, özellikle metallere arası bileşiklerin oluşumu istendiğinde doğrudur [89].

Herhangi bir sistemde muayyen bir yapı geliştirmek için gerekli özel zaman, başlangıç boyutunun ve içeriklerin (karışımın) karakteristiklerinin ve MA işlemi için özel ekipman ve bu ekipmanın çalışma parametrelerinin bir fonksiyonudur. Fakat, çoğu durumda, iç yapının inceltme hızı (parçacık boyutu, tane boyutu, lameller arası boşluk, vb.) işleme hızıyla kabaca logaritmik olarak değişir. Bu yüzden başlangıç tozların boyutu nispeten önemsizdir. Birkaç dakikadan bir saate, lamellerarası mesafe çoğunlukla küçülür ve tane boyutu nanometre boyutlarına kadar inceltilir. Bu yüzden, MA' nın nanokristal malzeme üretmek için yaygın olarak kullanılmasının sebebi olarak, nano yapı malzemelerin elde edilebilme kolaylığı gösterilebilir [89].



## 1.6. Toz Metalurjisi (TM)

TM yöntemi genelde, takviyelenecek parçacıklara sahip matris alaşımının tozlarının karışımını, preslenmesini ve katı hal sinterlemesini kapsamaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, takviye ile matris arasında az bir reaksiyon meydana gelir ve diğer yöntemlerden daha düşük sıcaklıkların kullanılması gerekmektedir. İyi bir mikroyapı eldesi için karışımdaki bütün parçacıkların homojen olarak dağılması gerekir. Toz Metalurjisi (TM) yöntemi, seramik partiküllerin sıvı alaşım tarafından ıslatılmasındaki güçlük nedeniyle ilk olarak geliştirilen kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemde partikül veya whisker şeklindeki takviye malzemesi ile metal veya alaşım tozları karıştırılır. Bu karışım daha sonra soğuk ya da sıcak presleme ile kalıplanır. Soğuk preslemeden sonra ürün sinterlenir. Sinterlemedeki amaç partikül veya matris ara yüzey mukavemetinin artırılmasıdır. Sinterleme sonrasında %75-85 yoğunluğa sahip ara ürün daha sonra dövülür, haddelenir veya ekstrüze edilir [92].

TM, çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, TM’i cazip kılmaktadır. TM, farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip tozları hassas, sağlam ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yoluyla ısıl bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşen işlemleri verimli bir şekilde kullanır [92,93].

### 1.6.1. Metal Tozların Üretimi

Tozların birçok özelliğini belirlemede, metal tozlarının üretiminde kullanılan yöntemler etkin bir rol oynar. Üretim yöntemlerine bağlı olarak küreselden karmaşık şekle, çok farklı toz şekilleri elde edilebilmektedir. Üretim yöntemine göre değişiklik gösteren diğer bir husus da tozun yüzey durumudur. Malzemelerin çoğunun toz haline getirilmesinde, malzeme özelliklerine uygun bir teknik kullanılabilir. Çok sayıda toz üretim yöntemi mevcuttur ancak ticari olarak bahsedilecek olursa aşağıda verilen teknikler ön planda gelmektedir:

- Elektrolitik ayrıştırma yöntemi
- Kimyasal yöntemler
- Değirmende öğütme

- Mekanik alaşımlama
- Atomizasyon yöntemi
- Mekanik yöntemler
- Talaş kaldırma [38].

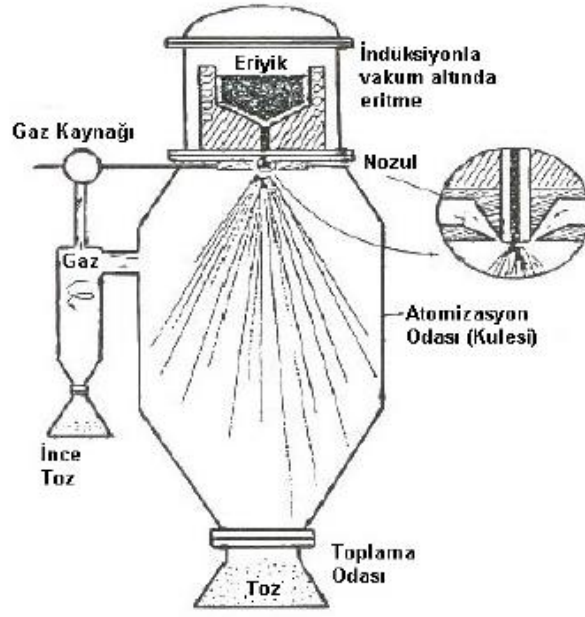
Farklı toz üretim metodlarıyla üretilen tozların şekilleri farklı bir yapı ortaya koyacaktır. Değişik toz üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen toz tane şekilleri; küresel, yüksek gözenekli, karmaşık, dendritik, pul ve iğnesel olabilmektedir.

Değişik uygulamalarda kullanılan bütün tozların %80 den fazlasının üretiminde atomizasyon yöntemleri kullanılır. Bunun sebepleri olarak, atomizasyon yöntemlerinin diğer üretim tekniklerine göre tane şekli, tane büyüklüğü ve dağılım kontrolünün gayet kolay olması ve özellikle alaşım tozlarının üretilmesinde bu yöntemlerin çok cazip olması sayılabilir [94].

Metal tozlarının üretiminde kullanılan değişik atomizasyon teknikleri maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

- Su jeti atomizasyonu
- Gaz atomizasyonu
- Santrifüj atomizasyonu
- Vakum atomizasyonu
- Ultrasonik gaz atomizasyonu

Gaz atomizasyon yönteminde kullanılan gaz olarak genellikle azot seçilir. Sıvı metal hüzmesine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülmesi ve hüzmenin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemi olarak tarif edilen bu teknikte iki veya daha fazla ağızlık sıvı metalin akma ekseni etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz jetleri ile sıvı metal hüzmesi bir noktada kesişir. Atomizasyon gazının cinsi, basıncı ve akış hızı, atomize edilecek sıvı metalin cinsi, akış hızı ve sıcaklığı, gazın püskürtüldüğü nozul tasarımı, bu yöntem dahilindeki işlem parametreleridir. Toz üretim sistemi ve gaz atomizasyon tekniğinin şematik gösterimi Şekil 1.7’de verilmiştir [51, 95].



Şekil 1.7. Gaz atomizasyon ünitesinin şematik gösterimi [51,95].

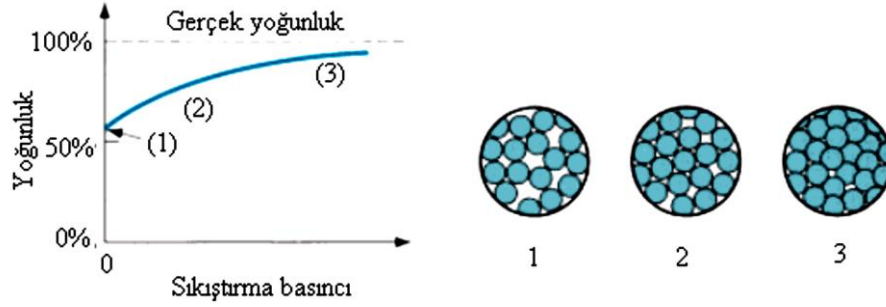
Su atomizasyonu yöntemi, atomizasyon yöntemleri içerisinde en çok kullanılan tekniktir. Çalışma prensibi, sıvı metalin akış eksenine etrafına en az iki tane olmak üzere eşit açıda yerleştirilen su jetleri ile kesilmesiyle açıklanabilir.

Serbest bir düşüşle akmakta olan metalin kesilmesi yassı huzmeli V-jetleri ile sağlanır. Atomizasyonda V-jetleri ikili veya dörtlü olarak kullanılabilir. İkili V-jetlerinde sıvı metal dağılıma uğramadan hüzmeye dışına çıkabilme olasılığı söz konusudur ve bu yüzden, dörtlü V-jetlerinde çalışma durumundaki verimi elde edebilmek amacıyla daha yüksek basınçlarda çalışmak gerekmektedir [53,96].

### 1.6.2. Presleme İşlemi

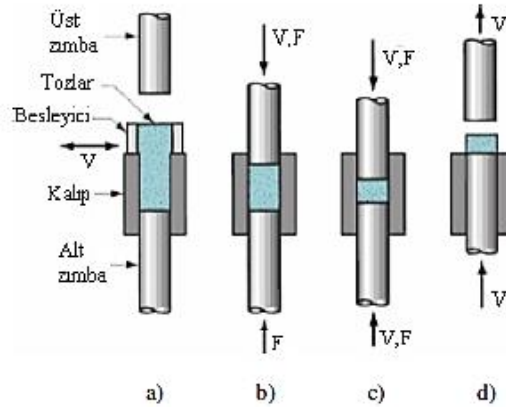
Tozların sıkıştırılmasında kalıp olarak genellikle kalıp çeliklerinden yapılan düşük hata paylı kalıplar; presleme işlemleri için pres olarak da emniyet ve esnekliklerinden dolayı sıkıştırma işlemlerinde yaygın olarak hidrolik veya mekanik presler kullanılmaktadır. Toz tipi ve özellikleri sıkıştırma basıncı üzerinde etkilidir [91] Sıkıştırma, serbest haldeki toz parçacıklarının bir yük uygulanarak istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi amacıyla gerçekleştirilen yoğunluk kazandırma işlemi olarak tarif edilebilir. TM üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı basma ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan

ilgilidir. İstenilen yoğunluğun ve fiziksel dayanımın elde edilmesi sinterlemede amaçlanan temel şarttır ve bu durum Şekil 1.8' de gösterilmektedir. İdeal yoğunluk olarak belirlenen değer %100 teorik yoğunluk değeridir Ortalama tane boyutunun küçük olması toz malzemelerin sıkıştırılabilirliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Görünür yoğunluk ve dayanımın elde edilmesi, tozların sıkıştırılmasındaki temel gayedir [99].



Şekil 1.8. Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisinin gösterilişi; (1) doldurmadan sonraki gevşek tozlar, (2) yeniden paketlenme olayı, (3) parçacıkların deformasyonu ve tozların yoğunluğunun, basınca bağlı olarak değişimi [97].

Presleme süresince kalıp içerisinde gerçekleştirilen işlemler ise Şekil 1.9' da adım adım gösterilmiştir [97].



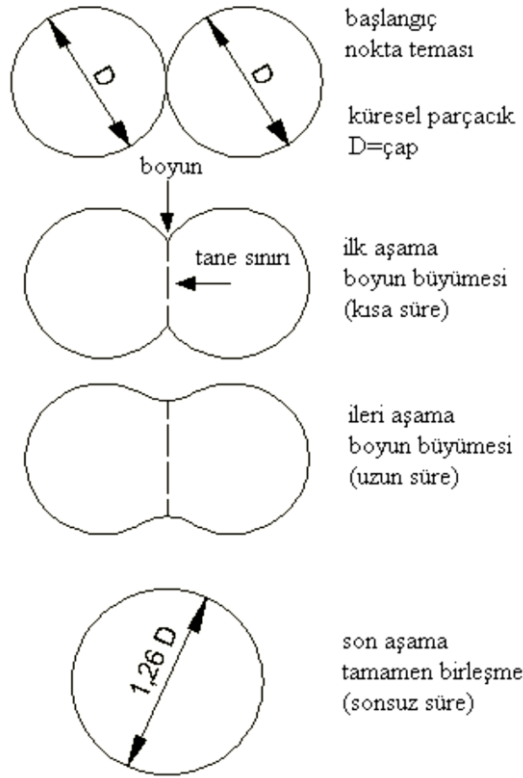
Şekil 1.9. TM'de presleme kademeleri, (a) kalıbın besleyici tarafından tozla doldurulması, (b) alt ve üst zımbaların presleme esnasındaki hareketi, (c) sıkıştırma ile son şeklin verilmesi, (d) parçanın kalıptan çıkarılması [97].

Alt zimba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozların doldurulması ilk adımdır. Toz besleme işleminin sona ermesinden sonra ölçülü toz miktarı presleme konumuna getirilir. Üst zimba kalıba girdikten sonra alt ve üst zimbalar merkeze doğru hareket ettirilir. Zimbaların sıkıştırma işlemini bitirmesinden sonra, üst zimba geri çekilir ve alt zimba sıkıştırma yoğunluğuna sahip parçayı kalıptan yukarı iterek çıkartır ve çevrim bu şekilde tamamlanır [98]. Kalıp içerisindeki tozun başlangıç yüksekliği sıkıştırılabilirliğinde belirleyici rol oynar. Dolayısıyla tozun şekli ve tane boyutu dağılımı tozun başlangıç yüksekliği ve sıkıştırılabilirliğiyle doğrudan ilgili parametrelerdir. Tozun kalıp içerisine sorunsuz ve hızlı akması da önem taşıdığından toz boyutu ve şekli tozun kalıba akış hızına önemli derecede etki eder. Örneğin, toz tanelerinin çok ince oluşu, toz akış hızının ve basma yoğunluğunun düşük olmasına neden olur. Toz dağılımı ise kalıpta basılan tozun yoğunluk dağılımının homojen olup olmaması üzerinde önemli rol oynar.

### 1.6.3. Sinterleme İşlemi

TM teknolojisinin diğer önemli bir adımı da sinterleme ısı işlemidir. Sinterleme işlemi, gözenekli yapıda şekil kazandırılmış tozların, özgül yüzey alanının küçülmesiyle birlikte partikül temas alanının büyümesi; temas alanının büyümesinin bir sonucu olarak yayının hızlanması ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak ifade edilebilir.

Sinterleme, birbirine bağlanan parçaların yüksek yoğunlukta bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleri ile oluşabilir. Sinterleme küçük parçaların yüzey enerjisinin azalması ve bunun sonucu olarak yüksek sıcaklıkta atomların yayınımları ile gerçekleşmektedir. Sinterleme işleminin ilk aşamasında her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi görülür. Ancak boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyümeye devam eder. Bu durumu özetleyen şematik bir gösterim Şekil 1.10'da verilmiştir [98].



Şekil 1.10. Sinterlemede nokta teması ile başlayıp parçacıklar arası bağ gelişimiyle devam eden iki küre sinterleme modelinin şematik gösterimi [98].

Sıkıştırma öncesinde parçacıklarda küçük noktalar halinde temas başlar. Başlangıçta gözenekler köşeli ve düzensiz şekildedir. Boyun dış bükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir iç bükeyliği göstermektedir. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Gözeneklerin çevresindeki kavis, kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurmasına rağmen sinterlemenin ara kademesinde gözenekler yuvarlaklaşır. Boyunlar birbiri ile etkileşerek örtüşecek hale gelene dek büyümeye devam eder. Gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelirler ancak hala dışa açık durumda bulunurlar. Yani hala akışkanların ham parça içine girip çıkabilmesi söz konusudur. Sinterlemenin devam etmesi ile gözenekler küçülür ve taneler büyür. Sinterlemenin devam etmesiyle gözenekler kapalı ve küresel bir hal alır.

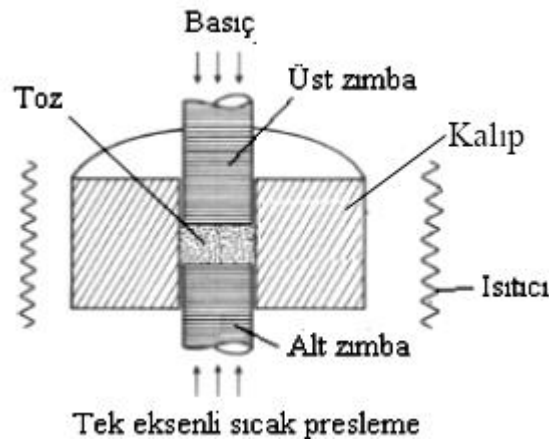
Esas olarak sinterleme işlemi katı hal sinterleme ve sıvı hal sinterleme olmak üzere iki bölümde sınıflandırılır. Sıkıştırılan tozun mikro yapısı malzeme ve işlem değişkenleri sinterlemeyi belirleyen önemli değişkenlerdir. Malzeme ile ilgili değişkenler sıkıştırılan tozun kimyasal bileşimi, toz boyutu, şekli, tozların yığılma derecesini kapsamaktadır. Bu

değişkenler tozun sıkıştırılabilirliği ve sinterlenmesi üzerinde etkili olup birden fazla tozun homojen olarak sıkıştırılması için önem arz etmektedir. Sıcaklık, basınç, ısıtma ve soğutma süreleri gibi etkenler sinterlemeyi etkileyen diğer faktörlerdir. Sıkıştırılan tozların sinterleme sıcaklığı ve basıncının sinterleme üzerindeki etkileri birçok sinterleme çalışmasında araştırılmıştır [100,101,102].

#### 1.6.4. Sıcak Presleme (SP) İşlemi

Malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi ve sinterlenmesini gerçekleştirmek bazı sistemlerde zordur. Basınç yardımıyla sinterleme işlemi bu zorlukların azaltılması için kullanılan bir tekniktir. Şekil 1.11’de verildiği gibi, sıcak presleme rijit bir kalıp içerisinde tek eksenli basınç kullanılarak gerçekleştirilir. Sistemin çalışmasında üst koç genellikle hidrolik sistem olarak hareket ederken alt koç sabit olmaktadır [103].

İşlem süresince uygulanan kuvvet eş eksenel biçimdedir ancak kalıp yüzeylerinde sürtünme ortaya çıkar ve kuvvet merkezden yanlara doğru değişen bir dağılım sergiler. Bunun sonucu olarak eksenel ve radyal yönler arasında gerilim farkı oluşur ve kayma bölgesi meydana gelir. Bu durum toz yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet verir [104,105].



Şekil 1.11. Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi [98].

Şekilde verilen sıkıştırma işlemi 3 aşamada gerçekleştirilir:

- Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip parçacıkların yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlenmesi gerçekleşir. Plastik şekil değiştirme yoktur. Kısmi

olarak bazı parçacıklarda mekaniksel kırılmalar olabilir. Bu aşamada parçacık boyutu, toz boyut dağılımı, parçacık şekli ve yüzey özellikleri ile parçacıklar arası sürtünme önemli rol oynar.

- Elastik ve plastik deformasyon faktörlerinin baskın olduğu toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında, parçacıklar arasında soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca bu aşamada parçacıkların mekaniksel kilitlemeleri ile parçacık-parçacık etkileşimleri dikkat çeker.
- Sıkıştırmanın son aşamasında presleme basıncı artar ve bunun sonucunda toz parçacıklarının kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanır; ayrıca bu aşamada toz parçacıkları arasında soğuk kaynak olabilir [99].

SP' nin avantajları olarak; düzgün iç yapılu malzemelerin imal edilmesi, maliyetin düşük olması, oksitlenmeyen seramiklerin üretilebilmesi, fiziksel özelliklerin daha iyi olması ve yüksek yoğunluklu malzeme üretilmesi söylenebilir.[106].

### 1.6.5. Son İşlemler

Sinterleme sonrası isteğe göre uygulanabilen bazı işlemler aşağıda verilmiştir:

- Yapıda oluşan gözeneklerin doldurulması,
- Yağ emdirme,
- Tekrar presleme ve/veya tekrar sinterleme,
- Yüzey kaplama,
- Yüzey sertleştirme,
- Son işlemler (talaş kaldırma, montaj, ısıl işlem) [107].

### 1.7. Triboloji

Triboloji değişik tariflere sahip olan yeni bir kavram olmasına rağmen, içeriği açısından kayda geçmiş ve tarihten daha eskilere dayanmaktadır [110]. Yağlama, sürtünme ve aşınma ile ilgili olan tribolojinin 19. ve 20. yy.daki sanayi gelişimi ile doğduğu düşünülür. Ancak başlangıçtan beri insanoğlu sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek için çaba sarfetmiştir. Bu amaçla M.Ö.2000 yılından da eski dönemlerden beri çömlek üretiminde kullanılan çarkın millerindeki sürtünmeyi azaltmak için yine zift kullanılmışlardır [109].



Triboloji alanındaki çalışmalara, yapılan çalışmaların amacı çerçevesinde bakıldığında, mühendislik anlamında her alanda yüzeylerin sürtünmesini konu alan durumlarda sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan malzeme kayıplarını en aza indirmek amaçlanmaktadır. Triboloji alanındaki çalışmalar sonucunda, daha iyi tesis verimi, daha iyi performans, daha az bozulma ve kayda değer tasarruflar elde etmek planlanmıştır [109].

Triboloji biliminde yuvarlanan ve kayan yüzeyler kullanan modern teçhizatlar büyük önem taşımaktadır. Uygulama alanlarına göre bazı durumlarda sürtünme gerekli olurken bazı durumlarda çok daha düşük olması istenir. Örnek olarak; frenler, debriyajlar, tren ve otomobillerdeki tahrik tekerlekleri, somunlar ve vidalar sürtünmenin gerekli olduğu parçalardır. Diğer yandan, sürtünmenin en aza indirilmesi amaçlanan uygulama alanlarına örnek olarak; içten yanmalı motorlar ve uçak motorları, dişliler, eksantrikler, yataklar ve sızdırmazlık elemanlarından bahsedilebilir [108].

Tribolojik sistem basit olarak tarif edilecek olursa, içinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemler olarak belirtilebilir. Dikkate alınacak bir konu da, mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemlerin bir tribolojik sistem olarak ele alınması gerektiğidir. Başka bir deyişle, aşınma olayı bir sistem bütünlüğü olarak düşünülmelidir [111]. Tribolojik sistem çoğunu içinde bulundurmak üzere, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevre olmak üzere 6 birimden oluşur. Aşınma çiftini ana malzeme ve karşı malzeme oluşturur ve az veya çok yük altında, bunların aralarında bir ara malzeme bulunması durumunda, hareketle birlikte aşınma meydana gelmeye başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri gibi aşınma özelliklerine dikkat çekilen katı cisimlerden meydana gelebilir [112].

### **1.7.1. Tribolojinin Diğer Bilim Dalları ile İlişkisi**

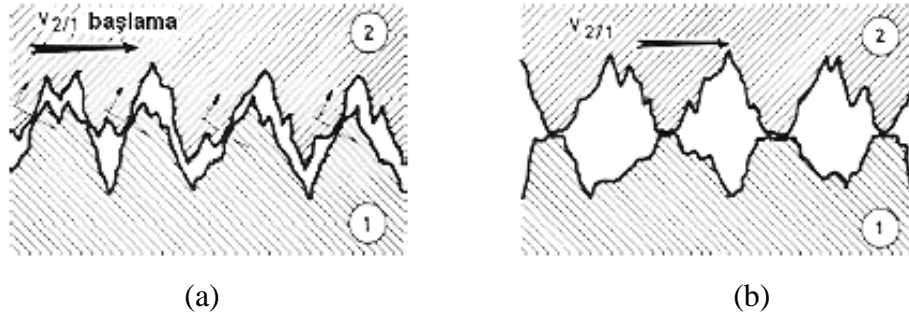
Bilindiği gibi mühendislikte değişik uygulamalarda karşılaşılan kayma yüzeyleri oldukça karmaşık yapılardan oluşabilmektedir ve bu da yüzeyler arası etkileşimlerin farklı düşüncelerin yorumuna ve bilgisine ihtiyaç duymasına yol açmaktadır.

Triboloji, oldukça geniş bir alana sahip olup birçok konuyu içine alan ve mühendislikte yüksek önem taşıyan bir bilim daldır. İçerdiği konulara, makine mühendisliği, malzeme bilimi, mekanik, yüzey kimyası, yüzey fiziği, yüzey karakteristiği, sürtünme, aşınma,

yağlama, yatak malzemeleri, yağlayıcılar, yağlama sistemlerinin seçimi ve dizaynı örnek olarak verilebilir [113].

### 1.7.2. Sürtünme

Metallerin sürtünmesi sırasında oldukça karmaşık bir durum ortaya çıkmakla beraber, kuru ortamda yağlama olmadan meydana gelirse, bu durumu kuru sürtünme olarak tarif etmek mümkün olur. Bu olayda, metal yüzeyindeki fiziksel ve mekanik karakteristikler, kristal yapı, yüzeydeki binlerce molekül tabakaları etki altında kalmaktadır. Yani sürtünmeye etki eden başlıca faktörler, yüzey durumu, her iki yüzeyin birbirine olan uygunluğu, yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü yanında pürüz uçlarının birbirine kaynaması, oksidasyon veya korozyon sebebiyle kimyasal yapısının değişmesi veya tamamıyla hasara uğraması durumlarıdır. Metallerin yüzeyleri düz bir görünüme sahip ve parlak olmasına rağmen mikroskobik olarak pürüzlüdür. Temas durumu, eğer iki yüzey sürtünürse pürüz uçları arasında meydana gelir. Statik ortamda iki pürüzlü yüzey dikkate alındığında, durgun halde her iki temas yüzeylerinin birbirlerine göre hareketine statik sürtünme denir. Bu sürtünme olayında, sürtünme katsayısı en yüksek değerlere ulaşmaktadır çünkü temas yüzeyleri arasında yağlayıcı bulunmaz. Sürtünmenin süresiz hal aldığı durum ise düşük kayma hızlarında meydana gelir. Hareket, yapışma-kayma şeklinde devam ederek kayma hızındaki artışla birlikte sürtünme sadece pürüzlerin en uç kısımlarında oluşur. Bundan dolayı sürtünme katsayısı azalışa geçer. Bu durum ise dinamik sürtünme olarak tarif edilir (Şekil 1.12) [109]. Kaymayı başlatan kuvvet ( $F_s$ ) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet ( $F_n$ ) arasında;  $F_s = \mu_s \cdot F_n$  bağıntısı mevcuttur. Bu denklemde,  $\mu_s$  statik sürtünme katsayısı olarak ifade edilir. Hareket sırasında ise sürtünme kuvvetinde azalış meydana gelir ve sürtünme kuvveti;  $F_k = \mu_k \cdot F_n$  denklemiyle hesaplanır. Burada  $\mu_k$ ; dinamik sürtünme katsayısını ifade eder ve bu katsayı genellikle statik sürtünme katsayısından daha düşüktür [125].



Şekil 1.12. Sürtünme tipleri; (a) statik sürtünme, (b) dinamik sürtünme

İki yüzey arasında oluşan hareket sonucunda sürtünme etkisi, yüksek basınçlara bağlı olarak ısı enerjisini meydana getirir ve plastik deformasyon sonucu temas eden pürüz uçları birbirlerine kaynarlar. Bu kaynama; soğuk kaynama veya sıcak kaynama şeklinde meydana gelir. Sıcak kaynama malzemenin iç difüzyonuna ve yeniden kristalleşmesine bağlı iken soğuk kaynama, metal yapışması şeklinde düşük sıcaklıklarda ortaya çıkar [109].

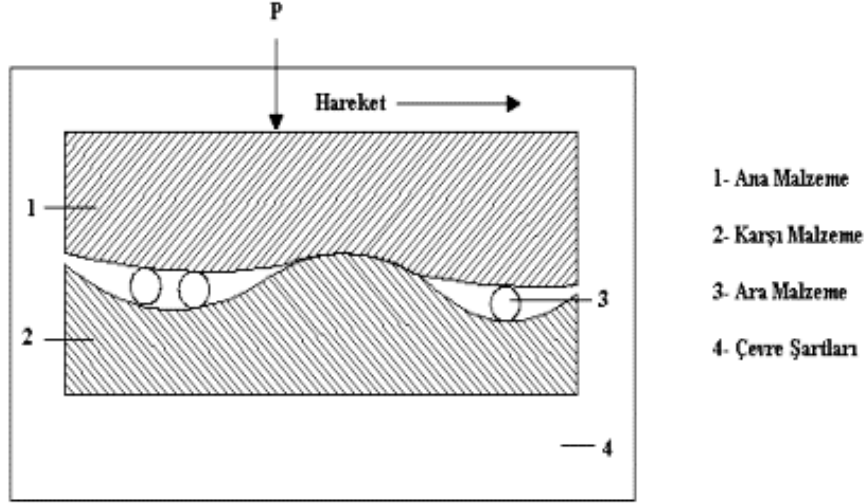
### 1.7.3. Aşınma

Aşınma, yüzeyde meydana gelen hasar veya birbiri ile ilişkili olarak kayma, çarpma ve yuvarlanma hareketi yapan iki katı yüzeyin sadece birisinden yada her ikisinden malzemenin kopartılması olarak tanımlanır. Birçok durumda, aşınma; yüzey boyunca pürüz uçlarındaki etkileşimlerde ortaya çıkar. Öncelikle yüzeye temas eden malzeme hareket esnasında yer değiştirebilir. Bunun sonucunda katı gövdenin özellikleri yüzeyde yada yüzeye yakın konumda değişmesine rağmen malzeme kaybı çok azdır. Daha sonra malzeme yüzeyden kaldırılabilir ya da bir aşınma partikülü olarak ayrılabilir. Genellikle aşınma tarifi malzeme kaybına dayandırılır. Ancak hasarın, net hacimde veya ağırlıkta değişiklik olmadan belirli bir gövdede malzemenin yer değiştirmesi yüzünden ortaya çıktığı ve aşınmayı oluşturduğu da unutulmaması gerekir [109].

Bir aşınma sisteminde;

- Aşınan eleman,
- Aşındıran eleman,
- Ara madde,
- Yük (P),
- Hareket,

ana unsurlar olarak düşünülebilir. Teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılan bu sistem bütün unsurların oluşturduğu sistemdir ve Şekil 1.13'te şematik olarak gösterilmektedir [114].



Şekil 1.13. Aşınma sisteminin ana bileşenleri [114].

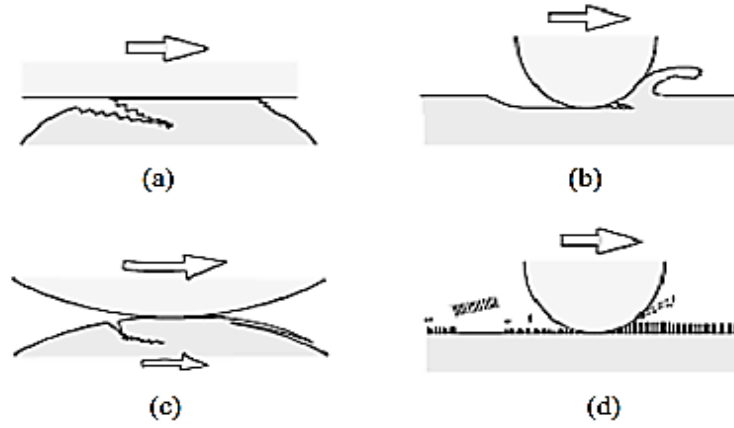
“Aşınma çifti” olarak tanımlanan aşınan ve aşındıran malzeme arasındaki “ara malzeme” sıvı, gaz ve buhar, sert taneli halde olabilir. Aşınma parçacıkları ara malzeme gibi davranır ve aşınma olayına katılması söz konusudur. Aşınma çifti ile ara malzemeye birlikte “aşınma kombinasyonu” denilir. Yük; statik, dinamik veya darbe biçiminde olmak üzere iki aşınma (aşınma çifti) arasındaki rölatif hareket aşınmanın türünü belirler [114].

Aşınmayı etkileyen faktörler ana malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcıya (karşı malzeme) bağlı faktörler olarak sınıflandırılabilir. Ana malzemeye bağlı faktörler; malzemenin sertliği, malzemenin kristal yapısı, elastisite modülü, yüzey pürüzlülüğü, deformasyon davranışı ve malzemenin boyutudur. Aşındırıcı etkisine bağlı faktörler ise; ortamın koşullarına göre, sıcaklık, nem, atmosfer; uygulama koşullarına göre; hız, basınç ve kayma koşullarıdır [124].

### 1.7.3.1. Aşınma Mekanizması Tipleri

Aşınma tipleri yada biçimleri, aşınma mekanizmasının belirli kombinasyonları olarak tanımlanır. Genel aşınma mekanizmaları:

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Korozif aşınma
- Yorulma aşınması (Şekil 1.14) [109].



Şekil 1.14. Temel aşınma mekanizmaları, (a) adhezif aşınma, (b) abrazif aşınma, (c) yorulma aşınması, (d) korozyon aşınması [115].

Abrazif ve adhezif aşınma plastik deformasyon sonucu meydana gelir. Yorulma ve korozyon aşınması hem plastik ve hem de elastik deformasyon sonucu ortaya çıkar. Abrazif ve adhezif aşınmada parçacıkların kopması deformasyon nedeni ile olmasına rağmen yorulma aşınmasında, aşınma mekanizması esneklik ve gevreklik sonucu ortaya çıkar. Korozyon aşınmasını ise, kimyasal reaksiyonlar ve sürtünme katsayısı etkiler [113].

Adhezif aşınma, kayma ve yapışma aşınması olarak da bilinen bir aşınma türüdür. Yağlamalı veya yağlamasız ortamda, iki düzgün katı cismin birbiri üzerinden kayması sırasındaki temas ile meydana gelmektedir. Bu aşınma türleri mühendislikte, adhezif aşınma (yapışma aşınması, kaynaklaşma aşınması) başlığı altında ifade edilebilir. Bu aşınma mekanizması, eş zamanlı çalışan yüzeyler arasındaki yükü taşıyan yüzey pürüzlülüklerinin arasında ortaya çıkan mikro kaynakların kesme olayıyla meydana gelir [116]. Bununla

birlikte bir yüzeyden kopan parçalar kayan diğer yüzeye yapışabilirler. Diğer yüzeye yapışmış olan parçalar kaymanın devam etmesi sonucunda tekrar başlangıç yüzeyine yapışabilir ya da her iki yüzeyden bağımsız aşınma parçacığı olabilir. Bu aşınma türü, metalografik olarak, kafes yapıları birbirine benzeyen metallerin korozyon ile aşınma esasına dayanmaktadır. Malzemenin aşınmaya maruz kalan yüzeyleri çok hassas işlense bile yüzeyde mikroskobik girinti ve çıkıntılar olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı iki yüzey bu çıkıntılar aracılığıyla birbirine temas eder. Bu çıkıntılar arasında kalan girintiler ise iki yüzeyin temas ettiği alanın dışında kalır [118]. Motor yataklarının sarması, adhezif aşınmaya ait karakteristik bir örnek olarak verilebilir [117].

Adhezif aşınma ile ilgili olarak yapılan deneylerden şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Aşınma olayı, normal kuvvete ve yüzeylerin izafi hızına bağlı olarak gelişir ve daha çok yüksek hızlarda ve yüklerde rastlanan bir aşınma türüdür.

2. Adhezif aşınma, benzer veya kolay alışım yapabilen malzemeler arasında görülmektedir.[113].

3. Sınır sürtünme bölgesinde bile yüzeylere yapışmış yağ tabakası adhezyon aşınmasını önler çünkü adhezif aşınma olayında yağlama durumunun etkisi çok büyüktür. Aşınmanın önlenmesi için yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katkılı bir yağ konulabilir.

5. Yüzeylerden birinin sertliği diğerine kıyasla büyük olduğunda kaynak bağlarının kopması olayı yumuşak malzemelerde gerçekleşir ve bunun sonucu olarak yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine aktarılır.

6. Aşınma olayı üzerinde, nem veya oksitten oluşan doğal tabaka önemli bir etkiye sahiptir [117].

Tabor ve Rabinowicz, aşınma ve yağlayıcılar üzerine yaptığı bazı çalışmalarda yüzeylerde yağlayıcı bulunmadığında yüzeye dik olan yükün artışıyla birlikte aşınma miktarının doğrusal olarak arttığını belirlemişler ve yüzeye bir yağlayıcı uygulanması durumunda sürtünme katsayısının düşürülerek aşınma miktarında azalma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [119].

Deneyler ve araştırmalar sonucunda adhezif aşınmanın azaltılmasında faydalı olan uygulamalardan bahsedilecek olursa;

- Metal yüzeylerin yağlama ile birbiri üzerinde temas etmesini engelleyerek mikro kaynamaları önlemek,

- Mikro kaynakları önlemek için değişik malzemelerden oluşan sürtünme çiftlerinin kullanılması, (Roach, Hunnicut ve Goadzeit, alaşımlamanın adhezif aşınmada çok etkili bir parametre olduğunu ve buna dayanarak, malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olduğunu belirtmişlerdir.)
- Malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması (Genellikle sert metallerin sürtünme katsayıları daha düşüktür ve çok zor plastik davranış gösterirler.) gibi maddelerden söz edilebilir [119].

Abrazif aşınma türünde, doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların veya dış ortamdan kayma yüzeyleri arasına giren toz, talaş gibi maddelerin etkisi yüzeylerin bozulmasına neden olmaktadır. Bahsedilen sert parçacıklar, yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olur [121,122].

Benzer bir durum olarak, çok sert partiküllerin daha yumuşak bir yüzeye batma etkisiyle de bu tip aşınma görülebilir. Etki yumuşak malzeme yüzeyinde zamanla oluşan belirgin çizikler şeklinde meydana gelmektedir [90].

Abrazyon aşınmasını önlemek için alınacak tedbirleri özetlemek gerekirse:

- Yüzeylerin sertleştirilmesi,
- Makinelerin ve sistemlerin talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmesi ve dışarıdan gelebilecek sert maddelerin kayma yüzeyleri arasına girmemesi amacıyla etkili bir sızdırmazlığın sağlanması söylenebilir [120].

Genellikle ısı-mekanik bir birleşim olarak bilinen yorulma aşınması, sıcaklık dalgalanmaları ve karşılıklı kaymanın sıklıkla durup-başlama hareketleri sonucunda kayma yüzeylerinin kenarlarına binen yüklerdeki değişimden dolayı yüzey kenarlarında çatlaklar ve kırılmalar olarak meydana gelir. Yorulma büyük bir çatlak tetikleyebilir ve malzeme kayma yüzeylerinden taneciklerin kırılmasına veya kopmasına sebep olabilir. Küçük çatlakların kayma yüzeylerinin altında çekirdeklendiği tabakalaşma aşınması ise mikroskobik ölçekte olup, yüzey pürüzlülüklerinin birbiri üzerinde hareketi (kayması) esnasında oluşan bir yorulma aşınmasıdır [123,124].

Yüzeylerin hava ile reaksiyona girmesi sonucunda aşınmanın şiddetli olmasını engelleyen oksit meydana gelir. Bununla birlikte, özellikle kimyasal madde içeren ortamlarda ince sert tabakalar meydana gelir. Uygulanan yükün değişmesiyle bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını oluşturur. Sert tabaka, temiz kalan

temas yüzeylerde reaksiyon sonucu tekrar oluşarak değişken yük altında tekrar kırılır ve bu durum birbirinin devamı şeklinde sürer [121].

Parçaların yüzeyleri ile çalışma ortamı arasındaki etkileşim önemli rol oynamaktadır. Korozif aşınmada, yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir ve temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girer. Sonrasında, abrazyon etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar veya temas noktasında çatlak oluşur [122]. Korozif aşınmayı engellemek amacıyla oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler (molibden disülfid) kullanılmaktadır [121].

### 1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yapılan araştırmalar çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre pek çok üstünlüklere sahip olduklarını göstermiştir. Bu üstünlüklerin başında alaşımların aşınma dayanımlarının ve özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, değişik ısı işlemlere elverişli olmaları gelmektedir. Söz konusu alaşımlardan imal edilen yataklar, hadde yataklarında, kablolu krenklerde, değişik iş makinalarında, taş kırma ve maden makinelerinde, hidrolik sistemlerde v.s. yaygın olarak kullanılmaktadır [125].

Ataç [126] çalışmasında, farklı kimyasal bileşimlere sahip çinko-alüminyum alaşımlarından ZA-8, ZA-12, ZA27 alaşımlarını farklı sürelerde mekanik alaşımlama yöntemi ile üretmiştir. Spex tipi değirmende farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilen çinko-alüminyum alaşım tozları 320 °C'de sıcak preslenmiş ve yine aynı sıcaklıkta sinterleme yapılmıştır. Bu alaşımların yoğunlukları alüminyum oranının artışıyla azalmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre en az aşınma ZA27 alaşımında olurken, en fazla aşınma ZA-8 alaşımında gerçekleşmiştir

Srimant Kumar Mishra ve arkadaşları [127]; her aşamada ağırlıkça %3 artacak şekilde %0-9 ağırlık oranlarında SiC partikül takviyeli ZA27 metal matrisli kompozitlerin karakterizasyonu ve işlemleri üzerinde yaptıkları çalışmada, baskın olarak aşınma oranını etkileyen parametreleri incelemişlerdir ve bu kompozitin erozyon aşınması oranının diğer faktörlere göre, darbe hızı ve katkı içeriğinden daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, aşınma oranının, matris malzemesi içerisinde bulunan katkı oranındaki artışla, azalmasından dolayı, SiC parçacıklarının iyi dolgu karakteristiklerini de göstermiştir.



M. Babic ve arkadaşları [128], ağırlıkça %1, %2, %3.5 ve %10 oranlarında; 20, 35, 100 µm boyutlarında grafit parçacık takviyeli ZA27 matris alaşımlı kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerine yaptıkları araştırmada, test edilen grafit katkılı kompozit malzemeler belirgin bir şekilde matris malzemesine göre daha düşük aşınma göstermiştir. Ayrıca yağsız yapılan kuru aşınma testlerinde de aynı etki görülmüştür. Aşınma genişliği izinin grafit katkılı kompozitlerde matris malzemesine göre %60 daha düşük olduğu görülmüştür.

S.C. Sharma ve arkadaşları [129], ağırlıkça %1-%5 oranlarında, her adımda ağırlıkça %2 SiC takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin üretimini gerçekleştirmiş ve yağsız kuru aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada katkı malzemesi olan SiC' ün aşınmaya olan etkisi araştırılmıştır. Karşılaştırmak amacıyla katkısız ve katkılı malzemeler üzerine yapılan araştırmada, deneyler; 3,4,5,6 kg yüklerde ve 200,250,300 devir sayılarında yapılmıştır. Sonuçlar, SiC takviyeli kompozitlerde meydana gelen aşınma miktarının katkısız malzemeye göre daha düşük miktarlarda olduğunu göstermiştir. Artan SiC içeriğiyle, sertliğin sürekli artış gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca SEM görüntüleri, SiC parçacıklarının malzemenin aşınma oranını düşürmesi üzerindeki etkisini göstermiştir.

Slobodan Mitrović ve arkadaşları [130], yaptıkları çalışmada katkısız çinko-alüminyum alaşımlarıyla çinko-alüminyum matrisli hibrit metal matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Matris malzemesine katkı olarak, SiC ve grafit kullanmışlar; artan grafit ve SiC oranıyla düşük sürtünme katsayısının düştüğünü ve katkısız alaşıma göre hibrit metal matrisli kompozitlerin daha iyi aşınma direnci gösterdiğini saptamışlardır.

N. Miloradovic ve arkadaşları [131], hacimce %10 SiC ve hacimce %1 grafit içeren ZA27 matrisli metal matrisli hibrit kompozitlerden hazırladıkları numuneler üzerinde tribolojik davranışları incelemişlerdir. Kuru sürtünme koşulları altında blok-on-disk kullanılarak farklı deney şartlarında yapılan deneyler sonucunda, uygulanan bütün yük ve hızlarda ZA27 matrisli hibrit kompozitlerin katkısız ZA27 malzemesine göre daha düşük miktarlarda aşınma gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Artan hız ve yüklerle aşınma miktarının arttığı ayrıca katkısız ZA27 malzemesinin aşınma mekanizmasının hibrit kompozitleriyle aynı karakterde olduğunu belirlemişlerdir. Artan yük ve hızlarla mikro çatlak oluşumu eğiliminin de arttığı görülmüş ve bu yüzden aşınma işlemi boyunca temas yüzeylerinde mekanik olarak karışmış tabakaların önemli bir rolünün olduğunu göstermiştir.

Literatür araştırması sonucu mekanik alaşımlama yöntemiyle ZA27 esaslı nano-grafit ve nano-alümina katkılı hibrit nanokompozitlerin üretilmesi ve tribolojik özelliklerinin

araştırılması ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır Bu nedenle, bu tez çalışmasında, öncelikle geleneksel yatak alaşımları yerine kullanılmak üzere üstün tribolojik özelliklere sahip yatak alaşımları geliştirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, bir yatak alaşımı olan ZA27'nin döküm yöntemiyle üretilmesi daha sonra toz haline getirilmesi ve mekanik alaşımlama yöntemiyle nano-grafit ve nano-alümina takviyeli hibrit nanokompozitler üretilerek bu malzemelerin tribolojik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemi ile nano parçacık takviyeli ZA esaslı HNK malzeme geliştirilmiş ve sıcak presleme yöntemiyle elde edilen nihai numunelere aşınma testi uygulanarak, tribolojik özellikleri araştırılmıştır.

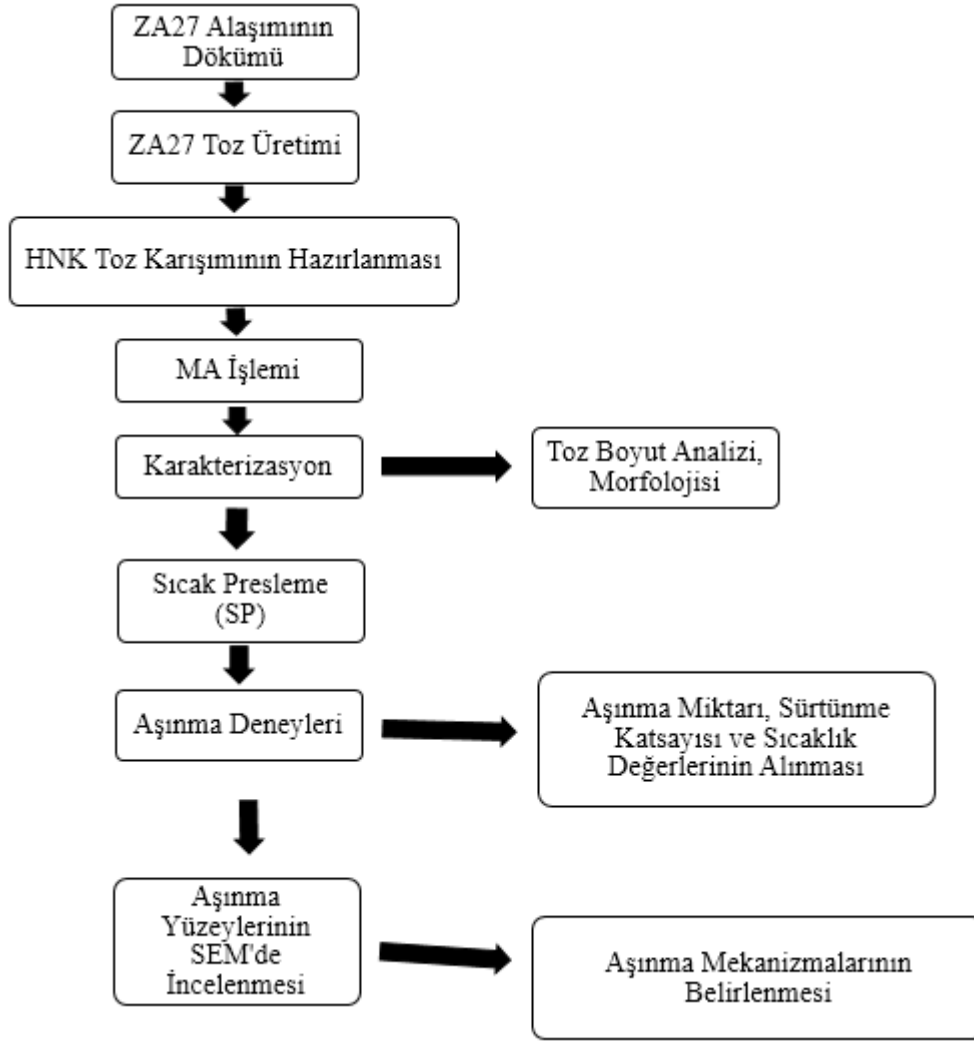
İlk olarak matris malzemesi ZA27 alaşımı, döküm yöntemiyle elde edildi. Ardından ortalama boyutu 40 µm olan düzensiz haldeki tozlar gaz atomizasyonu yöntemi ile (İKİ-EL METAL TOZLARI A.Ş.'de) elde edildi.

Bu tozlara 100 nm boyutlarındaki grafit parçacık takviyeleri hacimce %1 - %2 - %3 - %4 oranlarında; ortalama boyutu 100 nm olan alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) parçacık takviyeleri de hacimce %1 - %2 - %3 - %4 oranlarında eklenerek toz karışımları hazırlanmıştır.

Elde edilen toz karışımları, gezegen tipi yüksek enerjili bilyeli öğütücüde 8 saat öğütülerek hibrit nanokompozit toz karışımları elde edilmiştir. Elde edilen tozların SEM incelemesi ve boyut analizleri yapılmıştır.

Daha sonra tozlar, başlangıçta oda sıcaklığında 175 MPa'lık basınç altında şekillendirilmişti. Kalıp içerisinde şekillendirilen tozlara 432 °C' de 3 saat sinterleme ve bu süre sonunda 350 MPa'lık basınçta 30 dk sıcak presleme (SP) işlemi uygulanarak HNK numune üretimi yapılmıştır.

HNK numunelerin ve katkısız ZA27 numunenin aşınma deneyleri block-on-disk tipi aşınma cihazında yapılmıştır. Farklı deney şartlarında yürütülen aşınma testleri sonrasında her HNK numunede meydana gelen aşınma miktarları belirlenmiş ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması

## 2.1. Malzeme

### 2.1.1. ZA27 Alaşımının Dökümü ve Toz Üretimi

Yapılan çalışmalarda başlangıçta, matris malzemesi olarak belirlenen ZA27 alaşımının kokil döküm yöntemiyle üretimi yapılmıştır. Ergitme işlemini düşük sıcaklıklarda yapabilmek için öncelikle intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (AlCu50) dökülmüştür. Bölümümüzün alaşım geliştirme laboratuvarında gerçekleştirilen döküm işlemlerinde %99,99 saflıkta çinko, ticari saflıkta (%99,5) alüminyum, ticari saflıkta bakır ilavesi için intermetalik bakır-alüminyum ön alaşımı (AlCu50) ve ticari saflıkta Mg (%99,5) kullanılarak Tablo 2.1’de verilen bileşim oranlarında ZA27 alaşımı dökümü yapılmıştır.

Tablo 2.1. ZA27 Alaşımının ağırlıkça % kimyasal bileşimi

Alaşım	Zn	Al	Cu	Mg
ZA27	70,8	27,2	2,01	0,02

$ZnAl27Cu2 = \%27,2 \text{ Al} + \%2,01 \text{ Cu} + \%0,02 \text{ Mg} + \text{geri kalan Zn.}$

Bu bileşim için üretilecek 4000 gr lık alaşıma gereken malzeme miktarları aşağıda verildiği gibidir.

$AlCu50 \rightarrow 160,8 \text{ gr} ( 80,4 \text{ gr Al} + 80,4 \text{ gr Cu} )$

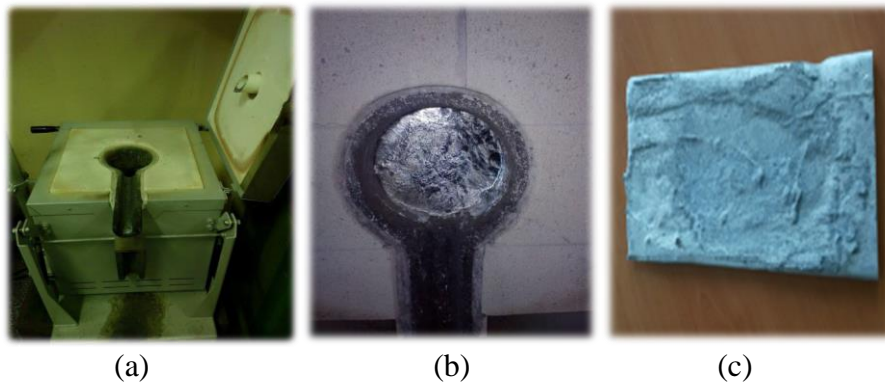
$Cu \rightarrow 4000 \times 0,0201 = 80,4 \text{ gr Cu}$  (bu miktar 160,8 gr intermetalikten (AlCu50) karşılandı.)

$Al \rightarrow 4000 \times 0,272 = 1088 \text{ gr Al} - 80,4 \text{ gr Al} ( \text{intermetalikten gelen} )$   
 $= 1007,6 \text{ gr Al}$

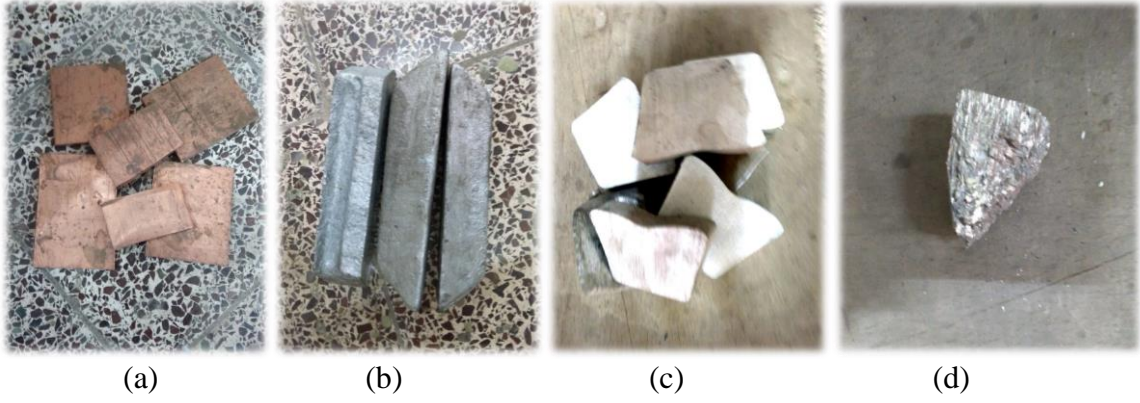
$Mg \rightarrow 4000 \times 0,0002 = 0,8 \text{ gr Mg}$

Geri kalan  $\rightarrow 4000 - (160,8 + 1007,6 + 0,8) = 2830,8 \text{ gr Zn}$

Tartılarak hazırlanmış olan alaşım bileşenleri sıcaklık kontrollü elektrikli ertitme potasında sırasıyla Al, intermetalik (AlCu50), Zn ve Mg eklenerek eritilmiş ve  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ' de kokil kalıba dökümü yapılmıştır. Şekil 2.2'de döküm işleminde kullanılan pota fırını, döküm potası ve üretilen ZA27 alaşımı döküm parçası sırasıyla verilirken; Şekil 2.3'te döküm işleminde kullanılan alaşım elementleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Döküm işleminde kullanılan ekipman ve elde edilen döküm parçası; (a) sıcaklık kontrollü elektrikli pota fırını, (b) döküm potası, (c) üretilen döküm parçası



Şekil 2.3. Döküm işleminde kullanılan alaşım elementleri; (a) bakır, (b) çinko, (c) alüminyum, (d) magnezyum

Döküm yöntemiyle elde edilen ZA27 alaşımı İKİ-EL METAL TOZLARI A.Ş.' de gaz atomizasyon yöntemiyle toz haline getirilmiştir. Daha sonra bu tozlar ‘Retsch’ marka elek (Şekil 2.4) ile 63 µm elek altına elenerek ortalama tane boyutu ( $d_{50}$ ) 40,2 µm olan ZA27 matris tozları elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Tozların elenmesinde kullanılan elek

### 2.1.2. Takviye Malzemeleri

Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak nano boyutta grafit ve alümina ( $Al_2O_3$ ) tozları seçilmiştir. Grafitin alaşıma yağlayıcı özellik sağlaması ancak mekanik özellikleri olumsuz etkilemesinden dolayı diğer katkı malzemesi olarak  $Al_2O_3$  tozu seçilmiş, böylece hem olumsuz etkilenen mekanik özellikler iyileştirilmiş hem de  $Al_2O_3$ 'ün aşınma direncinin iyi olması özelliğinden faydalanılmıştır. Kullanılan  $Al_2O_3$  tozları %99,94 saflıkta ve ortalama

100 nm boyutunda, grafit tozları ise %99,9 saflıkta ve ortalama 100 nm boyutundadır. Her iki malzeme de ‘Grafen Chemical Industries Co.’ şirketinden temin edilmiştir.

## 2.2. Mekanik Alaşımlama (MA) İşlemleri

Mekanik alaşımlama işlemleri gezegen tip bilyeli öğütücüde (Retsch PM 100) 300 dev/dak öğütme hızında gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi tungsten karbür hazne ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap hacmi 250 ml iken bilye boyutu 10 mm’ dir. Bilye/toz ağırlık oranı 5:1 olarak seçilmiştir. Bir defada öğütücü kaba 120 gr toz konulurken her işlemde sonra kap ve bilyelerin temizlenmesine özen gösterilmiştir. Hibrit nanokompozit numunelerin üretimi için mekanik alaşımlama süresi olarak 8 saat belirlenmiştir. Ortam sıcaklığına ve diğer faktörlere bağlı olarak, mekanik alaşımlama (bilye-toz ve bilye-toz-bilye çarpışması) nedeniyle artan noktasal sıcaklıklar nedeniyle oluşan soğuk kaynak ve çillenme sonucunda hazne duvarlarında ve bilye üzerinde yapışmalar gözlenmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için değirmen haznelerine mekanik alaşımlama öncesinde ağırlıkça %0,5 oranında metanol işlem kontrol katkısı eklenmiştir. MA işleminde kullanılan ekipman Şekil 2.5’te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. MA işleminde kullanılan ekipmanlar; (a) bilyalı öğütücü, (b) hazne ve bilyeler

### 2.3. Parçacık Boyutu Ölçümleri

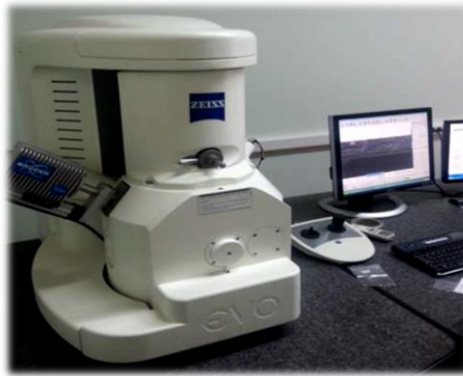
Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern Instruments™ marka Mastersizer 2000e model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 2.6. Partikül boyutu ölçüm cihazı

### 2.4. Parçacık Morfolojisi ve Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Başlangıç tozlarının ve MA yöntemi ile üretilen hibrit nanokompozit tozların morfolojileri ve aşınma deneyi uygulanmış numunelerin aşınma yüzeyi incelemeleri Şekil 2.7’de verilen taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. SEM’de yapılan incelemelerde mekanik alaşımlama sonrası farklı katkı oranlarındaki tozlarda mekanik alaşımlama safhaları incelenmiş; aşınma yüzeyi incelemelerinde ise hibrit nanokompozit numunelerde meydana gelen aşınma mekanizmaları araştırılmıştır.

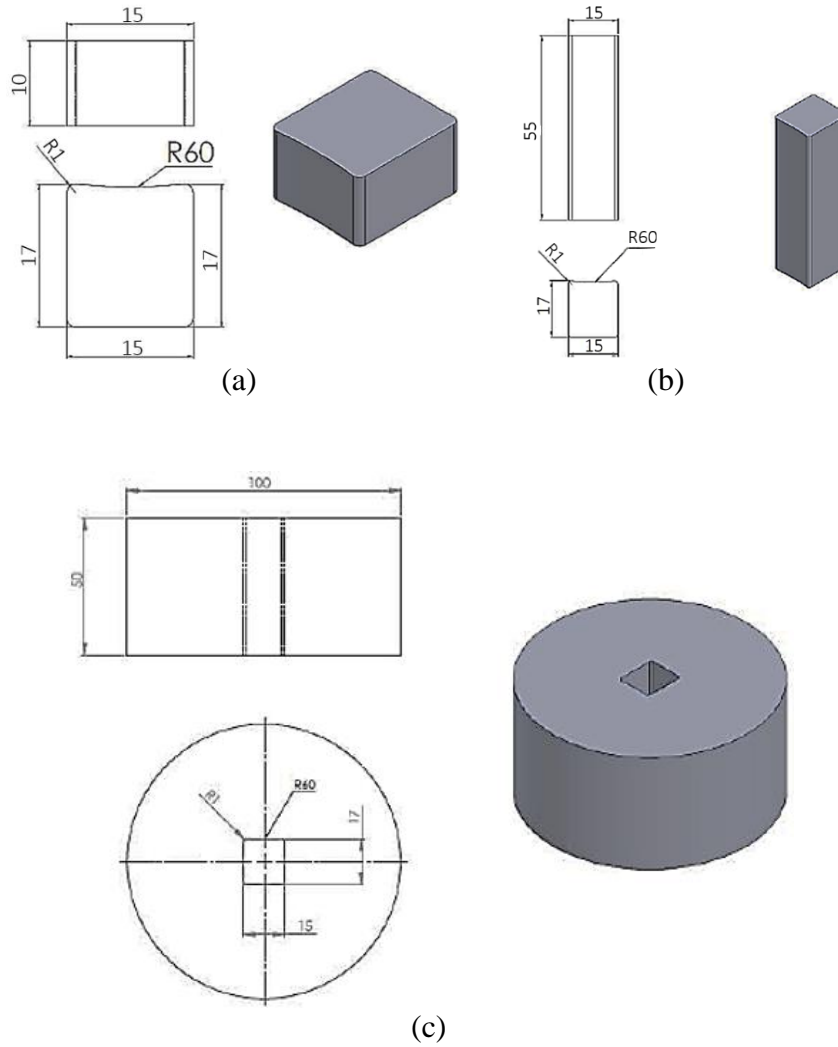


Şekil 2.7. Toz morfolojisi, içyapı ve aşınma yüzeylerinin incelenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM)



## 2.5. Sıcak Presleme İşlemi (SP)

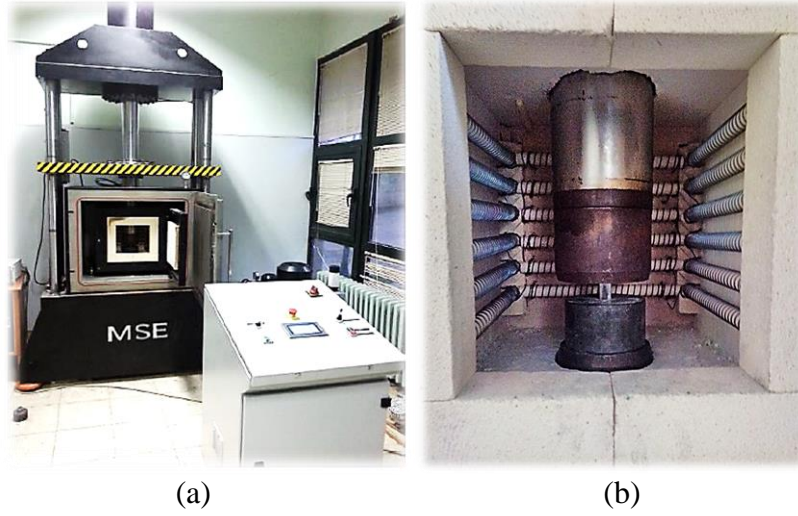
Üretilen hibrit nanokompozit tozlara ilk olarak 2 dakika süreyle 175 MPa basınç altında ön şekil verme işlemi uygulanmıştır. Şekil 2.8.'de teknik resmi ve Şekil 2.9'da fotoğrafı verilen kalıpta, preslemeyle ön şekil verilen kalıp içerisindeki tozlar 3 saat sinterlendikten sonra 30 dakika süreyle 350 MPa basınç altında SP işlemi uygulanmış ve aşınma numunesi üretimi yapılmıştır. Presleme işleminden sonra numunenin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi amacıyla kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak çinko-stearat sürülmüştür. Şekil 2.10'da SP işleminde kullanılan ekipmanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Aşınma numunesi üretimi için kullanılan kalıp elemanlarının teknik resimleri; (a) alt zımba, (b) üst zımba, (c) dişi kalıp



Şekil 2.9. Aşınma numunesi üretiminde kullanılan kalıp



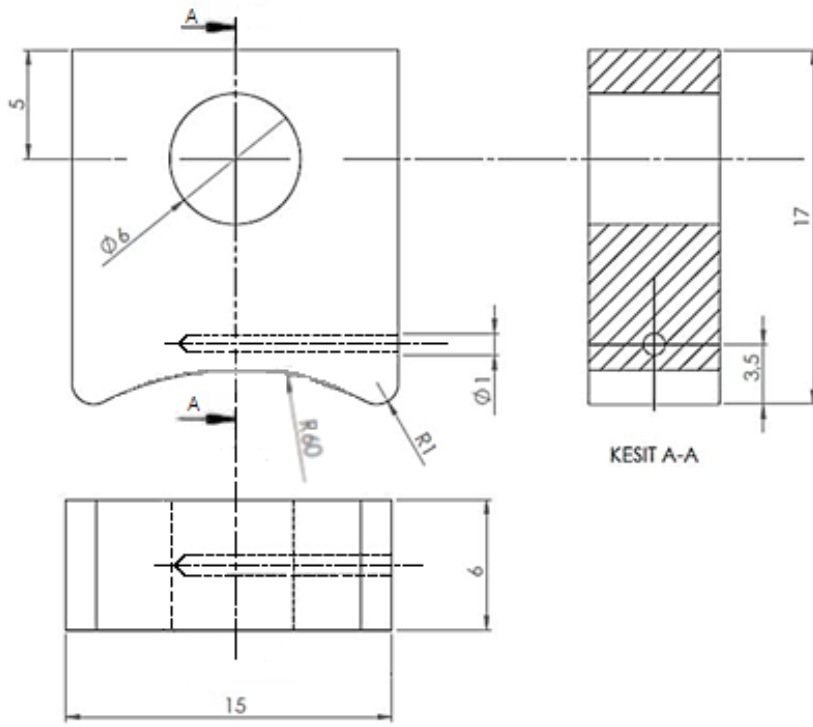
Şekil 2.10. SP işleminde kullanılan ekipmanlar; (a) tüm ekipman, (b) fırın kabini yakın görünümü

## 2.6. Aşınma Numunelerinin Hazırlanması

Sıcak presleme sonrasında kalıptan çıkarılan numuneye, aşınma deney mekanizmasında numune tutucuya yerleştirilmesi amacıyla matkap kullanılarak 6 mm çapında delik açılmıştır. Ayrıca; numunenin yan yüzeyine de, deney süresi boyunca sürtünme sonucu sıcaklık artışını belirlemek amacıyla termokupul ucu girişini sağlamak için matkap ile 1 mm çapında delik açılmıştır. Hazırlanan aşınma numuneleri Şekil 2.11’de, teknik resmi ise Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Aşınma deneyi numuneleri



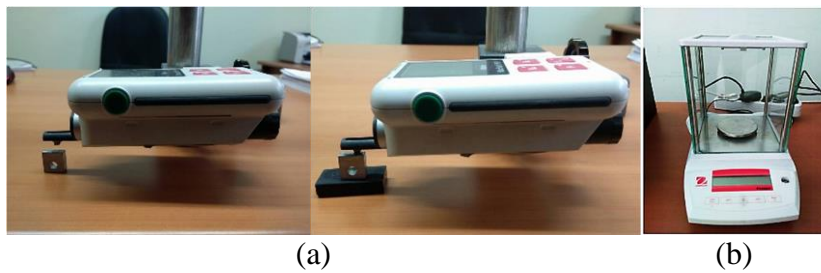
Şekil 2.12. Üretilen aşınma numunelerinin teknik resmi

Deney numunelerinin hazırlanmasında meydana gelebilecek karışıklıklardan dolayı numuneler katkı malzeme oranlarına göre numaralandırılmış numune poşetlerine konularak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Sınıflandırılan aşınma numuneleri

Aşınma deney numuneleri, sıcak presleme sonucu kalıptan çıkarıldıktan sonra deneyin gerçekleştirileceği yüzeylerde pürüzlülük kontrolleri sonucunda saptanan farklı pürüzlülük değerlerinden dolayı deney yapılacak yüzeyler 30 sn 1200 numaralı zımpara ile zımparalanmış ve ardından 30 sn alüminayla parlatılmıştır. Böylece pürüzlülük farklılıkları minimuma indirilmiştir. Deneylere başlamadan önce ve her deney sonrasında, yüzeyler temiz bir bez ile silinmiş ve daha sonra aseton içerisinde bekletilerek yüzeylerdeki yabancı maddelerden arıtılması sağlanmıştır. Her deney öncesi hassas terazide aşınma numunelerinin ilk ağırlıkları tartılmıştır (Şekil 2.14 b). Her yeni deney başlangıcında numune ile eş çalışan çelik disk yüzeyi 1200 numaralı zımpara tutularak ve sonrasında asetonla silinerek temizlenmiştir. Aşınma numunelerinin yüzey pürüzlülük değerlerinin kontrol edilmesi için “Mahr MarSurf PS1” marka yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.14 a).



Şekil 2.14. Numunelerin yüzey pürüzlülüklerin ölçülmesinde ve aşınma miktarlarının belirlenmesi için kullanılan ekipmanlar; (a) yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı, (b) hassas terazi

## 2.7. Aşınma Deneylerinin Yapılışı

Aşınma testleri sırasında, kuvvet ve sıcaklığı algılayabilen bir yazılım (program) yardımıyla sürtünme kuvveti ve sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Program saniyede 10 değer alabilecek şekilde hazırlanmıştır. Deney sonrasında, kaydedilen değerler kullanılarak sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve sıcaklıktaki değişimler tespit edilmiştir. Her deney sonrasında numune yüzeylerinde oluşabilecek aşınma parçacıklarından dolayı numuneler aseton içerisinde bekletilerek temizlenip kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak aşınma sonrası ağırlıkları ölçülmüştür. ZA27 alaşımına ait numuneler aşınma deney düzeneğinde değişik şartlar altında deneye tabi tutulmuştur. Her bir deney için ayrı ayrı 2'şer numune kullanılarak daha sonra elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır ve sonuçlar grafik haline getirilip karşılaştırılmıştır.

Değişkenler;

- Diskin dönme hızı (100 devir/dk)
- Numune üzerine uygulanan yük ( 10 N )
- Deney süresi (30 dk) dir.

Deney parametreleri her deney için değiştirilmiştir. Yük olarak; 10, 15, 20, 25 N; deney süreleri ise 30, 60, 90, 120 dk ve aşındırıcı disk devir sayısı olarak 100, 150, 200 ve 250 devir/dk olarak seçilmiştir. Her HNK için 14'er adet numune üretilmiştir.

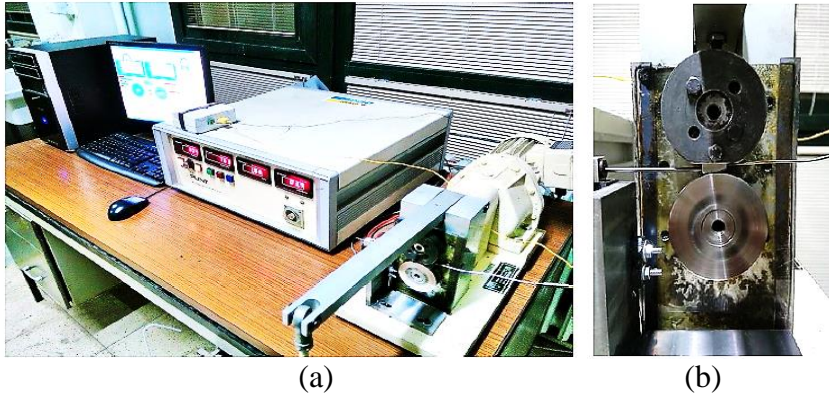
Her bir numune için, yük 10 N ve devir sayısı 100 dev/dk değerlerinde sabit tutularak 30, 60, 90, 120 dk' lık sürelerde; süre 30 dk ve yük 10 N değerlerinde sabit tutularak 100, 150, 200, 250 dev/dk' lık hızlarda ve son olarak süre 30 dk ve hız 100 dev/dk değerlerinde sabit tutularak 10, 15, 20, 25 N yüklerde deneyler uygulanmıştır.

Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen HNK tozlardan SP işlemi ile üretilen numuneler ve kodları Tablo 2.2'de verilmiştir.

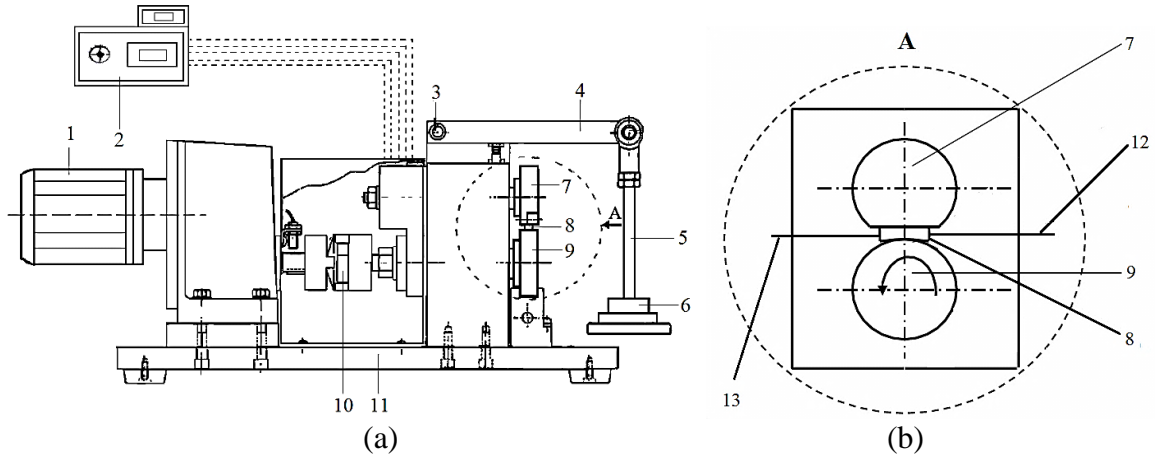
Tablo 2.2. Aşınma deneyleri için üretilen HNK numuneler

1.Grup		2.Grup	
HNK Numuneler	Numune Kodu	HNK Numuneler	Numune Kodu
ZA27-%1 Grafit-%1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-1-1	ZA27-%2 Grafit-%1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-2-1
ZA27-%1 Grafit-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-1-2	ZA27-%2 Grafit-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-2-2
ZA27-%1 Grafit-%3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-1-3	ZA27-%2 Grafit-%3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-2-3
ZA27-%1 Grafit-%4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-1-4	ZA27-%2 Grafit-%4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-2-4
3.Grup		4.Grup	
HNK Numuneler	Numune Kodu	HNK Numuneler	Numune Kodu
ZA27-%3 Grafit-%1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-3-1	ZA27-%4 Grafit-%1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-4-1
ZA27-%3 Grafit-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-3-2	ZA27-%4 Grafit-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-4-2
ZA27-%3 Grafit-%3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-3-3	ZA27-%4 Grafit-%3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-4-3
ZA27-%3 Grafit-%4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-3-4	ZA27-%4 Grafit-%4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZA-4-4

Aşınma deneylerinde Plint & Partners marka blok-on-disk tipi aşınma test cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.15). Deney düzeneğinde karşı yüzey (disk) malzemesi olarak, sertleştirilmiş ve menevişlenmiş 4140 çeliği kullanılmıştır. Diskin yüzey sertliği 60 RSD-C, çapı 60 mm ve kalınlığı da 12 mm'dir. Deney düzeneği; 1 kW gücünde bir elektrik motoru, bir hız ayar ünitesi, mil, disk, numune tutucusu, yükleme kolu ve sürtünme kuvvet ölçüm sisteminden oluşmuştur. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.15. Kullanılan aşınma deney düzeneğinin görüntüsü; (a) blok-on-disk tipi aşınma test cihazı; (b) numune ve diskin yakından görünümü



1. Elektrik motoru, 2. Kontrol ve veri toplayıcı, 3. Perno, 4. Yükleme kolu, 5. Askı kolu, 6. Ağırlık, 7. Numune tutucu, 8. Deney numunesi, 9. Disk, 10. Kavrama, 11. Alt tabla, 12. Termokupul 13. Kuvvet algılayıcı

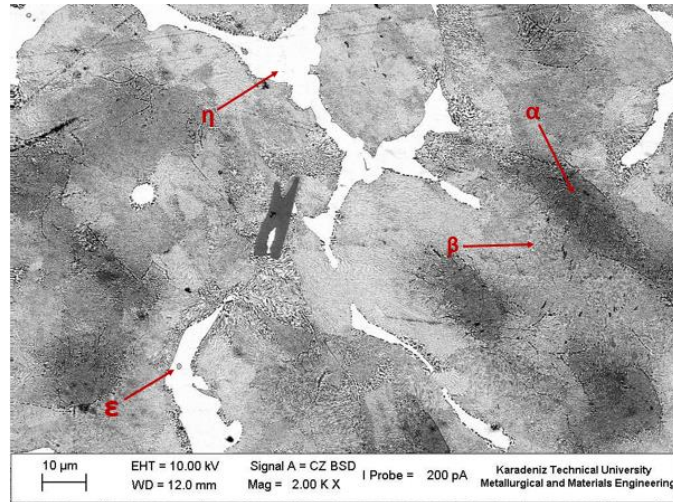
Şekil 2.16. Aşınma deney düzeneği; (a) aşınma test cihazının şematik gösterimi, (b) numune tutucu, numune ve diskin yakından görünümü



### 3. BULGULAR

#### 3.1. ZA27 Alaşımının Döküm Yapısı

Tez kapsamında yapılan çalışmaların ilk adımı olarak, yapılan alaşım dökümü sonucu elde edilen ZA27 alaşımının iç yapısı Şekil 3.1' de gösterilmektedir. Şekilde, taneler arasında beyaz olarak görülen bölgeler çinko bakımından zengin  $\eta$  fazıdır ve bu faz içinde çok ince  $\epsilon$  fazları bulunmaktadır. Ayrıca; bu alaşımda peritektik, ötektik ve ötektoid reaksiyonlar birlikte meydana gelmektedir. Katılaşma başlarken önce sıvı içinde alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı oluşur. Bu  $\alpha$  dentritleri sıvıyla peritektik reaksiyon oluştururken; sıvı faz çinkoca zenginleşir ve dendritler çevresinde çinkoca zengin  $\beta$  fazı oluşur. Katılaşma, geriye kalan çinkoca zengin fazın ötektik reaksiyonu ile tamamlanır. Ötektik reaksiyon sonucunda ise, çinkoca zengin  $\eta$  fazı, alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı ve intermetalik  $\epsilon$  fazları meydana gelir. 275 °C altında kararsız olan alüminyum bakımından zengin  $\beta$  fazı ötektoid reaksiyon sonucunda  $\alpha$  ve  $\eta$  kararlı fazlarını oluşmaktadır Döküm yapısı incelendiğinde; peritektik reaksiyon sonucuna oluşan  $\beta$  fazının ilk oluşan  $\alpha$  dentritlerini çevrelediği görülmektedir.



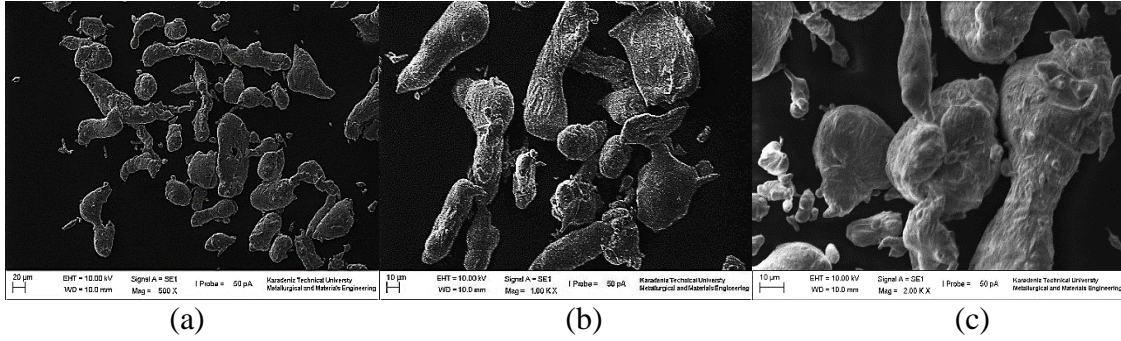
Şekil 3.1. ZA27 alaşımının dökümü sonrası gözlemlenen iç yapısı



Döküm sonrası yapılan mekanik deneyler sonucunda ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 314 MPa, sertlik değeri ise 132 BSD olarak belirlenmiştir.

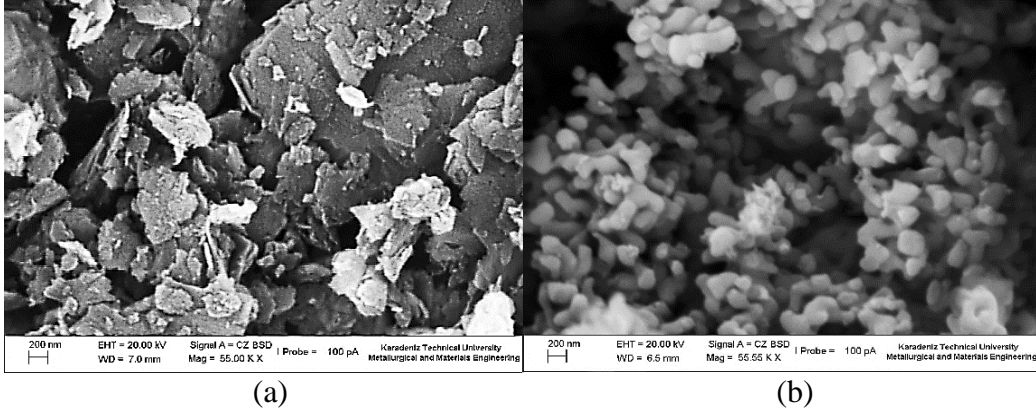
### 3.2. Matris Tozu ve Katkı Tozlarının Morfolojileri

ZA27 alaşımının dökümünden sonra elde edilen ZA27 (matris) tozlarının morfolojileri Şekil 3.2’de verilmiştir. Üretilen tozların küresel değil düzensiz ve ligament şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. ZA27 tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri; (a) 500X, (b)1000X (c) 2000X

Çalışmalarda kullanılan nano-grafit ve nano-alüminanın taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri de Şekil 3.3’te verilmiştir. Şekilden nano-grafit parçacıklarının pulsu ve ince plakalar halinde nano-alümina parçacıklarının ise daha düzgün şekilli ve küresel olduğu görülmektedir.



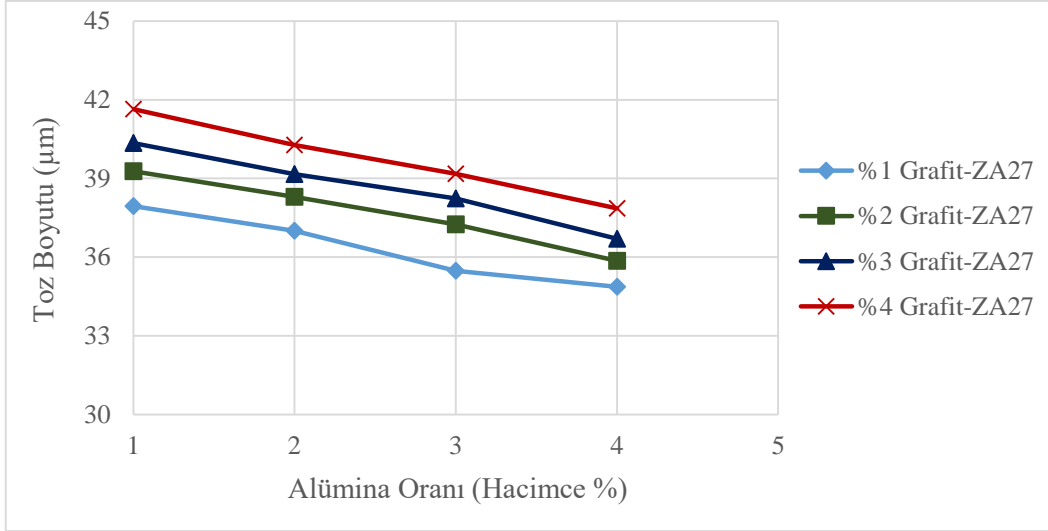
Şekil 3.3. Takviye malzemelerinin 55000X büyütmedeki SEM görüntüleri; (a) nano-grafit, (b) nano-alümina

### 3.3. Hibrit Nanokompozitler (HNK)

Bu aşamada, ZA27 alaşımının dökümünden sonra elde edilen alaşım tozlarının ve katkı malzemelerinin (nano-grafit ve nano-alümina) 8 saat süreyle mekanik alaşımlanması sonucu elde edilen HNK tozların parçacık boyutu ölçüm cihazında boyut analizi yapılmış ve SEM' de iç yapıları incelenmiştir.

#### 3.3.1. HNK Tozların MA Sonrası Toz Boyutları

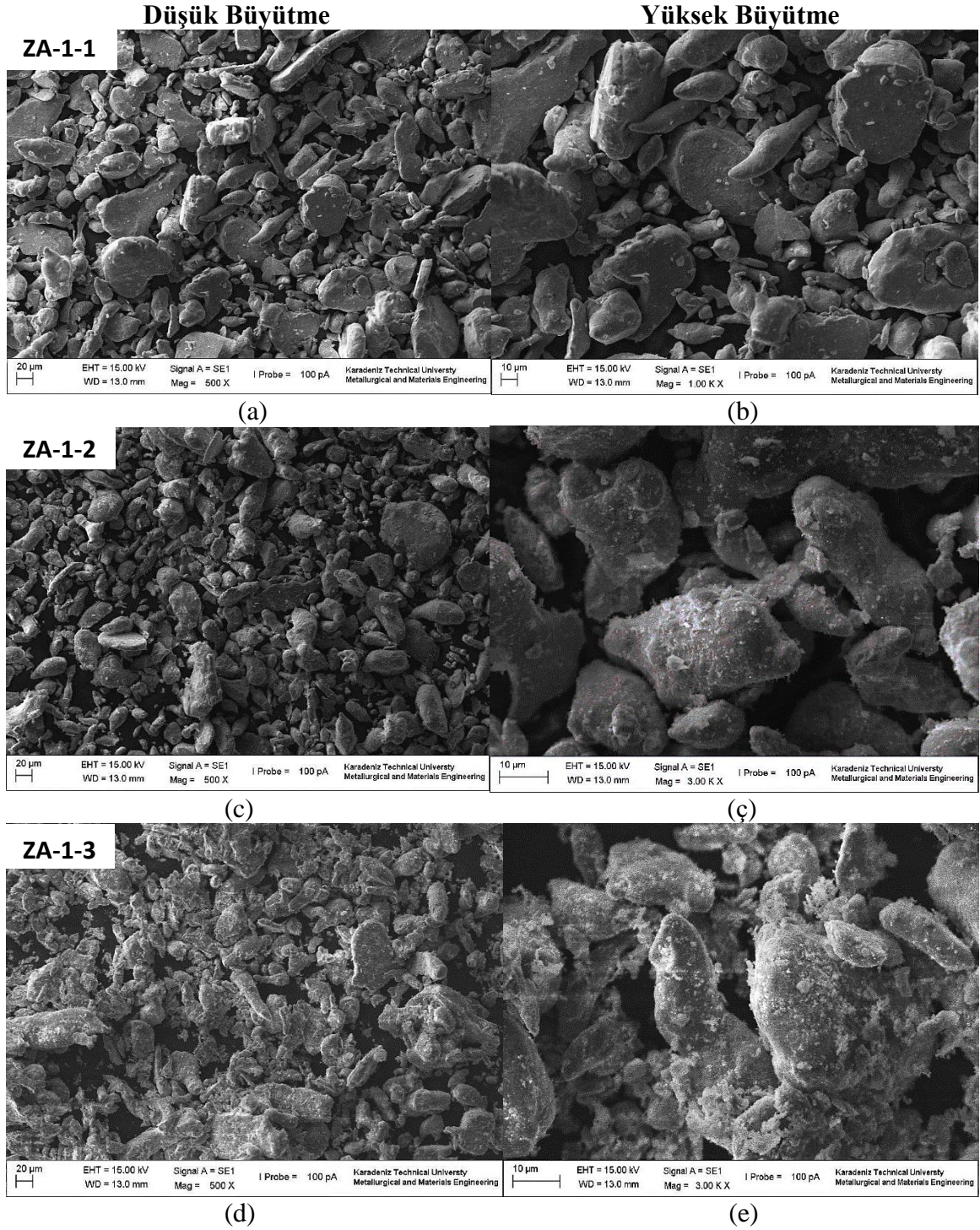
Farklı oranlarda grafit içeren kompozitlerde alümina oranının toz boyutu üzerindeki etkisi Şekil 3.4'deki grafikte verilmektedir. Şekilden alümina katkısı arttıkça toz tane boyutunu azaldığı görülmektedir. Bunun yanında aynı alümina oranına sahip HNK tozlarda grafit oranı arttıkça tozların tane boyutlarının arttığı gözlenmiştir. Örneğin; hacimce %1 grafit ve %1 alümina oranına sahip HNK tozların boyutu yaklaşık 38  $\mu\text{m}$  olurken; hacimce %1 grafit ve %4 alümina oranına sahip HNK tozların boyutu yaklaşık 35  $\mu\text{m}$  boyutuna düşmüştür. Ancak; grafit oranının artışıyla meydana gelen toz boyutu değişikliğine bakıldığında; %1 grafit ve %1 alümina oranına sahip HNK tozlarda boyut yaklaşık 38  $\mu\text{m}$  olarak belirlenirken, %4 grafit ve %1 alümina oranına sahip HNK tozlarda boyut yaklaşık 42  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. MA sonrası üretilen HNK tozların boyutlarının, alümina ve grafit oranıyla değişimi

### 3.3.2. HNK Tozların MA Sonrası Morfolojileri

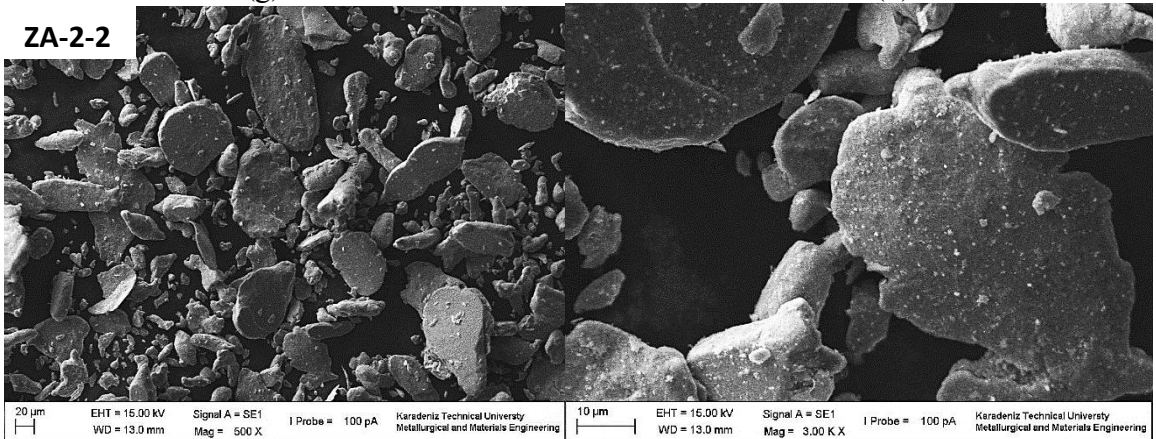
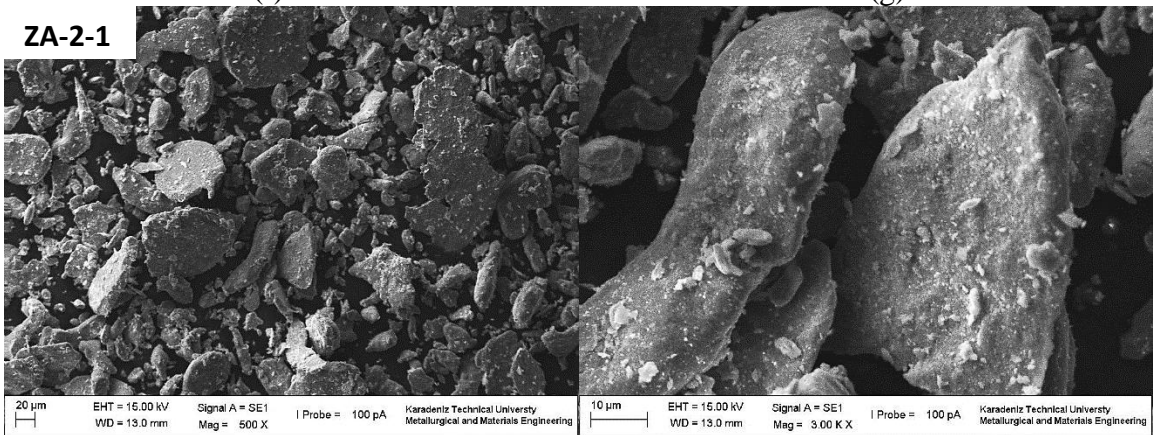
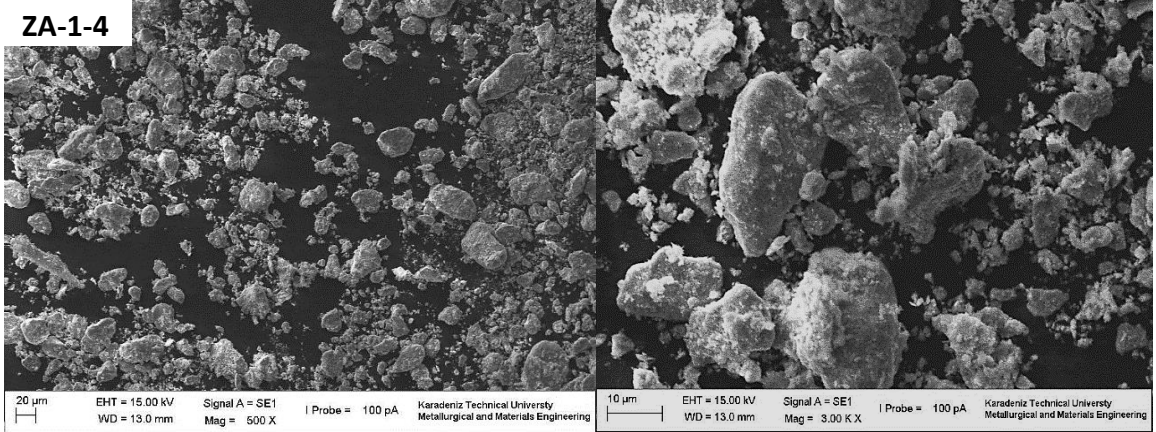
HNK tozları mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri Şekil 3.5'te verilmektedir. Başlangıç toz boyutu 40,2 µm (takviyesiz ZA27) ve toz şekli nispeten küresel ve çubuksudur. Şekillerde verilen toz morfolojileri incelendiğinde, %1 'den %4'e kadar olan grafit takviyelerinde (ZA-1-1, ZA-2-1, ZA-3-1, ZA-4-1) tozların çubuksu halden pulsu hale geldikleri görülmüştür (Şekil 3.5 a-b, ğ-h, n-o, u,ü). Grafit yağlayıcı bir özelliğe sahip olduğundan dolayı tozlar arasındaki etkileşimi olumsuz etkileyerek kırılma olaylarını azaltmıştır. Tozlar birbirlerine yüksek hızlarda çarparak çubuksu şeklini kaybetmiş ve kırılarak pulşulaşmıştır. %4 grafit takviyesinde (ZA-4-1) ise yüksek grafit oranının etkisiyle tozların birbirleriyle etkileşimi oldukça azalır (Şekil 3.5 u,ü). Bunun yanında alümina oranının artmasıyla (ZA-1-4) tozların MA ile kırılarak çubuksu hale döndüğü anlaşılmıştır (Şekil 3.5 f,g). Dolayısıyla 8 saat MA işlemi sonunda başlangıç toz şekline yakın bir morfoloji elde edilmiştir.



Şekil 3.5. MA ile üretilen HNK tozların düşük ve yüksek büyütmelemlerdeki SEM görüntüleri; (a,b) ZA-1-1, (c,ç) ZA-1-2, (d,e) ZA-1-3, (f,g) ZA-1-4, (ğ,h) ZA-2-1, (ı,i) ZA-2-2, (j,k) ZA-2-3, (l,m) ZA-2-4, (n,o) ZA-3-1, (ö,p) ZA-3-2, (r,s) ZA-3-3, (ş,t) ZA-3-4, (u,ü) ZA-4-1, (v,y) ZA-4-2, (z,w) ZA-4-3, (x,q) ZA-4-4

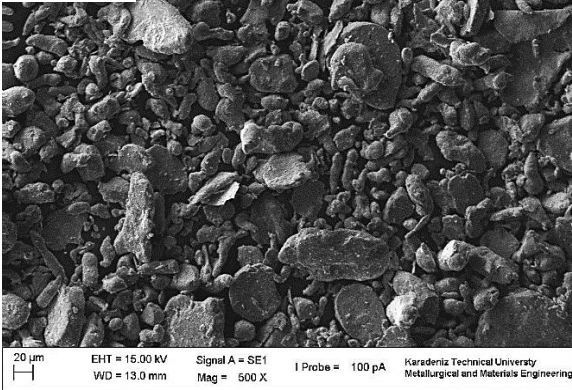


Şekil 3.5'in devamı

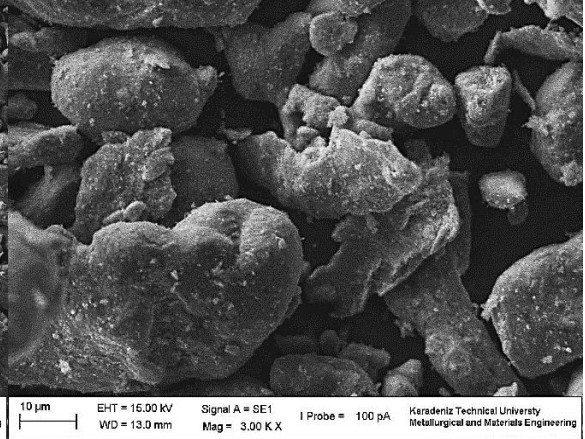




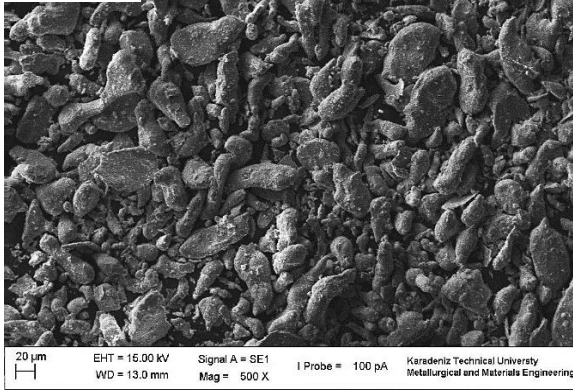
Şekil 3.5'in devamı

**ZA-2-3**

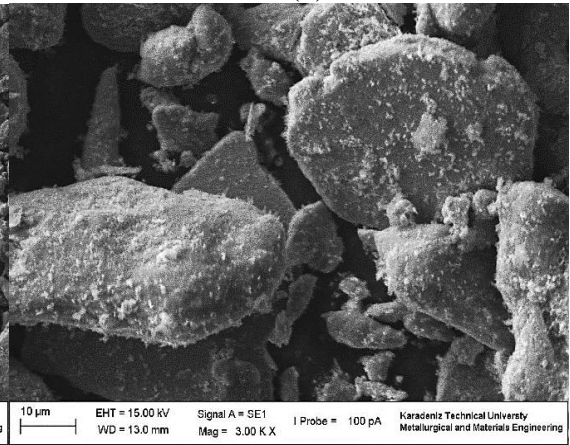
(j)



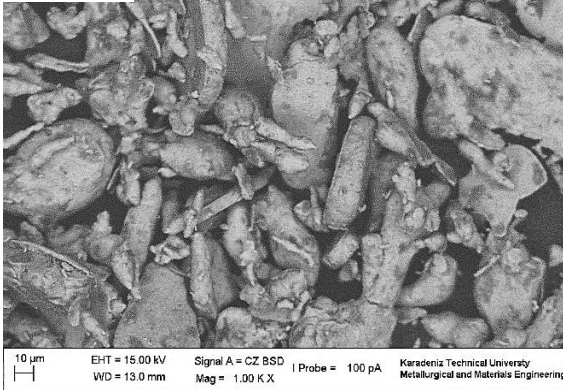
(k)

**ZA-2-4**

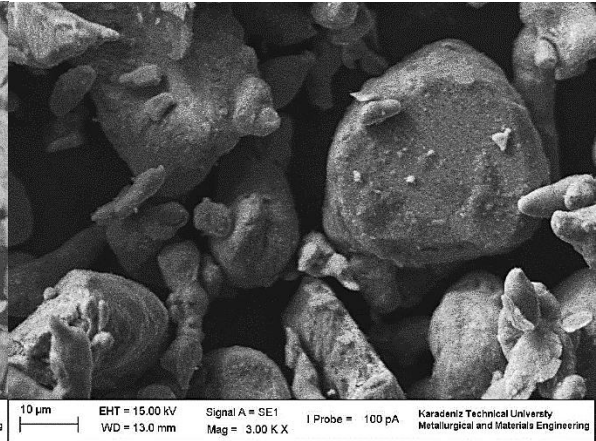
(l)



(m)

**ZA-3-1**

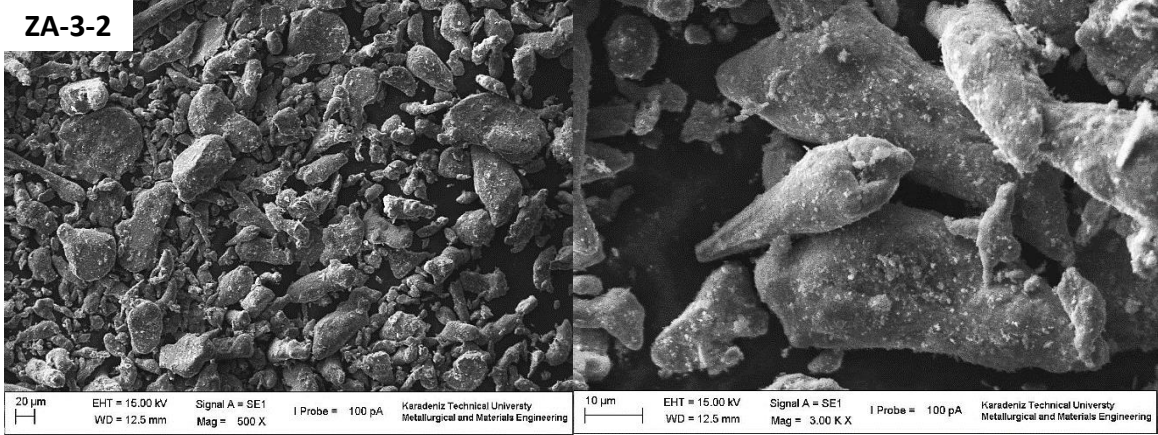
(n)



(o)

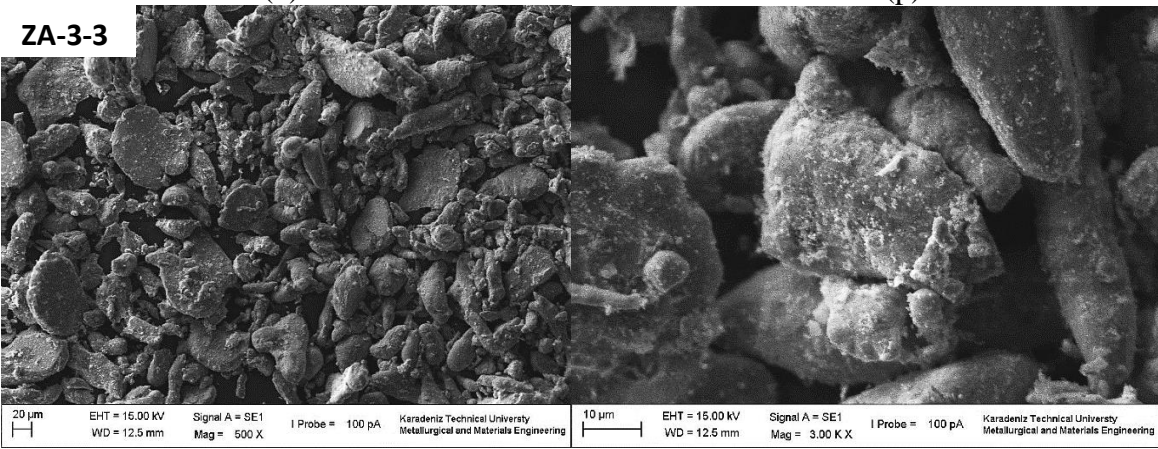


Şekil 3.5'in devamı



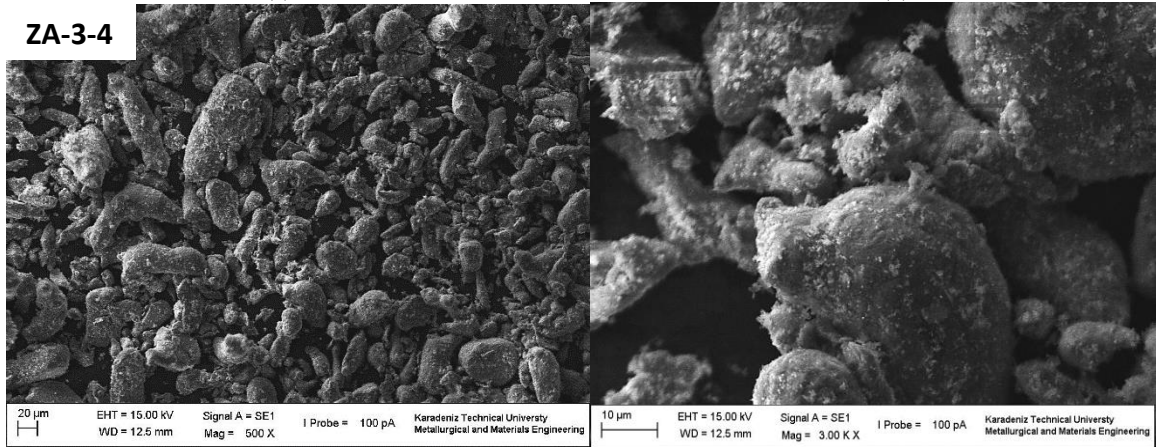
(ö)

(p)



(r)

(s)

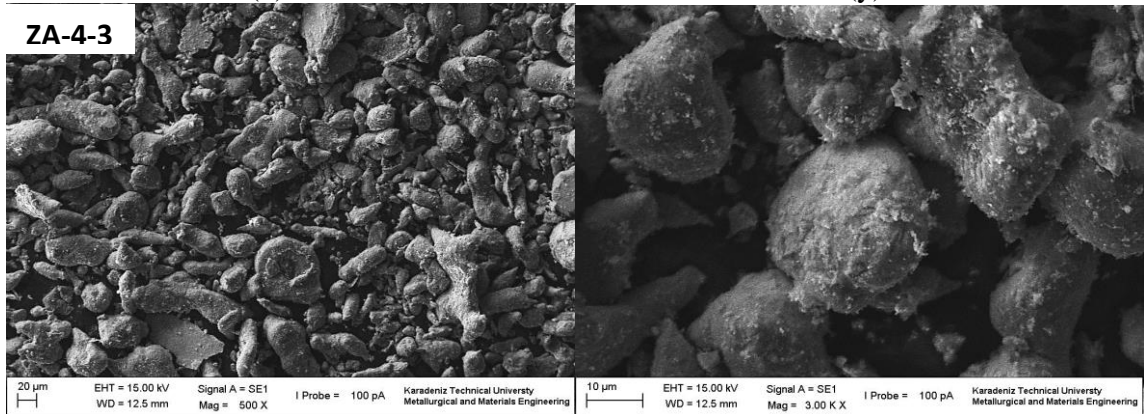
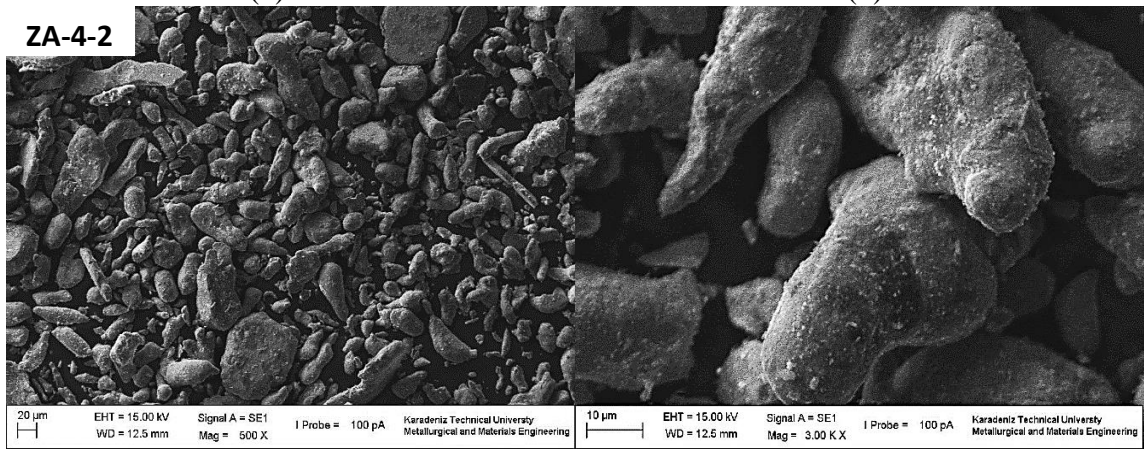
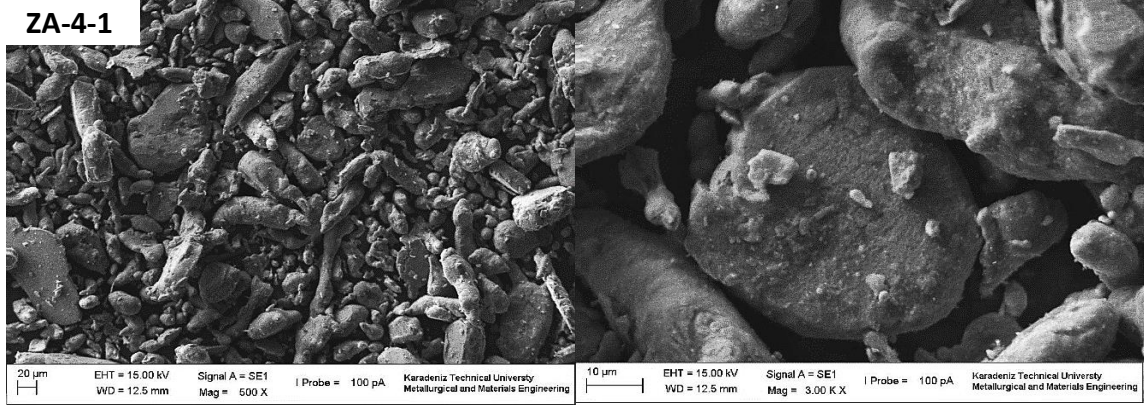


(ş)

(t)

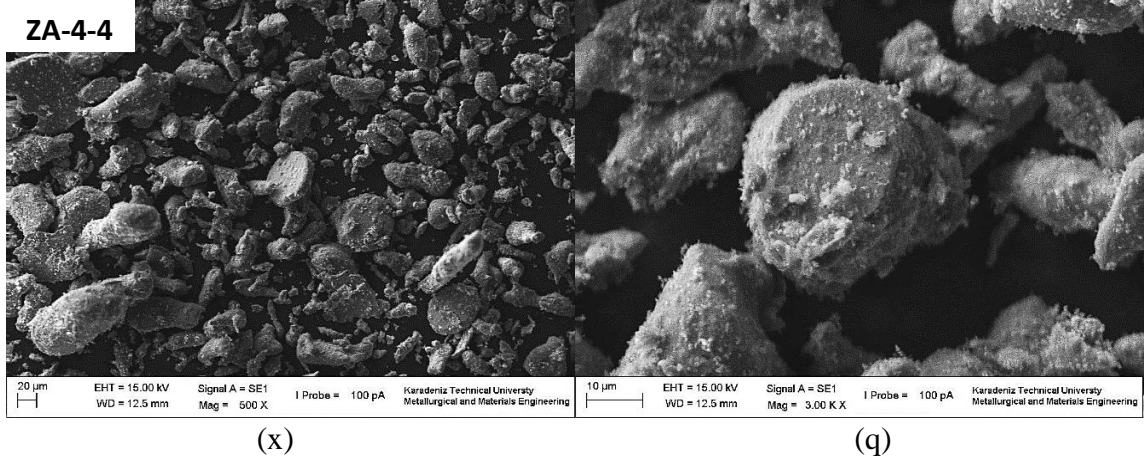


Şekil 3.5'in devamı



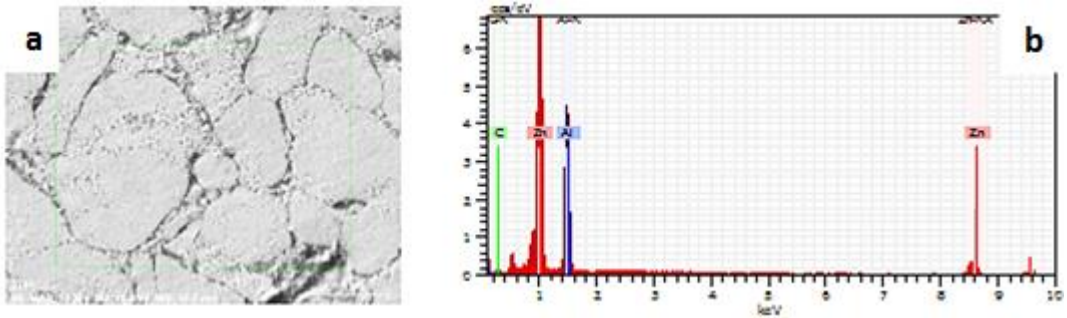


Şekil 3.5'in devamı

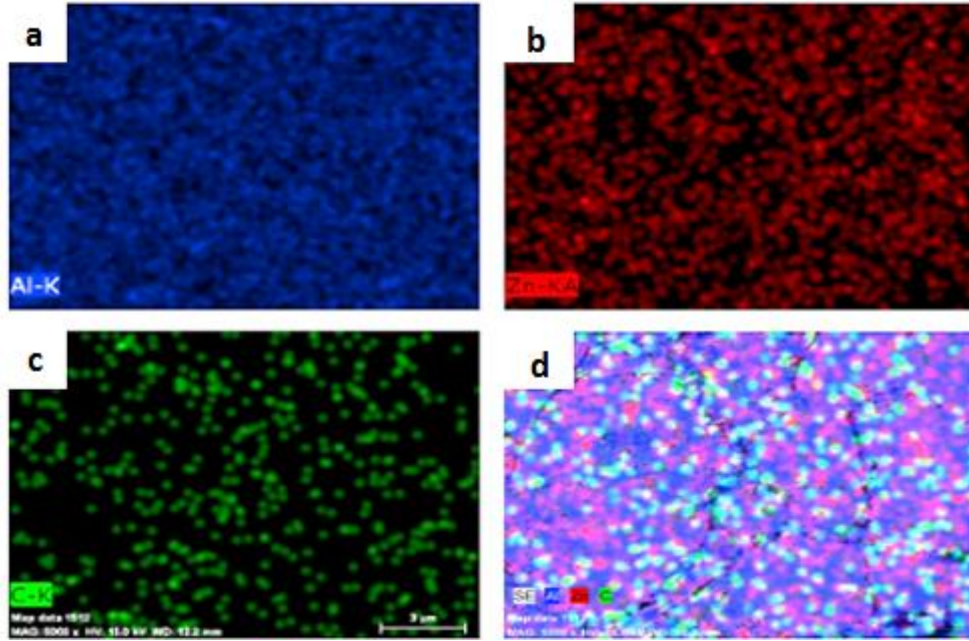


### 3.4. Üretilen Numunelerin İç Yapı İncelemeleri

Şekil 3.6' da ZA-2-2 kodlu HNK'lerin iç yapısı ve EDS analizinde yapı içerisinde bulunan Zn, Al ve grafit (C) bileşimlerini temsil eden spektrumlar verilmiştir. Şekil 3.7' de ise bu HNK numunelerin içerisindeki Zn, Al ve grafitin tek tek (Şekil 3.7 a,b,c) ve toplu olarak iç yapıdaki dağılımını gösteren harita verilmiştir (Şekil 3.7 d). İçyapıda ZA27 matris yapısında bulunan Zn, Al ve katkı elemanı olarak kullanılan grafitin dağılımına bakıldığında grafit parçacıklarının yapı içerisinde homojen olarak dağılımı görülmektedir. MA yöntemi ile öğütülmüş olan tozlardan SP ile üretilen bu HNK'lerde gerek ZA27 matris içine gömülmüş durumda bulunan gerekse tane sınırlarına yerleşmiş katkı malzemesi olan grafit, verilen dağılım haritasından görülmektedir. Buna göre; MA ile ilave malzemelerin yapı içerisinde homojen olarak dağılması ve daha kararlı bir iç yapı elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.6. SEM ve EDS incelemeleri; (a) ZA-2-2 kodlu HNK'lerin morfolojisi, EDS spektrumları (b)



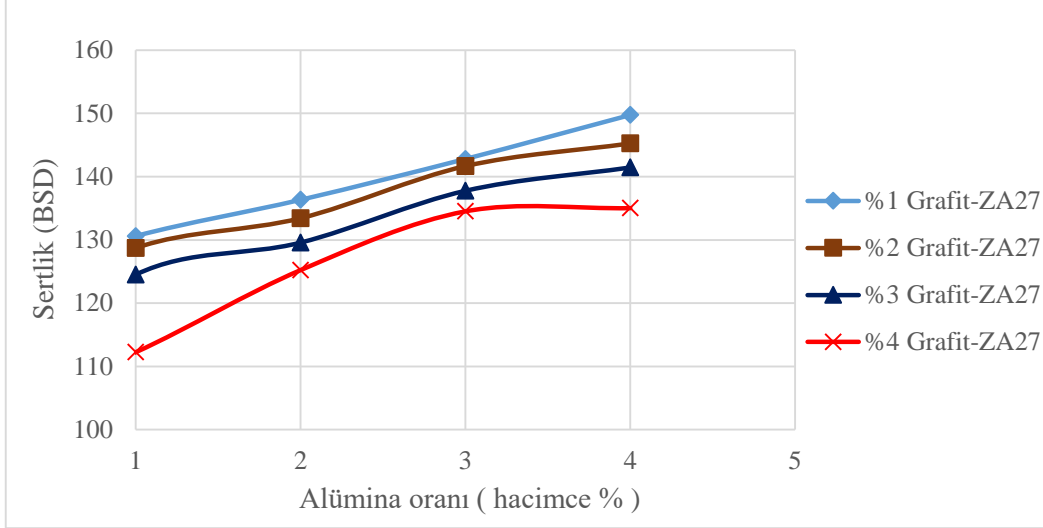
Şekil 3.7. Dağılım haritalarının görüntülenmesi; üretilen ZA-2-2 kodlu HNK'lerin içyapısında bulunan (a) Al, (b) Zn ve (c) grafitin dağılımı, (d) Zn (kırmızı) - Al (mavi) - grafitin (yeşil) toplu dağılım haritası

### 3.5. HNK Numunelerin Sertlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 3.8'de HNK numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılmasını sağlayan bir grafik verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, en yüksek sertlik değeri ZA-1-4 kodlu numunede, en düşük sertlik değeri ise ZA-4-1 kodlu numunede belirlenmiştir. Bunun yanında, takviye edilen alümina oranı arttıkça bütün HNK numunelerde sertlik değerleri artış göstermiş, takviye edilen grafit oranı arttıkça da aynı şekilde bütün HNK numunelerde sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Örneğin; hacimce %1 grafit ve %1 alümina oranına sahip numunelerde sertlik değeri yaklaşık 131 BSD olarak belirlenirken; bu değer aynı grafit oranında alümina oranının hacimce %4'e çıkması durumunda yaklaşık 150 BSD olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, hacimce %1 alümina ve %1 grafit oranına sahip numunelerde sertlik değeri 131 BSD olarak ölçülürken; bu değer, aynı alümina oranına sahip ancak grafit oranının %4'e çıktığı numunede yaklaşık 112 BSD'ye kadar gerilemiştir. ZA27 metal matris (132 BSD) içersine gömülmüş durumda bulunan nano parçacıkların ayrışmasını ve dağılmasını arttırmayı sağlayan mekanik alaşımlamadan sonra sıcak presleme işlemiyle yapıda homojen bir dağılım sağlanmıştır.

Nano grafit ve nano alümina parçacık takviye edilmesinin amacı başta belirtildiği gibi, grafitin katı yağlayıcı etkisinden yararlanmak, alüminanın da mekanik özellikleri iyileştirme

özelliğinden faydalanmaktı. HNK numunelerde sertlik değerlerindeki değişimler bu amaca yönelik yapılmış olan çalışmalarını desteklemektedir.



Şekil 3.8. HNK numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması

### 3.6. HNK Numunelerin Aşınma Yüzeyi Pürüzlülük Kontrolü

Sıcak presleme işleminden sonra kalıptan çıkarılan HNK numunelerden 3' ü üzerinde yapılan pürüzlülük ölçüm sonuçları Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. HNK numunelerin sıcak presleme sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

Numune kodu	Ra ( $\mu\text{m}$ )
ZA27	4,231
ZA-1-1	3,535
ZA-1-2	2,675

Yukarıda verilen yüzey pürüzlülük farklılıklarının giderilmesi amacıyla yapılan işlemler sonucu farklılıkların giderildiği görülmüş ve yukarıda ilk yüzey pürüzlülüğü alınan aynı numunelerin son yüzey pürüzlülük değerleri aşağıda Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. HNK numunelerin zımparalama ve parlatma sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

Numune kodu	Ra ( $\mu\text{m}$ )
ZA27	1,743
ZA-1-1	1,621
ZA-1-2	1,552

### 3.7. ZA27 ve HNK Numunelerin Aşınma Deneyleri

Her deney için katkısız ZA27 ve HNK numunelerden alınan değerlerin ortalamaları belirlenip aşağıdaki gibi karşılaştırılarak grafikler halinde gösterilmiştir.

#### 3.7.1. ZA27 ve 1. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

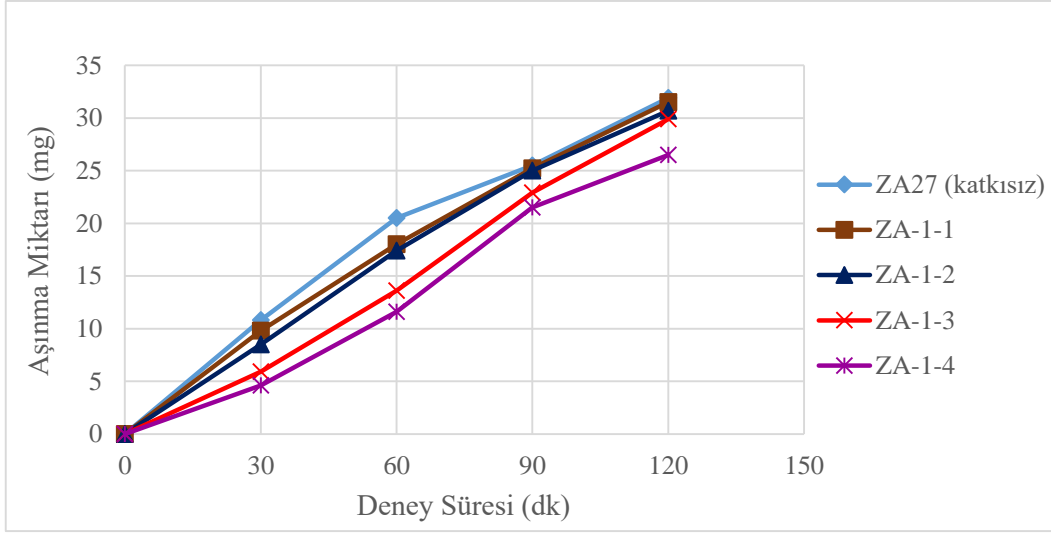
Her HNK numuneden 14'er adet üretilerek yapılan deneylerde, aşınma miktarı, sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin karşılaştırılmasında, değişen parametreler; deney süresi, devir sayısı ve yük' tür.

##### 3.7.1.1. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi

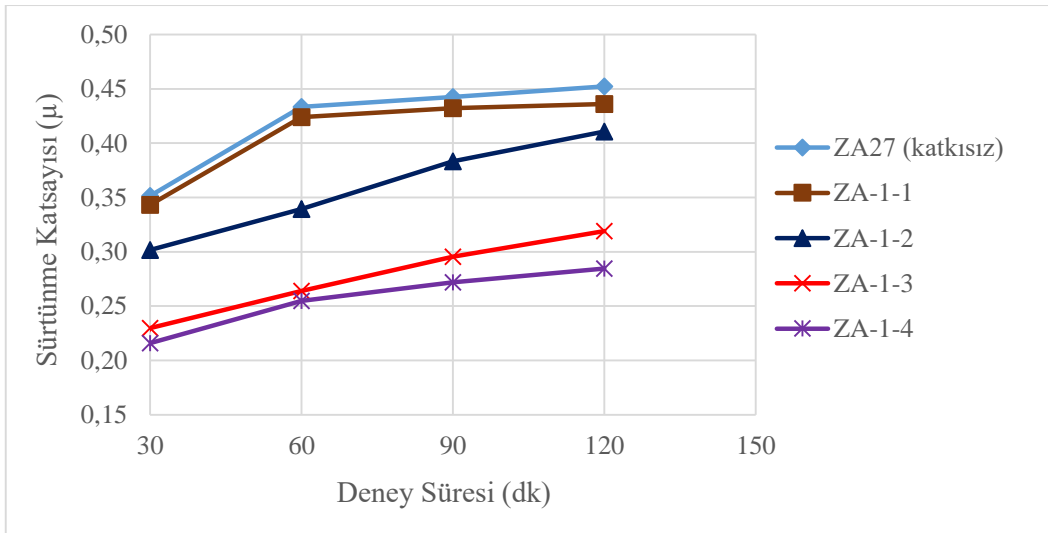
ZA27, ZA-1-1, ZA-1-2, ZA-1-3 ve ZA-1-4 HNK'lerde aşınma miktarı değerlerinin çalışma süresine göre değişimi Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Şekilden, artan çalışma süresi ile birlikte aşınma miktarının arttığı ve yüksek oranda alümina içeren kompozitin en üstün aşınma direnci sergilediği görülmektedir. Buna bağlı olarak, grafit oranı hacimce %1 oranında sabitken, alümina katkı oranının hacimce %4' e kadar arttığı HNK numunelerde, artan alümina oranının aşınma direncine katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Bilindiği gibi alüminanın sert bir yapıya sahip olması ve genellikle mukavemeti artırıcı özelliğinden dolayı kullanılması göz önünde bulundurularak 1. gruptaki numunelerde en üstün aşınma direnci gösteren malzeme ZA-1-4 kodlu HNK olmuştur. Katkısız ZA27'de 30 dk deney süresi sonunda 10,8 mg'lık bir aşınma miktarı belirlenirken; HNK numunelerin aşınma miktarı değerlerine bakıldığında, ZA-1-1 kodlu HNK'lerde aynı süre sonunda 9,8 mg; ZA-1-2 kodlu HNK'lerde 8,5 mg; ZA-1-3 kodlu HNK'lerde 5,9 mg ve en üstün aşınma direnci gösteren ZA-1-4 kodlu HNK'lerde 4,6 mg'lık aşınma miktarı belirlenmiştir.

Şekil 3.10' da görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı değerleri yapılan aşınma testleri sonucunda aşınma miktarının artışına bağlı olarak bir artış göstermiştir. Dolayısıyla, en düşük aşınma miktarının belirlendiği yani en yüksek aşınma direncine sahip ZA-1-4 kodlu numunenin uygulanan deney sürelerinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Örneğin; bu numunede en uzun deney süresi olan 120 dk sonunda yaklaşık 0,29 değerinde bir sürtünme katsayısı elde edilirken; katkısız ZA27 numunede elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,45 olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, deney süresinin artmasıyla sürtünme katsayılarında meydana gelen artış aşınma miktarında artışa sebep olmuş, ZA-1-4 kodlu numunede meydana gelen bu artışın diğer numunelere kıyasla daha az olduğu gözlemlenmiştir. ZA-1-4 kodlu numunede 30 dk deney süresi sonunda belirlenen yaklaşık 0,21 değerindeki sürtünme katsayısı, 120 dk'lık deney süresi sonunda 0,28 değerine yükselmiştir.

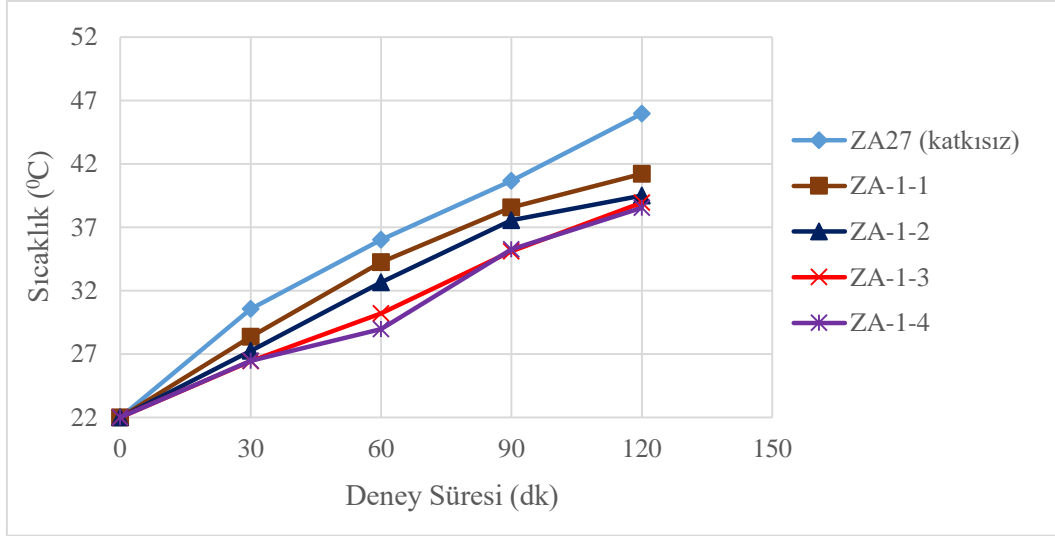
Numunelerde meydana gelen sıcaklık artışı deney süresine bağlı olarak sürekli bir artış göstermektedir. Şekil 3.11' den görüldüğü gibi başlangıçta 22 °C olan numune sıcaklığı, deney uygulama süresi boyunca çelik diskin numune aşınma yüzeyi ile sürtünme halinde olmasından dolayı sürekli artış göstermiştir. Deney süresinin artmasıyla meydana gelen en düşük sıcaklık artışları ZA-1-3 ve ZA-1-4 kodlu numunelerde tespit edilmiştir ve bu numunelerde meydana gelen sıcaklık artışlarının birbirine yakın değerlerinde olduğu görülmüştür. Buna göre; 120 dk'lık deney süresi sonunda, ZA-1-3 ve ZA-1-4 kodlu numunelerde sıcaklık en fazla 38 °C'ye kadar çıkmıştır. En yüksek sıcaklık artışı ise katkısız ZA27 numunede görülmüştür. Bu numunede sıcaklık, 120 dk deney süresi sonunda yaklaşık 46 °C'ye kadar çıkmıştır.



Şekil 3.9. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.10. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.11. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi

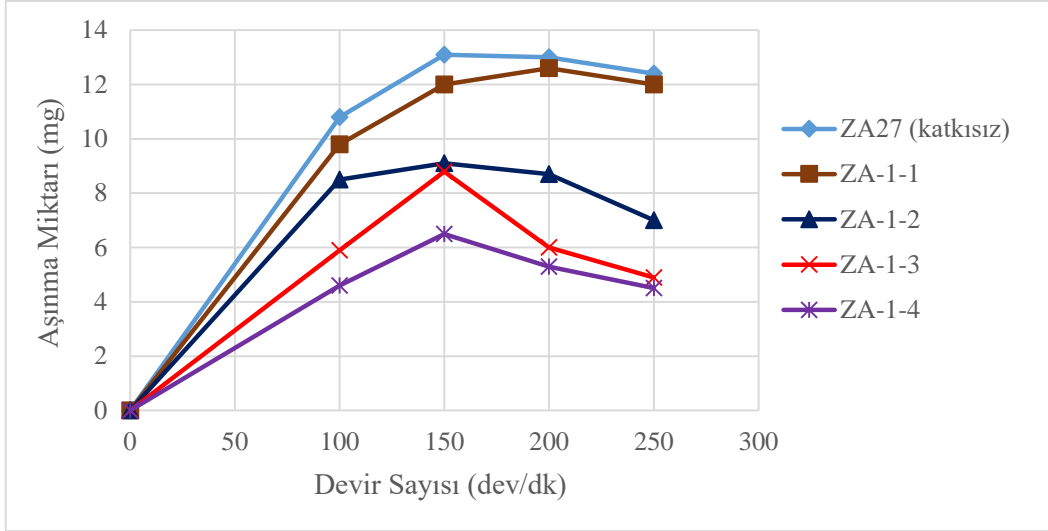
### 3.7.1.2. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi

Takviyesiz ZA27, ZA-1-1, ZA-1-2, ZA-1-3 ve ZA-1-4 HNK'lerde aşınma miktarı değerlerinin devir sayısına göre değişimi Şekil 3.12' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, deneylerin uygulandığı devir sayısındaki artışla birlikte (150 dev/dk'ya kadar) aşınma miktarlarında artış meydana gelmiştir. En yüksek aşınma miktarı katkısız ZA27 numunede gözlenirken en düşük aşınma miktarı ZA-1-4 kodlu numunede belirlenmiştir. Ayrıca, 150 dev/dk hızdan sonra ZA-1-3 ve ZA-1-4 kodlu numunelerin aşınma miktarında düşüş görülmüştür. Aşınma miktarının diğer numunelere göre düşük olduğu ZA-1-3 ve ZA-1-4 kodlu numunelerde 150 dev/dk hızda meydana gelen aşınma miktarları sırasıyla; 8,8 mg ve 6,5 mg iken; aşınma miktarları aynı numunelerde 250 dev/dk hızda sırasıyla; 4,9 mg ve 4,5 mg olarak belirlenmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, katkısız ZA27 numunede 250 dev/dk hızda belirlenen aşınma miktarı 12,4 mg olurken bu değer aynı şartlar altında ZA-1-1 kodlu numunede 12 mg, ZA-1-2 kodlu numunede 7 mg olarak belirlenmiştir. 150 dev/dk hızdan sonraki hızlarda (250 dev/dk'ya kadar) test uygulanan HNK'lerde görülen aşınma miktarları azalma eğilimi göstermiştir. Numunelere uygulanan farklı devir sayısındaki deneylerde ZA-1-4 kodlu numunelerde 250 dev/dk hızda meydana gelen aşınma miktarı, katkısız ZA27 numunelerle kıyaslandığında katkısız ZA27 numunelerinde meydana gelen aşınma miktarı ZA-1-4 kodlu numunelerinkinden neredeyse 2,5 kat fazladır.

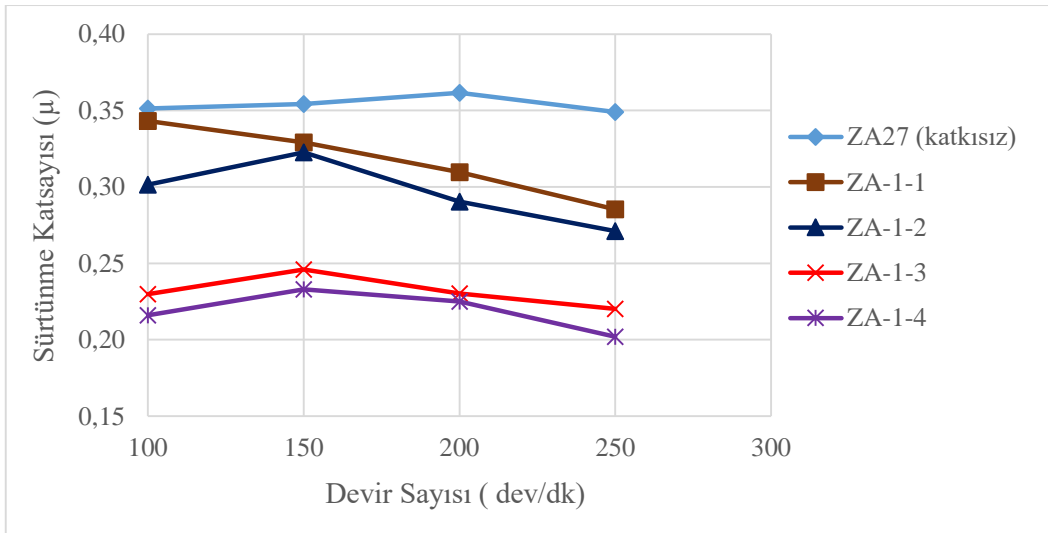
Değişik devir sayılarında uygulanan deneyler boyunca değişiklik gösteren sürtünme katsayısı değerlerini veren grafik Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü gibi HNK numunelerde devir sayısının artmasıyla sürtünmenin 150 dev/dk hıza kadar arttığı daha sonraki devir sayılarında azalışa geçtiği görülmektedir. Yalnızca katkısız ZA27 numunede görülen sürtünme katsayısının 250 dev/dk hızda 100 dev/dk hızda elde edilen sürtünme katsayısı ile yaklaşık değerler aldığı saptanmıştır. Katkısız ZA27 numunede 100 dev/dk hızda belirlenen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,35 iken; 250 dev/dk hızda gerçekleştirilen deneyde bu değer yine 0,35'e yakın değerde belirlenmiştir. Ancak HNK'lerden elde edilen değerlere bakıldığında; örneğin ZA-1-4 kodlu numunede 100 dev/dk hızda sürtünme katsayısı değeri diğer numunelerden daha düşük olup yaklaşık 0.21 değerindeyken; bu değer 250 dev/dk hızda gerçekleştirilen deneylerde 0,20 değerinde kalmıştır. Sonuç olarak, ZA-1-4 kodlu numunenin diğer HNK numunelere göre aşınmaya karşı gösterdiği üstün dirence bağlı olarak değişik devir sayılarında uygulanan deneyler sonucunda daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir.

Devir sayısının artmasıyla devam eden aşınma deneyleri boyunca numunelerde meydana gelen sıcaklık artışları Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Devir sayısının artması sonucu beklenildiği gibi her bileşimdeki numunede sürekli olarak bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. En yüksek sıcaklık artışı katkısız ZA27 numunede meydana gelirken, en düşük sıcaklık artışı ZA-1-4 kodlu numunede meydana gelmiştir. Katkısız ZA27 numunede 250 dev/dk devir hızında yapılan deney sonucu, sıcaklık yaklaşık 50 °C'ye yükselirken; ZA-1-4 kodlu numunede aynı şartlar altında sıcaklık yaklaşık 39 °C'ye yükselmiştir. HNK numunelerde devir sayısının artması sonucu meydana gelen sıcaklık artışlarının birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, tüm HNK numunelerde 250 dev/dk deney hızında yapılan deneyler sonucunda sıcaklık 38-40 °C arasındaki değerlere yükselmiştir.

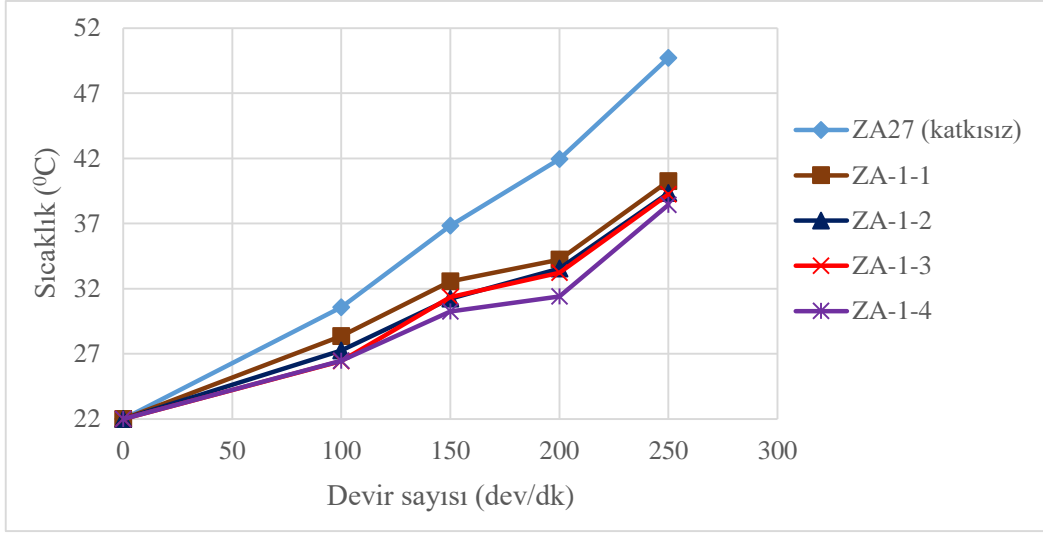




Şekil 3.12. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.13. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.14. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi

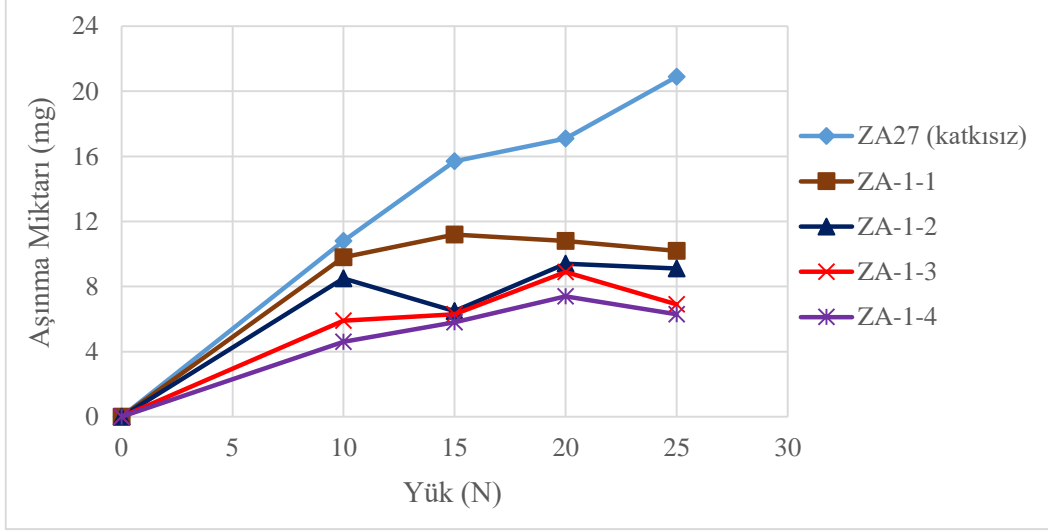
### 3.7.1.3. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi

Takviyesiz ZA27, ZA-1-1, ZA-1-2, ZA-1-3 ve ZA-1-4 HNK'lerde aşınma miktarı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi Şekil 3.15'de verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı gibi, HNK'lerin aşınma dirençleri katkısız ZA27 numuneden daha yüksektir. Katkısız ZA27 numunede uygulanan yük miktarının artışına bağlı olarak meydana gelen aşınma miktarı sürekli artarken, HNK numunelerde bu durum dalgalanmalarla artış yada azalış şeklinde gözlemlenmiştir. Örneğin, ZA-1-1 kodlu numunede artan yük ile oluşan aşınma miktarı önce artmış sonra bir miktar azalışa geçmiştir. Bu numunede 15 N yük altında aşınma miktarı 11,2 mg olarak belirlenirken; 25 N yük altında 10,2 mg olarak belirlenmiştir. ZA-1-2 kodlu numunede ise 15 N yük ile uygulanan testte aşınma miktarı 10 N yük ile uygulanan testte elde edilen miktardan daha az olmuş ancak daha sonraki yüklerin artışıyla yükselişe geçmiştir. Bu numunede, en düşük aşınma miktarı 15 N yük altında 6,5 mg olarak saptanırken; 25 N yük altında 9,1 mg olarak belirlenmiştir. Aşınma miktarlarında meydana gelen bu dalgalanmalar küçük miktarlarda oluşmuş ve en yüksek aşınma direncine ZA-1-4 kodlu HNK sahip olmuştur. ZA-1-4 kodlu numunelerde meydana gelen aşınma miktarı; 10 N yükte, 100 dev/dk hızda ve 30 dk deney süresince, yaklaşık 4,6 mg olurken; bu değer 25 N yük altında yürütülen deneylerde 6,3 mg olarak belirlenmiştir. Katkısız ZA27 numuneye uygulanan 25 N'lük yük altındaki deney koşullarında elde edilen aşınma miktarı yaklaşık 21 mg'a kadar ulaşmıştır. Dolayısıyla, değişik yüklerde uygulanan aşınma deneyleri

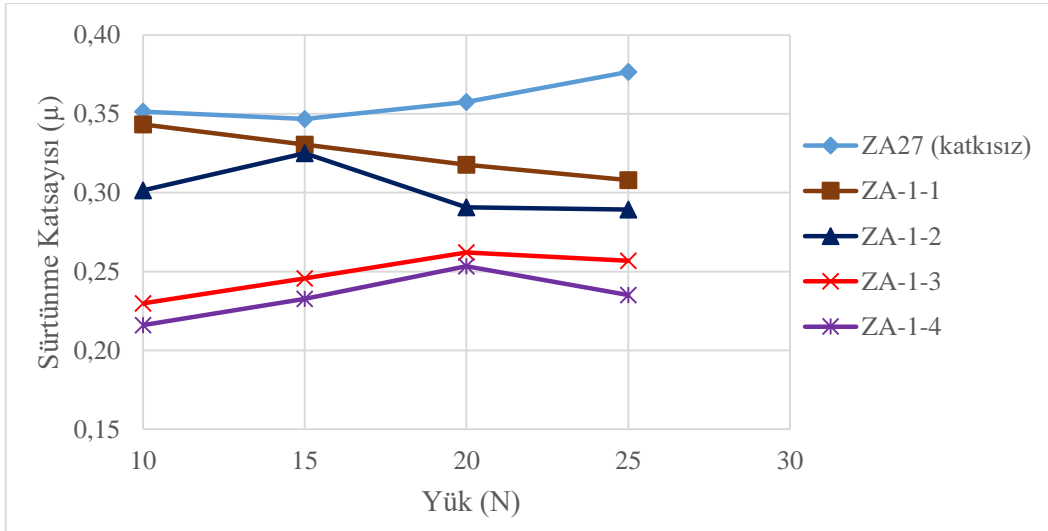
sonucunda ZA-1-4 kodlu HNK'lerde meydana gelen aşınma miktarı aynı şartlarda deneyleri yapılan katkısız ZA27 numunelerde meydana gelen aşınma miktarının üçte biri kadar olmuştur.

Şekil 3.16'de değişik yüklerde uygulanan aşınma deneyleri sonucunda katkısız ZA27 ve HNK'lerde sürtünme katsayısında meydana gelen değişiklikleri gösteren grafik verilmiştir. Değişik yüklerde uygulanan deneyler sonucu kaydedilen aşınma miktarının en az olduğu ZA-1-4 kodlu numunede grafikten görüldüğü gibi en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir. 25 N yük altında bu numuneden elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,22 iken; katkısız ZA27 numunede elde edilen değer yaklaşık 0,38 olmuştur. Uygulanan değişik yüklerde ZA-1-3 ve ZA-1-4 kodlu numunelerde sürtünme katsayısındaki değişiklik küçük miktarlarda dalgalanmalar şeklinde ilerlemiştir. ZA-1-3 kodlu numunede 10 N yük altında yaklaşık 0.23 olarak belirlenen sürtünme katsayısı, 25 N yük altında yaklaşık 0,25 olarak saptanmıştır. Bu durum ZA-1-4 kodlu numuneye göre bakıldığında, 10 N yük altında yaklaşık 0,22 olan sürtünme katsayısı, 25 N yük altında yapılan deneyler sonucu yaklaşık 0,24 olarak belirlenmiştir.

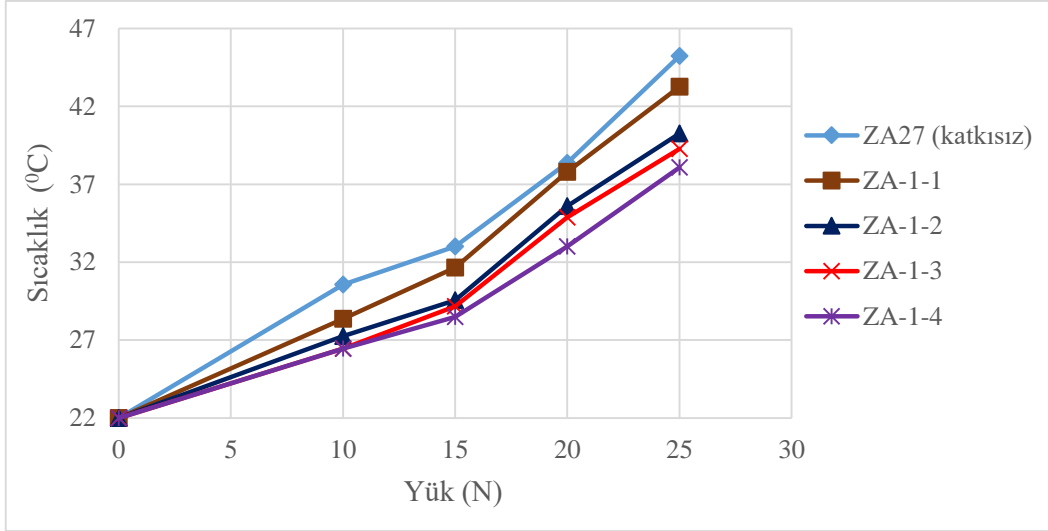
Şekil 3.17, numunelerde artan yüklerle uygulanan deneyler sonucu meydana gelen sıcaklık artışlarını göstermektedir. Yük miktarının artmasıyla gerçekleştirilen deneylerde sıcaklık, sürekli olarak artış göstermiştir. Önceki uygulanan deney şartları altında numunelerde meydana gelen sıcaklık artışlarına benzer olarak elde edilen sonuçlara göre, 25 N yük altında en yüksek sıcaklık artışı yaklaşık 24 °C'lik bir artışla katkısız ZA27 numunede; en düşük sıcaklık artışı ise 25 N yük altında yapılan deneylerde yaklaşık 16 °C' lik artışla ZA-1-4 kodlu numunede meydana gelmiştir.



Şekil 3.15. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.16. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.17. 30 dk ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 1. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi

1. gruptaki numunelerin yapılan aşınma deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, her deney koşulunda, HNK'lerin aşınma dirençlerinin katkısız ZA27 numuneye göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Kullanılan alümina parçacıkların sertlik değerleri matris malzemesi olan ZA27'den daha yüksek olduğundan, nano parçacıklar aşınma deneyleri sırasında yapı içerisinde matris malzemesinin sertliğini arttırmaktadır. Dolayısıyla, bu gruptaki numunelerle yapılan deneyler sonucu HNK'lerde katkı malzemesi olarak kullanılan nano alümina parçacıklarının aşınma direncine olan etkisi açıkça anlaşılmaktadır.

### 3.7.2. ZA27 ve 2. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

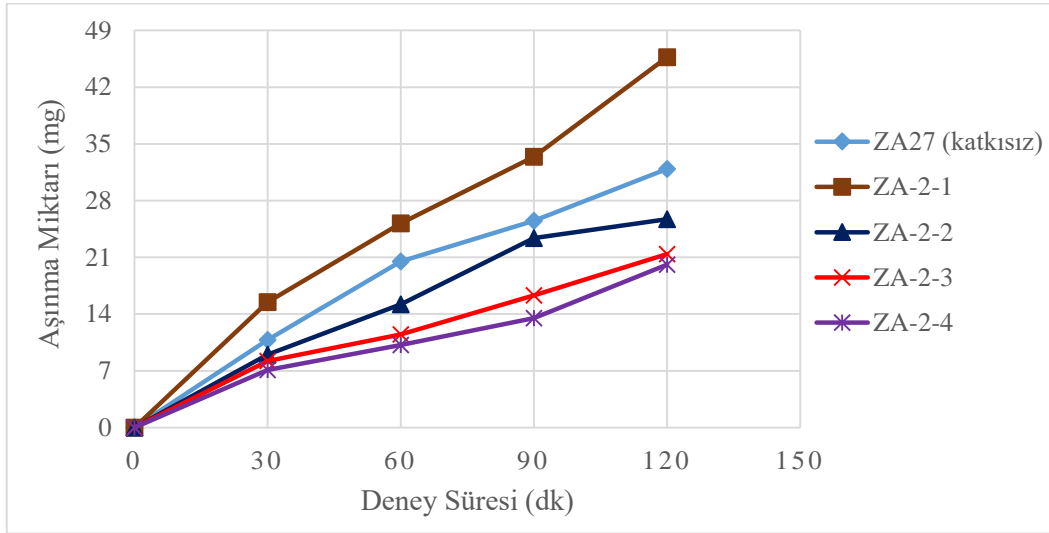
#### 3.7.2.1. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi

Şekil 3.18' de görüldüğü gibi bütün deney sürelerinde en düşük aşınma miktarı ZA-2-4 kodlu numunede, en fazla aşınma miktarı ise ZA-2-1 kodlu numunede meydana gelmiştir. ZA-2-1 kodlu numunedeki aşınma miktarı katkısız ZA27 numunede meydana gelen aşınma miktarından daha yüksek olmuştur. Katkısız ZA27 numunede 120 dk deney sonunda 31,9 mg'lık aşınma miktarı belirlenirken; ZA-2-1 kodlu numunede bu miktar 45,7 mg'a ulaşmıştır. Geçen süreyle yani alınan yolun artmasıyla tüm numunelerde aşınma miktarı artmıştır. Ancak grafikten görüldüğü gibi en fazla aşınma miktarı ZA-2-1 kodlu

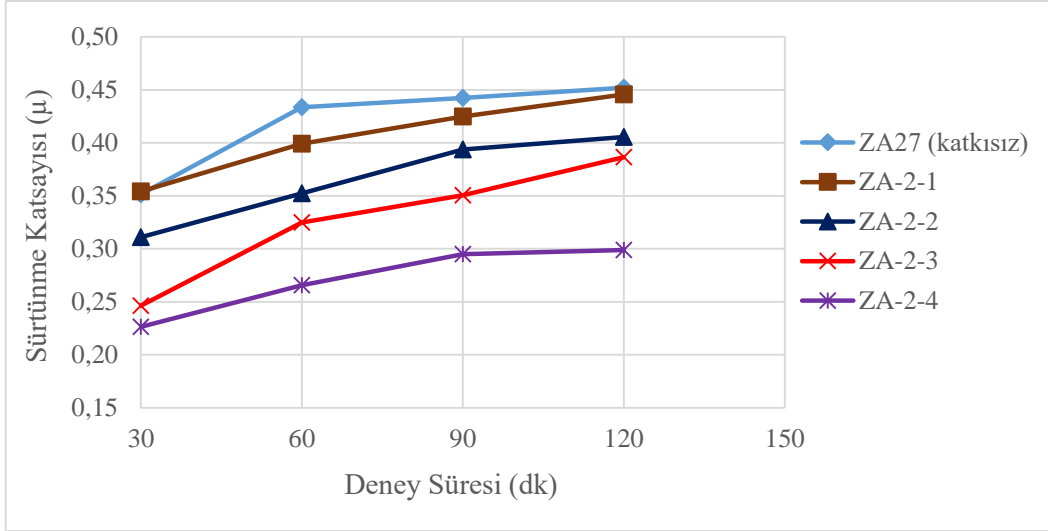
numunede görülmüştür. Bilindiği gibi grafit, tabakalı bir yapıya sahiptir ve nano boyuttaki grafit parçacıkları yapı içerisinde dağılarak kapladığı yüksek hacimden dolayı malzemenin sertliğinde ve yoğunluğunda bir düşüşe neden olmaktadır. Grafitin katı yağlayıcı olarak kullanıldığı ve olumlu sonuçlar alındığı bilinmektedir. Ancak yağlayıcı özellik göstermesine karşın mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır. Buna göre; alınan yolun artmasıyla yorulma ve ZA-2-1 kodlu numune köşelerinde çatlama, kırılma ve kopmalar görülmüştür. Ayrıca grafit oranının artmasıyla sinterlemede oluşabilecek zorluklar ve birbirleriyle tamamen kenetlenemeyen parçacıkların bu durumu meydana getirdiği düşünülmektedir. HNK'lerde alümina oranının artmasıyla bu durumun giderek azaldığı aynı şekilde açıkça anlaşılmaktadır. Grafit yapı içerisinde katı yağlayıcı özellik gösterirken diğer yandan alümina parçacıklarının sert ve daha yoğun yapıya sahip olması HNK numunelerde mekanik özelliklerin artmasını sağlamıştır. Dolayısıyla alümina oranı arttıkça, aşınma direnci artmıştır. Buna göre, grafit oranının artmasıyla malzemede meydana gelen mekanik özelliklerin düşüşü, alümina oranının artmasıyla karşılanmış ve aşınma miktarlarında düşüşler meydana gelmiştir. Aşınma miktarının, ZA-2-4 kodlu numunede diğer HNK numunelere kıyasla çok daha düşük olduğu saptanmıştır. Örneğin; 30 dk deney süresi sonunda 7,1 mg olan aşınma miktarı, 120 dk deney süresi sonunda 20,1 mg'a çıkmıştır. Katkısız ZA27 numunede ise bu miktarlar sırasıyla 10,8 mg ve 31,9 mg olarak belirlenmiştir.

Sürtünme katsayılarının deney süresi ile değişimini gösteren grafik Şekil 3.19' da gösterilmiştir. Deney süresinin artarak devam etmesiyle sürtünme katsayısındaki en düşük değerler ZA-2-4 kodlu numunede görülürken en yüksek değerler katkısız ZA27 numunede görülmüştür. Grafikten görüldüğü gibi ZA-2-1 kodlu numunede meydana gelen aşınma miktarının katkısız ZA27 numuneden yüksek ancak aynı numunelerden elde edilen sürtünme katsayılarının düşük olmasının nedeni olarak; numunelerde deney süresince kolayca meydana gelen kopmalar sonucu yük basıncının kayma yüzeyine olan etkisinin azalması ve kaymanın kopma ve parçalanmayla birlikte daha kolay bir hale gelmesi gösterilebilir. Katkısız ZA27 numunede sürtünme katsayısı değerleri 30, 60, 90 ve 120 dk deney süreleri boyunca sırasıyla; 0,35, 0,43, 0,44 ve 0,45 olarak belirlenirken bu değerler ZA-2-1 kodlu numunede; 0,35, 0,39, 0,42, ve 0,44 değerlerinde seyretmiştir. ZA-2-4 kodlu numuneden artan deney süresince elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin diğer numunelere oranla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. 90 dk süre sonunda elde edilen sürtünme katsayısı değeri bu numunede yaklaşık 0,29 iken; 120 dk süre sonunda yaklaşık 0,30 olmuştur.

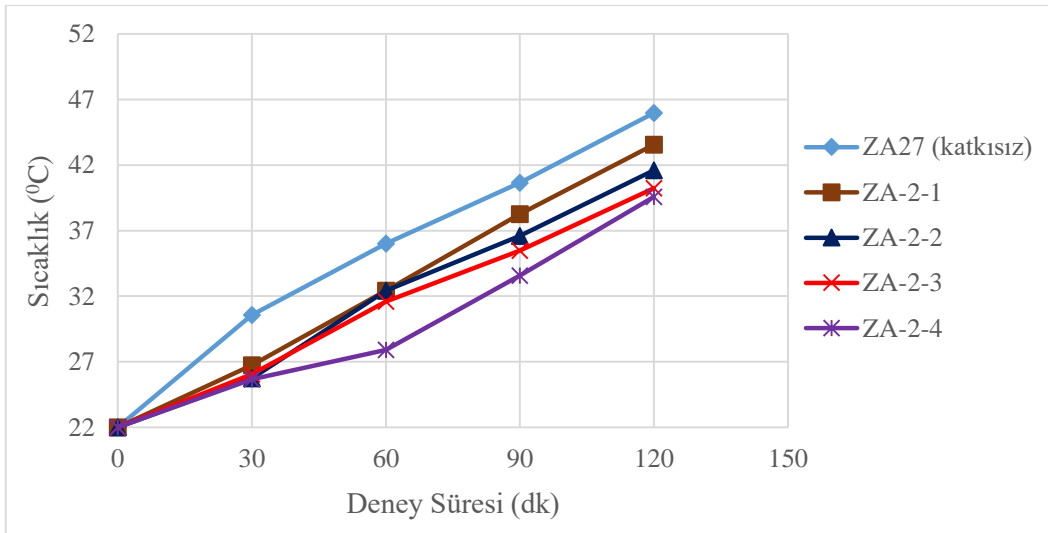
Deney süreleri boyunca numunelerde sürtünmeyle meydana gelen sıcaklığın artışı Şekil 3.20’ de görülmektedir. HNK numunelerde sıcaklıkta meydana gelen artışlar katkısız ZA27 numune ile karşılaştırıldığında önceki deney şartlarındaki gibi daha düşük değerlerde kalmıştır. 120 dk deney süresi sonunda katkısız ZA27 numunede ölçülen sıcaklık değeri yaklaşık  $46^{\circ}\text{C}$  iken, en düşük sıcaklık artışının görüldüğü ZA-2-4 kodlu numunede bu değer yaklaşık  $39^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Grafit ve alümina katkısıyla geliştirilen numunede sürtünme katsayısının diğerlerine göre daha düşük olmasından anlaşılacağı gibi sürekli kayan disk ve numune kayma yüzeyinde meydana gelen sürtünmenin daha düşük olması, diğer numunelere kıyasla sıcaklığın daha düşük değerlerde kalmasını sağlamıştır.



Şekil 3.18. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.19. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.20. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi

### 3.7.2.2. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi

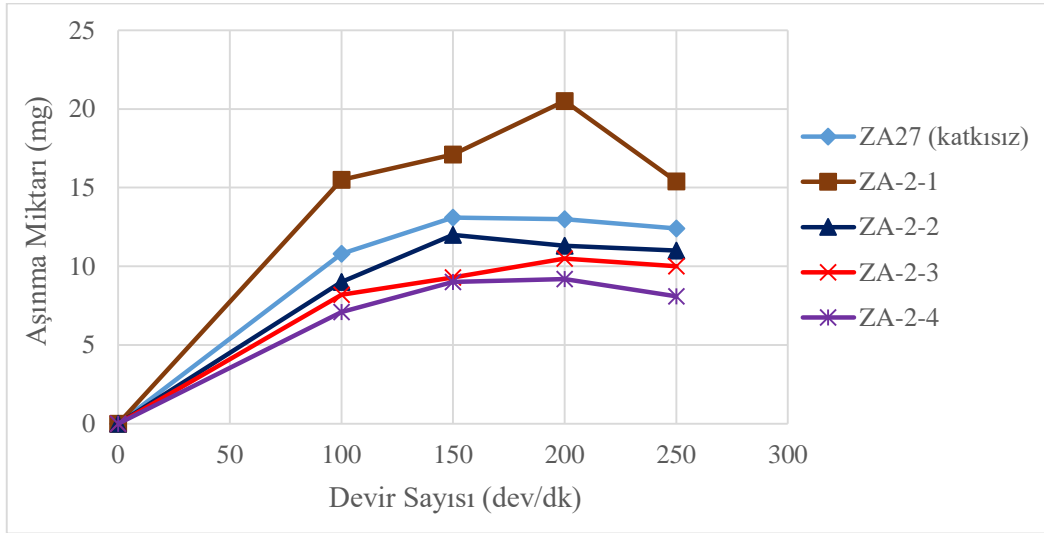
Aşınma deneyleri uygulanan 2. gruptaki HNK numunelerden, 10 N yük, 30 dk deney süresi ve değişik devir sayılarında yürütülen deneylerde elde edilen aşınma miktarlarını gösteren grafik Şekil 3.21’ de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi değişik devir sayıları altında gerçekleştirilen deneylerde en yüksek aşınma miktarı ZA-2-1 kodlu numunede görülürken en düşük aşınma miktarı ZA-2-4 kodlu numunede elde belirlenmiştir. ZA-2-1



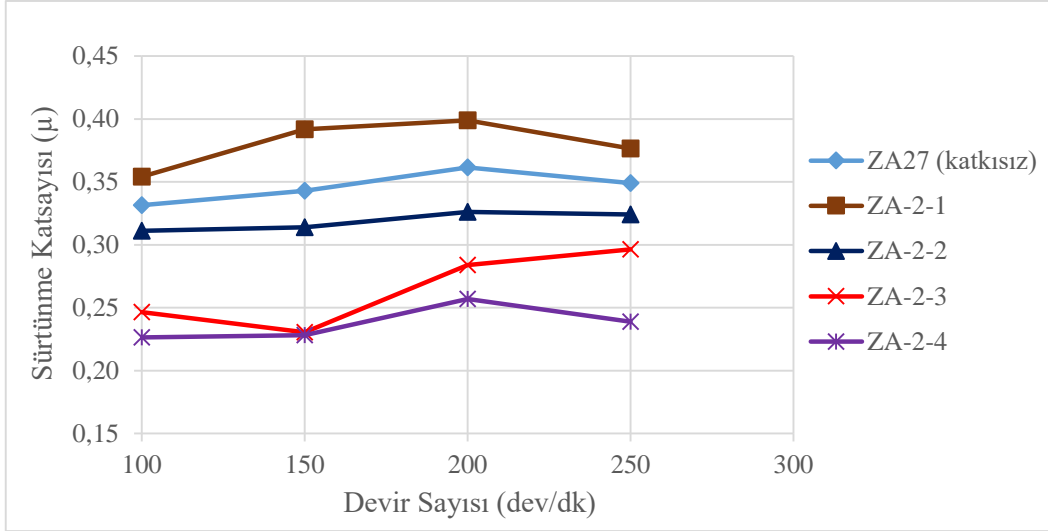
kodlu numunede katkısız ZA27 numuneye göre çok daha fazla miktarda aşınma görülmüştür. Bu numunede 200 dev/dk hız altında gerçekleştirilen deneylerde meydana gelen aşınma miktarı 20,5 mg olarak belirlenirken bu miktar katkısız ZA27 numunede 13 mg olarak saptanmıştır. Bunun sebebi aşınmanın yüksek miktarlarda görüldüğü bu numunelerde deney sırasında meydana gelen kırılma ve kopmalardır. ZA-2-1 yapısında bulunan hacimce %1 oranındaki alümina miktarı, hacimce %2 oranındaki grafit miktarının mekanik özelliklerde meydana getirdiği düşüşü karşılayamamış ve mukavemette meydana gelen azalmayla numuneden parça kopmaları görülmüştür. Yapıda alümina oranının artmasıyla grafikten görüldüğü gibi aşınma miktarında düşüş görülmüştür. HNK numunelerde devir sayısının artmasıyla birlikte önce aşınma miktarında artış yüksek devirlerde ise azalış görülmektedir. En az aşınmanın belirlendiği ZA-2-4 kodlu numunede aşınma miktarı devir sayısındaki artışa rağmen yaklaşık değerler sergilemiş, hatta en yüksek devir sayısındaki aşınma miktarı daha düşük değerlerde belirlenmiştir. Bu numunede 100, 150, 200, 250 dev/dk hızlarda gerçekleştirilen deneylerde belirlenen aşınma miktarları sırasıyla; 7.1, 9, 9.2, 8.1 mg olarak saptanmıştır. Buna göre; HNK numuneler özellikle ZA-2-4 kodlu numune yüksek devir sayılarında gerçekleştirilen deneyler sonucu aşınma direncinin yüksek hızlarda iyi olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma direncinin yüksek olduğu bu numunede hacimce %2 grafit oranı, hacimce %4 alümina oranıyla karşılanmış ve mekanik özelliklerin iyileşmesi sağlanarak grafitin de katı yağlayıcı etkisiyle aşınma direncinin yüksek olması sağlanmıştır.

Değişik devir sayılarıyla uygulanan deneylerde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Şekil 3.22’de verilmiştir. En yüksek hızlarda gerçekleştirilen deneylerde aşındırıcı diskin ZA-2-4 kodlu numunelerin temas yüzeyinde daha düşük sürtünme etkisi gösterdiği ve böylece aşınmanın diğer numunelere göre düşük oranlarda kaldığı belirlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değeri ZA-2-4 kodlu numunede belirlenmiş ve bu değer katkısız ZA27 numuneden elde edilen değerlerden oldukça düşük olduğu görülmüştür. Katkısız ZA27 numunede 250 dev/dk hızda elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,35 olurken; ZA-2-4 kodlu numunede bu hızda elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,24 olmuştur. En yüksek sürtünme katsayısı değerlerinin kaydedildiği ZA-2-1 kodlu numunede sürtünme katsayısı değerleri 200 dev/dk hızda yaklaşık 0,40 değeriyle en yüksek değerini almış; 250 dev/dk hızda bu değer yine tüm numuneler arasında en yüksek değer olan yaklaşık 0,38’de kalmıştır.

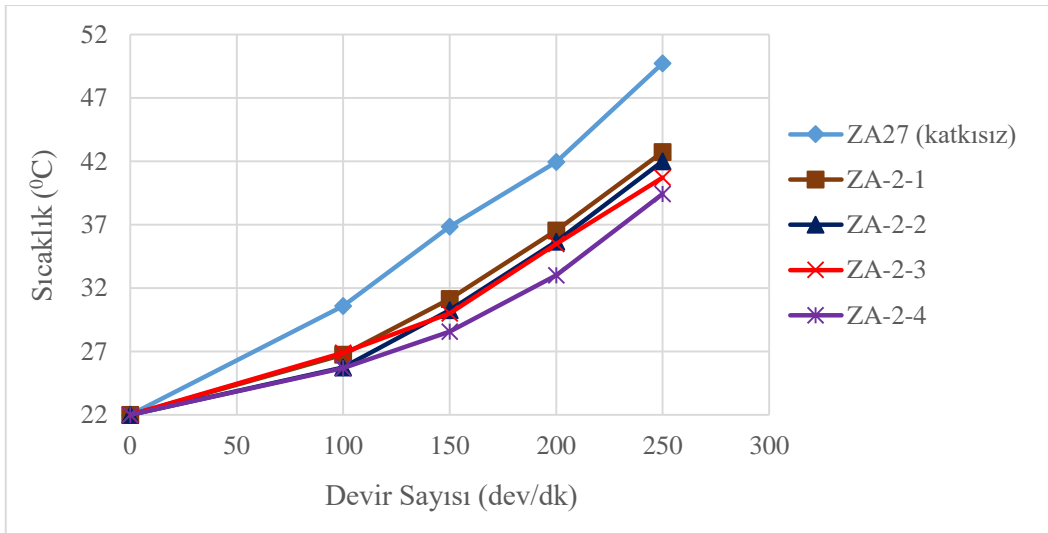
Temas yüzeylerindeki sürtünme sebebiyle numunelerde meydana gelen sıcaklık artışları Şekil 3.23'te grafik şeklinde verilmiştir. Bütün numunelerde devir sayısının artmasıyla sürekli bir sıcaklık artışı söz konusu olmuştur. Numunelerden elde edilen sıcaklık artışlarına göre en düşük sıcaklık artışı ZA-2-4 kodlu numunede belirlenmiştir. Ancak sıcaklık artış değerleri tüm HNK numunelerde yaklaşık değerlerdedir. Grafikten görüldüğü gibi değişik devir sayıları uygulanarak yapılan deneylerde en yüksek sıcaklık artışı katkısız ZA27 numunede 22 °C' den yaklaşık 50 °C'ye olmak üzere 28 °C, en düşük sıcaklık artışı ise ZA-2-4 kodlu numunede 22 °C' den yaklaşık 38 °C' ye olmak üzere 16 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.21. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.22. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.23. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi

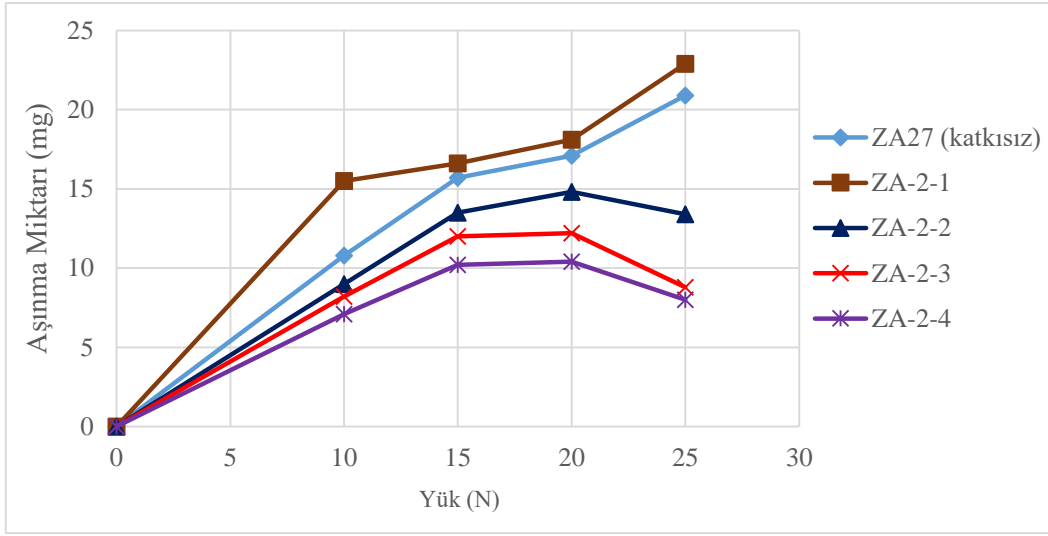
### 3.7.2.3. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi

Şekil 3.24'de katkısız ZA27 ve 2.gruptaki HNK numunelerin aşınma miktarlarının uygulanan yük ile değişimi gösterilmektedir. Yapılan deneyler sonucu, bu gruptaki numunelerden ZA-2-1 kodlu numunenin aşınma direnci olarak en düşük performans gösteren numune olduğu anlaşılmıştır. Hatta bu numune katkısız ZA27 numuneden daha fazla aşınma göstermiştir. Yapıdaki grafit oranının mekanik özellikleri düşürmesinin söz

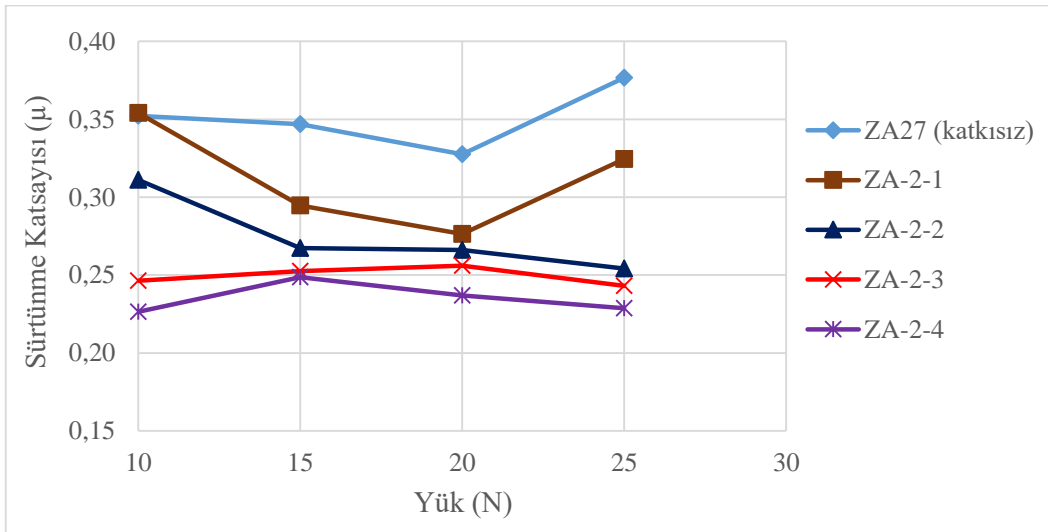
konusu olduğu bu durumda, aşınma testleri sırasında numune kenarlarında kırılmalar görülmüştür. Bu numunede 10, 15, 20 ve 25 N yük altında yapılan deneylerde belirlenen aşınma miktarları sırasıyla; 15.5, 16.6, 18.1 ve 22.9 mg'dır. Katkısız ZA27 numunede bu yükler altında belirlenen aşınma miktarları sırasıyla; 10.8, 15.7, 17.1 ve 20.9 mg'dır. Diğer yandan, en üstün aşınma direnci ZA-2-4 kodlu numuneden elde edilmiştir. Ayrıca, hacimce %2 oranında grafit içeren numune, alümina oranının hacimce %2 oranına çıkmasıyla aşınma dirençlerinde artış sergilemiş ve bu oranın daha da artmasıyla daha düşük aşınma miktarları kaydedilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, ZA-2-2, ZA-2-3 ve ZA-2-4 kodlu numuneler yüksek yüklerin uygulanarak yapıldığı aşınma testleri sonucu iyi aşınma dayanımı ortaya koymuşlardır. Bu durum gözönüne alındığında en yüksek aşınma direnci gösteren ZA-2-4 kodlu numunede 10 N yük altında 7,1 mg olan aşınma miktarı, 15 N yük altında 10,2 mg'a daha sonra 20 N yük altında küçük bir artışla 10,4 mg'a ve son olarak 25 N yük altında tekrar 8 mg' a düşmüştür. Buna göre; HNK numunelerde (ZA-2-1 kodlu numuneler hariç) uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı önce artış göstermiş ancak 20 N yükten sonra azalışa geçmiştir. Katkısız ZA27 numunede ise 25 N yükü uygulanan deneyler sonucu görülen aşınma miktarı 20,9 mg olmuştur. Bu değer, aynı şartlar altında ZA-2-4 kodlu numunede 8 mg olarak belirlenen aşınma miktarının neredeyse 2,5 katıdır.

Uygulanan deneyler sonucu incelenen sürtünme katsayılarına bakıldığında, Şekil 3.25'de gösterilen grafik elde edilmiştir. Aşınma miktarında görülen durumlardaki gibi en düşük sürtünme katsayısının ZA-2-4 kodlu numunede meydana geldiği anlaşılmıştır. Bu numunelerde 25 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,23 iken bu değer katkısız ZA27 numunede yaklaşık 0,38 olarak belirlenmiştir. ZA-2-1 kodlu numunede 25 N yük altında yaklaşık 0,32 değerinde sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Aşınma miktarlarının artan yüke göre en yüksek değerlere sahip olduğu ZA-2-1 kodlu numunede sürtünme katsayısının ZA27 katkısız numuneye kıyasla daha düşük olmasının sebebi de bu numunelerde deneyler esnasında meydana gelen kopmalardır. Aşınma miktarları grafiklerinde olduğu gibi sürtünme katsayılarını gösteren grafikte alümina oranının hacimce %2 ve üzerine çıkması durumunda sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim daha az olmuştur. ZA-2-3 ve ZA-2-4 kodlu numunelerde 15 N yük altında gerçekleştirilen deneylerde sürtünme katsayısı değerleri başlangıçtakine kıyasla artmış daha sonraki yüklerde azalışa geçmiştir. Örneğin; ZA-2-3 kodlu numunede 15 N yük altında 0,25 olarak belirlenen sürtünme katsayısı değeri, 25 N yük altında 0,24 olarak saptanmıştır.

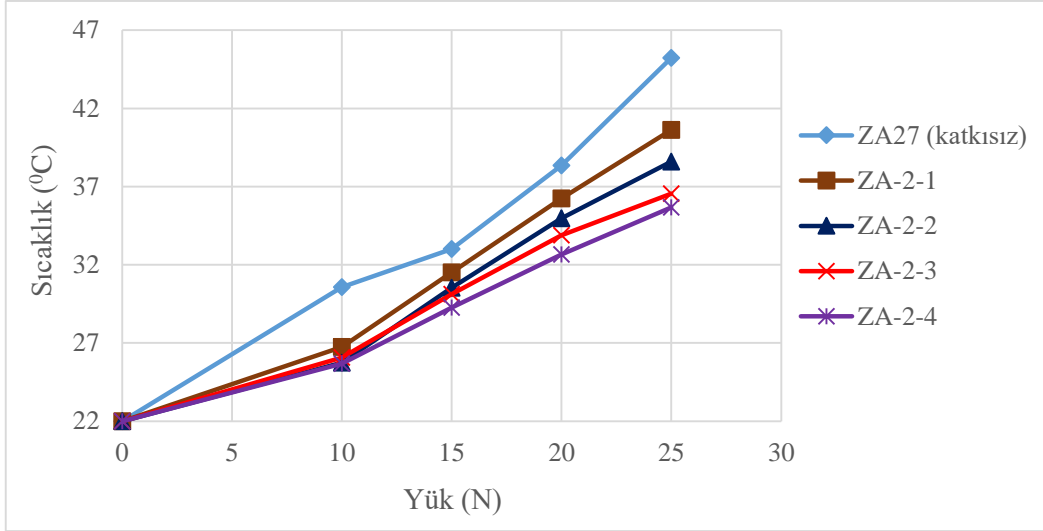
Şekil 3.26, artan yüklerle uygulanan deneyler sonucu numunelerde meydana gelen sıcaklık artışlarını vermektedir. HNK numunelerde meydana gelen sıcaklık artışları ZA27 katkısız numunede meydana gelen sıcaklık artışlarına göre daha düşük seviyelerde olduğu grafikten anlaşılmaktadır. ZA-2-4 kodlu numunede 25 N yük altında uygulanan aşınma testleri sonucu meydana gelen sıcaklık artışı 22 °C' den yaklaşık 36 °C'ye olmak üzere 14 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık artışı katkısız ZA27 numunede aynı şartlar altında, yaklaşık 23 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.24. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.25. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.26. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 2. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi

### 3.7.3. ZA27 ve 3. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

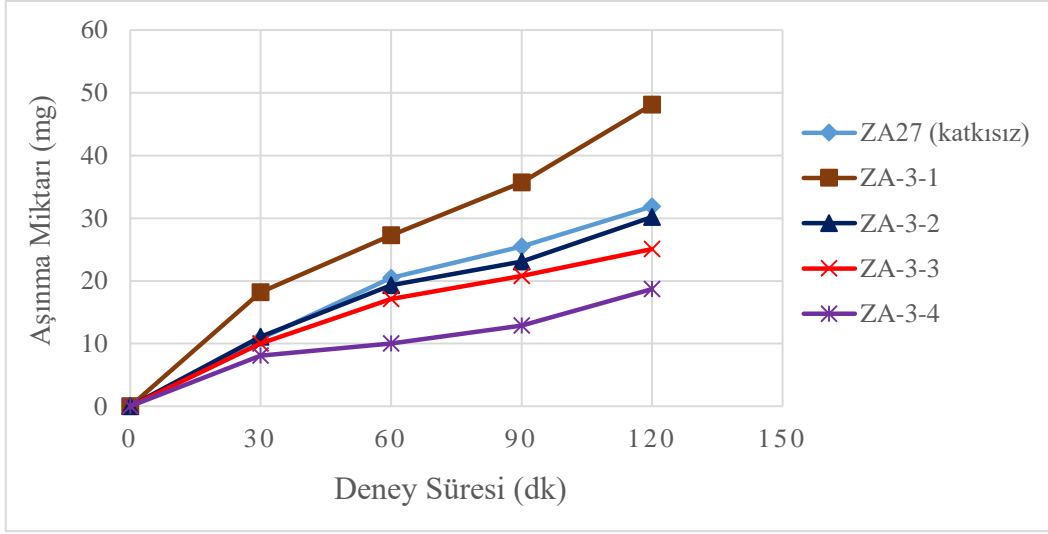
#### 3.7.3.1. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi

3. grupta yer alan HNK numuneler için uygulanan aşınma testleri sonucunda elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 3.27, 3. gruptaki HNK numunelerin deney süresine göre aşınma miktarında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Grafiğe göre, 30 dk sonunda en düşük aşınmanın elde edildiği numune 8,1 mg aşınma miktarıyla ZA-3-4 kodlu numune olarak belirlenmiştir. Alınan yol yani geçen deney süresi zarfında, aşınma miktarı beklenildiği gibi tüm numunelerde devamlı olarak artış göstermektedir. Alümina içeriğinin artmasıyla (grafit oranı hacimce %3 ile sabit) aşınma miktarındaki azalma açıkça görülmektedir. ZA-3-1 kodlu numunede görülen aşırı aşınma miktarı yine grafit oranının yüksek olmasına ve bu yüzden HNK numunelerde mekanik özelliklerin düşmesine bağlanmaktadır. Bu numunelerde aşınma testleri sırasında meydana gelen aşırı yorulma ve bunun sonucunda görülen kırılma ve kopmalar, ZA-3-1 kodlu numunenin aşınma direncinin katkısız ZA27 numunedan daha düşük olduğunu açıkça göstermektedir. ZA-3-1 kodlu numunede 120 dk deney süresi sonunda kaydedilen aşınma miktarı 48,1 mg olurken; katkısız ZA27 numunede aynı şartlar altında belirlenen aşınma miktarı 31,9 mg olmuştur. Diğer yandan, alümina oranı arttıkça aşınma direncinin artmasıyla en düşük aşınma miktarı 120 dk süre sonunda 18,7 mg ile ZA-3-4 kodlu numunede elde edilmiştir. Bu miktar, katkısız ZA27

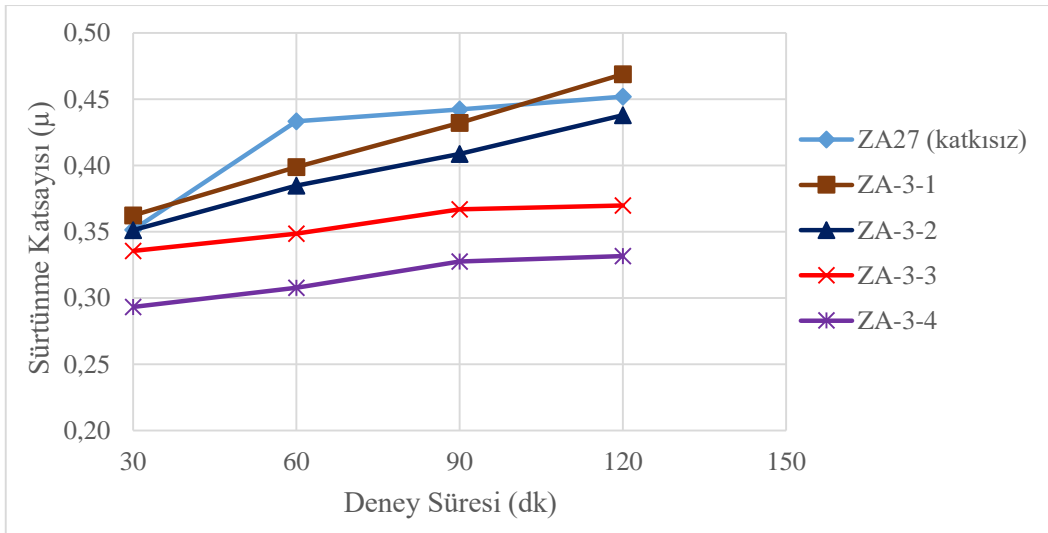
numuneden bu süre sonunda elde edilen aşınma miktarıyla karşılaştırıldığında, ZA27 katkısız numuneler ZA-3-4 kodlu numuneye göre yaklaşık 1.7 kat daha fazla aşınma göstermiştir.

Deney süresinin artmasıyla 3. gruptaki numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri HNK numunelerde alümina oranının artmasıyla düşüş göstermektedir. ZA-3-1 kodlu numunede sürtünme katsayısı 60 ve 90 dk'lık deney sürelerinde katkısız ZA27 numuneden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri altında belirlenirken, 120 dk'lık deney süresi sonunda bu değer katkısız ZA27 numuneden elde edilen değerlerin üzerine çıkmıştır. ZA-3-1 kodlu numunede 30, 60, 90 ve 120 dk'lık deney sürelerinde belirlenen sürtünme katsayısı değerleri yaklaşık olarak sırasıyla; 0.36, 0.40, 0.43 ve 0.47 olarak saptanırken; bu değerler aynı şartlarda katkısız ZA27 numunede sırasıyla; 0.35, 0.43, 0.44 ve 0.45 olmuştur. ZA-3-3 ve ZA-3-4 kodlu numunelerden deney süresinin artmasıyla elde edilen sürtünme katsayısı değerleri hafif artışlarla ilerlemiştir. ZA-3-4 kodlu numunede en düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Buna göre; 120 dk deney süresi sonunda yaklaşık 0,33 değerinde sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

Aşındırıcı diskin numune temas (kayma) yüzeyinde bir yük altında hareket etmesiyle bütün numunelerde sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Tüm numunelerde meydana gelen sıcaklık artışı miktarları Şekil 3.29'da verilmiştir. Deney süresinin artmasıyla sürekli bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Deneyle geçen süreyle en düşük sıcaklık artışının meydana geldiği numune ZA-3-4 kodlu numune olmuştur. 120 dk'lık deney süresi sonunda ZA-3-4 kodlu numunede sıcaklık 22 °C'den yaklaşık 36 °C'ye çıkarken; katkısız ZA27 numunede aynı değerden yaklaşık 46 °C'ye kadar çıkmıştır.

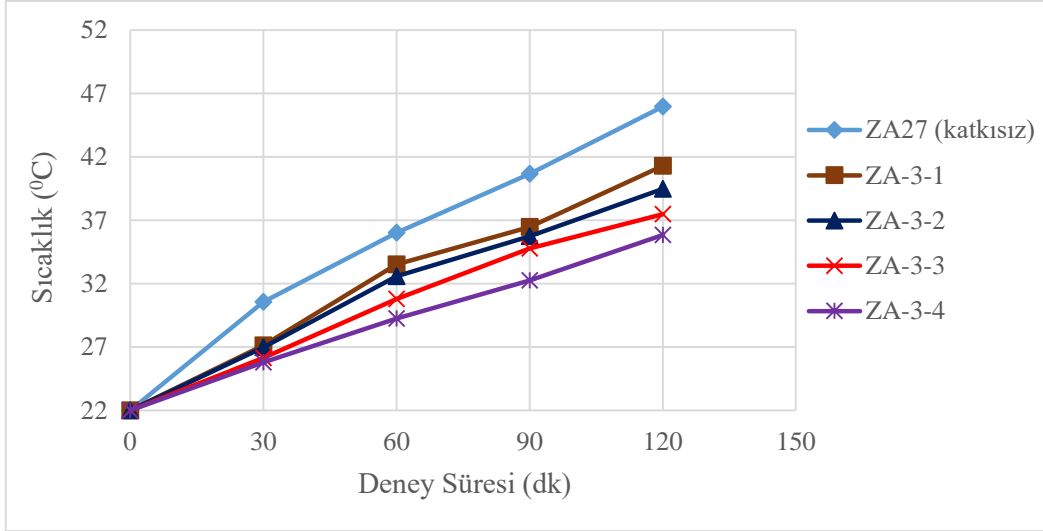


Şekil 3.27. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.28. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi





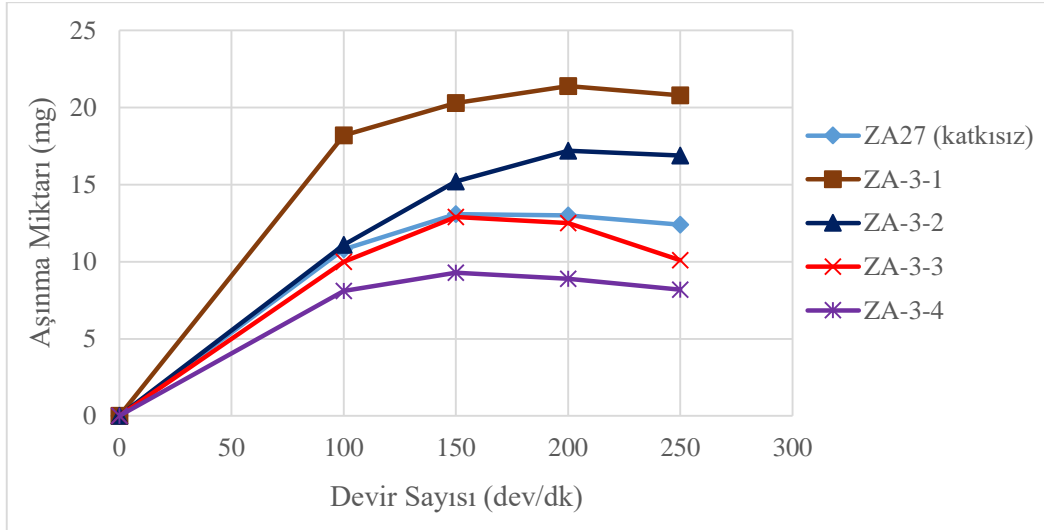
Şekil 3.29. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi

### 3.7.3.2. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi

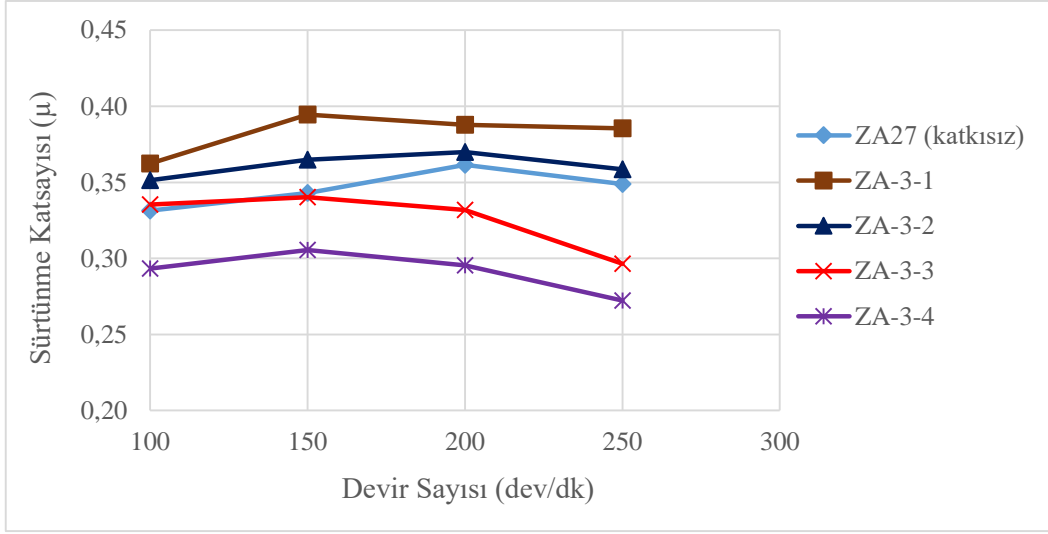
Şekil 3.30'da, uygulanan devir sayısının artmasıyla numunelerde meydana gelen aşınma miktarlarındaki değişim gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, bütün numunelerde aşınma miktarında önce belli miktar artış görülmüş, 200 dev/dk hız ve sonrasında tekrar düşüş belirlenmiştir. Hatta ZA-3-3 ve ZA-3-4 kodlu numunelerde en düşük hızda uygulanan deneyde elde edilen aşınma miktarı değerleri en yüksek hızda uygulanan test sonucu elde edilen aşınma miktarı değerleriyle neredeyse aynı olmuştur. Örneğin; ZA-3-3 kodlu numunede 100 dev/dk hızda kaydedilen aşınma miktarı 10 mg olurken bu değer 250 dev/dk hızda 10,1 mg olarak belirlenmiştir. Önceki deneylerde belirtildiği gibi burada ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde mekanik özelliklerin ve sertliklerin düşüşü sebebiyle değişken hızlarda uygulanan deneyler sonucu elde edilen aşınma miktarları ZA27 katkısız numuneden daha fazla olmuştur. ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde 250 dev/dk hızda belirlenen aşınma miktarları sırasıyla; 20,8 ve 16,9 mg olurken; katkısız ZA27 numunede aynı şartlar altında meydana gelen aşınma miktarı 12,4 mg olmuştur. ZA-3-4 kodlu numunede ise yapıda elde edilen iyi mukavemet ve sertlik değerleri sonucunda elde edilen en fazla aşınma miktarı 150 dev/dk hızda 9,3 mg olmuştur. Bu miktar, devir sayısının yani hızın artmasıyla birlikte 250 dev/dk hızda 8,2 mg değerine gerilemiştir. Yüksek devir sayılarında ZA-3-4 kodlu numunelerin aşınma dirençlerinin katkısız ZA27 numuneden daha iyi olduğu bu testlerle belirlenmiştir.

Aşınma değerlerindeki değişikliklere paralel olarak 3. gruptaki numunelerden değişik hızlarda uygulanan deneyler sonucu elde edilen sürtünme katsayısı değerlerini veren grafik Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Aşınma direnci olarak en iyi sonuçların elde edildiği ZA-3-4 kodlu numuneden en düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu numuneden 250 dev/dk hızda elde edilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,27 olurken; bu değer ZA-3-1 kodlu numunede yaklaşık 0,39 ve katkısız ZA27 numunede yaklaşık 0,35 olarak belirlenmiştir. Aşınmada olduğu gibi yüksek hızlarda azalma eğilimi gösteren sürtünme katsayısı eğrisi şekilden açıkça görülmektedir. Yapıdaki sert alümina parçacıklarının ve katı yağlayıcı görevini üstlenen grafit parçacıklarının sağladığı yüksek aşınma direnciyle bu numunelerde sürtünme katsayısı değerlerinin de daha düşük olduğu belirlenmiştir.

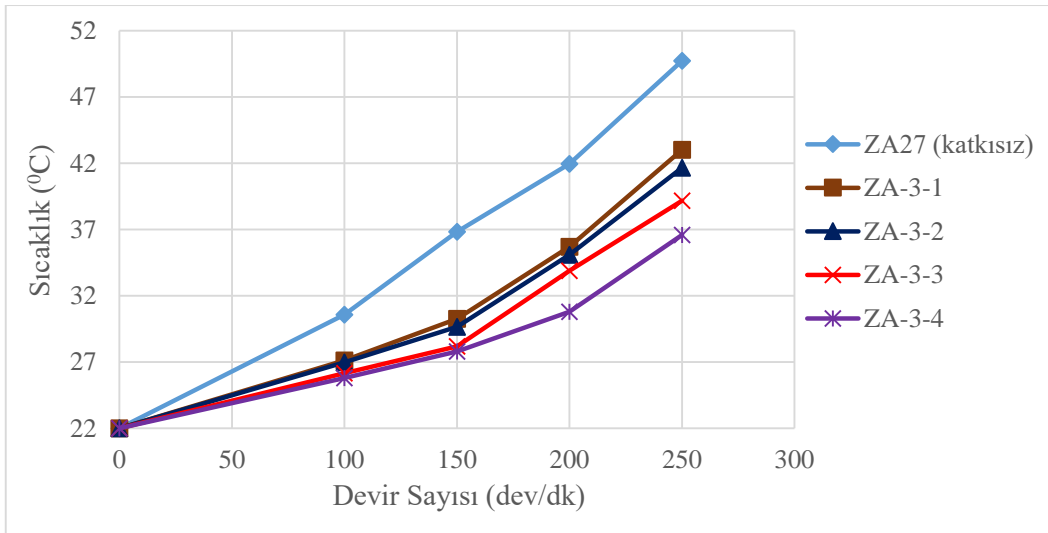
Farklı hızlarda uygulanan deney şartları altında tüm numunelerde meydana gelen sıcaklık artışlarının kaydedilmesiyle elde edilen grafik Şekil 3.32’ de verilmiştir. Deney hızının artmasıyla sıcaklık sürekli artış göstermektedir. Ancak ölçülen sıcaklık değerlerine göre en düşük sıcaklık artışı ZA-3-4 kodlu numuneden elde edilmiştir. Katkısız ZA27 numunede en yüksek hız olan 250 dev/dk hızda meydana gelen sıcaklık artışı 22 °C’ den yaklaşık 50 °C’ye olmak üzere 28 °C olurken; ZA-3-4 kodlu numunede aynı şartlar altında bu değer, 22 °C’den yaklaşık 37 °C’ye olmak üzere 15 °C olmuştur.



Şekil 3.30. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.31. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.32. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi

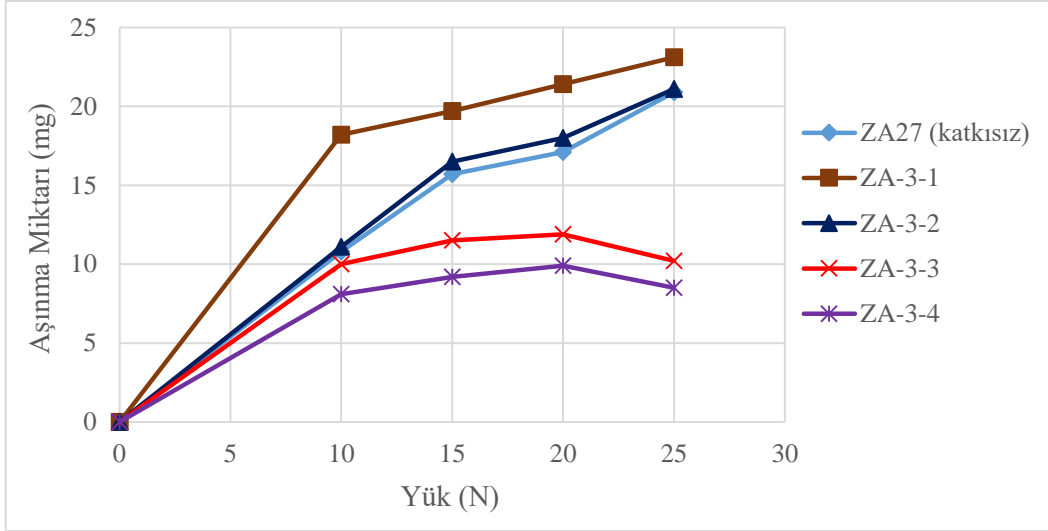
### 3.7.3.3. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi

Değişik yükler altında yapılan aşınma testleri sonucunda 3. gruptaki numunelerden elde edilen aşınma miktarları, sürtünme katsayıları ve sıcaklık değerlerindeki değişiklikler aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Şekil 3.33'te görüldüğü gibi ZA27 katkısız, ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde aşınma miktarlarında uygulanan yükün artmasıyla sürekli bir artış söz konusu olmuştur. Yükün artmasıyla disk ve temas yüzeyleri arasında meydana

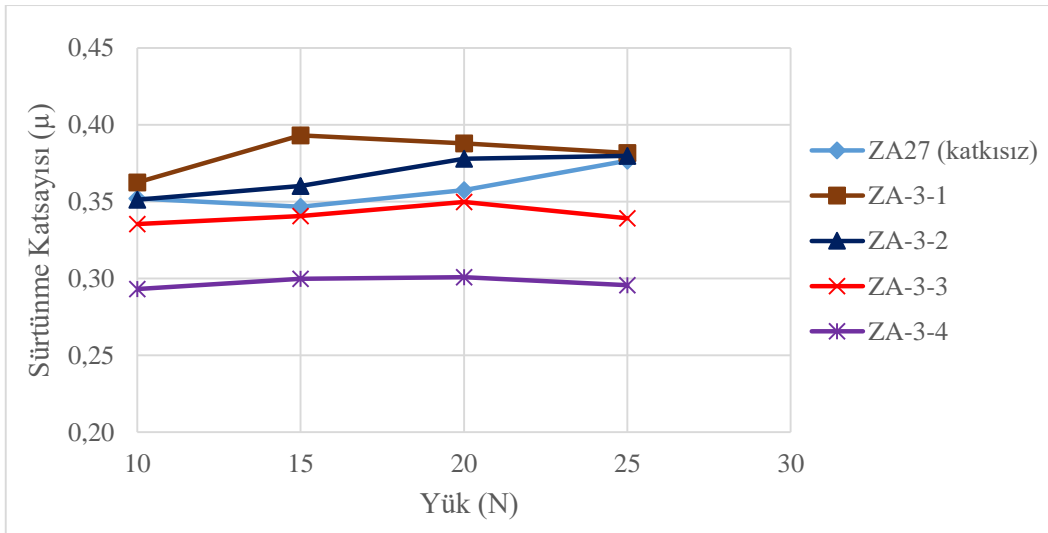
gelen basınç kuvveti bu numunelerde sürtünmeyle birlikte kazınma, kopma ve kırılmalara neden olmuş ve buna bağlı olarak en yüksek aşınma miktarları en yüksek yük olan 25 N altında gerçekleşmiştir. ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde 25 N yük altında belirlenen aşınma miktarları sırasıyla 23,1 ve 21,1 mg olurken; katkısız ZA27 numunede aynı şartlar altında belirlenen aşınma miktarı yaklaşık 20 mg olmuştur. Yapıdaki alümina parçacık miktarının artmasıyla bu durum değişiklik göstermiş ve şekilde belirtildiği gibi ZA-3-3 ve ZA-3-4 kodlu numunelerden elde edilen değerlere göre aşınma miktarları 20 N yük'e kadar küçük artışlarla ilerlemiştir. Yükün daha da artırılması sonucunda bu numunelerde 25 N yük altında belirlenen aşınma miktarları 15 N ve hatta 20 N altında elde edilen aşınma miktarlarından daha düşük miktarlarda olduğu saptanmıştır. Bunlara paralel olarak, ZA-3-3 kodlu numunede 10 N yük altında 10 mg olan aşınma miktarı, 15 N yük altında 11,5 mg ve 20 N yük altında 11,9 mg'a yükselirken. 25 N yük altında bu değer tekrar düşüş göstererek 10,2 mg seviyesine gerilemiştir. Benzer bir durumun görüldüğü ZA-3-4 kodlu numunede ise elde edilen aşınma miktarı değerleri 10 N yük altında 8,1 mg, 15 N yük altında 9,2 mg, 20 N yük altında aşınma miktarının devam etmesiyle 9,9 mg ve son olarak 25 N yük altında aşınmada meydana gelen azalmayla 8,5 mg olmuştur. Sonuç olarak, grafikten anlaşıldığı gibi ZA-3-4 kodlu numunenin en yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve yüksek yüklerdeki aşınma dirençlerinin iyi olduğu saptanmıştır.

Şekil 3.34'te verilen sürtünme katsayılarının farklı yükler altında değişimlerini gösteren grafiğe göre 3. gruptaki numunelerden ZA-3-4 kodlu numunede en düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Aşınma miktarlarındaki değerlere paralel olarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ZA-3-3 ve ZA-3-4 kodlu numunelerde daha düşük değerlerde belirlenmiş; yük miktarının artmasıyla sürtünme katsayılarında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Buna göre; ZA-3-3 kodlu numunede 25 N yük altında yürütülen deneyler sonucu yaklaşık 0,34 sürtünme katsayısı değeri belirlenirken; bu değer ZA-3-4 kodlu numunede yaklaşık 0,30 olmuştur. En yüksek sürtünme katsayısı değeri de yaklaşık olarak 0,39 ile ZA-3-1 kodlu numunelerden elde edilmiştir.

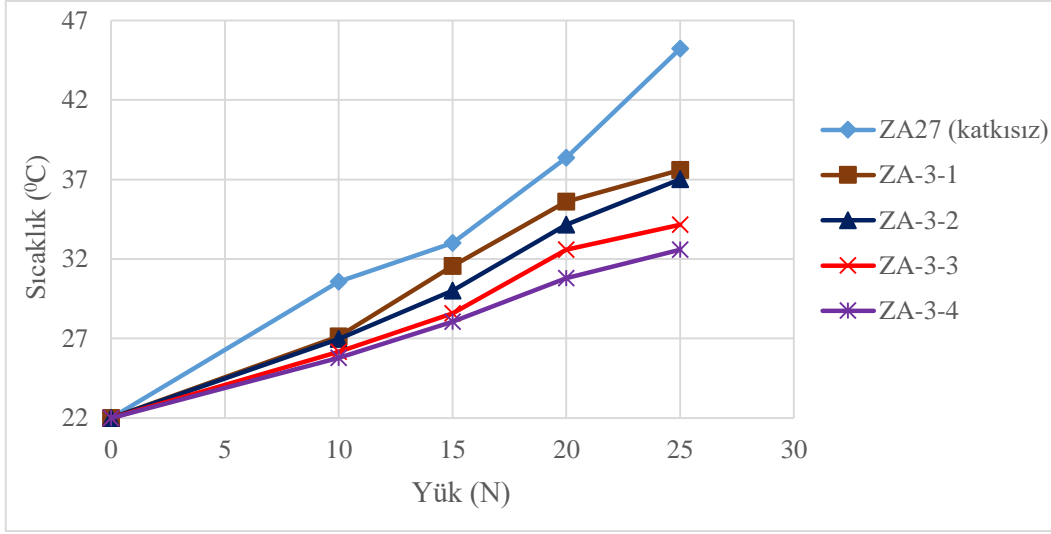
Şekil 3.35'e göre, uygulanan yük miktarının artmasıyla test edilen bütün numunelerde sürekli bir sıcaklık artışı gözlenmiştir. En yüksek sıcaklık artışının meydana geldiği numune, katkısız ZA27 olurken, en düşük sıcaklık artışının belirlendiği numune ise ZA-3-4 kodlu numune olmuştur. Katkısız ZA27 numunede 25 yük altında elde edilen artış, 22 °C'den yaklaşık 45 °C'ye olmak üzere 23 °C olurken; en düşük sıcaklık artışının gözlemlendiği ZA-3-4 kodlu numunede 22 °C'den yaklaşık 33 °C'ye olmak üzere 11 °C olmuştur.



Şekil 3.33. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.34. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sürtünme kuvvetinin uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.35. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 3. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi

#### 3.7.4. ZA27 ve 4. Gruptaki HNK Numunelerin Aşınma Miktarı, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

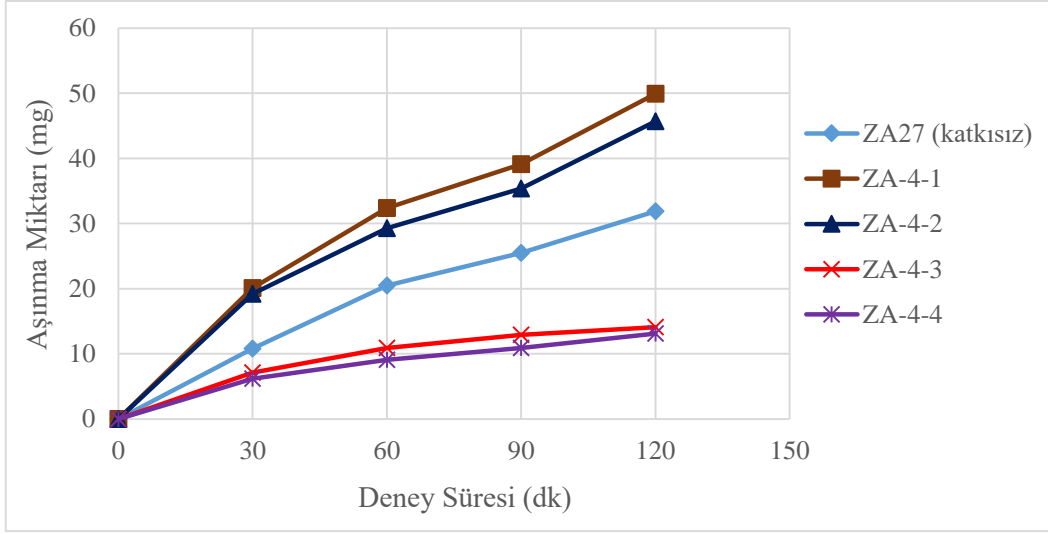
##### 3.7.4.1. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Deney Süresi ile Değişimi

Deney süresinin artmasıyla 4. gruptaki numunelerde meydana gelen aşınma miktarlarını gösteren grafik Şekil 3.36' da verilmiştir. Grafit oranının en üst seviyede ve alümina katkısının en düşük oranda olduğu ZA-4-1 kodlu numunede fazla miktarda aşınma miktarları belirlenmiştir. Grafit parçacıklarının fazlalığı HNK numune yapısında mekanik özellikleri olumsuz etkilemiş ve bunun sonucunda deney süresi boyunca numunede basıncın etkisiyle kırılmalar oluşmuştur. Ayrıca disk üzerinde numunelerden kopan parçacıkların yapışması ve yapışan parçacıkların numune kayma yüzeyinde tahribatlara neden olduğu görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı ZA-4-1 kodlu numunelerdeki aşınma miktarı katkısız ZA27 numunede meydana gelen aşınma miktarından daha fazla miktarlarda olmuştur. Benzer bir durum şekilde görüldüğü gibi ZA-4-2 kodlu numunede gerçekleşmiş, aşınma oldukça fazla miktarlarda meydana gelmiştir. Ancak hacimce %4 oranında grafit katkılı numunelerde alüminanın hacimce %3 ve %4 oranlarına çıkması durumunda, deney süresince aşınma olayının çok daha az miktarlarda meydana geldiği belirlenmiştir. Buna göre; katkısız ZA27 numunede 120 dk deney süresi sonunda meydana gelen aşınma miktarı yaklaşık 40 mg olurken; aynı şartlar altında ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde belirlenen aşınma miktarları sırasıyla; yaklaşık 50 ve 46 mg olmuştur. Alümina oranının hacimce %3 ve %4

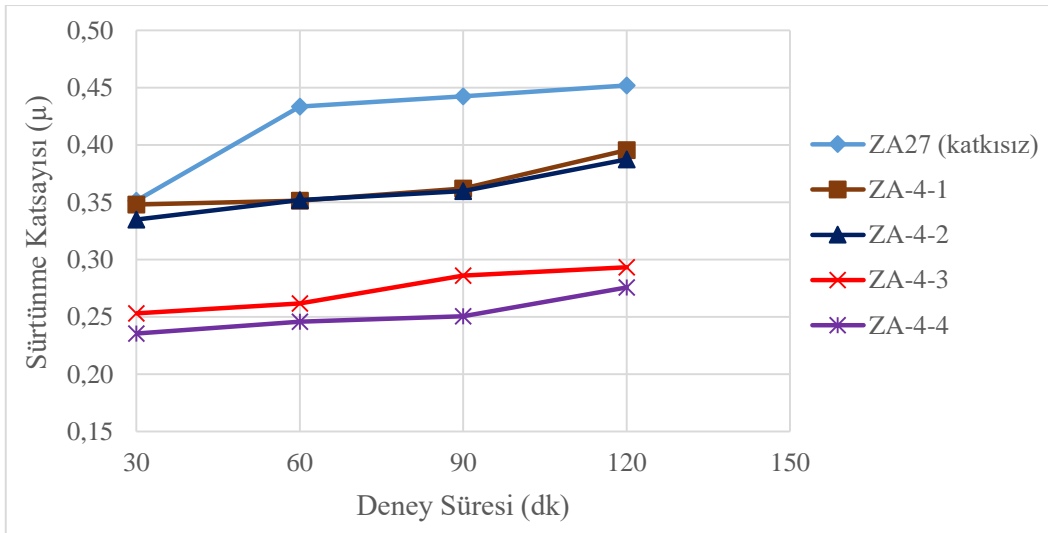
olduğu numunelerde ise (ZA-4-3 ve ZA-4-4) 120 dk deney süresi sonunda sırasıyla; 14,1 ve 13,1 mg'lık aşınma miktarı belirlenmiştir. Dolayısıyla 120 dk'lık deney süresi sonunda, ZA-4-4 kodlu numunede görülen aşınma miktarı katkısız ZA27 numunede 120 dk sonunda elde edilen aşınma miktarının yarısından daha az olmuştur.

Aşınmanın artmasıyla geçen süre boyunca beklendiği gibi sürtünme katsayısı değerleri de artış göstermiştir. Bununla ilgili grafik Şekil 3.37' de gösterilmektedir. Aşınma miktarı grafikleriyle paralellik göstermeyen grafiklere sahip ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde meydana gelen kopmalar sonucu temas yüzey alanlarının küçülmesiyle sürtünmenin bir miktar azalması sebebinden dolayı sürtünme katsayısı değerleri katkısız ZA27 numuneden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin altında kalmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri katkısız ZA27 numunede 0,35-0,45 aralığında ve deney süresinin artması ile sürekli artan değerlerde belirlenmiştir. ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde ise deney süresinin artmasıyla sürtünme katsayısı değerleri birbirine çok yakın seyretmiş ve yaklaşık 0,33-0,40 değerleri arasında belirlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri 30 dk deney süresi sonunda yaklaşık 0,24 olurken; 120 dk deney süresi sonunda yaklaşık 0,28 olarak ZA-3-4 kodlu numunede belirlenmiştir.

Deney süresi boyunca numunelerde meydana gelen sıcaklık artış değerleriyle oluşturulan grafik Şekil 3.38'de verilmiştir. Nano-parçacık ilavesiyle malzemelerdeki sıcaklık artış değerlerinin daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmüştür. Deney süresinin artmasıyla bütün numunelerde sürekli bir sıcaklık yükselmesi görülmüştür. Ancak en düşük sıcak artışı 22 °C'den yaklaşık 38 °C'ye olmak üzere 16 °C olarak, ZA-4-4 kodlu numunede belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık artışı ise katkısız ZA27 numunede belirlenmiş; 120 dk'lık deney süresi sonunda bu numunede yaklaşık 50 °C sıcaklık tespit edilmiştir.

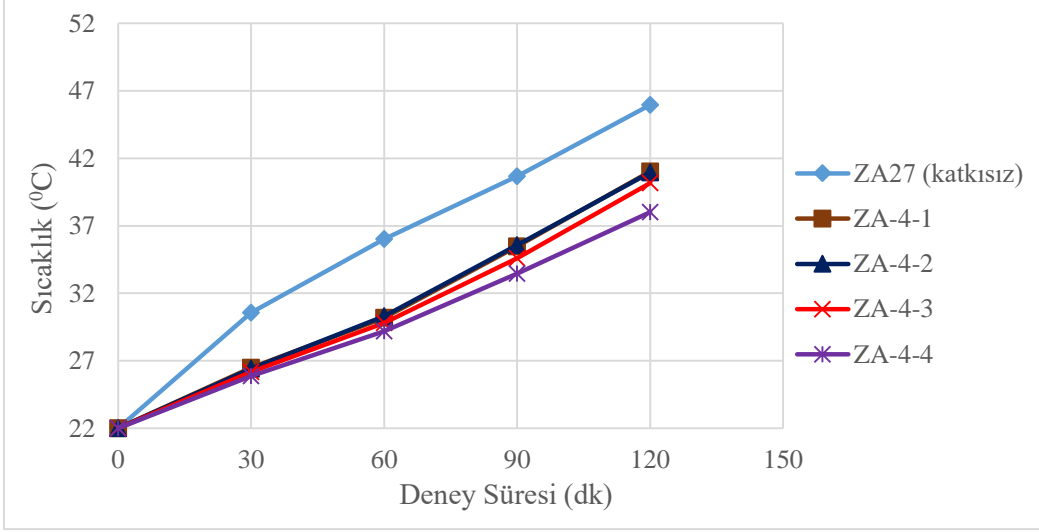


Şekil 3.36. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının deney süresi ile değişimi



Şekil 3.37. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının deney süresi ile değişimi





Şekil 3.38. 10 N yük ve 100 dev/dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın deney süresi ile değişimi

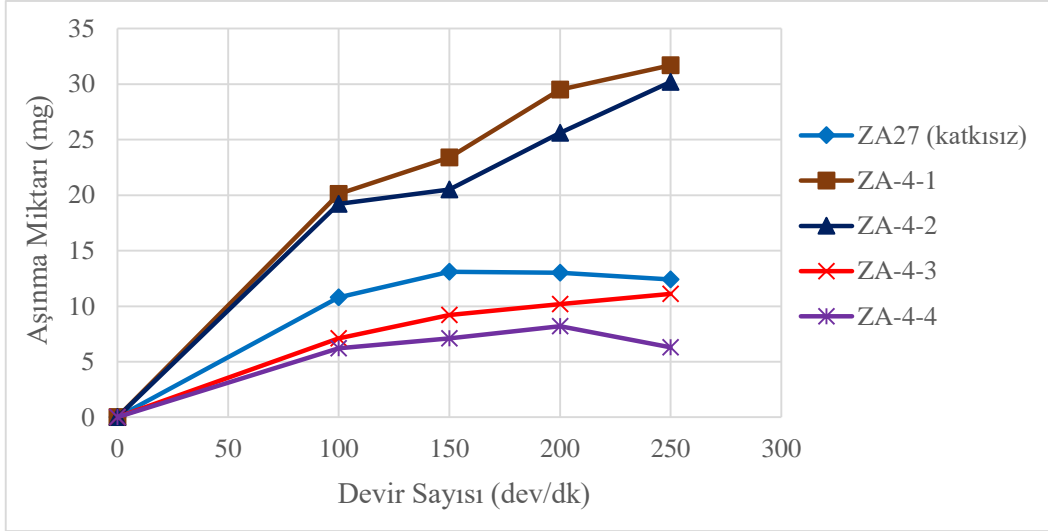
#### 3.7.4.2. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Devir Sayısı ile Değişimi

Şekil 3.39, devir sayısının artmasıyla aşınma miktarında meydana gelen değişiklikleri belirtmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde devir sayısının artmasıyla yüksek aşınma miktarları belirlenmiştir. Katkısız ZA27 numunede devir sayısının 250 dev/dk hıza ulaştığında aşınma miktarının bir miktar azalışa geçtiği görülmüştür. Buna göre, katkısız ZA27 numunede 200 dev/dk'da 13 mg olan aşınma miktarı 250 dev/dk'da 12,4 mg'a düşmüştür. ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde yüksek grafit oranının mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi nedeniyle ve sürekli bir aşınma görülmüş ve 250 dev/dk hızda en yüksek aşınma miktarı meydana gelmiştir. Buna göre; ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde 250 dev/dk hızda meydana gelen aşınma miktarları sırasıyla; 31,7 ve 30,2 mg. olmuştur. Ayrıca bu numunelerden yüksek sertlikteki aşındırıcı disk üzerine diğer numunelere kıyasla daha fazla yapışma olayı görülmüş ve bu durum aşınma miktarını arttırmıştır. Alümina katkı oranının arttığı, ZA-4-3 ve ZA-4-4 kodlu numunelerde görülen aşınma miktarı diğer numunelere göre çok düşük miktarlarda kalmıştır. Buna göre; ZA-4-4 kodlu numunede 100 dev/dk hızda meydana gelen aşınma miktarı (6,2 mg), 250 dev/dk hızda neredeyse aynı miktarda (6,3 mg) kalmıştır. Şimdiye kadar yapılan aşınma testleri sonucu HNK numunelerden (kırılma ve kopma olayları gerçekleşenler hariç) elde edilen sonuçlara göre devir sayısının yüksek hızlara ulaşması durumunda aşınma olayının azalma eğiliminde olduğu dikkat çekmişti ancak ZA-4-3 kodlu

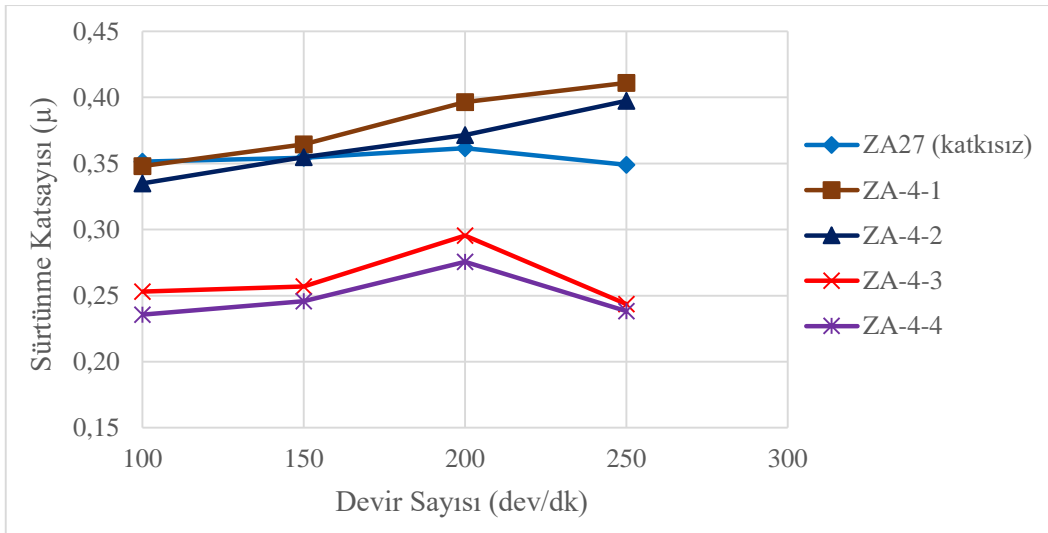
numunelerde devir hızının artmasıyla aşınma sürekli olarak artış göstermiş ve 250 dev/dk hızda en yüksek değere ulaşmıştır. Buna göre ZA-4-3 kodlu numunede 250 dev/dk hızda 11,1 mg aşınma miktarı belirlenmiştir.

Grafit katkı oranının en yüksek oranlara ulaştığı 4. gruptaki numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin deney hızıyla nasıl değiştiğini veren grafik Şekil 3.40'ta verilmiştir. Grafit parçacıklarının aşınma sırasında yağlayıcı görevi üstlenmesi sonucu başlangıçta sürtünme katsayılarında düşük değerler dikkat çekmiştir. Ancak yapıdaki sertliğin düşük olmasından dolayı aşınmaya müsait kayma yüzeyleri zamanla ve devir sayısının artmasıyla sürekli sürtünmede bir artışa neden olmuştur. Bu duruma örnek olarak, başlangıçta ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ZA27 katkısız numunelerden elde edilen değerlerden daha düşük olmasına rağmen devir sayısının biraz arttırılmasından sonra bu numunelerde hemen bir aşınma olayı gerçekleşmiş aynı zamanda sürtünme katsayısı değerlerinde yükseliş görülmüştür. Buna göre; katkısız ZA27 numunede 250 dev/dk hızda sürtünme katsayısı değeri düşüş göstererek yaklaşık 0,35 olarak belirlenmiştir. ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde ise sürtünme katsayısı değerleri sürekli artış göstererek 250 dev/dk hızda sırasıyla; yaklaşık 0,41 ve 0,40 olarak belirlenmiştir. ZA-4-3 ve ZA-4-4 kodlu numunelerde sürtünme katsayısı değerleri değişik deney hızlarında yürütülen deneylerde benzer artışlarla ilerlemiştir. Bu iki numunede sürtünme katsayıları aynı hızlarda artmış aynı hızlarda azalmıştır. Buna göre; ZA-4-3 kodlu numunede 200 dev/dk hızda sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,29; ZA-4-4 kodlu numunede yaklaşık 0,28 olarak belirlenirken bu değerler hızın 250 dev/dk'ya çıkması durumunda sırasıyla; 0,24 ve 0,23 olarak saptanmıştır.

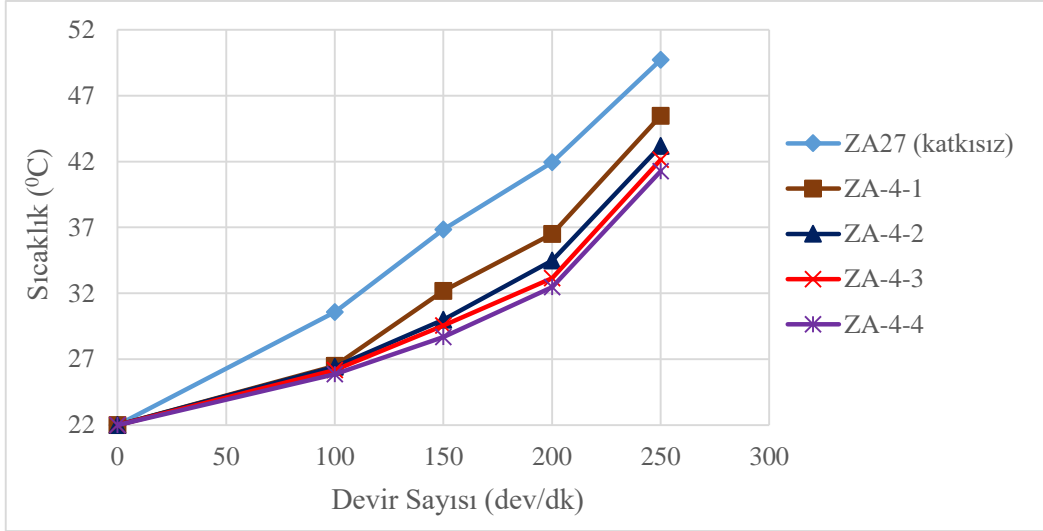
Devir sayısının artmasıyla aşındırıcı çelik diskin hızlı bir şekilde ısınmasına bağlı olarak numunelerde meydana gelen sıcaklık artışları Şekil 3.41'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi, her numunede deney hızının artması sonucu bir miktar sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Ancak HNK'lerde katkı oranının artmasıyla birlikte bu sıcaklık artışları düşük seviyelerde seyretmiştir. En düşük sıcaklık artışının kaydedildiği numuneler ZA-4-4 kodlu numuneler olup sıcaklık değerlerindeki artış 250 dev/dk hızda yaklaşık 26 °C' den yaklaşık 41 °C'ye olmak üzere 15 °C olmuştur.



Şekil 3.39. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.40. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.41. 10 N yük ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın devir sayısı ile değişimi

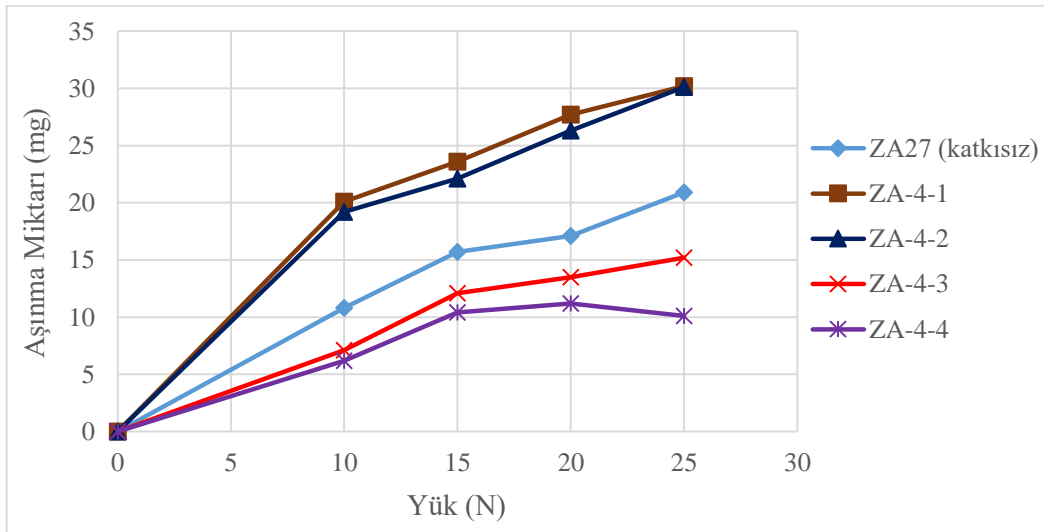
### 3.7.4.3. Aşınma, Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklığın Uygulanan Yük ile Değişimi

4. gruptaki numunelerin değişik yük altında yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma miktarı-yük grafiği Şekil 3.42’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi genellikle yük miktarının artırılmasıyla numunelerde meydana gelen aşınma olayı hız kazanarak ilerlemiştir. Ancak, ZA-4-4 kodlu numunelerde bu durumda değişiklik kaydedilmiştir. Bu numunelerde 20 N yüke kadar aşınma sürekli olarak artmış ancak 25 N yük altında yapılan deneylerde bu durum tersine dönerek aşınma miktarı azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca ZA-4-4 kodlu numunelerde uygulanan yükün artışıyla daha az miktarlarda aşınma meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak, 10 N yükte meydana gelen aşınma miktarı, 6,2 mg olurken bu değer 15 N yük altında 10,4 mg’a, 20 N yük altında diğerlerine nazaran hafif bir artışla 11,2 mg’a çıkmış ve son olarak 25 N yük altında ise bu değer azalışa geçerek, 10,1 mg’a gerilemiştir. En yüksek aşınma miktarı ise önceki deneylerde olduğu gibi ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde meydana gelmiştir.

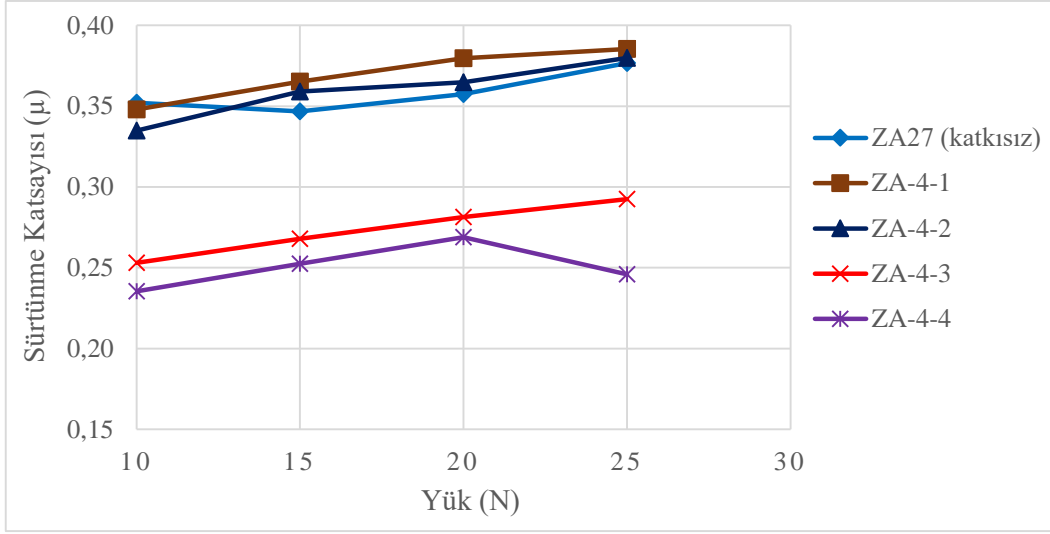
Değişik yüklerle uygulanan aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 3.43’te gösterilmektedir. Grafiğe göre, en düşük sürtünme katsayısına sahip numuneler her yükte ZA-4-4 kodlu numuneler olmuştur. Ayrıca bu numunelerden alınan değerler en yüksek yük olan 25 N altında en düşük düzeylere inmiştir. Buna göre 25 N yük altında gerçekleştirilen deneylerde bu numunede belirlenen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,25 olmuştur. Bu durum, ZA-4-4 kodlu numunelerde meydana gelen aşınma

miktarının 25 N yük altında azalmaya eğilimli olmasıyla birlikte aşınma direncinin yüksek yüklerde iyi olduğunu kanıtlamaktadır. En yüksek sürtünme katsayısı değerlerinin belirlendiği ZA-4-1 kodlu numunelerin yüksek yüklerde aşınması sırasında numune kayma yüzeylerinden kopma parçacıkların aşındırıcı çelik disk yüzeyine yapışması ve bu yapışan parçacıklarla birlikte sürtünmenin devam etmesi nedeniyle, sürtünme katsayısı değerleri sürekli bir şekilde artış göstermiştir. Buna göre; ZA-4-1 kodlu numunede 10 N yük altında kaydedilen sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,35 iken; 25 N yük altında bu değer 0,39 olarak tespit edilmiştir.

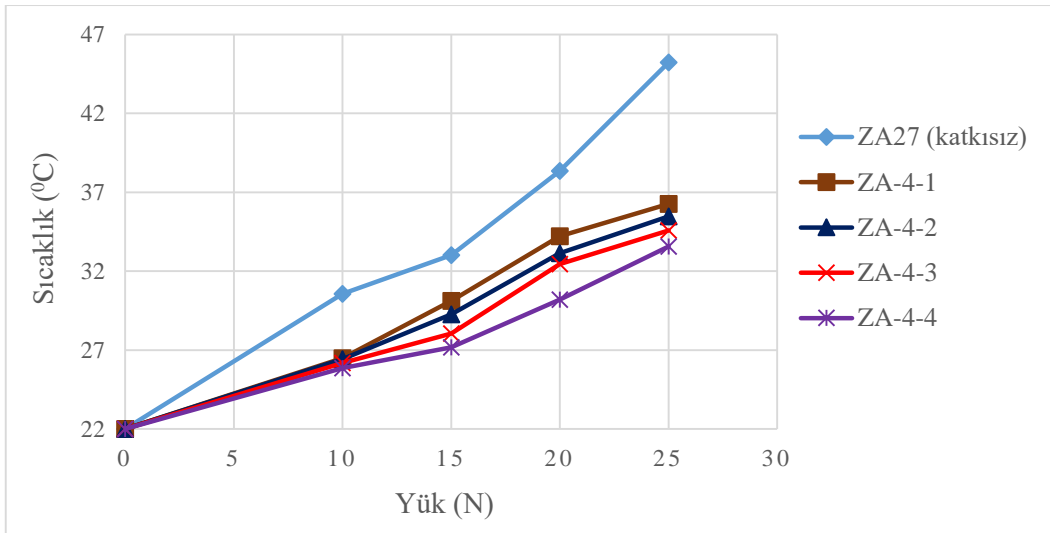
Sıcaklık değişim değerlerinin verildiği Şekil 3.44'ten görüldüğü gibi bütün yüklerde en yüksek sıcaklık artışı katkısız ZA27 katkısız numunede, en düşük sıcaklık artışı ZA-4-4 kodlu numunede kaydedilmiştir. Buna göre; 25 N yük altında katkısız ZA27 numunede meydana gelen sıcaklık artışı yaklaşık 23 °C olurken; bu sıcaklık artışı aynı şartlar altında ZA-4-4 kodlu numunede yaklaşık 12 °C olarak belirlenmiştir. Katkı oranının artmasıyla sürtünme sırasında ısınan aşındırıcı diskin ve numune kayma yüzeylerinin numunelerde sıcaklık artışı meydana getirmesindeki etkinin azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 3.42. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde aşınma miktarının uygulanan yük ile değişimi



Şekil 3.43. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi

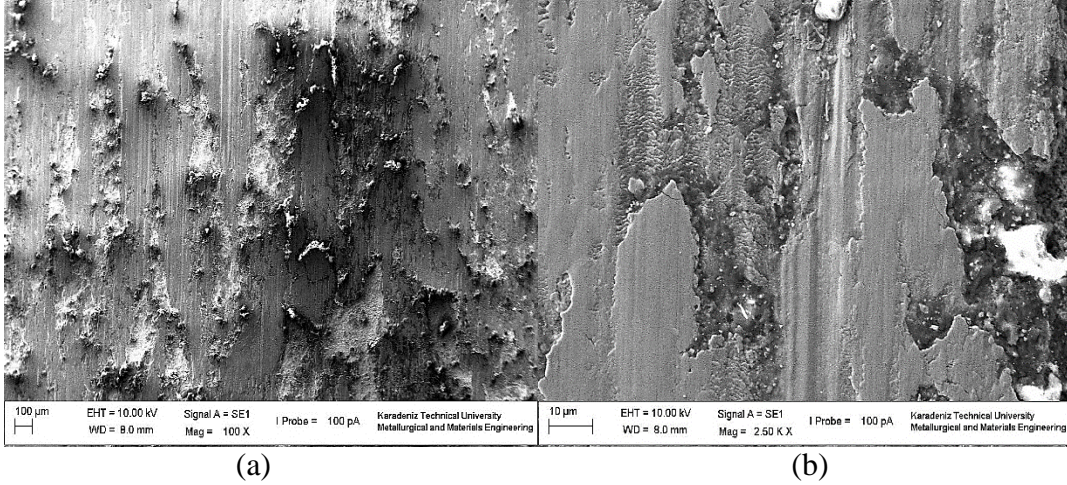


Şekil 3.44. 100 dev/dk ve 30 dk deney şartlarında ZA27 ve 4. gruptaki HNK numunelerde sıcaklığın uygulanan yük ile değişimi

### 3.8. Aşınma Yüzeylerinin SEM’de Görüntülenmesi ve Aşınma Mekanizmalarının Belirlenmesi

#### 3.8.1. Katkısız ZA27 Alaşımı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Şekil 3.45, yüksek hızlarda yapılan aşınma testlerinde aşınma yüzeyinde meydana gelen tahribatı göstermektedir. Deney hızının artmasıyla, aşındırıcı çelik diskin numune temas yüzeyindeki sürtünmesinden dolayı kayma yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı sonucu yapıda bulunan yumuşak Zn fazının adhezyon etkisiyle ortaya çıkan adhezif aşınma etkili olmuştur. Ayrıca, ince oluk oluşumu, plastik deformasyon ve tabakalaşmayla aşınma durumları da gözlemlenmiştir (Şekil 3.45 a,b).



Şekil 3.45. Katkısız ZA27 numunenin 30 dk deney süresi, 10 N yük ve 250 dev/dk devir sayısı altında aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri; (a) 100X (b) 2500X

#### 3.8.2. 1. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

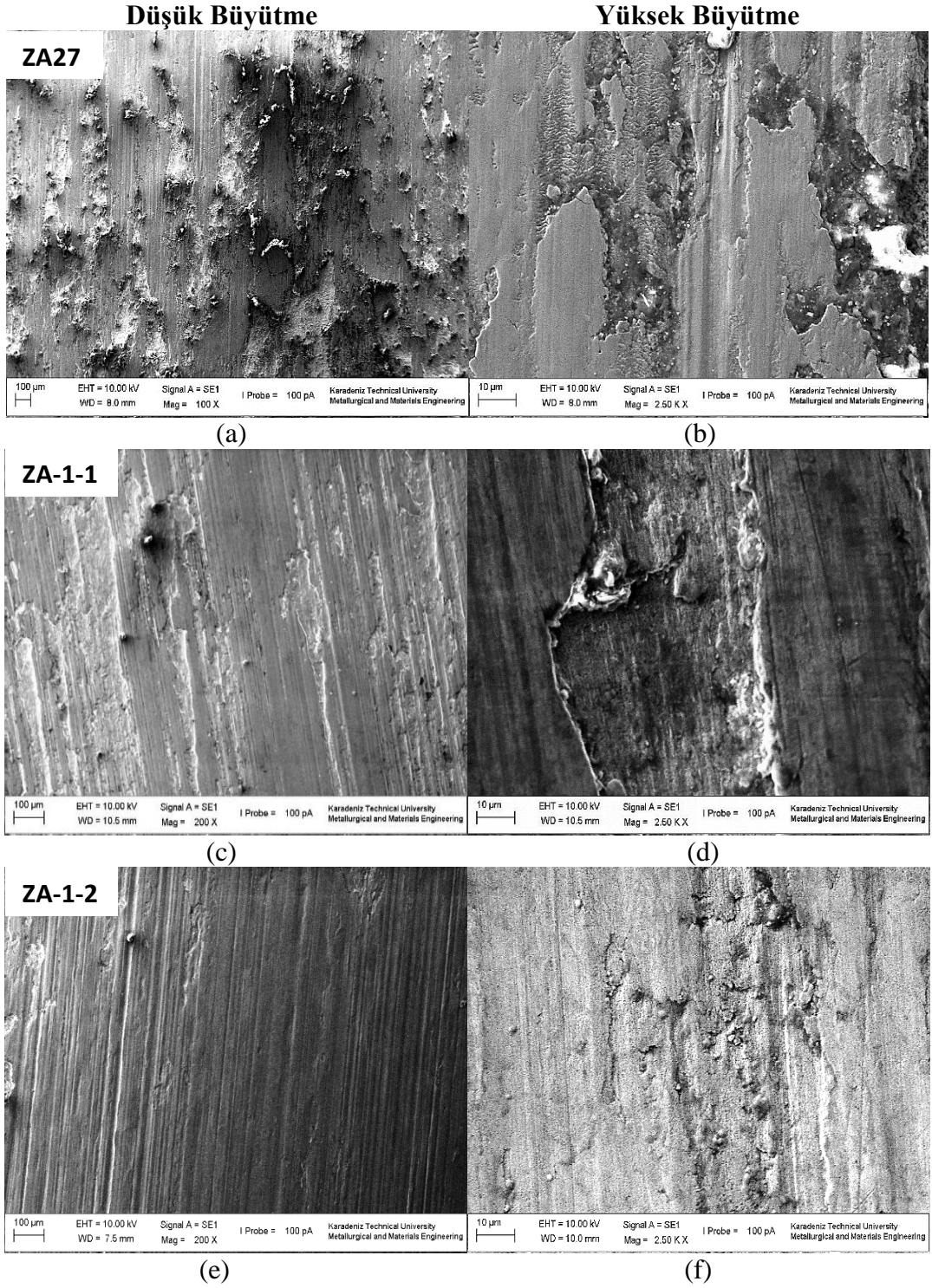
1. gruptaki numunelerde devir sayısının yani aşınma test hızının artmasıyla aşınma miktarı 250 dev/dk hızda azalmıştır. Bundan dolayı, Şekil 3.46’da 10 N yük, 30 dk deney süresi ve 250 dev/dk deney şartları altında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

HNK’lerin aşınma yüzeyleri katkısız ZA27 alaşımının aşınma yüzeyinden daha düzgün bir görüntüye sahiptir. ZA27 alaşımı yapısına nano parçacıkların eklenmesiyle,

plastik deformasyon ve tabakalaşma durumları azalmıştır. Fakat Şekil 3.46 (e,f)'de açıkça görüldüğü gibi ZA-1-2 numunesinin yüzeyinde abrazif etki ortaya çıkmıştır. Sert nano alümina parçacıkları daha yumuşak olan matris malzemesini koruma pozisyonuna geçerek kuru sürtünme boyunca HNK'lerin yapısını sertleştirmiştir. Bu yüzden, aşınma yüzeylerindeki tabakalaşma aşınma durumu kısıtlanmıştır. Yapıdaki alümina parçacıklarının meydana getirdiği abrazif davranış aşınma yüzeylerinin karakterize edilmesiyle şekillerden (Şekil 3.46 g, h) görülmektedir. Ancak , nano grafit parçacıklarının yapıda gösterdiği katı yağlayıcılık özelliğiyle ağır abrazif etki engellenmiş ve derin oluk oluşumunun önüne geçilmiştir (Şekil 3.46 ı, i). Nano alumina ilavesinin daha da arttırılmasıyla aşınma direnci de artış göstermiştir. Bu durumun diğer bir nedeni ise sert alümina parçacıklarının yapıya katkısının artmasıyla, aşınma yüzeylerindeki tabakalaşmanın, plastik deformasyonun ve mikro-çatlakların azalmasıdır. Bu durum Şekil 3.46 (g, h, ı , i)'de açıkça görülmektedir. Bu şekilde, derin oluk oluşumu görülmektedir ancak bu oluklar sürekli bir eğilim değil bölgesel olarak oluşmuştur. Bu yüzden, HNK'lerin yüksek sertliği yüksek aşınma direncine sahip olmasını sağlamıştır. Yapıdaki nano grafit parçacıkların varlığı da yapıda katı yağlayıcı etki göstererek yoğun abrazif aşınmanın azaltılmasında önemli rol oynamıştır.

Bütün bunlara ek olarak, 1. gruptaki numuneler arasında en yüksek aşınma direncinin belirlendiği ZA-1-4 kodlu numuneden 10 N yük, 30 dk deney süresi (565 m yol) ve 250 dev/dk deney hızı şartları altında elde edilen aşınma yüzeylerinin EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 3.47'den görüldüğü gibi, HNK'in aşınma yüzeyinde var olan Zn, Al, C, O ve Fe elementleri açıkça görülmektedir. Yüzeydeki Fe oluşumunun sebebinin, bu elementin aşınma testi süresi boyunca aşındırıcı çelik diskten numune yüzeyine transfer olması düşünülmektedir.

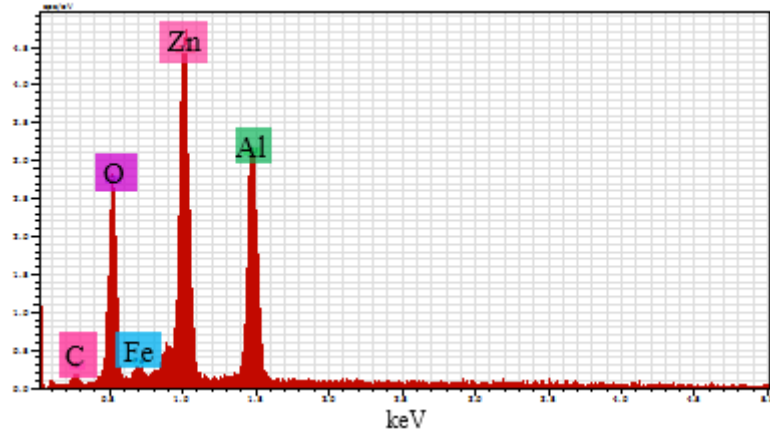
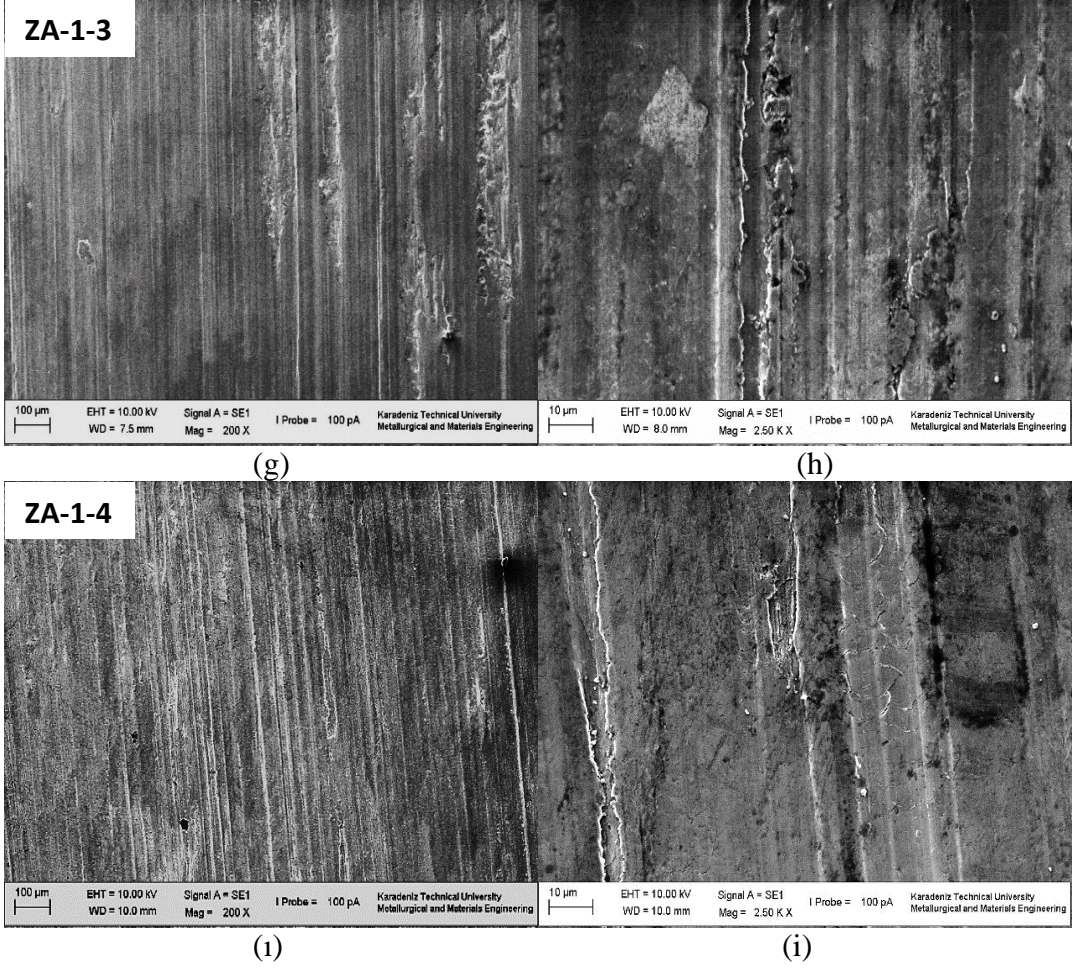




Şekil 3.46. Yüksek hız altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a,b) katkısız ZA27, (c,d) ZA-1-1, (e,f) ZA-1-2, (g-h) ZA-1-3, (i,i) ZA-1-4



Şekil 3.46'nın devamı



Şekil 3.47. ZA-1-4 kodlu numunenin 10 N yük, 30 dk deney süresi ve 250 dev/dk devir sayısı altında aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi spektrumlarının şematik olarak gösterilişi

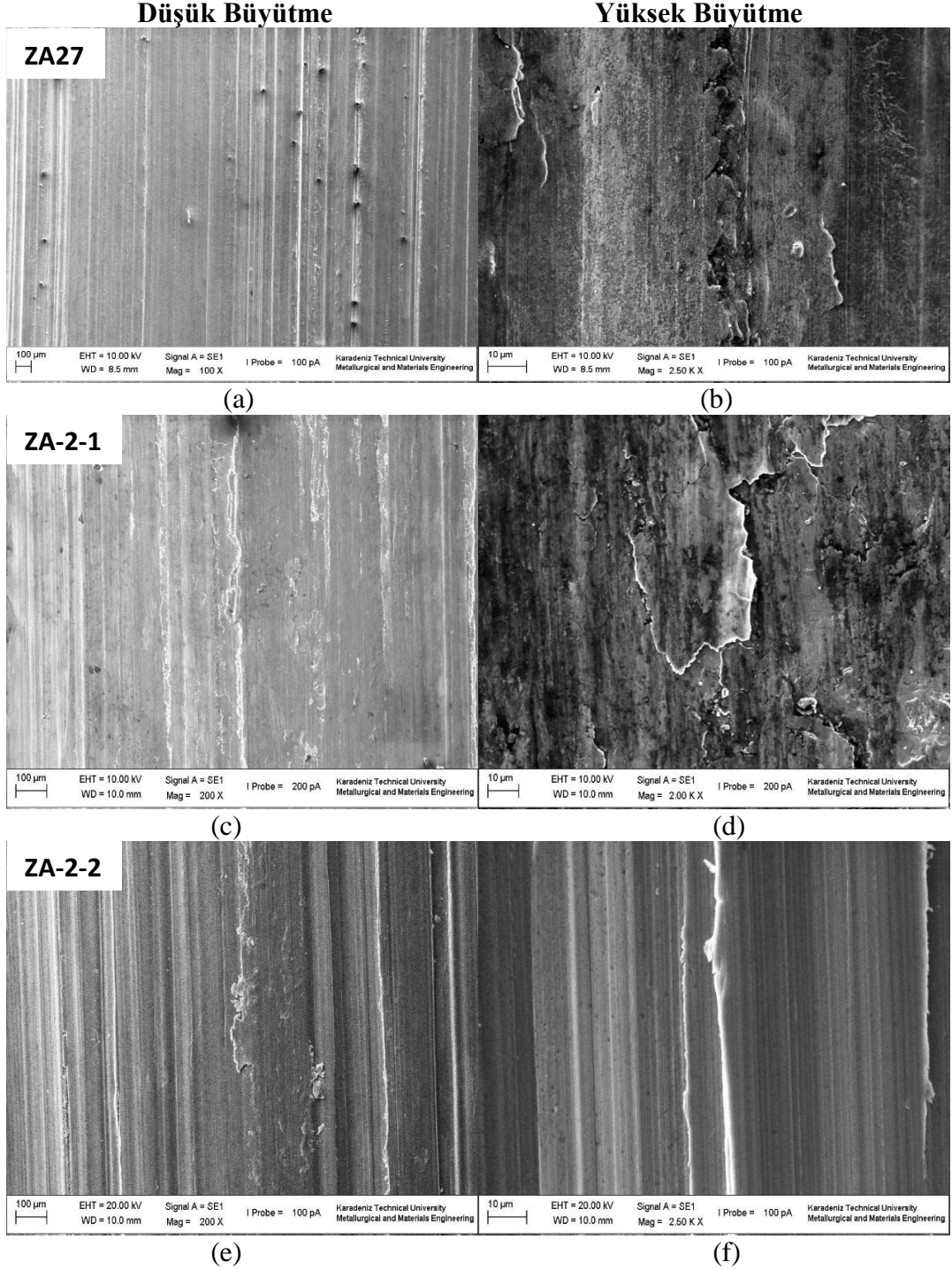
### 3.8.3. 2. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

2. gruptaki HNK numunelerden elde edilen aşınma yüzeylerine bakıldığında yüksek yükler altında katkısız ZA27 ve HNK'lerin aşınma dirençlerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Buna göre, Şekil 3.48'de 2. gruptaki numunelerden ve katkısız ZA27 numuneden, 30 dk deney süresi, 100 dev/dk deney hızı ve 25 N yük deney şartları altında elde edilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir.

İlk olarak katkısız ZA27 numunenin aşınma yüzeyi incelendiğinde 25 N yük altında daha çok adhezif aşınmaya bağlı tabakalaşma aşınması meydana gelmiştir (Şekil 3.48 a,b). 2. gruptaki HNK numunelerin aşınma yüzeylerinde grafitin katı yağlayıcı etkisinin daha yüksek olacağı düşünülmüştür. Yüksek yükler altındaki aşınma yüzeyleri incelendiğinde, ZA-2-1 kodlu numunelerde aşınmanın abrazif davranıştan uzaklaşarak daha çok adhezif aşınma, tabakalaşma, mikro çatlaklar ve grafit oranının hacimce %2 değerine çıkmasıyla mekanik özelliklerin düşüş eğilimine bağlı olarak kırılmaların ortaya çıktığı belirlenmiştir (Şekil 3.48 c,d). Grafit oranının sabit kalarak nano-alümina oranının artırılmasıyla aşınma mekanizması sert alümina parçacıkları nedeniyle tekrar abrazif davranış sergilemeye başlamıştır. Bu durum ZA-2-2, ZA-2-3 ve ZA-2-4 kodlu numunelerden yüksek yükler altında elde edilen aşınma yüzeylerinde bulunan oluk oluşumlarıyla belirtilebilir. Yapıya eklenen nano-grafit parçacıklarının yapıda başta sertlik olmak üzere mekanik özellikleri düşürmesinden dolayı alümina katkı oranının belli aralıklarla artırılarak hem mekanik özellikleri iyileştirme hem de grafitin yapıya kazandırdığı kendi kendine yağlayıcı özelliğini kullanma yoluna gidilmiştir. Bu durumda, ZA-2-1 kodlu numunelerden sonra test edilen daha yüksek nano-alümina oranlarına sahip numunelerde ne kadar abrazif aşınma özelliği ortaya çıksa da mekanik olarak iyileştirilmiş HNK yapısı aşınmanın engellenmesinde önemli rol oynamıştır. Alümina oranının artmasıyla aşınma direnci de artarken yüzeylerde ince ve sürekli oluk oluşumları gözlenmiştir. Ayrıca oluk kenarlarında kırılmış parçacıklar da belirlenmiştir (Şekil 3.48 g, h).

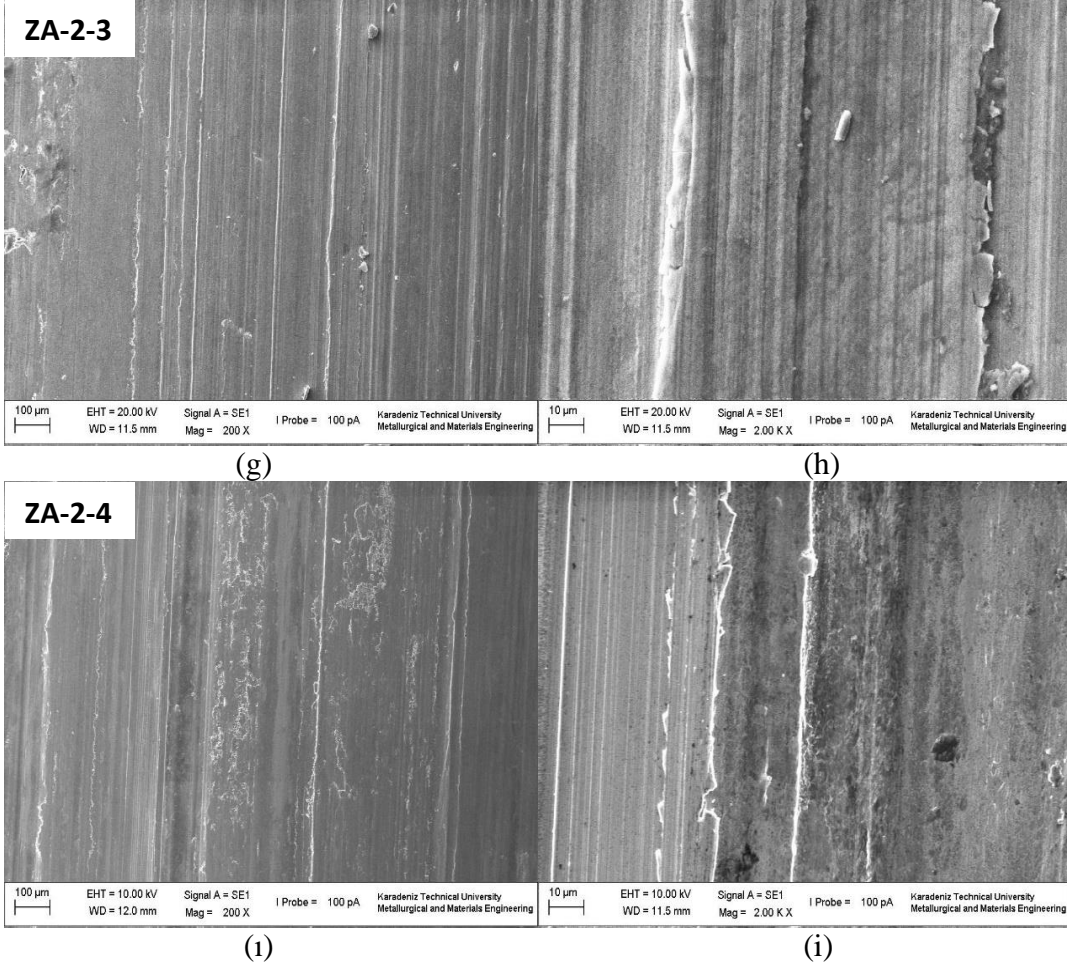
Grafit oranının hacimce %2'de sabit, alümina oranının hacimce %4 değerine ulaşmasıyla yüzeylerde abrazif aşınma ve kırılmalar dikkate değer şekilde azalmıştır (Şekil 3.48 i, j). Bu durum, yüksek yüklerde kayma yüzeyinin daha yüksek basınçlara maruz kalmasıyla numune temas yüzeyinin alt kısmında arayüzeyde bulunan yağlayıcı film ve alümina parçacıklarının kayma yüzeyine çıkmasıyla sürtünmenin azalması ve aşındırıcı diskin temas yüzeyinde tutunmasının zorlaşması olarak yorumlanabilir. Alümina oranının

arttırılmasıyla mekanik özelliklerin de iyileştirildiği numunelerde nano-grafit parçacıklarının yüksek yük altında aşınma yüzeyinde sıkıştırılması bu durumda yüksek aşınma dayanımı sağlamaktadır.



Şekil 3.48. Yüksek yük altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a,b) katkısız ZA27, (c,d) ZA-2-1, (e,f) ZA-2-2, (g-h) ZA-2-3, (i-i) ZA-2-4

Şekil 3.48'in devamı



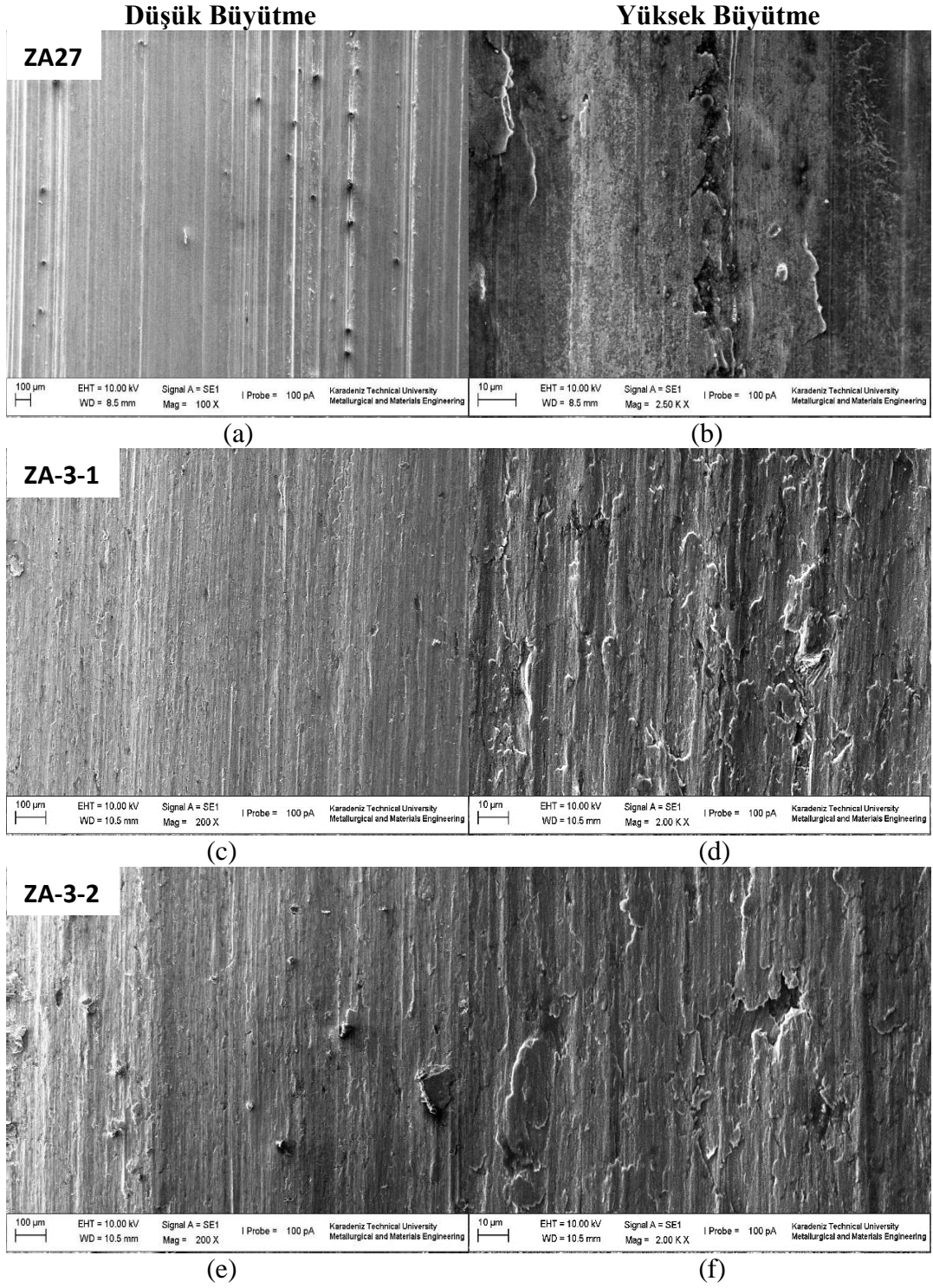
### 3.8.4. 3. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

3. gruptaki numunelerde yüksek yükler altında gerçekleştirilen aşınma testlerinde ZA-3-3 ve ZA-3-4 kodlu numunelerin yüksek yükler altında aşınma miktarının azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. ZA-3-1 ve ZA-3-2 kodlu numunelerde ise yük miktarının artmasıyla sürekli bir aşınma artışı görülmüş ve bu miktar yüksek yükler altında en üst seviyelere ulaşmıştır (Şekil 3.49 c,d,e,f). Buna göre; Şekil 3.49 'da gösterilen aşınma yüzeylerine sahip numunelere 25 N yük, 100 dev/dk deney hızı ve 30 dk deney süresi şartları altında aşınma testi uygulanmıştır.

İlk olarak, ZA-3-1 kodlu numunenin yüksek yükler altında gösterdiği yüksek aşınma miktarının, grafit parçacıklarının yapı içerisindeki oranının yüksek miktarlarda olmasından dolayı mekanik özellikleri düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıda, hacimce %1 oranda bulunan alümina miktarı ne kadar sertlik oranında artış sağlasa da aşınma olayında grafit oranının baskın olarak etki ettiği görülmektedir. Bundan dolayı, yüksek

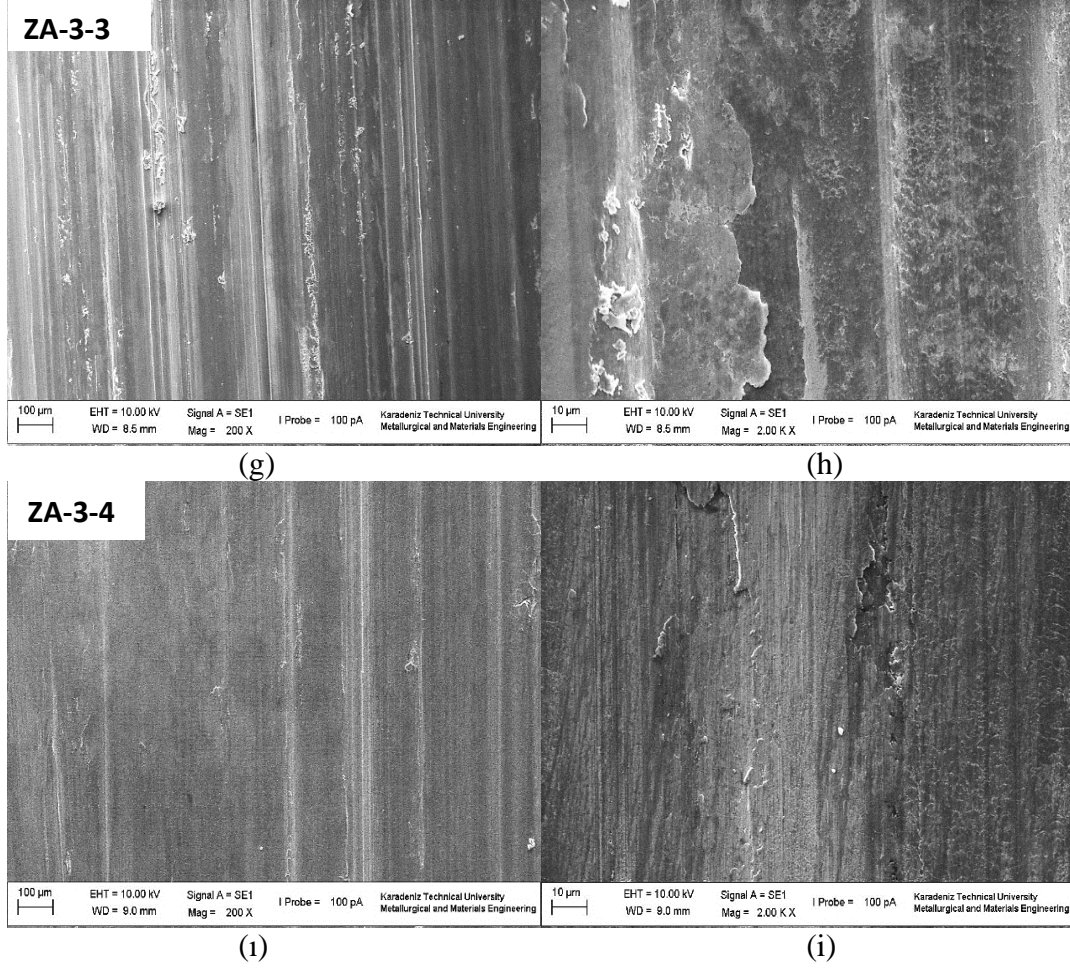
yükler altında, ZA-3-1 kodlu numunelerde yüzeylerde parçacık kopmaları ve köşelerde kırılmalar gözlenmiştir. Yüzey sıcaklığın da daha fazla artmasıyla kopan parçacıklar aşındırıcı disk üzerine sıvanmış ve aşınmanın giderek artmasına yol açmıştır (Şekil 3.49 c,d). Sıcaklığın artması sonucu grafit parçacıklarının yapıda neden olduğu yumuşama ile akma dayanımını düşürmesi aşınma mekanizmasının belirlenmesinde önemli rol oynamıştır. Bu yüzden, bu numunelerde abrazif aşınma mekanizmasının baskın olmadığı daha çok yapışmalarla birlikte adhezif aşınma mekanizmasının etkin olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.49 c,d,e,f) Yüzeyden koparak ayrılan parçacıkların ortaya çıkardığı oyuklanmalar da gözlenmiştir. Bütün bunların sonucu olarak, yüksek plastik deformasyonun oluşumu aşınma yüzeylerinden açıkça görülmektedir. Bu durum ZA-3-2 kodlu numunede ne kadar adhezif aşınma ve yapışma durumunda azalma belirlense de geçerliliğini korumaya devam etmiştir (Şekil 3.49 e,f). Bu numunelerde yüzeyde meydana gelen kopma ve kırılma durumlarının ZA-3-1 kodlu numuneye göre azaldığı ancak hala yüksek plastik deformasyonun ve yapışma olayının devam ettiği ve bunun sonucunda aşınma miktarının yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür (Şekil 3.49 c,d,e,f). Grafit oranının hacimce %3'te sabit, alümina oranının hacimce %3 oranına çıkmasıyla adhezif aşınmanın yani yapışmanın azaldığı aşınma yüzeylerinden açıkça görülmektedir. Sert alümina parçacıkları grafit parçacıklarının yapı içerisinde meydana getirdiği yumuşamayı ortadan kaldırmaktadır (Şekil 3.49 g,h). Bu durum aşınma miktarının azalmasından anlaşılmaktadır. ZA-3-3 kodlu numunelerin aşınma yüzeyi incelendiğinde aşınma mekanizmasının adheziften abrazife geçtiği görülmüştür (Şekil 3.49 g,h). Adhezif etkinin meydana getirdiği yapışma durumu bu numunelerde engellenmiş ve aşınma miktarı bu bağlamda azalma eğilimi göstermiştir. Derin olmayan olukların oluşumu ve oluk uçlarındaki mikro-çatlaklar bu numunelerde belirlenen davranışlardır ve plastik deformasyon olayının etkinliğinin giderildiği aşınma yüzeylerinden görülmektedir (Şekil 3.49 g,h,i). Yapıdaki nano-grafitin katı yağlayıcı özellik göstermesiyle pürüzsüz ve derin olmayan oluklar daha az aşınma miktarı belirlenmiştir. Alümina oranının daha fazla olduğu ZA-3-4 kodlu numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde ise oluk oluşumunun nispeten daha sınırlı hale geldiği ve süreksiz olukların oluşmaya başladığı görülmektedir (Şekil 3.49 i,i).





Şekil 3.49. Yüksek yük altında yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a,b) katkısız ZA27, (c,d) ZA-3-1, (e,f) ZA-3-2, (g-h) ZA-3-3, (i,j) ZA-3-4

Şekil 3.49'un devamı

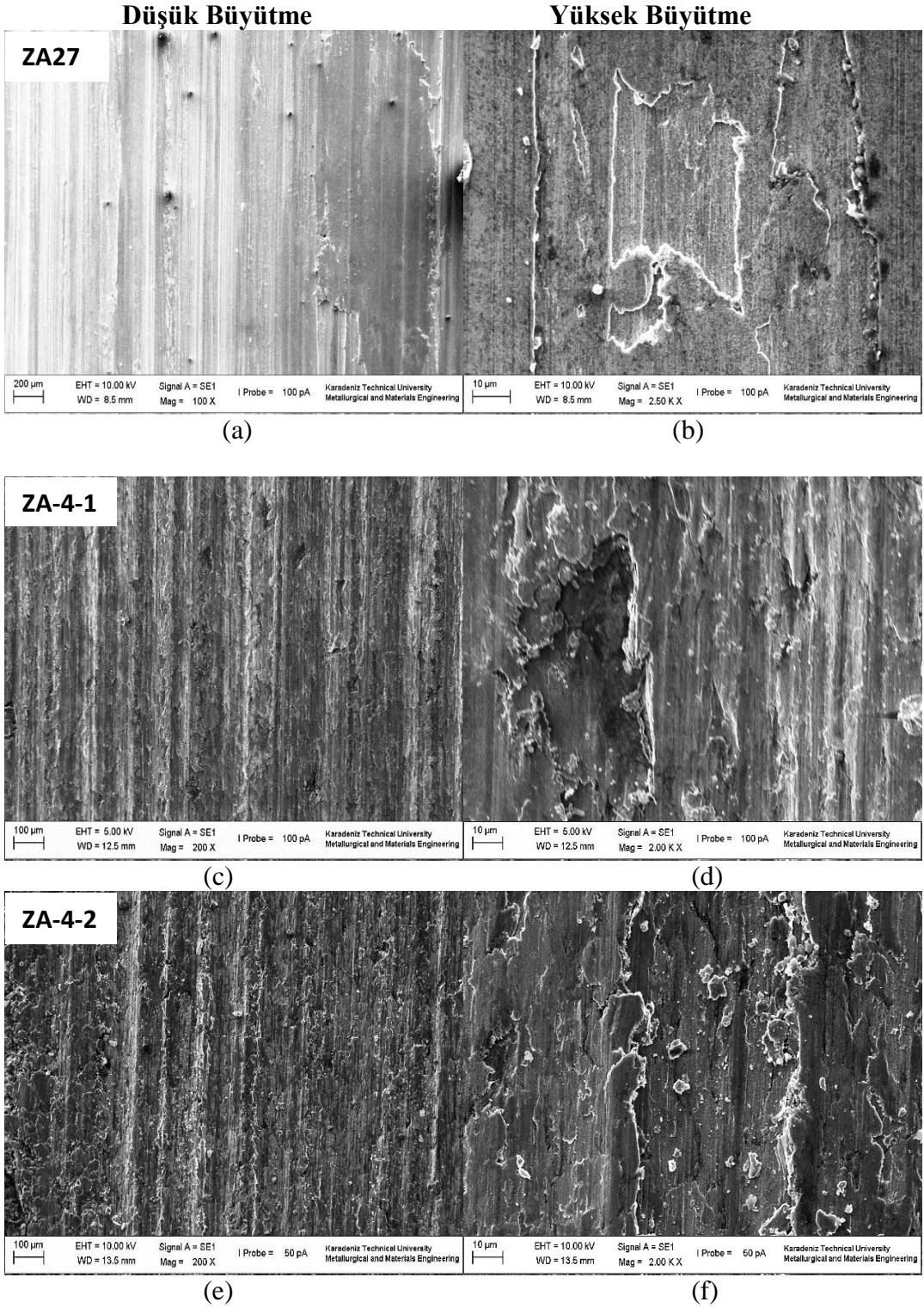


### 3.8.5. 4. Gruptaki Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

4. gruptaki numunelerin ve katkısız ZA27 numunenin, 120 dk süreyle 10 N yük altında ve 100 dev/dk hızda test edilmesi sonucu elde edilen aşınma yüzeyi görüntüleri Şekil. 3.50 'de verilmiştir. ZA-4-1 ve ZA-4-2 kodlu numunelerde görülen aşırı plastik deformasyon malzemelerin şiddetli ölçüde aşınmaya uğramasına sebebiyet vermiştir. Kayma yüzeylerinde ve numune köşelerinde meydana gelen kırılmalar aşınma yüzeyi görüntülerinden de açıkça görülmektedir (Şekil 3.50 c,d,e,f). Grafit oranının %4 ile sabit, alümina oranındaki artışla birlikte bu durumda iyileşme gözlenmiş; plastik deformasyon ve kırılma olaylarında azalma belirlenmiştir. Daha çok adhezif ve derin olukların oluşumuyla tabakalaşma olarak artan aşınma, alümina katkısının yapıdaki oranı arttıkça abrazif aşınma olarak kendini göstermiş ve oluk oluşumu daha düz bir hal almaya başlamıştır (Şekil 3.50 g,h,i,i). Yapıdaki grafitin yağlayıcılık özelliği alümina oranının hacimce %1 ve %2 olduğu numunelerde mekanik özelliklerin büyük oranda düşmesiyle etkisiz kalmıştır.



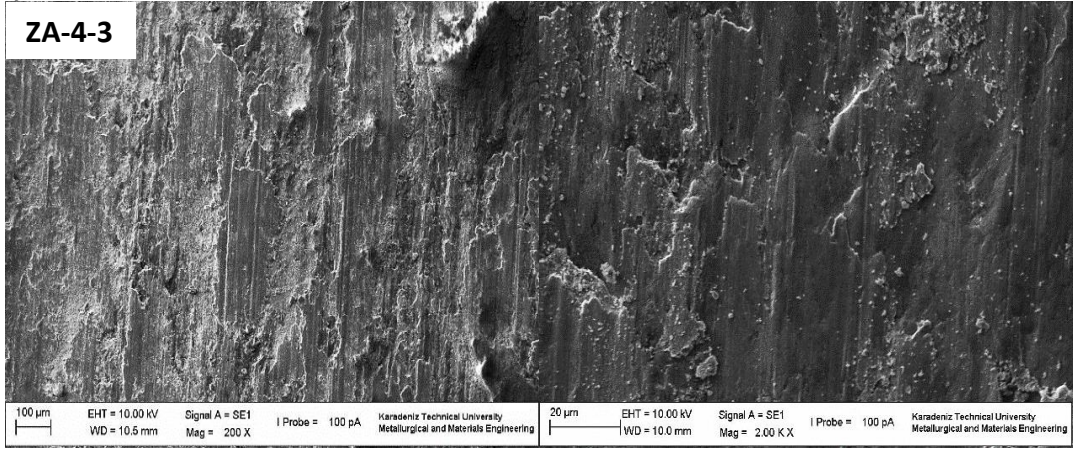
Ancak ZA-4-3 ve ZA-4-4 kodlu numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde, mekanik özelliklerin de iyileşmesiyle malzeme yüzeyinden kopan ve derin oyuklanma oluşturan kopmuş parçacık miktarının azaldığı gözlenmiş, aşınma mekanizmasının diğer numunelere göre abrazif olarak ilerlediği kaydedilmiştir (Şekil 3.50 g,h,i). Buna sebebiyet veren durumun sert alümina katkısının artışı olduğu belirlenmiştir. Bu numunelerde alümina ilavesiyle mekanik özelliklerin iyileşmesi ve yapı içerisindeki grafit parçacıkların kayma yüzeyinde yağlayıcı film oluşturularak aşınma miktarını azalttığı anlaşılmıştır. Ancak, ayrı ayrı yapılan yüksek yük ve yüksek devir şartlarındaki aşınma testlerinde, diğer gruptaki numunelere (aynı alümina oranına sahip) göre grafit oranının artışı aşınmayı olumsuz yönde etkilemiştir. Bu gruptaki numuneler arasında, en iyi aşınma dayanımına sahip ZA-4-3 ve ZA-4-4 kodlu numunelerde uzun süreli testler sonucu diğer gruptaki numunelere göre üstün aşınma dayanımı gösterdiği açıkça gözlenmiştir (Şekil 3.50 g,h,i). Düşük yük ve düşük test hızlarında uzun sürede yani alınan uzun yollarda kayma yüzeyleri tabakasının hemen altında oluşan yağlayıcı film ve yapıdaki sert alümina parçacıklarının varlığı bir yandan mekanik özellikleri iyileştirirken aşınmaya olumlu yönde etkileyen faktörler olarak belirlenmiştir. Sıcaklıkta meydana gelen artışın düşük seviyelerde oluşu da test sırasında kopan parçacıkların aşındırıcı disk yüzeyine yapışır halde kalmasını ve bunun devamında numune yüzeyinden parça koparmasını engelleyici bir etken olduğu düşünülmektedir. Buna göre, uzun süreli yani uzun yollarda yürütülen testlerde aşınma direncinin en yüksek olarak belirlendiği numuneler ZA-4-3 ve ZA-4-4 kodlu numuneler olmuştur.



Şekil 3.50. Uzun deney sürelerinde yürütülen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a,b) katkısız ZA27, (c,d) ZA-4-1, (e,f) ZA-4-2, (g,h) ZA-4-3, (i,j) ZA4-4

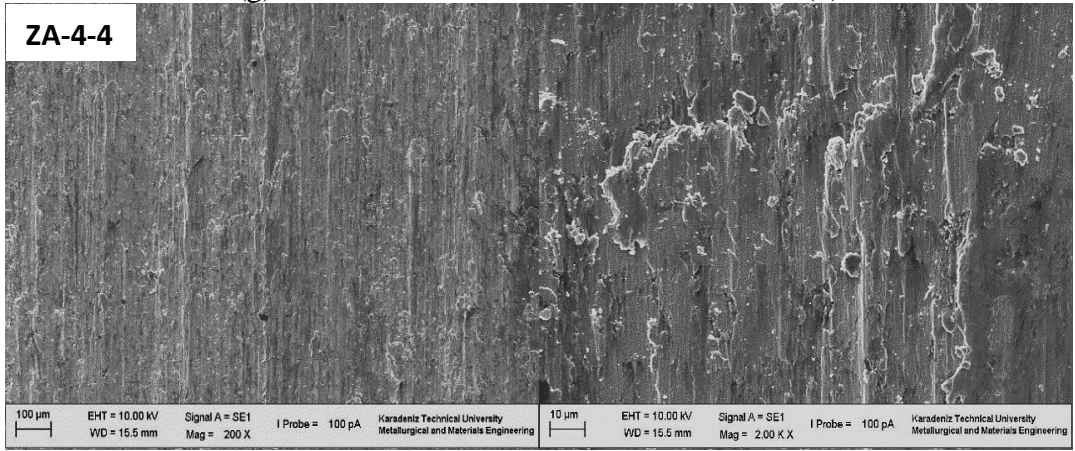


Şekil 3.50'nin devamı



(g)

(h)



(i)

(i)

#### 4. İRDELEME

İlk üretim aşaması olan mekanik alaşımlama ile elde edilen hibrit nanokompozit tozlarının toz boyutu incelemesi yapıldığında, yapıdaki nano-grafit oranı sabitken, nano-alümina oranı arttıkça aynı mekanik alaşımlama süresinde (8 saat) toz boyutunun düştüğü görülmüştür. Bu bakımdan, alüminanın sert bir seramik faz olması ve öğütmeyle birlikte ZA27 matris içine gömülerek ve kırılmaya uğrayarak toz boyutunu düşürdüğü belirlenmiştir. Diğer yandan, nano-alümina oranının sabit tutularak artan nano-grafit oranına göre bakıldığında da, aynı mekanik alaşımlama saatinde, toz boyutunun giderek arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.4). Buradan da, grafitin tabakalı yapıda olmasından dolayı öğütme sırasında bu tabakaların sürekli birbiri üzerinde kayması ve topaklanması nedeniyle toz boyutunu arttırdığı belirlenmiştir. HNK tozlarda öğütmenin ilk saatlerde, pulsu yapı görülmüştür. Devam eden öğütme süreleri sonunda tozlar soğuk kaynak olayına maruz kalmış ve sonuç olarak 8 saat öğütme sonucunda soğuk kaynak olayından kırılma mekanizmasına geçilerek hemen hemen kararlı bir yapı elde edilmiştir. Kısaca, 8 saatlik öğütme süresi sonunda, mekanik alaşımlama sistemi olarak, sünek-sünek yapıda bir davranış belirlenmiş ve nano parçacıkların yumuşak ZA27 matris içerisine gömüldüğü görülmüştür.

HNK'lerin iç yapı incelemeleri sonucu, nano parçacıkların yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak takviye elemanları olarak kullanılan nano partiküller matris elemanı içerisinde hem tanelerin içinde hem de tane sınırlarında konumlanmıştır.

HNK'lerin sertlik değerleri araştırıldığında, nano-grafit oranı sabit tutulurken nano-alümina oranının arttığı numunelerde sertlik sürekli bir artış gösterirken, nano-alümina oranı sabit tutulurken, nano-grafit oranının arttırıldığı numunelerde ise sürekli bir azalma göstermiştir. Örneğin, ZA-1-1 kodlu numunelerde sertlik değeri, yaklaşık 131 BSD ölçülürken katkı malzemesi olan alüminanın artmasıyla ZA-1-2 kodlu numunelerde yaklaşık 136 BSD, ZA-1-3 kodlu numunelerde yaklaşık 143 BSD ve ZA-1-4 kodlu numunelerde yaklaşık 150 BSD değerinde ölçülmüştür. Üretilen HNK numunelerde en yüksek sertlik değeri grafit oranının hacimce %1, alümina oranının hacimce %4 olduğu ZA-1-4 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Sert bir seramik faz olan alümina katkısı yapıda sertlik ve mukavemet artışına neden olmuş ve mekanik alaşımlama işleminin de katkı malzemeleri

olan nano parçacıkların yapı içerisinde homojen olarak dağılımını sağlaması ve daha kararlı bir iç yapı oluşturması malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirici etki yapmıştır.

Yapılan aşınma testleri sonucunda, ZA-1-4 kodlu numunede, ağır şartlar altında (yüksek hız, yüksek yük) yürütülen deneylerde aşınma miktarının en düşük seviyede belirlendiği HNK'tir. Yapıya grafit ve alümina katkı malzemelerinin ilave edilmesiyle yağlayıcılık özelliği ve mekanik özellikleri geliştirilmiş olan hibrit nanokompozitler yüksek hızlarda ve yüklerde daha iyi aşınma direnci sergilemiş ve katkısız ZA27 alaşımına sahip numunelerde görülen aşınma miktarından daha düşük aşınma miktarları belirlenmiştir. Bazı HNK'lerde aşınma direncinin katkısız ZA27 numuneden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Örneğin, ZA-2-1 kodlu numunede 250 dev/dk hız, 30 dk deney süresi ve 10 N yük altında gerçekleştirilen testlerde aşınma miktarı 15,4 mg olurken, bu değer katkısız ZA27 numunede 11 mg olarak ölçülmüştür. Benzer durumlar, yapıdaki grafit oranının alümina oranından yüksek olduğu ZA-3-1, ZA-4-1 kodlu numunelerde görülmüştür. Yapıda bulunan grafit parçacıklarının mekanik alaşımlamayı ve sinterlemeyi olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle mekanik özellikleri düşürmesi yüzünden aşınma testleri sırasında bu numunelerde kayma yüzeylerinde parçaların koparak yüzeyden ayrılması ve aşırı plastik deformasyona sebebiyet vermiş ve yüksek aşınma miktarlarına neden olmuştur. 1. grupta yer alan HNK'lerde en iyi aşınma dayanımı gösteren malzeme ZA-1-4 kodlu numune, 2. grupta yer alan HNK'lerde en üstün aşınma direncine sahip malzeme ZA-2-4 kodlu numune, 3. grupta bulunan HNK'lerde en az aşınma miktarlarının görüldüğü malzeme ZA-3-4 kodlu numune ve son grup olan 4. gruptaki HNK'lerde en iyi aşınma direncine sahip olanlar ise ZA-4-4 kodlu numune olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi bütün gruptaki numunelerde yapıdaki alümina oranının artmasıyla birlikte aşınma dirençlerinde artış görülmüştür. Grafitin yapı içerisinde yağlayıcılık özelliklerinin yanında mekanik özelliklerin düşüşüne neden olmasıyla eklenen sert alümina parçacıkları yapıyı daha mukavemetli hale getirerek mekanik özelliklerin artmasını sağlamıştır. Dolayısıyla bu durumun aşınma direncine olumlu etki ettiği açıkça görülmüştür. Ayrıca ZA-4-4 kodlu numunede hafif şartlar altında yürütülen deneylerde (düşük yük, düşük hız) en iyi aşınma dayanımı elde edilmiştir. Bu malzemede mekanik özellikler, yapısında alümina oranı hacimce %4'te sabit ancak daha az grafit bulunan malzemelere göre düşük olsa da hafif şartlar altında grafitin yağlayıcı özelliği ve diğer yandan alüminanın sert bir faz olup, yumuşak olan ZA27 matris fazını korur vaziyette görev yaptığı anlaşılmıştır.

Aşınma testleri sırasında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerine bakıldığında, sürtünmenin düşük olduğu malzemelerde beklenildiği gibi genellikle aşınma miktarı buna paralel olarak düşük olmuştur. Örneğin 1. gruptaki HNK'lerde en düşük sürtünme katsayısı değerleri ZA-1-4 kodlu malzemede elde edilmiştir. Bu durum aşınma miktarlarından elde edilen sonuçlara paralel olarak 2. gruptaki HNK'lerde en düşük sürtünme katsayısı değerleri ZA-2-4 kodlu numunede; 3. gruptaki HNK'lerde en düşük sürtünme katsayısı değerleri ZA-3-4 kodlu numunede ve 4. gruptaki HNK'lerde de en düşük sürtünme katsayısı değerleri ZA-4-4 kodlu numunede tespit edilmiştir. Bazı istisnai durumların da varlığı belirlenmiştir. Örneğin, ZA-4-1 kodlu numunede aşınma değişik sürelerde uygulanan aşınma testleri sonucunda, aşınma miktarlarının katkısız ZA27 malzemeden bile daha fazla olduğu görülürken, bu şartlar altında sürtünme katsayılarının katkısız ZA27 malzemeden daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu durumun sebebi, ZA-4-1 kodlu numunede, mekanik özelliklerin aşırı derecede düşmesi sonucu aşınma deneyleri sırasında meydana gelen kopmalar ve kırılmalarda kayma yüzey alanının küçülmesi ve sürtünmenin daha az oranda meydana gelmesi olarak belirtilmektedir.

Aşınma deneyi yürütülen her malzemeden aynı zamanda test sırasında malzemede meydana gelen sıcaklık artışlarının tespiti sonrasında, malzeme içerisindeki katkı elemanı oranının artmasıyla sıcaklıktaki yükselmenin düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünmenin daha az meydana geldiği HNK'lerde sıcaklığın düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.

Aşınma testi uygulanan katkısız ZA27 ve HNK'lerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, aynı zamanda HNK'ler için matris malzemesi olan ZA27 alaşımının ana aşınma mekanizmasının adhezif olduğu ve yumuşak olan tabakanın aşınma sırasında yapışma aşınması olarak ilerlediği ve ardından tabakalaşma (delaminasyon) aşınması olarak ilerlediği ve bunun sonucunda aşırı plastik deformasyona uğradığı kanıtlanmıştır. Yapıya ilave edilen grafit ve alümina parçacıkları ile aşınma mekanizması abrazif aşınmaya doğru dönmüş ve yapıdaki alümina oranı arttıkça adhezif aşınma bulguları hemen hemen kaybolmuştur. Ancak yüksek oranlarda alümina içeren HNK'lerde ana aşınma mekanizması abrazif olarak belirlense de aşınma yüzeylerindeki oluk oluşumları çok daha bölgesel ve dar şekilde görülmüş, plastik deformasyon olayı çoğunlukla giderilmiştir. Alümina oranı sabit tutularak grafit oranının arttırılmasıyla elde edilen HNK'lerin aşınma yüzeylerine sırasıyla bakıldığında, grafit oranının artmasıyla plastik deformasyon olayının aşırı bir şekilde arttığı ve derin oyuklanmaların, mikro kırılma ve çatlakların varlığı açıkça

görülmüştür. Grafitin yapı içerisinde mekanik özellikleri ciddi biçimde düşürdüğü ve bu nedenle yağlayıcılık özelliğinin artan oranlarda etki etmediği saptanmıştır. Ancak düşük oranlarda grafit ve yüksek oranlar alümina içeren HNK'lerde aşınma yüzeyleri daha pürüzsüz; oluk oluşumları daha dar ve bölgesel, mikro çatlaksız ve kırılma gerçekleşmeyen yüzeyler elde edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. ZA27 matrisli grafit ve alümina takviyeli HNK malzemeler mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yöntemiyle üretilebilir.
2. MA ile nano boyutlu katkı elemanlarından olan grafit hem toz tane sınırlarında hem de taneler içinde konumlanmıştır.
3. Artan alümina oranı ile HNK malzemelerin sertliği artış gösterirken, artan grafit oranı ile sertlik düşmüştür.
4. Alümina, ZA27 esaslı HNK malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve aşınma direncini arttırmak için kullanılabilir.
5. ZA27 esaslı nano-grafit ve nano-alümina takviyeli çoğu HNK malzemenin, katkısız ZA27 malzemedan daha üstün tribolojik özelliğe sahip olduğu anlaşılmıştır.
6. Yüksek oranlarda nano-grafit içeren ZA27 matrisli HNK malzemeler ağır şartlar altında, mekanik özelliklerin kötüleşmesinden dolayı düşük aşınma direnci göstermiştir.
7. Düşük oranlarda nano-grafit ve grafit oranına göre daha yüksek oranlarda nano alümina içeren ZA27 matrisli HNK malzemeler bütün deney şartları altında, üstün aşınma dayanımı göstermiştir.
8. Sürtünme katsayı değerleri, grafit oranı sabit iken artan alümina oranına bağlı olarak azalmakta olup hemen hemen bütün şartlar altındaki aşınma testlerinde en iyi aşınma direnci sergileyen malzemeler ZA-1-4 kodlu HNK malzemeler olmuştur.
9. ZA27 matris içerisine takviye edilen nano-grafit ve nano-alümina parçacıkları aşınma sırasında malzemelerde meydana gelen sıcaklık artışının daha düşük değerlerde olmasını sağlamıştır. Dolayısıyla HNK malzemelerde aşınma deneyleri sırasında meydana gelen sıcaklık artışı, katkısız ZA27 malzemeye göre daha az olmuştur.



10. Katkısız ZA27 malzemelerin ana aşınma mekanizması adhezif aşınma olurken, HNK malzemelerde artan nano-alümina oranına bağlı olarak ana aşınma mekanizması abrazif aşınma olmuştur.
11. Nano-grafitin yağlayıcılık özelliği ve aynı zamanda nano-alüminanın mekanik özellikleri arttırıcı özelliği kullanılarak üretilen ZA27 matrisli HNK'lerin aşınma mekanizmaları artan alümina oranı ile abrazif aşınma olarak meydana gelmesine rağmen aşınma yüzeylerinde daha dar ve bölgesel oluk oluşumları görülmüş; daha pürüzsüz yüzeylerin ortaya çıkmasıyla aşınma miktarlarının daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir.

## 6. ÖNERİLER

1. MA işlemleri argon gazı altında yürütülerek oksitlenme olayının önüne geçilebilir.
2. Sinterleme işlemleri ve sıcak presleme işlemleri için optimizasyon çalışmaları üzerinde daha kapsamlı çalışmalar yapılarak özelliklerde iyileştirmeler sağlanabilir.
3. Üretilen malzemelere ısı işlemleri uygulanabilir.
4. Yağlı ortamda da aşınma testleri uygulanarak bu şartlar altında malzemelerin tribolojik özellikleri incelenebilir.
5. Katkı malzemesi olarak kullanılan grafitin tabakalı içyapısı gereği yapıda tabakalaşmaya yol açarak mekanik özellikleri düşürmesi sebebiyle, katkı malzemelerinin her ikisi daha düşük oranlarda tutularak tribolojik özellikler incelenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Sahar, F., Çelik Takviyeli Zamak 5 Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
2. Çuvalcı, H., Çinko Alüminyum Esaslı Ticari ZA-27 Kaymalı Yatağının Sürtünme Davranışının İncelenmesi, Turk J Engin Environ Sci, 25 (2001), 199 – 204.
3. Babic, M., Mitrovic, S., Jeremic, B., The Influence of Heat Treatment on the Sliding Wear Behavior of A ZA27 Alloy, Tribology International, 43 (2010), 16–21.
4. Božić, D., Stašić, J., and Rajković, V., Microstructures and Mechanical Properties of ZA27-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Obtained by Powder Metallurgy Process, Science of Sintering, 43 (2011) 63-70.
5. Mitrović, S., Babić, M., Stojanović, B., and Miloradović N., Tribological Potencial Of Hybrid Composites Based On Zinc And Alüminium Alloys Reinforced With SiC And Graphite Particles, 12th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 2011.
6. Azaklı, M. A., Aslan, S., Akbulut, H., Bindal, C., Etial 171-SiC-Grafit Hibrit Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi Ve Mikroyapısı, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 2, 2003.
7. A. Alizadeh, E. Taheri-Nassaj, Mechanical properties and wear behavior of Al–2 wt.% Cu alloy composites reinforced by B<sub>4</sub>C nanoparticles and fabricated by mechanical milling and hot extrusion, Materials characterization, 67 (2012) 119-128.
8. Jia, D.C., Influence of SiC particulate size on the microstructural evolution and mechanical properties of Al–6Ti–6Nb matrix composites, Materials Science and Engineering: A, 289 (2000) 83–90.
9. Mykura, N., Zhu, Y., ve Murphy, S., Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25 (1986) 151-159.
10. Zhu, Y., Villasenor, G.T., and Pina, C., Complex Microstructural Changes in As- Cast Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Materials Science, 29 (1994) 1549- 1552.
11. Houghton, M.E., and Murray, M.T., An Introduction to Zinc Alloys , Metals Forum, 6 (1984) 211-225.
12. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalürji Kongresi, Ekim 1986, Ankara, Bildiriler Kitabı II: 532-555.
13. Gervais, E., Levert, H., and Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys, Trans.Am.Foundrym.Soc., 88 (1980) 183-194.

14. Barnhurst, R.J., and Gervais, E., Gravity Casting of Zinc-Aluminum (ZA)Alloys : Dependence of Mechanical Properties on Soundness, Microstructure and Inclusion Content, AFS Transactions. 93 (1985) 591-602.
15. Savaşkan, T., and Murphy, S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-700.
16. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low Copper Part of the Zn-Al-Cu System, Z.Metallkde., 71(1980) 96-102.
17. Durman, M., and Murphy, S., "Precipitation of Metastabil E-Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminum Alloys Containing Copper", Acta Metali. Matter., 39 (1991) 2235-2242.
18. Zho, Y. H., Torres, G., and Pina, C., "Complex Microstructural Changes in As-Cast Eutectoid Zn-Al Alloy", Journal of Materials Science, 29 (1994) 1549-1552.
19. Zhu, Y. H., and Goodwin, F. E., "Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27% Al Alloy", J. Mater. Res., 8 (1993) 3043-3049.
20. Savaşkan, T., ve Pürçek, G., "Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri", Türk Mühendis ve Çevre Bilimleri Dergisi (Tr. J. Engin. Sci.), 24 (2000) 25-34.
21. Prasad, B. K, "Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-based Alloy", Z. Metallkd., 87 (1996) 226-232.
22. Lyon, R, "New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications", Proc. Conference on Materials Engineering, University of Leeds, 87-96 (1984).
23. Barnhurs, R. J., Metals Hendbook, 10th Edition, Amarican Society for Metals, Metals Park, Ohio, 2 (1991) 528-542.
24. Savaşkan, T. ve Çuvalcı, H., "Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", 4. Ulusal Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi, Ankara, 123-130 (1990).
25. Lo, S. H. J., Dionne, S., Sahoo, M. and Hawthorne, H. M., Journal of Materials Science, 27 (1992) 5681-5691.
26. Goodwin, F. E. and Ponikvar, A. L., Engineering Properties of Zinc Alloys, Publised by Int. Lead Zinc Res. Org. Inc., Third Edition-Revised, North Carolina, 2225-2235 (1989).
27. Choudhury, P., Das, K. and Das, S., Evolution of as-cast and heat-treated microstructure of a commercial bearing alloy, Materials Science and Engineering A, 398 (2005), 332–343.
28. Savaşkan, T. and Murphy, S. Mechanical Properties and Lubricated Wear Of Zn–Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211–224.

29. Savaşkan, T. and Alemdağ, Y., Mechanical and Tribological Properties of Al–40Zn–Cu alloys, *Tribology International*, 42 (2009) 176–182.
30. Yağcı, E., Tabakalı Kompozit İnce Plakların Plak Düzlemine Dik Yükleme Etkisi Altındaki Eğilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.
31. Ransone, P. O., Carbon-Carbon Cylinder Block, United States Patent, Patent Number; 5, 769, 046 (1998).
32. Aycan, M. F., Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Eesası Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
33. Ersoy, H.Y., “Kompozit Malzeme”, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. ve Tic. Ltd. Sti., İstanbul, 11-15, 95-105, 110-116 (2001).
34. Saçak, M., “Polimer Kimyası”, Gazi Kitabevi, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397 (2002).
35. Olcay, Y., Akyol, M. ve Gemci, R., “Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesi, Bursa, 7(2002), 94-96.
36. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Ankara, 2006.
37. Demirel, A., Karbon elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
38. Nazık, C., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz metalürjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
39. Çalın, R., Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
40. Lyold, D. J., Particulate Reinforced Alüminium And Magnesium Matrix Composites, *International Materials Reviews*, 39 (1994) 1-22.
41. Şahin, Y., ‘Kompozit Malzemelere Giriş’, Ankara, 2000.
42. Akıncı, H. ve Ögel, B., Al-SiC Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilmesi, 10. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi, 1773-1779, 2000.
43. Clyne, T. W. and Withers., P. J., *An Introduction to Metal Matrix Composites.*, 1995.
44. Cöcen,Ü., ve Önel, K.Ç., Metal Matriks Kompozitler, *Metalurji Dergisi*, 104, 1996.
45. ASM Composite Handbook, 2002.

46. Hull, D., “An Introduction to Composite Materials”, Cambridge University Pres, 71-79, 1992.
47. Agarwal, D. B., Broutman, L. J. ve Chandrashekhara, K., “Analysis and Performance of Fiber Reinforced Composite”, New Jersey, Canada, 2006.
48. Ersoy, H. Y., “Kompozit Malzeme”, İstanbul, 95-127, 2001.
49. Kadir, S. ve Arık, H., “Sepiyolitten Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’e dönüşüm mekanizmaları”, Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, 23 (1999), 287-298.
50. Akbulut, H., Durman, M. ve Yılmaz, F., “SiC seramik partikül takviyeli alüminyum-silisyum metal esaslı kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Haziran 1993, Ankara, Bildiriler Kitabı, 1183-1192.
51. Mabuchi, M. and Higashi, K., “An experimental investigation of a superplastic constitutive equation in Al-Mg-Si alloy composites reinforced with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> whiskers”, International Journal of Plasticity, 17 (2001) 399-407, Japan.
52. Kurt, T., “Diyatomit’ten karbo-termal indirgeme ve nitrüleme yoluyla silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) seramik toz üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
53. Işıker, V. ve Ögel, B., “Al-SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi”, 1.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı, 377-385.
54. Uygur, İ. ve Saruhan, H., “Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri”, SAU, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2004.
55. Ekinci, V. Ş., “Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
56. ASM Handbook, Composites, 21 (2001).
57. Özdin, K., Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
58. Chawla, K.K, Composite Materials Science and Engineering, Springer-Verlag, USA, 1998.
59. Guesser., W. L., et al, Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks, Ecole centrale Lyon, 2004.
60. Şen, O., “TiO<sub>2</sub> partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 6-25, 2005.

61. Karagöz, A., Grafit katkılı Kurşun Kalemlerin Dozimetrik Özelliklerinin Ve Lüminesans Hassasiyetlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
62. Aslan, S., SiC ve Grafit Takviyeli Çinko Alüminyum Hibrit Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
63. <http://www.marbleport.com/dogal-kaynaklar/43/grafit>, 01,01, 2015.
64. Varol, T., AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
65. Kaya, M., “Nano-Ölçek Dünyası, Nano-Teknoloji Nedir ve Nerelerde Kullanılır?“, Termodinamik Dergisi, 158-159, 10, 2005.
66. Özdoğan, E., Demir, A., ve Seventekin, N., Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları. Tekstil ve Konfeksiyon, 16 (2006), 159-163.
67. Balcı, H., Akıllı (Fonksiyonel) Tekstiller, Seçilmiş Kumaşlarda Antibakteriyel Apre ve Performans Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ç.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
68. Cireli, A., Kutlu, B., Onar, N. ve Erkan, G., Tekstilde ileri teknolojiler, Tekstil ve Mühendis, 13(2006),7-20.
69. Bozkaya, Y., Nanoteknoloji Yüksek Lisans Programı, Anadolu Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Nanoteknoloji Bilim Dalı, <http://www.itab.anadolu.edu.tr/itab/pdf/nylp.pdf>, 01,01,2015.
70. Kut, D. ve Güneşoğlu, C., Nanoteknoloji ve Tekstil Sektöründeki Uygulamaları, Tekstil&Teknik, 224-230, 2005.
71. Demirel, R. Ö., Askeri Malzemelerde Nanoteknoloji Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
72. Menceloğlu, Y., Türkiye’de ve Sabancı Üniversitesinde Birikim, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, <http://www.robotlar.com/NANO SmartKids%20for%20web.pdf>, 01, 01, 2015.
73. Başaran, E., Nanoteknoloji (A. AYHAN editör). Dünden Bugüne Türkiye’de Bilim-Teknoloji ve Geleceğin Teknolojileri, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 379-388, 2002.
74. <http://www.polymer.hacettepe.edu.tr/webim/msen/undergraduate/NNT602/nano composites2.pdf>, 01 2015.

75. Sajjadia, S.A., Ezatpoura, H.R. ve Torabi Parizib, M., Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites fabricated by stir and compo-casting processes, Materials & Design, 34 (2012), 106–111.
76. Dalmış, R., Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Nano-parçacık Takviyeli Zn-Al Esaslı Nano-Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
77. Casati, R. and Vedani, M., Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review, Metals, 4 (2014) 65-83; 2075-4701.
78. Singer, R.F., Oliver, W.C. and Nix, W.D., Metal Transaction., 11(1980) 1895.
79. Arzt, E., “High temperature properties of dispersion strengthened materials produced by mechanical alloying”, Conf. of New Materials by MA. Techniques, 185-200, 1988.
80. Kobayashi, K.F., Tackibana, N. and Shingu, P.H., Formation of amorphous Al-Cr alloys by mechanical alloying, J. Of Material Science., 25 (1990) 3149-3154.
81. Koch, C.C., Cavin, O.B., Mc Kamey, C.G. and Scabrough, J.O., “Preparation of Amorphous Ni<sub>60</sub>Nb<sub>40</sub> by MA”, Appl.Phys. Letters, 43(1983), 1017-1019.
82. Fair, G.H. and Wood, J.U., “MA. of iron- aluminium intermetallics”, Powder Metals, 36 (1993), 123-128.
83. Sümer, M., Mekanik Alaşımlama İle Üretilen Fe-Fe<sub>3</sub>C Kompozit Malzemede Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri enstitüsü, 2003.
84. Özkök, Ö., a - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi Ve Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
85. Bostan, B., “Alüminyum Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama Ve Sonrası İşlemlerle Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> Sentezlenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, 2003.
86. Suryanarayana, C., “Mechanical Alloying And Milling”, Marcel Dekker, 33- 82, ABD, 2003.
87. Suryanarayana, C., Mechanical Alloying and Milling, Progress in Materials Science, 46 (2001), 1-184.
88. Pelit, Y., Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.



89. Fındık, T., Mekanik Alaşımama Değirmeninde Öğütülmüş 17-4 Çökelti Serleştirilmiş Paslanmaz Çelik Tozların Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-13, 2002.
90. Özkan, S., Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımama Yöntemiyle Üretimi Ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
91. German, R.M., Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, 2nd edition, USA, 5-400 (1994).
92. Torralba, J.M., Costa, C.E. and Velasco, F., P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview, Journal of Metarials Processing Technology, 133 (2003) 203-206.
93. Akın, G., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
94. Kurt, A., Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1992.
95. Arık, H., Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrürleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Seramik Tozu Üretimi Parametrelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-36, Ankara, 1996.
96. Türker, M., Özdemir, A.T., Ögel, B. ve Yavuz, A., Al-SiC tozlarının mekanik alaşımama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması, Uluslar arası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Kongresi, ODTÜ, 425-431, Ankara, 1998.
97. Groover M.P., Fundamentals of modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems 4 th Edition. U.S.A., 2009.
98. German, R.M., Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., MPIF, New Jersey, 4-272, 2007.
99. Kurt, A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, S.A.Ü., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 2004.
100. Archbold, J., Sintering Temperature Effects On The Mechanical Properties Of Porous-coated Ti-Al-4V ELI Alloy, Master Degree Of Applied Science, Graduate Department Of Metallurgy And Material Science, University Of Toronto, 106, Canada, 1999.
101. Ekici, E., Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 187, Ankara, 2012.

102. Durmuş, H., CO<sub>2</sub> Lazer Kaynağıyla birleştirilmiş Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 1- 150, 2006.
103. <http://www.cercom.itu.edu.tr>, 03,02,2015.
104. Cura, M.E., Sıcak Preslenmiş WC-Co/B<sub>4</sub>C Kompozitlerinin Mekanik, Manyetik Ve Mikroyapısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10-115, 2001.
105. Çelik, E., Elmaslı kesici takımlarda alternatif bağlayıcılar, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 2009.
106. Kaya, G., Mechanical Properties of PM Al-SiC Composites Produced By Conventional Hot Pressing Method, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
107. Taşcı, U., AA2014-B<sub>4</sub>C Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilebilirliği, Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
108. Bhushan, B., Principles and applications of tribology, 2nd Edition, March 2013.
109. <http://www.yildiz.edu.tr/~kaleli/TribolojiPrensipleriUygulamalar.pdf>, 03,02,2015.
110. Halling, J., Tribology Science and Practise, Physics in Technology, 8 (1977) 116-122, 1977.
111. Odabaş, D. ve Topal, E. S., 100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrazif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Bildiriler Kitabı, 396-405, 04, 1995.
112. Donald, R. A., The Science and Engineering of Materials, Third Edition, PSW Publishing Company , University of Missouri / Rolla, 123 (1997) 5-13, 1994
113. Bhushan, B., Tribology Applications, Modern Tribology Handbook, Definition and History of Tribology, CRC Yayınevi, 2000.
114. Toğuşoğlu, Ç., Cam Fiber Ve Grafit Takviyeli Naylon 6 Matrisli Kompozit Malzemelerin Bazı Mekanik Özellikleri Ve Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2011
115. Burwell, J.T. , Survey of Possible Wear Mechanisms, wear, 1, 119-141, 1957/58.
116. Lipson, C., Wear Considerations in Desing. Michigan üniversitesi yayınevi. Hall Inc., 1967.

117. Owsalou, R. G., Aşınmaya Maruz Kalan Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2012.
118. Karaoğlu Y., Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006.
119. Yılmaz F., Sürtünme ve Aşınma, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 06, 1997.
120. Yılmaz, M., Kompozitlerin Kuru Kaymadaki Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2013.
121. Akkurt, M., Makine Elemanları Cilt II., Birsen Kitapevi Yayınları, İstanbul, 1982.
122. Kato, K., Adachi, K., Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook, Principles of Tribology, 1 (2001) 7.
123. Kılıç, E. F., Alüminyum Alaşımli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 29-36, 2007.
124. Erdoğan, M., Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-33, 2005.
125. Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
126. Ataç, A. M. ve Güral, A., Çinko-Alüminyum (ZA) Alaşımlarının Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilirliği Üzerine Bir Çalışma, Politeknik Dergisi (Journal of Polytechnic), 147-154, 2013.
127. Mishra, S. K., Biswas, S. and Satapathy, A., A study on processing, characterization and erosion wear behavior of silicon carbide particle filled ZA-27 metal matrix composites, Materials and Design, 55 (2014) 958–965.
128. Babić, M., Mitrović, S. and Bobić, I., Tribological Properties of Composites with Substrate Made of the ZA-27 Alloy Reinforced by the Graphite Particles, M., S., I., Tribology in industry, 29 (2007) 3&4.
129. Sharma, S.C., Girish, B.M., Kamath, R. And Satish, B.M., Effect of SiC particle reinforcement on the unlubricated sliding wear behaviour of ZA-27 alloy composites, Wear, 213 (1997) 33-40.

130. Mitrović, S., Babić, M., Stojanović, B. and Miloradović, N., Tribological Potencial Of Hybrid Composites Based On Zinc And Alüminium Alloys Reinforced With SiC And Graphite Particles, 12th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 2011.
131. Miloradović, N. and Stojanović, B., Tribological Behaviour Of ZA27/10SiC/1Gr Hybrid Composite, Journal of the Balkan Tribological Association, 19 (2013) 97–105.

## ÖZGEÇMİŞ

Onur GÜLER, 1989 yılında Aydın'ın Nazilli ilçesinde doğdu. 2007 yılında Nazilli Lisesi'ni bitirdi. 2008 yılında, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak aynı yıl içinde K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Kasım 2015' te Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup görevine devam etmektedir. 2015 yılı içerisinde sunulmuş olan 3 adet bildirisi bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.