

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZA27 MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN
FARKLI ORTAMLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Ümit KARATAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

ŞUBAT 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZA27 MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN
FARKLI ORTAMLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Ümit KARATAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. SERDAR ASLAN

ŞUBAT 2025

Ümit Karataş tarafından hazırlanan “ZA27 MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 21.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof.Dr. Hatem AKBULUT Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Serdar ASLAN (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Mustafa AKÇİL Sakarya Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ZA27 MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete ’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(21/02/2025)

(imza)

Ümit Karataş



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlamasında, araştırılması, yürütülmesi ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım yönlendirmeleri ve tavsiyeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç.Dr. Serdar Aslan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında hoşgörü ve anlayışla yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Arş.Gör. Erhan Duru'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, değerli katkıları ve destekleriyle tez çalışmama yön veren kıymetli hocam Prof. Dr. Hatem Akbulut'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Diler Demir Çelik bünyesinde bulunan Recep Sami Yazıcı Ürün Geliştirme Merkezi Laboratuvarı'nda yardımlarını esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ek olarak maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve canım eşime çok teşekkür ederim.

Ümit Karataş



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ÇİNKO ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	3
2.1. Çinko- Alüminyum Alaşımlarının Tarihçesi	3
2.2. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı	4
2.3. Çinko-Alüminyum Özellikleri	5
2.4. Çinko-Alüminyum Mekanik Özellikleri	6
2.5. Çinko-Alüminyum Aşınma Direnci	7
3. KOMPOZİT MALZEMELER	9
3.1. Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması	10
3.1.1. Matris malzemesine göre gruplandırma	10
3.1.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMC'ler)	10
3.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMC'ler)	10
3.1.4. Seramik Matrisli Kompozitler (CMC'ler)	10
3.1.5. Karbon-Karbon Kompozitler	11
3.2. Takviye Malzemesinin Şekline Göre Sınıflandırma	11
3.2.1. Elyaf takviyeli Kompozitler	11
3.2.2. Whisker takviyeli Kompozitler	11
3.2.3. Partikül takviyeli Kompozitler	11
3.2.4. Tabakalı Kompozitler	11
3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin (MMC'ler) Üretim Yöntemleri	12
3.3.1. Katı-faz üretim yöntemleri	12
3.3.1.1. Difüzyonla bağlama	12
3.3.1.2. Toz Metalurjisi (TM)	12
3.3.2. Sıvı-faz üretim yöntemleri	13
3.3.2.1. Sıvı-metal infiltrasyonu	13
3.3.2.2. Püskürtme (Spray deposition)	14
3.3.2.3. Karıştırılmalı döküm	15
3.3.2.4. Kompo-döküm	16
3.3.2.5. Reaktif (In-Situ) yöntem	17
3.3.2.6. Sıkıştırılmalı döküm	18
3.3.3. Buhar-faz üretim yöntemleri	19
3.3.3.1. Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)	19

3.3.3.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD).....	19
3.4. Takviye Elemanları	20
3.4.1. Silisyum Karbür (SiC).....	20
3.4.2. Grafit	21
4. TRİBOLOJİ.....	23
4.1. Tribolojinin Diğer Bilim Dalları ile İlişkisi.....	24
4.2. Sürtünme.....	24
4.3. Aşınma.....	25
4.3.1. Adeziv aşınma	26
4.3.2. Abraziv aşınma.....	27
4.3.3. Yorulma aşınması.....	27
4.3.4. Korozyon aşınması.....	27
5. DENEYSEL ÇALIŞMLAR.....	29
5.1. Kompozit ve Hibrit Malzemelerin Üretimi	29
5.2. Karakterizasyon İncelemeleri.....	32
5.2.1. Sertlik deneyleri	32
5.2.2. Aşınma deneyleri.....	33
5.2.3. Yüzey analizi.....	33
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	35
6.1. ZA27 Alaşımı ve Kompozitlerin Mikro Yapı İncelemesi	35
6.2. Sertlik Sonuçları	38
6.3. Aşınma Deney Sonuçları	39
6.3.1. Grafit ilavesinin sürtünme katsayısı değerlerine etkisi	39
6.3.2. Grafit ilavesinin aşınmaya etkisi	42
6.3.3. Yükün ve ortamın aşınmaya etkisi	43
6.4. Profilometre Sonuçları.....	44
6.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi	47
6.5.1. ZA27 alaşımının aşınma SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	47
6.5.2. STK aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	51
6.5.3. HTK aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi	55
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
7.1. Sonuçlar.....	81
7.2. Öneriler.....	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan standart
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
F	: Kuvvet
Gr	: Grafit
HKM	: Hibrit kompozit malzeme
MMK	: Metal matriksli kompozit
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiC	: Silisyum Karbür
STK	: SiC takviyeli kompozit
ZA	: Çinko-alüminyum alaşımı
μ	: Sürtünme Katsayısı



SİMGELER

P	: Kuvvet
μ	: Sürtünme Katsayısı
μ_k	: Dinamik sürtünme katsayısını
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı





TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Çinko alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri [23].	6
Tablo 2.2. Çinko alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [23].	7
Tablo 6.1. 3N yük altında kuru ve yağlı ortamda aşınan yüzeylerin profilometresi. 45	
Tablo 6.2. 5N yük altında kuru ve yağlı ortamda aşınan yüzeylerin profilometresi. 46	
Tablo 6.3. Numunelerin aşınma iz genişliklerinin farklı yükler altında ortama göre yüzdesel değişimi (%).	46



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı.....	4
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerinin takviye bileşenine göre sınıflandırılması. a) elyaf takviyeli, b) whisker takviyeli, c) partikül takviyeli, d) tabakalı kompozitler	11
Şekil 3.2. Toz metalurjisi üretim yöntemi	13
Şekil 3.3. Sıvı metal infiltrasyon yöntemiyle üretimin şemasal gösterimi.	14
Şekil 3.4. Püskürtme yöntemiyle kompozit malzeme üretiminin şekilsel gösterimi.	15
Şekil 3.5. Vortex metoduyla kompozit malzeme üretimi.	16
Şekil 3.6. Kombo döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretimi.	17
Şekil 3.7. Sıkıştırma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi.	19
Şekil 3.8. Grafitin yapısı.	22
Şekil 4.1. Temel aşılma mekanizmaları, a) adhezif aşınma, b) abrazif aşınma c) yorulma aşınması, d) korozyon aşınması	26
Şekil 5.1. Struers Labotom-5 kesme cihazı.	30
Şekil 5.2. Struers Tegramin-25 zımparalama ve parlatma cihazı.	31
Şekil 5.3. ZEISS – Imager.M2m optik mikroskobu.	31
Şekil 5.4. HITACHI SU7000 taramalı elektron mikroskobu.	32
Şekil 5.5. Dıgirock makrosertlik cihazı.	32
Şekil 5.6. CSM Instruments Tribometer aşınma cihazı.	33
Şekil 5.7. KLa Tencor P6 profilometre cihazı.	33
Şekil 6.1. ZA27 alaşımı optik mikroskop görüntüsü 100X.	35
Şekil 6.2. SiC Takviyeli Kompozit 100X.	36
Şekil 6.3. %2.5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.	36
Şekil 6.4. %5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.	37
Şekil 6.5. %7.5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.	37
Şekil 6.6. %10 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.	38
Şekil 6.7. Numunelerin makro sertlik değerleri (HB).	39
Şekil 6.8. Kuru ortamda 3N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.	41
Şekil 6.9. Kuru ortamda 5N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.	41
Şekil 6.10. Yağlı ortamda 3N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.	41
Şekil 6.11. Yağlı Ortamda 5N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.	42
Şekil 6.12. Alaşım, kompozit ve hibrit kompozitlerine ait hacim kaybı grafiği.	43
Şekil 6.13. Kuru ortamda aşınma hızı a) 3N yük altında b) 5N yük altında.	44
Şekil 6.14. Yağlı ortamda aşınma hızı a) 3N yük altında b) 5N yük altında.	44
Şekil 6.15. ZA27 Alaşımına kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	47
Şekil 6.16. ZA27 Alaşımına yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	48
Şekil 6.17. ZA27 Alaşımına kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	49

Şekil 6.18. ZA27 Alaşımına yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	50
Şekil 6.19. STK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	52
Şekil 6.20. STK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	52
Şekil 6.21. STK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	53
Şekil 6.22. STK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	54
Şekil 6.23. %2,5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	56
Şekil 6.24. %2,5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	57
Şekil 6.25. %2,5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	58
Şekil 6.26. %2,5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	59
Şekil 6.27. %5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	61
Şekil 6.28. %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	62
Şekil 6.29. %5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	64
Şekil 6.30. %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	65
Şekil 6.31. %7.5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	68
Şekil 6.32. %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	69
Şekil 6.33. %7.5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	71
Şekil 6.34. %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	72
Şekil 6.35. %10 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	75
Şekil 6.36. %10 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	76
Şekil 6.37. %10 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	78
Şekil 6.38. %10 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.	79

ZA27 MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI ORTAMLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Mühendislik uygulamalarında artan talepler, daha dayanıklı ve yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Geleneksel mühendislik malzemelerinin aşınma direnci ve mekanik özellikleri belirli sınırlar içerisinde kalmakta, bu da yeni nesil kompozit malzemelerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada, ZA27 çinko-alüminyum alaşımı matris olarak kullanılarak alaşım, kompozit ve hibrit kompozitler üretilmiş ve farklı ortamlarda aşınma davranışları incelenmiştir.

Tez kapsamında, ZA27 alaşımına %20 oranında silisyum karbür (SiC) eklenerek kompozit malzemeler üretilmiş ve farklı oranlarda grafit (Gr) takviyesi ile hibrit kompozitler elde edilmiştir. Takviye malzemelerinin homojen dağılımını sağlamak amacıyla vorteks-sıkıştırma döküm yöntemi tercih edilmiştir. Üretilen numuneler, kuru ve yağlı ortamlarda 3N ve 5N yükler altında aşınma testlerine tabi tutulmuş, sürtünme katsayısı ve aşınma davranışları incelenmiştir. Testler, ball-on-disc yöntemi kullanılarak 1000 metre mesafede, 0,1 m/s hızla ve alümina (Al_2O_3) aşındırıcı bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile analiz edilmiş, ayrıca üretilen malzemelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Aşınma sonrası yüzey pürüzlülükleri profilometre ile ölçülerek aşınma iz genişlikleri ve aşınma yüzeylerinin detaylı görüntüleri elde edilmiş değerlendirilmiştir.

DeneySEL sonuçlar, SiC takviyesinin malzemenin yük taşıma kapasitesini ve sertliğini artırdığını, grafit ilavesinin ise sürtünme katsayısını düşürdüğünü göstermiştir. Özellikle %10 grafit içeren hibrit kompozit, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci ile en iyi performansı sergilemiştir. Ayrıca, kuru ortamda adeziv ve abraziv aşınma mekanizmalarının, yağlı ortamda ise daha hafif aşınma mekanizmalarının etkili olduğu gözlemlenmiştir. Profilometre incelemeleri, grafit içeriğinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün azaldığını göstermiştir.

Bu çalışma, ZA27 matrisli hibrit kompozitlerin aşınma direnci gerektiren endüstriyel uygulamalar için uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Yapılan aşınma testleri, SiC takviyesinin malzemenin sertlik ve yük taşıma kapasitesini artırdığını, grafit ilavesinin ise sürtünme katsayısını düşürerek aşınma direncini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle %10 grafit içeren hibrit kompozitler hem kuru hem de yağlı ortamda en iyi performansı sergilemiştir. Gelecekte farklı üretim yöntemleri, test koşulları ve çevresel faktörler incelenerek, bu malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığı artırılabilir ve mühendislik uygulamalarındaki potansiyeli genişletilebilir.



INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF ZA27 MATRIX HYBRID COMPOSITE MATERIALS IN DIFFERENT ENVIRONMENTS

SUMMARY

The increasing demands in engineering applications have rapidly raised the need for innovative materials. The mechanical, thermal, and chemical limitations of traditional materials often fall short, leading to the search for new materials. This need has heightened interest in composite materials that combine properties such as high strength, lightness, durability, and longevity.

In this study, the ZA27 zinc-aluminum alloy was selected as the matrix material. ZA27 stands out with its low melting point, high tensile strength, excellent castability, and corrosion resistance. To improve the properties of this alloy, 20% silicon carbide (SiC) reinforcement was added, and hybrid composite materials containing varying amounts of graphite (Gr) were produced. The vortex-compression casting method, which ensures homogeneous distribution of reinforcement materials and enhances casting quality, was employed.

Wear tests were conducted on the produced samples in dry and lubricated environments under 3N and 5N loads over a distance of 1000 meters at a constant speed of 0.1 m/s using the pin-on-disk method with alumina (Al_2O_3) as the abrasive. After the tests, surface roughness was measured using a profilometer, wear traces were imaged with a scanning electron microscope (SEM), and point analyses were performed using energy dispersive spectroscopy (EDS). Test results showed that SiC reinforcement increased the load-carrying capacity of the material, while graphite supplementation provided a lubricating effect by reducing the coefficient of friction. The hybrid composite with 10% graphite reinforcement exhibited the best performance in both dry and lubricated conditions, standing out with a low coefficient of friction and high wear resistance.

The types of wear observed in ZA27 hybrid composites varied depending on the test conditions and material combinations used. Generally, adhesive wear and abrasive wear were more prominent in dry test environments. Adhesive wear occurred due to material transfer or microscopic particle detachment caused by high friction between contact surfaces. This was largely mitigated by the addition of SiC reinforcement, which enhanced load-carrying capacity through increased hardness, and graphite, which reduced metal-to-metal contact by providing a lubricating effect.

Abrasive wear, on the other hand, resulted from the abrasive action of the alumina (Al_2O_3) disk during testing. This type of wear was significantly minimized by the wear resistance contribution of SiC reinforcement. In lubricated test environments, the lubricating effect of graphite and the protective film formed by the lubricant led to a noticeable reduction in wear rates. In these conditions, milder wear mechanisms, such as thin film sliding or micropitting, were predominantly observed. The combined effects of SiC's hardness and resistance-enhancing properties and graphite's friction-

reducing characteristics enabled the hybrid composites to exhibit superior performance against all types of wear.

The tribological properties of ZA27-based hybrid composites were analyzed in detail. The tribological system consists of the main material (ZA27 hybrid composites), the counter material (metal ball), the lubricant (if applied), the load (3N or 5N), motion, and environmental conditions. The synergistic effects of SiC and graphite reinforcements significantly improved the tribological performance of the hybrid composites.

The effects of SiC and graphite in hybrid composites play a critical role in enhancing the mechanical and tribological performance of the material. SiC, with its high hardness and thermal stability, emerges as a reinforcement material that increases the wear resistance and load-carrying capacity of the matrix material. When integrated into the ZA27 matrix, SiC particles form a micro-level barrier on the contact surface, slowing down the wear process. This enhances the material's durability even under challenging operating conditions. On the other hand, graphite significantly reduces the coefficient of friction in the tribological system due to its solid lubricating properties. Graphite particles form a thin layer between surfaces, minimizing metal-to-metal contact and reducing surface damage caused by friction. This effect is particularly evident in dry condition tests. In lubricated environments, the lubricating effect of graphite supports the reduction in the coefficient of friction and plays a crucial role in extending the material's lifespan. The synergistic effects of SiC and graphite enable ZA27 hybrid composites to exhibit superior properties in terms of both mechanical strength and tribological performance. The contribution of SiC to high wear resistance combined with the low friction coefficient provided by graphite makes these materials an ideal solution for a wide range of applications. It was also observed that an increase in graphite content led to a reduction in the coefficient of friction and less surface damage. This combination makes ZA27 hybrid composites a reliable alternative for demanding industrial conditions.

The mechanical and tribological properties of the ZA27 alloy combine high wear resistance with a low coefficient of friction. While the solid lubricating effect of graphite minimizes surface damage, SiC particles enhance the material's durability and load-carrying capacity. These properties make ZA27-based hybrid composites highly suitable for industrial applications.

One of the greatest advantages of ZA27 hybrid composite materials is their proven suitability for various applications, tested under different conditions. In lubricated environment tests, the lubricating effect of graphite provided a significant reduction in the coefficient of friction and played a critical role in extending the material's lifespan. In dry environments, the contribution of SiC particles to wear resistance revealed the advantages of the hybrid structure under conditions where the effect of graphite diminished.

The promising tribological and mechanical properties of ZA27-based hybrid composites open the door to a variety of industrial applications where performance and efficiency are critical. In the automotive industry, these materials can be utilized in components such as gears, bearings, and brake pads, where wear resistance and a low coefficient of friction are paramount. Similarly, in aerospace applications, the lightweight yet durable nature of these composites offers the potential to reduce overall weight without compromising structural integrity. The combination of SiC's reinforcement capabilities and graphite's lubricating properties ensures reliability even

in high-stress or high-temperature environments, making these materials ideal candidates for demanding operational conditions.

Future research could delve deeper into optimizing the balance between SiC and graphite content to tailor the material's performance for specific applications. Investigations into alternative manufacturing techniques, such as additive manufacturing or powder metallurgy, could further enhance the microstructural properties and uniformity of the composites. Additionally, long-term environmental testing, including high-temperature and corrosive conditions, would provide invaluable insights into the durability and sustainability of ZA27-based hybrid composites. By addressing these aspects, the potential for these advanced materials to revolutionize a range of industries can be fully realized.

In conclusion, this study demonstrated that ZA27 matrix hybrid composites are a suitable alternative for challenging tribological environments. These materials show promising potential for use in industrial fields such as automotive, aerospace, and machinery components due to their remarkable wear and friction performance. Future studies may reveal that different production techniques and reinforcement configurations could further optimize the properties of these materials. Additionally, long-term durability and energy-saving potential can be explored on a broader scale.



1. GİRİŞ

Geleneksel malzemeler, insan ihtiyaçlarının hızla artması ve teknolojinin gelişmesi karşısında beklenen performansı sunmakta yetersiz kalmaktadır. Bu durum, malzeme bilimcilerini her zaman yeni ve yenilikçi malzeme arayışlarına yönlendirmiştir. Ancak bu süreçte malzeme seçiminde yeryüzünde bulunabilirlik, ekonomik uygunluk ve teknik üretilebilirlik gibi kriterler ön plana çıkmaktadır [1].

Zamak alaşımları, temel olarak saf çinkoya alüminyum ve bakır eklenmesiyle elde edilen, teknik özellikleri sayesinde çok farklı uygulamalarda tercih edilen bir malzeme grubudur. Zamak terimi, içeriğindeki elementlere atıfta bulunarak "Zink" (Çinko), "Aluminium" (Alüminyum), "Magnesium" (Magnezyum) ve "Kupfer" (Bakır) kelimelerinin Almanca karşılıklarının baş harflerinden türetilmiştir [2].

Zamak alaşımlarının en önemli avantajları, seri üretime uygunlukları, yüksek korozyon direnci, döküm sıcaklıklarında gösterdikleri yüksek akışkanlık ve karmaşık şekilleri dahi kolayca alabilme kabiliyetidir. Bu özelliklerinden dolayı, otomotiv, elektrik-elektronik ve tüketici ürünleri gibi birçok sektörde tercih edilen bir hammadde olarak öne çıkmaktadır [3].

Zamak alaşımları ilk kez 1929 yılında New Jersey Zinc Cooperation tarafından geliştirilmiştir. Alaşımların sahip olduğu bazı dezavantajlara rağmen (örneğin, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmamaları ve fiyat dalgalanmaları) sağladıkları mekanik dayanım, korozyon direnci ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Zamak alaşımlarının temel bileşenleri çinko, alüminyum, bakır ve magnezyumdur. Alaşımın ana unsuru olan saf çinko, yüksek korozyon direnci sağlamasına rağmen düşük mekanik özellikleri nedeniyle tek başına kullanıma elverişli değildir. Bunun yanı sıra, alüminyum, alaşımın mekanik dayanımını artırır ve ergimiş halde akışkanlığını iyileştirir. Bakır, sertlik ve dayanıklılığı artırırken boyutsal kararlılığı olumsuz etkileyebilir. Magnezyum ise alaşımın mukavemetini artırmakla birlikte fazla miktarda bulunduğunda akışkanlığı azaltabilir [5,6].

Zamak döküm alaşımları, alüminyum oranına göre farklılaşır. ZA27 alaşımı, yaklaşık %27 oranında alüminyum içerir ve zamak ailesinin öne çıkan bir üyesidir. Üstün mekanik ve tribolojik özellikleriyle dikkat çeken ZA27, düşük maliyeti sayesinde yatak ve fırça uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, dökme alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek çekme dayanımı sunarak yüksek mukavemetli alaşımlar arasında yer almaktadır [7,8].

Yüksek aşınma direnci, özgül mukavemetin yüksekliği, kolay üretilebilirlik ve ekonomik olma gibi özelliklere sahip çinko-alüminyum alaşımları, aşırı yük, yetersiz yağlama ve yüksek hız gibi zorlayıcı koşullarda dahi üstün tribolojik davranışlar sergilemektedir [9-11]. Bu nedenle, bu alaşımlar düşük hızda ve ağır yük gerektiren uygulamalarda yatak üretimi için sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca, kaymalı yatakların yanı sıra mühendislik uygulamalarında kullanılan birçok parçada da giderek daha yaygın hale gelmiştir. Örneğin, otomobillerde karbüratör parçaları, silindir kapakları, dişli kutusu kapakları, motor ayakları, biyel kolları ve jantlar gibi parçalar bu alaşımlardan üretilmektedir [12-14].

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve gelişimi, savunma, uzay ve havacılık gibi sektörlerdeki uygulamaları önemli ölçüde artırmıştır. Teknolojinin ve sanayinin hızlı gelişimi, mevcut malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yetersiz kalmasına neden olmuş ve bu durum, ekonomik ve teknolojik açıdan daha verimli alternatif malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çerçevede, kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmalar yoğunlaşmış ve sağladıkları çeşitli avantajlar sayesinde bu malzemelerin önemi giderek artmaktadır [15].

Bu tezde, ZA27 alaşımı kullanılarak yüksek aşınma direnci ve üstün sertlik özellikleri sunan SiC partikülleri ile yağlayıcı özellik taşıyan grafit partiküllerinin katkısıyla alaşım, kompozit malzeme ve hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin artan grafit (Gr) takviyesi ile farklı ortamlarda tribolojik ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

2. ÇİNKO ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1. Çinko- Alüminyum Alaşımlarının Tarihçesi

Çinko-alüminyum (ZA) alaşımları, 20. yüzyılın başlarından itibaren mühendislik ve metal işleme alanındaki yeniliklerle birlikte endüstriyel kullanımlarda yaygınlaşmıştır. Alüminyumun hafifliği, korozyona karşı direnci ve kolay işlenebilirliği ile çinkonun üstün döküm kabiliyeti ve dayanıklılığı bir araya getirilerek üretilen ZA alaşımları, özellikle hafif ve dayanıklı malzemelere olan talebin arttığı dönemlerde önemli bir seçenek olarak dikkat çekmiştir. İlk olarak 1900'lü yıllarda ticari kullanımı başlayan bu alaşımlar, özellikle otomotiv ve makine sanayisinde hafif ama dayanıklı malzeme gereksinimlerini karşılamak için tercih edilmiştir [16].

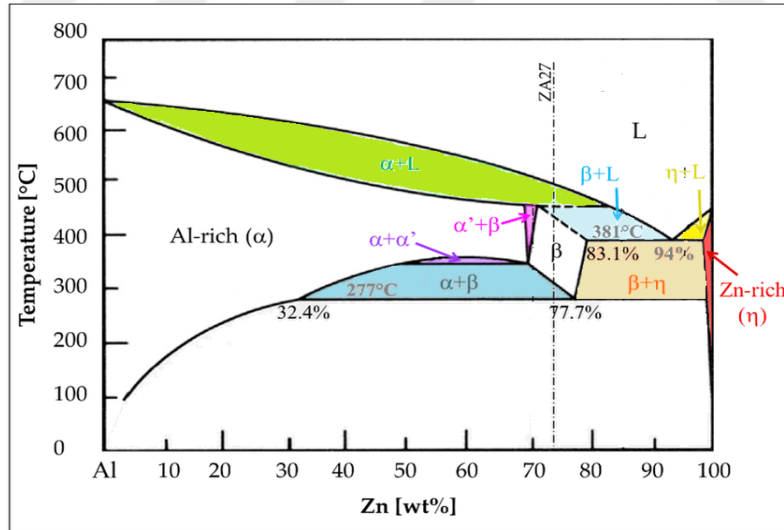
II. Dünya Savaşı sırasında hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyacın artmasıyla ZA alaşımlarının geliştirilmesi hız kazanmıştır"ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 gibi türler, yüksek mukavemet ve aşınma direnci özellikleri sayesinde dişli kutuları, yataklar ve çeşitli makine bileşenlerinde standart bir malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. 1960'lar ve 1970'lerde döküm tekniklerinde yapılan iyileştirmeler ve magnezyum, bakır ile silisyum gibi elementlerin alaşımlara eklenmesi, ZA alaşımlarının hem mekanik özelliklerini hem de korozyon direncini önemli ölçüde artırmıştır. Bu ilerlemeler, ZA alaşımlarının mühendislik alanında daha geniş bir yelpazede kullanılmasını mümkün kılmıştır [17].

1990'lı yıllardan itibaren ZA alaşımlarının teknolojik gelişimi ve araştırmalar hız kazanmış, kullanım alanları otomotiv, havacılık, elektronik ve makine sanayisi gibi sektörlere kadar genişlemiştir. Özellikle çinko-alüminyum-silisyum ve çinko-alüminyum-bakır-silisyum gibi yeni alaşım türleri, ZA alaşımlarının performansını artırarak dayanıklılık, hafiflik ve işlenebilirlik gibi özellikleri geliştirmiştir. Geri dönüştürülebilirlik özellikleri ise çevresel duyarlılığın arttığı günümüz dünyasında bu alaşımları daha cazip bir seçenek haline getirmiştir. Hafifliği, dayanıklılığı ve üstün mekanik özellikleri sayesinde ZA alaşımları, dişli kutularından motor parçalarına kadar geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır (18).

ZA alaşımları, geçmişten günümüze uzanan teknolojik gelişim süreciyle birlikte mühendislik dünyasında önemli bir yer edinmiştir. Çeşitli üretim teknikleri ve yeni kompozisyon kombinasyonları ile bu alaşımların endüstriyel önemi giderek artmaktadır. ZA alaşımlarına yönelik araştırmaların gelecekte de devam edeceği ve bu malzemelerin farklı sektörlerde daha geniş bir kullanım potansiyeline ulaşacağı öngörülmektedir (16-18).

2.2. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum alaşımlarında katılaşma aralığı ve ergime sıcaklığı, alaşımın içerdiği alüminyum oranına bağlı olarak değişir. Şekil 2.1'de görülebileceği üzere, çinko-alüminyum faz diyagramı, çinko ve alüminyum esaslı alaşımların yapısını açıklamaktadır. Bu alaşımlar, çinko veya alüminyum açısından zengin dendritlerin yer aldığı, α ve η fazlarından oluşmuş bir ötektik matris içermektedir. Diyagramda, çinkoca zengin η fazı ve alüminyumca zengin α fazı tanımlanmıştır. Alüminyum açısından zengin katı çözeltiler α , α' ve β fazlarından meydana gelir ve kafes parametrelerindeki farklılık sebebiyle α ve α' olarak adlandırılır. Yavaş bir şekilde soğutulduğunda, bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşür [19].



Şekil 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı.

ZA 27 alaşımının sıvıdan katıya dönüşümünde oluşan fazlar ve sıcaklıkları Şekil 2.1'de verilmiştir. Alaşım, soğuma sırasında sıvı fazdan katı fazlara belirli bir sırayla dönüşüm geçirir. Katılaşma süreci yaklaşık 500°C'de başlar. Bu sıcaklıkta sıvı faz (L), alüminyumca zengin α fazı ve kalan sıvı faz (L) olarak ayrışır. Sıcaklık azaldıkça sıvı fazın bileşimi sürekli olarak değişir ve çinkoca zenginleşir. Her ne kadar ZA 27 alaşımı

382°C’de gerçekleşen ötektik noktaya doğrudan temas etmese de, son katılaşılan sıvının bileşimi (%17 Al) ötektik bölgeye ulaştığı için ötektik dönüşüm gerçekleşir. 443°C’de, α fazı ile sıvı faz arasında peritektik reaksiyon meydana gelir ve β fazı oluşur. Alaşım, 275°C’ye ulaştığında, kararsız β fazı ötektoid dönüşüm geçirerek daha kararlı $\alpha + \beta$ fazlarına dönüşür. Bu dönüşüm, mikroyapının stabil hale gelmesini sağlayarak sertlik artışına neden olur. Son olarak, oda sıcaklığına kadar soğuma tamamlandığında, nihai mikroyapı $\alpha + \eta$ fazlarından oluşur.

2.3. Çinko-Alüminyum Özellikleri

Çinko-Alüminyum (ZA) alaşımları, çinko esaslı olup alüminyum, magnezyum ve bazen bakır gibi elementlerin eklenmesiyle özellikleri geliştirilen ileri mühendislik malzemeleridir. Bu alaşımlar, hafiflik, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gibi üstün fiziksel özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve makine mühendisliği gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [20].

ZA alaşımlarının yoğunluğu, tipik olarak 6,3-6,8 g/cm³ aralığında değişmektedir. Bu değer, alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek, ancak çeliğe kıyasla düşüktür. Özellikle hafiflik ve dayanıklılık dengesinin önemli olduğu uygulamalarda ZA alaşımları ön plana çıkmaktadır. Alaşımın mukavemet özellikleri, içerdiği alüminyum oranına bağlı olarak artış göstermekte olup ZA-27, 330 MPa’ya kadar çekme mukavemeti sunarak grubundaki en güçlü alaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikler, ZA alaşımlarını yüksek mukavemet gerektiren dişliler, yataklar ve motor parçaları gibi mekanik bileşenler için uygun hale getirmektedir [21].

ZA alaşımları, sert yapıları ve düşük sürtünme katsayıları sayesinde mükemmel aşınma direnci sunar. Bu durum, yüksek aşınma yüküne maruz kalan hareketli mekanik sistemlerde bu malzemelerin tercih edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda çinkonun doğal korozyon direnci, alaşımların nemli ve açık hava koşullarında uzun ömürlü olmasını desteklemektedir [22].

ZA alaşımlarının düşük ergime sıcaklıkları (370-440°C arası) ve yüksek akışkanlık özellikleri, karmaşık şekillere sahip parçaların üretiminde önemli avantajlar sunar. Bu özellikler sayesinde ince duvarlı ve detaylı döküm parçalar elde edilebilmektedir. Ayrıca, döküm sonrası işlemeye uygun olmaları, talaşlı imalat işlemleri sırasında yüzey kalitesinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, ZA alaşımlarını otomotiv

ve havacılık sektörlerinde karmaşık bileşenlerin üretimi için tercih edilen ideal bir seçenek haline getirmektedir [21].

Tablo 2.1. Çinko alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri [23].

Özellik	ZA8	ZA12	ZA27
Yoğunluk (g/cm ³)	6,3	6,2	5,0
Eritme Sıcaklığı (°C)	380	380	430
Isıl İletkenlik (W/mK)	115	120	140
Elastisite Modülü (GPa)	96	96	96

2.4. Çinko-Alüminyum Mekanik Özellikleri

ZA alaşımlarının en dikkat çekici mekanik özelliklerinden biri, yüksek çekme ve akma mukavemetidir. Çekme mukavemeti, alaşıma uygulanan maksimum gerilme kuvvetine dayanma kapasitesini ifade ederken; akma mukavemeti, plastik deformasyonun başladığı noktayı belirtir. Örneğin, ZA-8 alaşımı 410 MPa çekme mukavemetine sahipken, ZA-27 alaşımı yaklaşık 330 MPa çekme mukavemeti sunmaktadır. ZA-12 ise bu iki değer arasında yer alır ve 390 MPa çekme mukavemeti ile dengeli bir performans sergiler.

Bu değerler, ZA alaşımlarını yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda çelik veya alüminyum alaşımlarına alternatif bir malzeme haline getirmektedir. Özellikle ZA-27, hafif yapısına rağmen tatmin edici mekanik dayanımı ile dikkat çeker.

ZA alaşımlarının sertlik değerleri, genellikle Brinell sertlik testi (HB) ile ölçülmektedir. Bu alaşımlarda sertlik, bileşimdeki alüminyum ve magnezyum oranlarına bağlı olarak değişir. Alüminyum oranı arttıkça sertlik genellikle yükselirken, magnezyum oranı da sertlik üzerinde belirgin bir etki yapmaktadır. Örneğin, ZA-8 alaşımının Brinell sertlik değeri 100 HB ile yüksek bir sertlik sunarken, ZA-12 alaşımı 105 HB ile biraz daha düşük bir sertlik değerine sahiptir. ZA-27 alaşımı ise 120 HB sertlik değeri ile en düşük sertlik değerini göstermektedir. Bu sertlik farkları, her bir alaşımın kullanım alanlarını ve mekanik performansını etkileyen önemli bir faktördür.

ZA alaşımlarının yorulma dayanımı, sürekli tekrarlayan gerilmelere karşı dayanıklılığını ifade eder. ZA-27, hafif ve dayanıklı yapısı sayesinde yüksek yorulma dayanımı sunar. Yorulma dayanımı, otomotiv ve havacılık gibi dinamik yüklemelerin sık olduğu uygulamalarda büyük önem taşır.

Tablo 2.2. Çinko alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [23].

Özellik	ZA8	ZA12	ZA27
Çekme Dayanımı (MPa)	330	380	410
Akma Dayanımı (MPa)	280	310	360
Sertlik (Brinell, HB)	100	105	120
Uzama (%)	1-3	2-4	4-6

Yapılan araştırmalar, çinko-alüminyum esaslı alaşımların sertlik ve mukavemetini artırmanın en etkili yolunun alaşım elementlerinin eklenmesi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük oranlarda eklenen bakır, magnezyum ve silisyum gibi elementler, bu alaşımların mukavemetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bakırın %2 seviyesine kadar eklenmesi, alaşımların mukavemet, korozyon, aşınma ve sürtünme direncini artırırken, aynı zamanda boyutsal kararsızlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bakır içeren alaşımlarda, faz dönüşümleri nedeniyle oluşan boyutsal değişiklikler, ısıtılma işlem ve uygun alaşım elementleri eklenerek düzeltilmeye çalışılmaktadır. Çinko-alüminyum-silisyum alaşımları ise yüksek aşınma direnci sağlarken, mukavemet değerleri bakır içeren alaşımlardan daha düşük olmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla son yıllarda dördü çinko-alüminyum-bakır-silisyum yatak alaşımları geliştirilmiş ve %2'yi aşan bakır eklemelerinin mukavemeti azalttığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, düşük oranda silisyum katkısı, bakır ile aynı düzeyde olmasa da aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirmiştir. [24]

2.5. Çinko-Alüminyum Aşınma Direnci

ZA alaşımları, özellikle yüksek aşınma direnci ile tanınır ve bu özellikleri, onları otomotiv ve makine mühendisliği gibi sektörlerde tercih edilen malzemeler haline getirmektedir. Çinko-alüminyum alaşımlarında aşınma direnci, alaşımın kimyasal bileşimi, sertlik değeri ve mikro yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle alüminyum ve magnezyum gibi elementlerin eklenmesi, bu alaşımların mekanik özelliklerini geliştirirken aşınma direncini de artırmaktadır. ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 gibi farklı ZA alaşımlarının aşınma direnci, bileşimdeki alüminyum oranı arttıkça iyileşir. Alüminyum, sert ve aşınmaya dayanıklı bir yapıya sahip olup, alaşımın yüzeyinde oluşan oksit tabakası da aşınma karşısında ekstra koruma sağlar [25].

Ayrıca, ZA alaşımlarında aşınma direnci üzerinde etkili bir diğer faktör de magnezyum ve bakır gibi ek elementlerin varlığıdır. Düşük orandaki bakır katkıları, alaşımın sürtünme katsayısını azaltarak aşınmayı önlerken, silisyum ve magnezyum katkıları

da özellikle sıcak ve yüksek gerilim altında üstün aşınma performansı sunar. Bu özellik, ZA alaşımlarını dişli kutuları, yataklar ve diğer sürtünme yüküne maruz kalan parçalarda kullanmak için ideal hale getirir [25].

ZA alaşımlarının aşınma özellikleri, genellikle tribolojik testlerle belirlenir ve bu testler, malzemenin yüksek sıcaklık, nem ve sürtünme koşulları altında nasıl performans gösterdiğini ortaya koyar. Bu testlerde, ZA8 ve ZA12'ye göre ZA-27 alaşımı genellikle daha yüksek aşınma direnci sergiler. Bununla birlikte, aşınma direncinin yanı sıra, bu alaşımların işlenebilirlik ve döküm kabiliyeti de büyük avantaj sağlamaktadır. Yüksek akışkanlıkları ve düşük ergime sıcaklıkları, ZA alaşımlarının karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde tercih edilmesine olanak tanır [25].

Sonuç olarak, ZA alaşımları, güçlü aşınma direncine sahip olmalarıyla öne çıkar ve endüstriyel uygulamalarda dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü artıran önemli bir özellik sunar.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip birden fazla malzemenin birleşimiyle oluşturulan mühendislik ürünleridir. Bu malzemeler, bireysel bileşenlerin zayıf yönlerini azaltarak veya tamamen ortadan kaldırarak, daha üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sunar. Kompozitlerin en büyük avantajı, tasarım esnekliğidir; bu sayede, hafiflik, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve korozyon direnci gibi özelliklerin tek bir malzemede birleştirilmesi mümkündür.[26]

Kompozit malzemeler genellikle iki ana bileşenden oluşur: bir matris ve bir takviye. Matris, bileşenleri bir arada tutarak yapısal bütünlüğü sağlarken; takviye, malzemenin dayanıklılık, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerini artırır. Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesine göre polimer, seramik ve metal matrisli olmak üzere farklı kategorilere ayrılabilir [26-29].

Son yıllarda, gelişmiş üretim teknikleri ve yenilikçi mühendislik yaklaşımları sayesinde, kompozit malzemeler otomotiv, havacılık, savunma sanayii, inşaat ve biyomedikal gibi birçok endüstride geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Özellikle metal matrisli kompozitler (MMC'ler), üstün mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları ve tribolojik özellikleri nedeniyle diğer kompozit türlerinden ayrılır. MMC'ler, metal matrislerin sağlamlığı ile takviye malzemelerinin (genellikle seramik veya karbon) hafiflik ve mukavemet özelliklerini birleştirerek yüksek performans gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunar [30].

Metal Matrisli Kompozitler (MMC'ler), geleneksel malzemelere kıyasla üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sunarak modern mühendislik uygulamalarında önemli bir yer edinmiştir. MMC'lerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, yüksek mukavemet ve sertlik değerleridir. Bu malzemeler, matris metallerin esneklik ve dayanıklılığını, takviye malzemelerinin sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı ile birleştirir. Özellikle, yüksek sıcaklıklarda şekil ve dayanım kaybı göstermemeleri, onları havacılık ve uzay sektöründe benzersiz kılar. Ayrıca, MMC'ler, mükemmel aşınma direnci ve düşük termal genleşme katsayılarıyla öne çıkar; bu özellikler, motor parçaları, fren diskleri ve tribolojik uygulamalarda kullanımını yaygınlaştırır.

MMC'lerin bir diğ er avantajı, d üş uk yoğ unluklu takviye malzemelerinin kullanımı sayesinde geleneksel metal malzemelere g ore daha hafif olmalarıdır. Hafiflik ve y uksek mukavemet kombinasyonu, otomotiv sektöründe yakıt tasarrufu ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından b y uk önem taşır. MMC'lerin üstün korozyon dayanımı ve kimyasal kararlılığı, bu malzemelerin denizcilik ve kimya sektörlerinde kullanımını ideal kılmaktadır. Tüm bu  zellikler, MMC'lerin y uksek performans gerektiren mühendislik uygulamaları için önemli bir seçenek haline gelmesine katkıda bulunmaktadır [26-30].

3.1. Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması

Kompozit malzemelerin gruplandırılması, bileşen türüne, kullanılan matris malzemesine, takviye elemanın formuna ve uygulama alanlarına g ore yapılabilir. Bu sınıflandırma hem malzeme özelliklerini anlamak hem de doğ ru uygulama için uygun kompozit malzemeyi belirlemek açısından kritik bir rol oynamaktadır [30].

3.1.1. Matris malzemesine g ore gruplandırma

Kompozit malzemeler, matris malzemesinin türüne g ore dört ana gruba ayrılır:

3.1.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMC'ler)

Metal matrisler, genellikle alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metallerden yapılmaktadır. Metal matrisli kompozitler (MMC'ler), y uksek sıcaklıklara dayanıklılık, aşınma direnci ve üstün mekanik mukavemet gibi özellikler sunar. Bu sebeple, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir.

3.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMC'ler)

Polimer matrisli kompozitler, epoksi, polyester veya termoplastik gibi polimerlerden oluşur. Hafiflik, kolay işlenebilirlik ve y uksek dayanım gibi avantajları sayesinde inşaat, otomotiv ve spor ekipmanlarında yaygın olarak kullanılır.

3.1.4. Seramik Matrisli Kompozitler (CMC'ler)

Y uksek sıcaklık direnci ve kimyasal kararlılıklarıyla tanınan seramik matrisli kompozitler, özellikle t rb n kanatları, roket motorları gibi ısıya maruz kalan uygulamalarda ideal bir çözüm olarak seçilmektedir.

3.1.5. Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon matris ve karbon takviye elemanlarından oluşan bu kompozitler, üstün termal ve mekanik özellikleri sayesinde uzay ve savunma sanayi için ideal bir seçenek sunmaktadır.

3.2. Takviye Malzemesinin Şekline Göre Sınıflandırma

Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemede, takviye malzemesinin şekli önemli bir etkiye sahiptir. Takviye bileşeninin şekline göre kompozitler şu şekilde sınıflandırılabilir: [26-30]

3.2.1. Elyaf takviyeli Kompozitler

Sürekli veya kesikli elyafların kullanıldığı bu tür kompozitler, yüksek mukavemet ağırlık oranı sunar. Başta havacılık ve otomotiv endüstrileri olmak üzere yaygın olarak tercih edilmektedir.

3.2.2. Whisker takviyeli Kompozitler

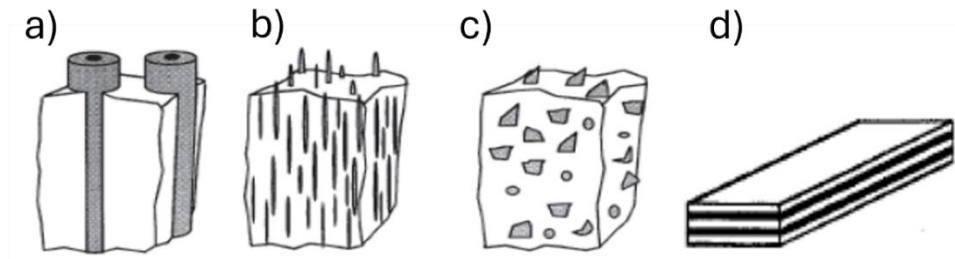
Çok ince ve kısa kristallerden oluşan whisker takviyeli kompozitler, yüksek sertlik ve dayanım sağlar.

3.2.3. Partikül takviyeli Kompozitler

Takviye bileşeni olarak seramik veya metal partiküllerinin kullanıldığı bu kompozitler, izotropik özellikleri ve düşük maliyet avantajı ile bilinir.

3.2.4. Tabakalı Kompozitler

Değişik özelliklere sahip malzemelerin katmanlar halinde bir araya getirilmesiyle üretilen bu kompozitler, özellikle mukavemet ve rijitliğin belirli yönlere optimize edilmesi gerektiği durumlarda kullanılır.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerinin takviye bileşenine göre sınıflandırılması. a) elyaf takviyeli, b) whisker takviyeli, c) partikül takviyeli, d) tabakalı kompozitler [26, 30]

3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin (MMC'ler) Üretim Yöntemleri

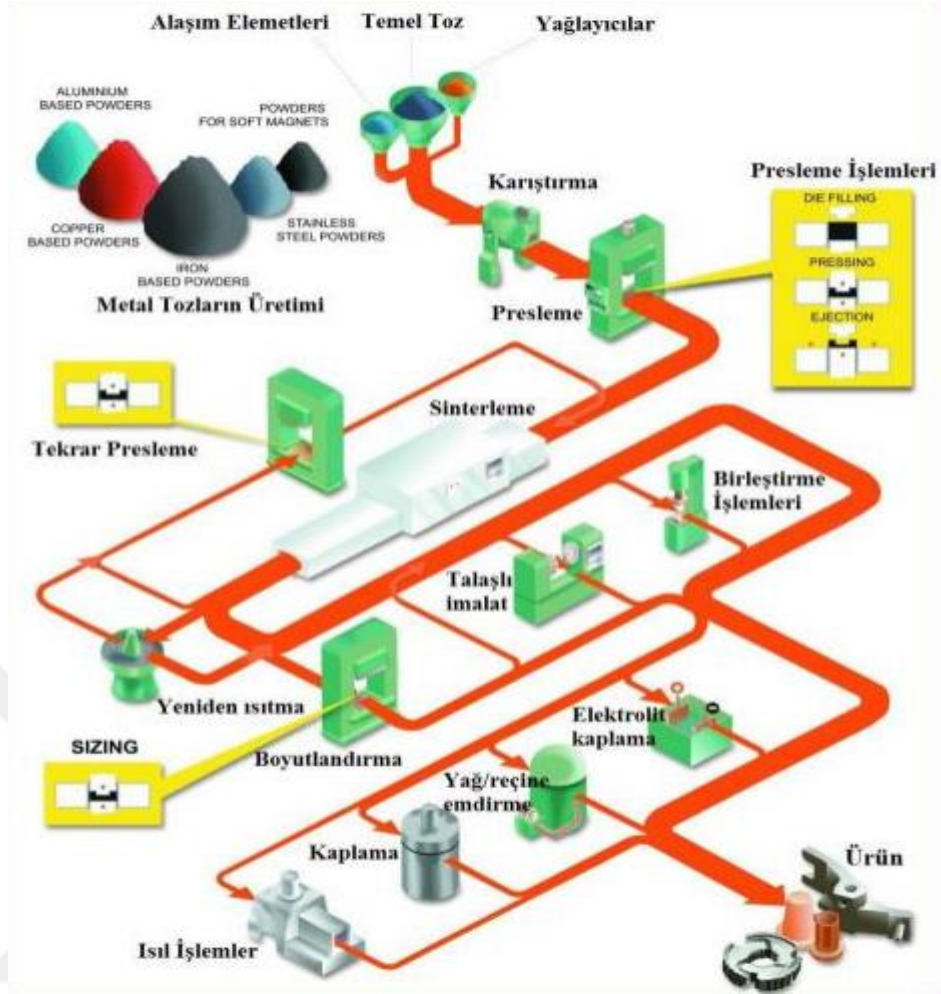
3.3.1. Katı-faz üretim yöntemleri

3.3.1.1. Difüzyonla bağlama

Bu teknik, malzeme yüzeylerinin yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirilerek atomların yüzeyler arasında yayılmasıyla güçlü bir bağ meydana getirir. Erime olmadan gerçekleşen bu işlem, özellikle metal matrisli kompozitlerde matris ile takviye elemanları arasında yüksek mekanik dayanım sağlayan bir bağ yapısı oluşturur. Kimyasal dolgu malzemesi gerektirmemesi, heterojen malzemeleri birleştirebilmesi ve düşük şekil bozulması gibi avantajlarıyla dikkat çeker. Ancak uzun işlem süresi ve yüzey hazırlığının hassasiyet gerektirmesi, yöntemin dezavantajları arasında yer alır. Havacılık, uzay, otomotiv ve tıp gibi alanlarda yüksek performanslı kompozit malzeme üretiminde sıkça tercih edilmektedir. SiC (silisyum karbür) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, uçak motorlarının termal koruma panellerinde kullanılmak üzere bu yöntemle üretilmektedir [31].

3.3.1.2. Toz Metalurjisi (TM)

Toz metalurjisi, metal tozlarının çeşitli işlemlerle bir araya getirilerek katı bir malzeme oluşturulmasını sağlayan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Bu süreç, metal tozlarının öncelikle sıkıştırılarak bir kalıp içinde şekillendirilmesi ve ardından yüksek sıcaklıkta sinterleme işlemiyle bağlanmasını içerir. Erimeye gerek kalmadan atomik düzeyde bağlanma sağlandığı için malzeme özelliklerinde mükemmel bir homojenlik elde edilir. Toz metalurjisi, kompleks geometrilere sahip parçaların üretiminde, malzeme kaybını minimumda tutması ve yüksek hassasiyet sunması nedeniyle tercih edilir. Otomotiv, havacılık ve elektronik sektörlerinde sıkça kullanılan bu yöntem, özelleştirilmiş malzemelerin düşük maliyetle üretilmesine olanak tanır. Örneğin, titanyum matrisli bir kompozitin, bor karbür (B₄C) takviyesiyle üretilmesi, zırh malzemelerinde yüksek mukavemet ve sertlik sağlamak için bu yöntemle yapılır [31].

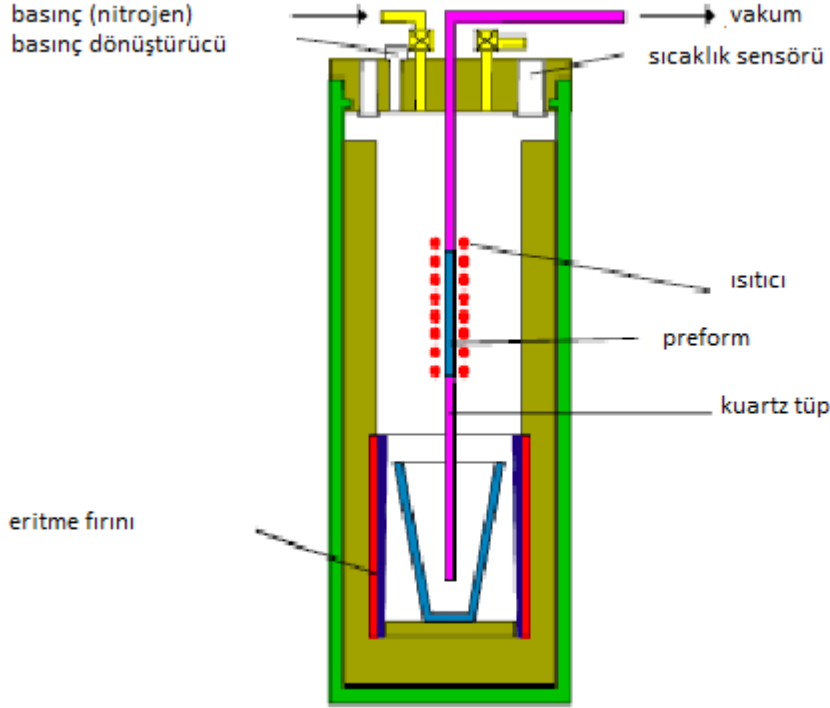


Şekil 3.2. Toz metalurjisi üretim yöntemi [32].

3.3.2. Sıvı-faz üretim yöntemleri

3.3.2.1. Sıvı-metal infiltrasyonu

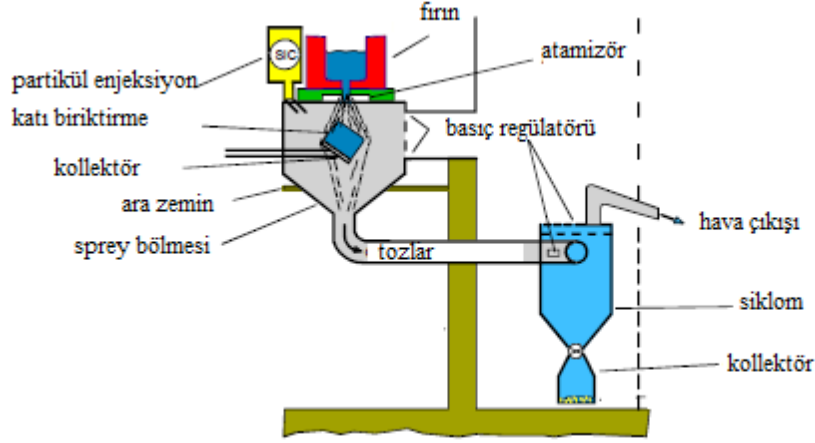
Sıvı metal infiltrasyonu, gözenekli bir yapıya sahip malzemelerin sıvı metal ile doldurularak kompozit bir yapı oluşturulduğu bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, öncelikle seramik, karbon veya metal tozlarından oluşan gözenekli bir önform hazırlanır. Daha sonra bu önform, sıvı metalin gözeneklere nüfuz etmesi için uygun sıcaklık ve basınç koşulları altında işlem görür. İnfiltrasyon sırasında sıvı metal, gözenekleri doldurarak yüksek mekanik dayanım, sertlik ve termal iletkenlik gibi üstün özellikler kazandırır. Bu yöntem, özellikle alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılmakta olup, havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans talep eden sektörlerde etkili bir çözüm sunmaktadır [33].



Şekil 3.3. Sıvı metal infiltrasyon yöntemiyle üretimin şemasal gösterimi [35].

3.3.2.2. Püskürtme (Spray deposition)

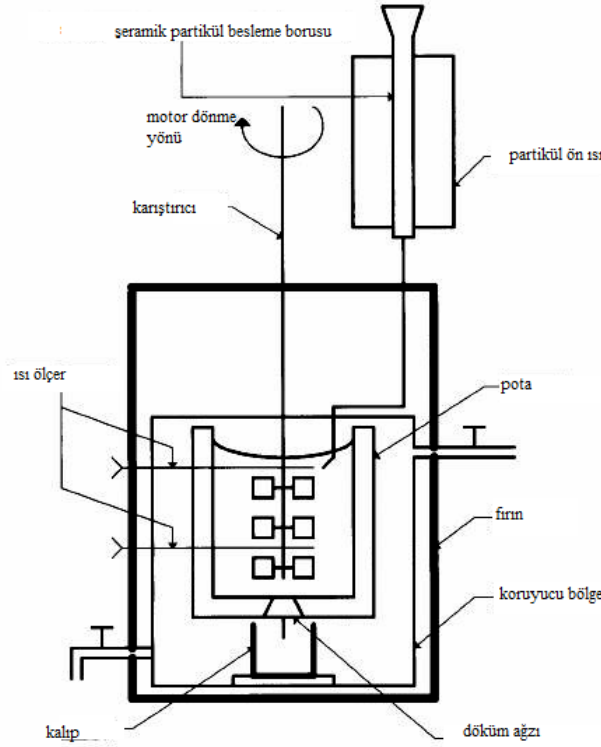
Püskürtme yöntemi, metal veya alaşım tozlarının bir yüzeye yüksek hızda püskürtülerek kaplama veya kompozit malzeme üretimi amacıyla uygulandığı bir yöntemdir. Bu süreçte, tozlar bir gaz akışı ile hızlandırılır ve yüksek sıcaklık altında eritilerek hedef yüzeye çarptığında birikerek katman oluşturur. Termal püskürtme, plazma püskürtme ve soğuk püskürtme gibi farklı teknikleri içerir. Bu yöntem, yüzeylerin aşınma direncini artırmak, korozyonu önlemek veya termal bariyer oluşturmak için kullanılır. Havacılık, enerji, otomotiv ve tıp gibi sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahip olan püskürtme yöntemi, yüksek kaliteli ve özelleştirilmiş yüzey kaplamaları üretmek için etkili bir tekniktir. Alüminyum ve bor nitrür (BN) kombinasyonu, hafif ve yüksek mukavemet gerektiren otomotiv parçalarında bu yöntemle üretilir [33-34].



Şekil 3.4. Püskürtme yöntemiyle kompozit malzeme üretiminin şekilsel gösterimi [35].

3.3.2.3. Karıştırılmal döküm

Karıştırılmal döküm (Stir Casting), metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan etkili ve ekonomik bir yöntemdir. Bu süreçte, seçilen metal alaşımı önce eritilir ve sıvı hale getirilir. Ardından, takviye malzemeleri (örneğin, seramik partikülleri, SiC gibi güçlendiriciler) sıvı metalin içine eklenir ve yüksek hızda karıştırılır. Karıştırma işlemi, takviye malzemelerinin sıvı metal içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Karıştırmanın ardından, elde edilen metal-takviye karışımı uygun kalıplara dökülerek katılaşması sağlanır. Bu aşamada, sıvı metalin düzgün şekilde soğuması ve takviye malzemelerinin matrisle birleşmesi, kompozit malzemenin istenilen mekanik özellikleri kazanmasını sağlar. Karıştırılmal döküm, düşük maliyetli ve yüksek üretim hızı sunan bir yöntemdir ve otomotiv, havacılık, savunma gibi sektörlerde yüksek performanslı, dayanıklı ve hafif kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla tercih edilir. Ancak, takviye malzemelerinin homojen dağılımı ve sıvı metalin düzgün şekilde soğuması gibi faktörler, üretim sürecinde dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır. Bu yöntem, kompozit malzemelerin dayanıklılığını, sertliğini ve aşınma direncini artırarak, çeşitli endüstriyel uygulamalar için önemli avantajlar sunar. Al_2O_3 partikülleriyle takviye edilen alüminyum matrisli kompozitler, fren diskleri gibi otomotiv bileşenlerinde kullanılır [33].



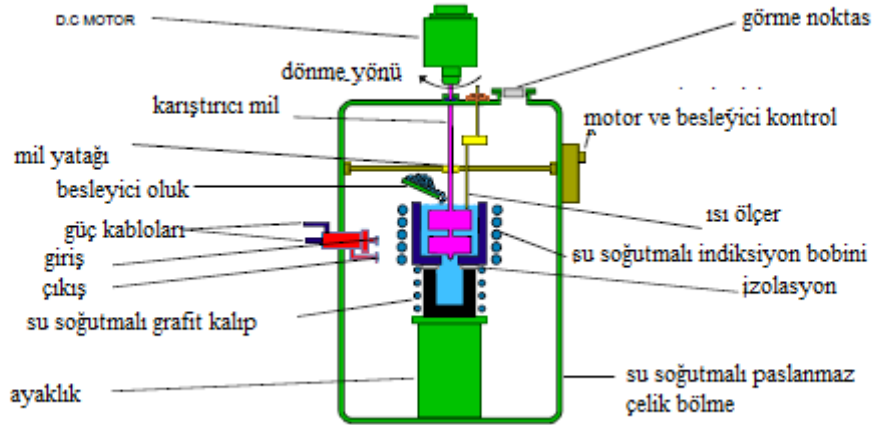
Şekil 3.5. Vortex metoduyla kompozit malzeme üretimi [24].

3.3.2.4. Kompo-döküm

Kompozit döküm, metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir döküm yöntemidir. Bu süreç, metal veya alaşım matrisine takviye malzemelerinin (örneğin, seramik partiküller, karbon fiberler veya silisyum karbür gibi güçlendirici malzemeler) eklenmesiyle gerçekleştirilir. Kompozit dökümde, genellikle sıvı metal, döküm kalıbına dökülmeden önce takviye malzemeleri ile karıştırılır. Karıştırma işlemi, takviye malzemelerinin metal matris içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu yöntem, metalin özelliklerini geliştirmek ve istenilen performans özelliklerini elde etmek amacıyla kullanılır. Kompozit döküm, malzeme özelliklerini artırmak için takviye malzemelerinin eklenmesiyle, kompozit malzemenin dayanıklılığını, aşınma direncini, sıcaklık dayanımını ve mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi metallerin kompozit hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılır.

Kompozit döküm, çeşitli endüstriyel uygulamalar için büyük avantajlar sunar. Otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi sektörlerde, yüksek performans gerektiren parçaların üretiminde kullanılır. Bu yöntemle üretilen kompozit malzemeler, hafif olmasının yanı sıra yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri sunarak, parçaların daha dayanıklı ve verimli olmasını sağlar.

Bu yöntem, karıştırmalı döküme benzer şekilde gerçekleştirilir ancak ara yüzey bağını geliştirmek için özel reaksiyonlar içerir. SiC partikülleri ile takviye edilmiş magnezyum matrisli kompozitler, havacılık uygulamalarında hafiflik ve dayanıklılık sağlamak için üretilir [34].



Şekil 3.6. Kombo döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretimi [34].

3.3.2.5. Reaktif (In-Situ) yöntem

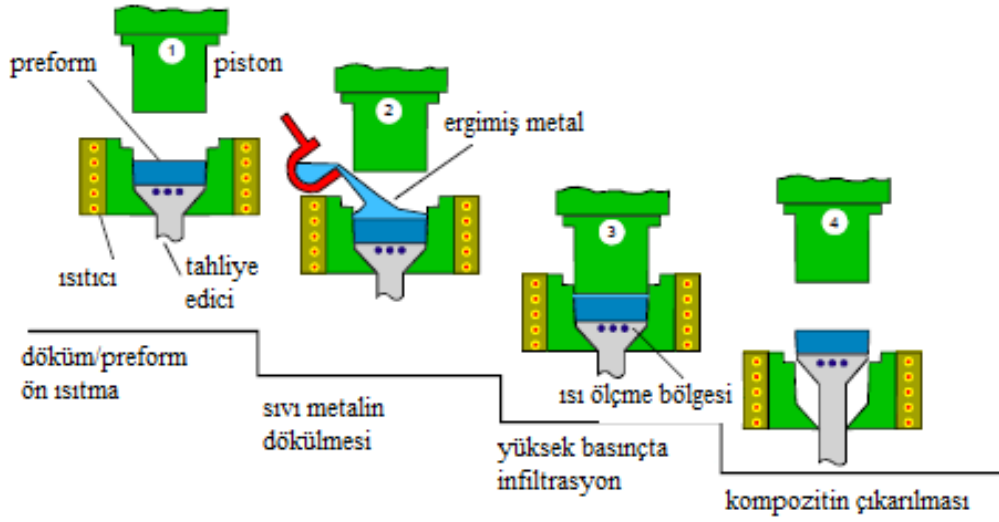
In-situ yöntemi, metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir tekniktir ve burada takviye malzemeleri, sıvı metalin içinde, üretim sürecinde yerinde oluşturulur. Bu yöntem, dışarıdan eklenen takviye malzemeleri yerine, kimyasal reaksiyonlar veya fiziksel süreçler aracılığıyla takviye fazlarının doğrudan metal matrisin içinde oluşmasını sağlar. Örneğin, bir alüminyum alaşımına titanyum veya bor gibi elementler eklenerek, in-situ olarak titanyum borid (TiB_2) gibi takviye malzemeleri üretilir. Bu süreç, takviye malzemelerinin metal matris içinde homojen bir şekilde dağılmasını ve metal ile takviye arasındaki kimyasal bağların daha güçlü olmasını sağlar. In-situ yöntemi, takviye malzemeleri ile metal arasındaki bağları güçlendirerek kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirirken, dışarıdan eklenen takviye malzemelerine kıyasla daha düşük kontaminasyon riski sunar. Ancak, bu yöntemde kimyasal reaksiyonların kontrol edilmesi zor olabilir ve işlem sırasında istenmeyen fazların oluşma riski bulunur. In-situ yöntemi, otomotiv, havacılık, savunma ve elektronik gibi yüksek performanslı malzemelerin gerektiği alanlarda tercih edilir, özellikle zırh malzemeleri, motor parçaları ve mühendislik uygulamaları gibi alanlarda kullanımı yaygındır. Bu yöntemde, matris içinde takviye fazı doğrudan kimyasal

reaksiyonlarla oluşturulur. Al-TiC matrisli kompozitler, türbin kanatlarında kullanılmak üzere in-situ yöntemle üretilir [24-30-31].

3.3.2.6. Sıkıştırılmalı döküm

Sıkıştırılmalı döküm (Die Casting), genellikle yüksek hassasiyet ve detay gerektiren metal döküm süreçlerinden biridir. Bu yöntemde, sıvı metal yüksek basınç altında, özel kalıplara (genellikle çelik veya alaşımdan yapılmış) enjekte edilir. Sıkıştırılmalı döküm, yüksek üretim hızına sahip olup, kompleks şekillerdeki parçaların yüksek doğrulukla üretilmesini sağlar. İşlem, genellikle alüminyum, çinko, magnezyum gibi düşük erime sıcaklığına sahip metallerle yapılır, ancak bakır ve pirinç gibi diğer metallerle de kullanılabilir. İlk adımda, metal alaşımı yüksek sıcaklıkta eritilir ve ardından sıvı metal, döküm makinesine bağlı kalıba enjekte edilir. Bu enjekte etme işlemi, sıvı metalin kalıbın her köşesine ve en ince detaylarına ulaşmasını sağlayacak kadar yüksek basınca sahiptir. Metal, kalıp içinde hızla soğur ve katılaşır, bu da yüksek üretim hızı ve az hata payı ile sonuçlanır. Sıkıştırılmalı döküm süreci, özellikle yüksek hacimli üretimlerde çok verimlidir çünkü her dökümde son derece düzgün yüzeyler, karmaşık geometriler ve dar toleranslar elde edilebilir [34].

Sıkıştırılmalı döküm, büyük miktarlarda parça üretme imkânı sunarak ekonomik bir yöntem olarak öne çıkar ve otomotiv, elektronik, telekomünikasyon, havacılık gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçaların yüksek mekanik özelliklere sahip olması, işleme süreçlerini daha hızlı ve verimli hale getirir. Bunun yanı sıra, sıkıştırılmalı döküm, karmaşık ve detaylı geometrilere sahip parçalarda bile yüksek kaliteyi garantiler. Ancak, döküm sırasında oluşabilecek hava cepleri, iç yapısal kusurlar veya aşırı sıcaklık değişimlerinin yol açabileceği sorunlar da mevcuttur. Bu nedenle kalıp tasarımı ve işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi önemlidir. Ayrıca, kalıpların dayanıklılığı ve işlem süresi de kritik faktörlerdir, çünkü yüksek basınç ve sıcaklık altında kalıplar aşınabilir. Sıkıştırılmalı dökümün sunduğu avantajlar ve verimlilik, onu yüksek kaliteli metal parçaların üretimi için ideal bir tercih haline getirmektedir [34-35]. Örneğin, SiC partikülleri ile güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitler, otomotiv şasi bileşenlerinde bu yöntemle üretilir.



Şekil 3.7. Sıkıştırma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi [35].

3.3.3. Buhar-faz üretim yöntemleri

3.3.3.1. Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)

Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD), metal, seramik veya alaşımların vakum ortamında buharlaştırılarak, bu buharın yüzeye çökmesiyle ince kaplama tabakaları oluşturan bir yüzey kaplama yöntemidir. Bu işlem, genellikle yüksek sıcaklıkta buharlaştırılan kaplama malzemesinin atom veya moleküllerinin vakum ortamında taşınarak, hedef yüzeye çökmesiyle gerçekleşir. PVD, homojen ve düzgün kaplamalar sağlayarak, aşınma direnci, yüksek sertlik ve estetik özellikler kazandırır. Ayrıca çevre dostu olması ve kimyasal atık üretmemesi nedeniyle tercih edilir. Ancak, genellikle ince kaplamalar sağladığı için kalın kaplamalar için birkaç katman halinde yapılması gerekebilir. PVD, otomotiv, havacılık, elektronik ve dekoratif uygulamalar gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılır. Titanyum matris üzerine elmas benzeri karbon (DLC) kaplama yapılması, kesici takımların performansını artırır.[24]

3.3.3.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), bir yüzey üzerine ince film kaplamalar oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir ve burada gaz fazındaki reaktif bileşiklerin, yüzeyde kimyasal reaksiyonlar sonucunda katı bir film olarak çökmesi sağlanır. CVD süreci, genellikle yüksek sıcaklıklarda, hedef yüzeyin üzerine reaktif gazların yönlendirilmesiyle başlar. Bu gazlar yüzeyde kimyasal reaksiyonlar sonucu birikerek, istenilen malzemeyi (örneğin, silisyum karbür, grafen veya metal oksitler) ince bir tabaka olarak oluşturur. CVD, yüksek saflıkta ve düzgün kaplama sağlar, bu da

mikroelektronik, otomotiv, enerji ve optik uygulamalarda yaygın kullanımını sağlar. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık gereksinimi ve enerji tüketimi gibi dezavantajları vardır. CVD, özellikle mikroçip üretimi ve koruyucu kaplamalar gibi hassas ve yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilir. Alüminyum matrisli bir kompozite TiB₂ kaplama uygulanması, uzay araçlarının ısı kalkanlarında yüksek sıcaklık dayanımı sağlar [24].

3.4. Takviye Elemanları

Takviye elemanları, kompozit malzemelerin performansını artırmak ve belirli mühendislik uygulamalarına uygun özellikler kazandırmak amacıyla kullanılan temel bileşenlerdir. Kompozitlerin mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi özelliklerini optimize etmek için çeşitli formlarda ve malzemelerde takviye elemanları kullanılmaktadır. Elyaf, partiküller ve tabakalar gibi farklı şekillerde bulunabilen bu takviyeler, kompozitlerin matris malzemesi ile çalışarak dayanıklılık ve fonksiyonelliği artırır.

3.4.1. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum Karbür (SiC), üstün mekanik ve termal özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilen bir seramik malzemedir. SiC, karbon ve silisyum atomlarının güçlü kovalent bağlarla bir araya gelmesinden oluşur ve bu yapısı ona yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve mükemmel ısı iletkenlik gibi özellikler kazandırır. Mohs sertlik skalasında 9,5 gibi yüksek bir değere sahiptir ve bu özelliği sayesinde aşındırıcı malzeme, kesici takım ve zırh üretiminde yaygın olarak kullanılır. [36-38]

SiC, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı ile dikkat çeker. 2.700°C'ye kadar erime noktasına sahiptir ve oksidasyon direnci oldukça yüksektir. Bu nedenle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda, örneğin türbin kanatları ve ısı eşanjörlerinde tercih edilir. Ayrıca düşük termal genleşme katsayısı sayesinde ani sıcaklık değişimlerine karşı direnç gösterir ve termal şok dayanımı yüksektir. Bu özelliği, silisyum karbürün uzay ve havacılık sektöründe tercih edilen bir malzeme yapar. [36-38]

Elektriksel özellikleri açısından da SiC oldukça esnek bir yapıya sahiptir. İletkenliği, üretim sırasında yapılan katkı maddesi ilaveleri ile ayarlanabilir. Bu özelliği sayesinde güç elektroniği ve yarı iletken sektöründe, özellikle yüksek frekanslı ve yüksek voltajlı

uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SiC tabanlı yarı iletkenler, geleneksel silikon cihazlara kıyasla daha düşük enerji kaybı ve daha iyi termal performans sunar [36-38].

SiC aynı zamanda metal matrisli kompozitlerde (MMC) sıkça kullanılan bir takviye malzemesidir. Toz, partikül veya fiber formunda kullanılan SiC, metal matrisin mukavemetini, sertliğini ve aşınma direncini artırır. Alüminyum matrisli kompozitlerde SiC takviyesi ile üretilen malzemeler, hafiflik ve dayanıklılığın bir arada gerektiği otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde tercih edilmektedir. Silisyum karbürün çevresel sürdürülebilirliği de dikkat çekmektedir. Aşınmaya dayanıklı olması ve uzun kullanım ömrü, kaynakların etkin kullanımını destekler. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve aşındırıcı koşullara dayanıklılığı sayesinde bakım maliyetlerini düşürür ve enerji tasarrufu sağlar [36-38].

Sonuç olarak, SiC, yüksek performans gerektiren çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Üstün mekanik, termal ve elektriksel özellikleri, onu geleceğin teknolojilerinde de önemli bir bileşen hâline getirmektedir [36-38].

3.4.2. Grafit

Grafit, karbonun doğal bir allotropu olup eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Karbon atomlarının tabaka yapısında (hexagonal) düzenlenmesi, grafiti yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, kayganlık ve kimyasal kararlılık gibi üstün özelliklerle donatır. Bu yapısal özellik, grafiti hem endüstriyel hem de teknolojik uygulamalarda çok yönlü bir malzeme hâline getirir.

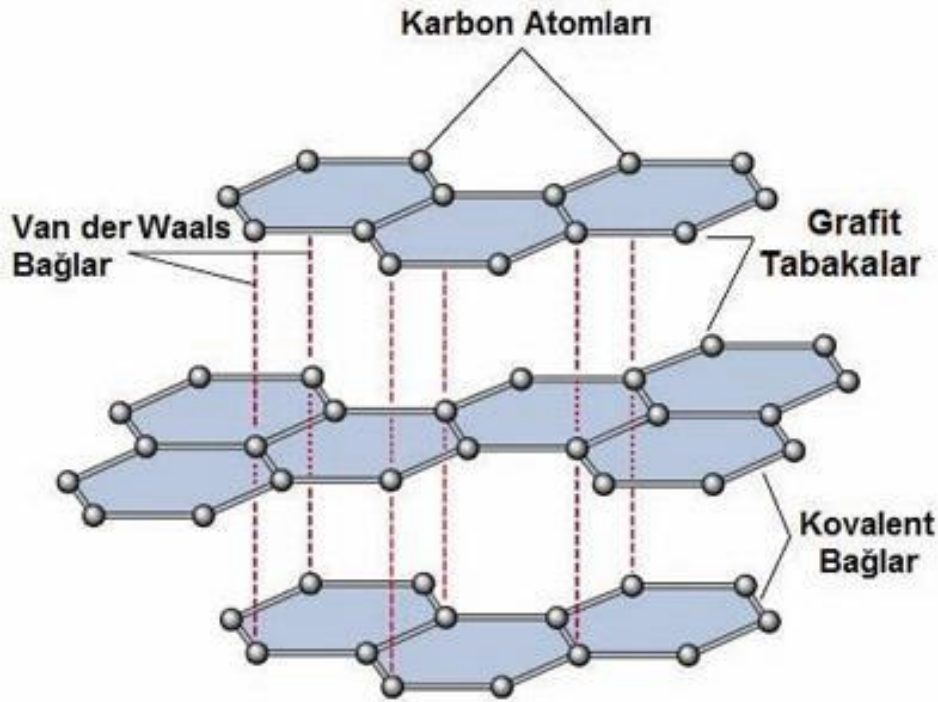
Grafit, aynı zamanda mükemmel bir katı yağlayıcıdır. Tabakalar arasındaki zayıf Van der Waals bağları, tabakaların kolayca kaymasını sağlar ve bu da sürtünmeyi azaltır. Bu özellik, grafitin makine parçalarında, yüksek sıcaklık koşullarında çalışan rulmanlarda ve diğer hareketli mekanizmalarda tercih edilmesini sağlar. Grafit, aşırı sıcaklıklarda bile oksitlenmeden çalışabilir, bu da onu zorlu ortamlar için vazgeçilmez bir yağlama malzemesi yapar.

Kimyasal kararlılığı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, grafitin refrakter malzeme olarak kullanılmasını mümkün kılar. Çelik üretimi, dökümhane işlemleri ve cam üretimi gibi yüksek sıcaklıklı endüstriyel süreçlerde grafit, pota ve kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, grafit bazlı kompozitler, aşınmaya ve termal şoka

dayanıklı yapıları sayesinde savunma ve havacılık sektörlerinde de tercih edilmektedir.

Grafit, son yıllarda gelişen nanoteknoloji uygulamalarında da önemli bir rol üstlenmektedir. Grafitin iki boyutlu türevi olan grafen, ultra ince yapısı ve üstün elektriksel, mekanik özellikleri ile geleceğin malzemesi olarak kabul edilmektedir. Grafit, bu anlamda grafen üretiminde temel bir hammadde olarak öne çıkar.

Sonuç olarak, grafit, çok yönlü özellikleriyle mühendislik, enerji, savunma ve ileri teknolojilerde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Elektrik ve ısı iletkenliği, kimyasal kararlılığı, kayganlık özelliği ve yüksek sıcaklık dayanımı sayesinde grafit, sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzeme çözümleri sunmaktadır. Bu özellikleri, grafiti hem günümüzün hem de geleceğin endüstriyel süreçlerinde vazgeçilmez bir bileşen hâline getirmektedir [39-42].



Şekil 3.8. Grafitin yapısı [43].

4. TRIBOLOJİ

Triboloji, sürtünme, aşınma ve yağlama konularını inceleyen, mühendislikte geniş uygulama alanlarına sahip bir bilim dalıdır. Her ne kadar tribolojinin modern anlamda ortaya çıkışı, 19. ve 20. yüzyıldaki sanayi devrimleri ile ilişkilendirilse de tarih boyunca insanlar bu olguların etkilerini anlamaya ve yönetmeye çalışmıştır. M.Ö. 2000'li yıllarda, çömlek çarklarının sürtünmesini azaltmak için zift kullanılması, bu alandaki en eski yöntemlerden biri olarak kaydedilmiştir. Bu durum, tribolojinin yalnızca modern bir bilim değil, aynı zamanda insanlığın ilk mühendislik uygulamalarından biri olduğunu göstermektedir [44].

Günümüzde tribolojinin temel amacı, yüzeyler arasında oluşan sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan enerji kayıplarını ve malzeme hasarlarını en aza indirerek sistem verimliliğini artırmaktır. Bu sayede, mühendislik sistemlerinde daha uzun ömür, daha az bakım maliyeti ve daha yüksek performans sağlanmaktadır. Örneğin, içten yanmalı motorlar, dişliler, yataklar ve sızdırmazlık elemanları gibi sistemlerde sürtünmenin azaltılması gereklidir. Ancak, frenler, debriyajlar ve tahrik tekerlekleri gibi uygulamalarda sürtünme, sistemin işlevselliği için gereklidir ve kontrollü bir şekilde optimize edilmelidir [45].

Tribolojinin modern mühendislikteki önemi, kayan ve yuvarlanan yüzeyler kullanan ekipmanların davranışlarının incelenmesinde daha da belirginleşmiştir. Bu bilim dalı, yalnızca malzeme kayıplarını önlemekle kalmayıp, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Tribolojik araştırmalar, endüstriyel süreçlerde kaliteyi artırmak, arızaları azaltmak ve kaynakların etkin kullanımını sağlamak için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Tribolojiye dayalı bu yaklaşımlar, modern mühendislikte ileri teknolojiler için sağlam bir temel oluşturmaktadır [45].

Tribolojik sistemler, aşınma ve sürtünme olaylarının meydana geldiği teknik sistemler olarak tanımlanabilir. Mühendislik uygulamalarında, bu sistemlerin malzeme davranışlarını incelemek için bir bütün olarak ele alınması gereklidir. Aşınma, yalnızca bir yüzeyin özelliği değil, bir sistemin etkileşimleri sonucunda ortaya çıkan

bir olgudur. Bir tribolojik sistem, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevre koşulları gibi altı temel bileşenden oluşur. Aşınma, ana malzeme ile karşı malzeme arasında belirli bir yük ve hareket altında meydana gelir. Ara malzeme ise genellikle yağlayıcı maddelerden oluşarak bu etkileşimi düzenler veya sınırlayabilir. Ana malzemeler metal, plastik, kauçuk, deri veya mineral gibi farklı mühendislik malzemelerinden seçilebilir ve bu malzemelerin özellikleri tribolojik performansı doğrudan etkiler [46-47].

4.1. Tribolojinin Diğer Bilim Dalları ile İlişkisi

Triboloji, yüzeyler arası sürtünme ve aşınma süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle birden fazla bilim dalını kapsayan geniş bir alandır. Kayma yüzeylerinin incelenmesi, malzeme bilimi, mekanik, yüzey kimyası ve yüzey fiziği gibi farklı disiplinlerin iş birliğini gerektirir. Bu alan, sürtünme, aşınma, yağlama gibi temel konuların yanı sıra, yağlayıcı malzemelerin seçimi, yüzey karakteristiği ve yağlama sistemlerinin tasarımı gibi çeşitli mühendislik uygulamalarını da içerir.

Mühendislikte triboloji çalışmaları, enerji verimliliğini artırmak, malzeme kayıplarını azaltmak ve sistem performansını optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Tribolojik sistemlerin diğer bilim dallarıyla olan ilişkisi, karmaşık yüzey etkileşimlerinin anlaşılmasını kolaylaştırarak inovasyon ve sürdürülebilirlik için yeni çözümler sunar. Bu çok disiplinli yaklaşım, tribolojiyi yalnızca bir mühendislik dalı değil, aynı zamanda gelişen teknolojilerin temel bir bileşeni hâline getirmiştir [48].

4.2. Sürtünme

Sürtünme, bir katı cismin, kendisiyle temas eden başka bir cismin hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu direnç, hareket doğrultusuna zıt yönde etkileyerek sürtünme kuvvetini oluşturur. Temas halindeki yüzeylerden birinin diğerine göre hareket etmeye başlaması için gereken kuvvet, "statik sürtünme kuvveti" olarak adlandırılır; hareketin devamı sırasında ise "dinamik (veya kinetik) sürtünme kuvveti" ortaya çıkar. Dinamik sürtünme kuvveti genellikle statik sürtünme kuvvetinden daha küçüktür. Sürtünme, kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin kombinasyonu şeklinde gerçekleşebilir.

Sürtünmeyle ilgili iki temel yasa bulunmaktadır. İlk yasa, sürtünme kuvvetinin temas eden yüzeylerin alanından bağımsız olduğunu belirtir. İkinci yasa ise sürtünme

kuvvetinin, temas yüzeyine dik uygulanan normal kuvvetle doğru orantılı olduğunu ifade eder. Bu yasalar, sürtünme katsayısı kavramının temelini oluşturur.

Sürtünme katsayısı, iki yüzey arasındaki sürtünme miktarını tanımlayan önemli bir parametredir ve iki ana türü bulunmaktadır: statik ve dinamik sürtünme katsayıları. Statik sürtünme katsayısı, bir cismin harekete geçebilmesi için gerekli sürtünmeyi ifade ederken, dinamik sürtünme katsayısı hareket halindeki sürtünmeyi temsil eder.

Sürtünme kuvveti, matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir: Hareketin başlaması için gerekli kuvvet Denklem (4.1)'de hareket sırasında oluşan sürtünme kuvveti: Denklem (4.2)'de ifade edilmiştir.

$$F_k = \mu_k \cdot P \quad (4.1)$$

$$F_k = \mu_k \cdot P \quad (4.2)$$

Burada, P, yüzeye uygulanan normal kuvveti, μ_s statik sürtünme katsayısını, μ_k ise dinamik sürtünme katsayısını ifade eder. Araştırmalar, statik sürtünme katsayısının temas süresine bağlı olarak artabileceğini ve dinamik sürtünme katsayısının kayma hızındaki artışla hafif bir düşüş gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu etkiler, sürtünmenin sistem performansı üzerindeki kritik rolünü anlamada önemli bir yere sahiptir [49].

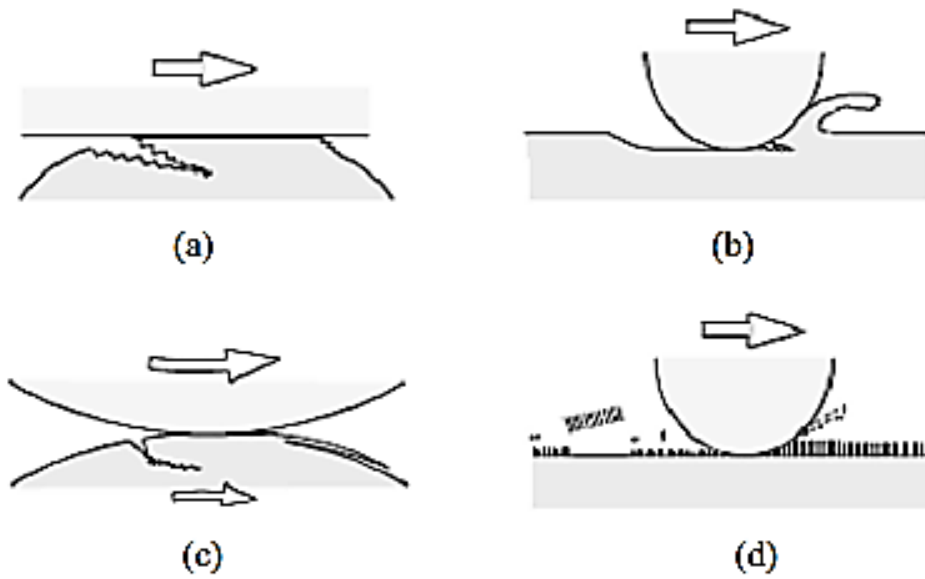
4.3. Aşınma

Aşınma, bir yüzeyin, başka bir yüzeyle temas halinde olduğu süre boyunca malzeme kaybına uğraması olarak tanımlanır. Bu süreç, sürtünme kuvvetleri, uygulanan yük ve hareketin türü gibi faktörlerden etkilenir. Mühendislik sistemlerinde aşınma hem ekonomik kayıplara hem de sistem performansının azalmasına neden olabilecek kritik bir etkidir. Aşınma, mekanik ekipmanlardan elektronik cihazlara kadar birçok alanda karşılaşılan bir sorun olup, uzun vadede malzeme maliyetlerinin artmasına ve arıza oranlarının yükselmesine yol açabilir [50].

Aşınma tipleri, genellikle adeziv aşınma, abraziv aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınması gibi sınıflandırmalara ayrılır. Adeziv aşınma, yüzeyler arasındaki mikroskobik çıkıntıların birbirine yapışması ve kopmasıyla meydana gelirken, abraziv aşınma, daha sert bir yüzeyin veya partiküllerin, daha yumuşak bir yüzeyi kazınmasıyla

oluşur. Yorulma aşınması tekrarlayan yüklerin neden olduğu yüzey kırılmalarını içerir. Korozyon aşınması ise kimyasal reaksiyonlarla yüzeyin zarar görmesini ifade eder.

Aşınma olayını minimize etmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Yüzey sertleştirme işlemleri, yağlama teknikleri, uygun malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu bu stratejiler arasında yer alır. Özellikle metal matrisli kompozit (MMC) malzemeler, üstün mekanik özellikleri ve aşınma dirençleri sayesinde bu tür uygulamalarda tercih edilen malzemeler arasında ön plana çıkmaktadır. Örneğin, SiC ve grafit gibi takviye elemanları, aşınma direncini artırarak hem daha uzun ömürlü hem de daha güvenilir malzeme yapıları oluşturur [50].



Şekil 4.1. Temel aşınma mekanizmaları, a) adhezif aşınma, b) abrasif aşınma c) yorulma aşınması, d) korozyon aşınması [50].

4.3.1. Adeziv aşınma

Adeziv aşınma, temas eden iki yüzey arasındaki atomik veya mikroskobik yapışma sonucu oluşur. Yüzeyler birbirine temas ettiğinde, yerel sıcaklık artışı ve yük nedeniyle mikroskobik düzeyde malzeme transferi meydana gelir. Hareket sırasında bu yapışan bölgeler kopar ve bir yüzeyden diğerine malzeme aktarımı gerçekleşir. Bu tür aşınma, genellikle düşük sertlikteki malzemelerde ve yağlamanın yetersiz olduğu durumlarda görülür. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğü artar, sürtünme kuvveti yükselir ve malzeme kaybı hızlanır [50].

4.3.2. Abraziv aşınma

Abraziv aşınma, daha sert bir yüzeyin veya sert partiküllerin, diğer yüzeyi mekanik olarak kazımasıyla meydana gelir. Bu tür aşınma, iki şekilde gerçekleşir:

- **İki cisimli abraziv aşınma:** Daha sert bir yüzey, daha yumuşak bir yüzey üzerinde hareket ederek malzeme kaybına neden olur.
- **Üç cisimli abraziv aşınma:** Yüzeyler arasında sıkışan sert partiküller, her iki yüzey üzerinde de kazıma etkisi yapar. Bu aşınma türü, özellikle kumlama, taşlama ve toprakla temas eden makinelerde sıklıkla karşılaşılr.

4.3.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, tekrarlayan yükler altında malzeme yüzeyinde çatlak oluşumu ve bu çatlakların zamanla büyüyerek malzeme kaybına yol açmasıyla gerçekleşir. Genellikle rulmanlar, dişliler ve dönen makinelerde bu tür aşınma gözlenir. Yorulma aşınmasının başlıca nedenleri arasında, yüzey altı çatlakların oluşması ve bu çatlakların birleşerek parçalanmalara neden olması yer alır [51].

4.3.4. Korozyon aşınması

Korozyon aşınması, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonların malzeme yüzeyinde hasara yol açtığı bir aşınma türüdür. Özellikle nemli veya agresif kimyasallarla dolu ortamlarda çalışan ekipmanlarda yaygındır. Korozyon aşınması, malzeme yüzeyini zayıflatarak sürtünme ve diğer aşınma türlerine karşı daha duyarlı hale getirir. Bu tür aşınma, denizcilik, kimya endüstrisi ve enerji üretim tesislerinde sıkça karşılaşılan bir problemdir [52].



5. DENEYSEL ÇALIŞMLAR

5.1. Kompozit ve Hibrit Malzemelerin Üretimi

ZA 27 alaşımı, yüksek aşınma dayanımı ve mukavemeti ile yatak malzemesi olarak öne çıkan bir alaşımdır. Vortex-sıkıştırma döküm yöntemi kullanılarak, ZA 27 alaşımı SiC ve grafit partikülleriyle zenginleştirilmiş, böylece kompozit ve hibrit malzemeler üretilmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı yükler altında ve sabit kayma hızında yağlı ve kuru ortam koşullarında malzemelerin aşınma davranışlarını incelemektir.

Literatürde, ZA 27 alaşımı, bu alaşıma SiC takviyesi ile oluşturulan kompozit ve bu kompozite farklı oranlarda eklenen grafit takviyesi ile hibrit kompozitler üretilmiştir. Bu alaşım, kompozit ve hibrit kompozitlerin kuru ve yağlı ortamdaki aşınma özellikleri ele alınmıştır. SiC takviyesinin alaşımın aşınma dayanımını artırdığı, grafit takviyesinin ise sürtünme katsayısını düşürdüğü; ancak yumuşak faz yapısı nedeniyle sertlik üzerinde düşürücü bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, SiC ve grafit takviyelerinin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerin farklı yükler altında ve sabit kayma hızında aşınma davranışlarını yağlı ve kuru ortam koşullarında inceleyerek literatürdeki bilgi eksikliğini gidermeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmada kullanılan matriks malzemesi ZA 27 alaşımıdır. ZA 27 alaşımının üretiminde %99,99 saflığında çinko (Zn), bakır (Cu) ve magnezyum (Mg) ile %99,95 saflığında alüminyum (Al) kullanılmıştır. Hazırlanan matriks alaşımı, kokil kalıba dökülerek şekillendirilmiştir. Ergitme işlemi, elektrikli direnç fırınında grafit pota içerisinde argon gazı altında gerçekleştirilmiştir. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimi, absorpsiyon cihazında yapılan analizler sonucunda %26,70 Al, %2,1 Cu, %0,03 Mg, %0,035 Fe ve %71,135 Zn olarak belirlenmiştir.

Alaşıma takviye olarak, %20 oranında SiC Takviyeli Kompozit (STK) ve %20 SiC + %2,5-%10 arasında değişen grafit takviyeleri ilave edilerek Hibrit Takviyeli Kompozit (HTK) elde edilmiştir. Bu takviyeler, vortex-sıkıştırma döküm yöntemiyle malzemeye eklenmiş ve kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde kullanılan SiC partiküllerinin boyutu 60-100 µm, grafit partiküllerinin boyutu ise yaklaşık 40-90 µm arasındadır.

ZA 27 alaşımına grafit eklemek, alaşım ile grafit arasındaki yüksek yüzey gerilimi nedeniyle zorluk yaratmaktadır. Bu sorunu çözmek için grafit partikülleri bakır (Cu) ile kaplanmıştır. Yüzey gerilimini düşürmek amacıyla, 380°C'deki bir fırında grafit partiküllerinin yüzeyleri aktif hale getirilmiş ve 0,2 mol/l $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile bakır kaplama işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak, grafit partiküllerinin yüzeylerine ince bir bakır tabakası uygulanmıştır. Bu kaplama işlemi, grafit ve metal arasındaki ara yüzey yapısını metal-metalale dönüştürmeyi amaçlamaktadır.

Üretilen numuneler, istenilen boyutlara uygun olarak metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Bu işlemde, numuneler Şekil 5.1'de gösterilen Struers Labotom-5 marka kesme cihazı kullanılarak, elmas disk yardımıyla kesilerek uygun boyutlara getirilmiştir.



Şekil 5.1. Struers Labotom-5 kesme cihazı.

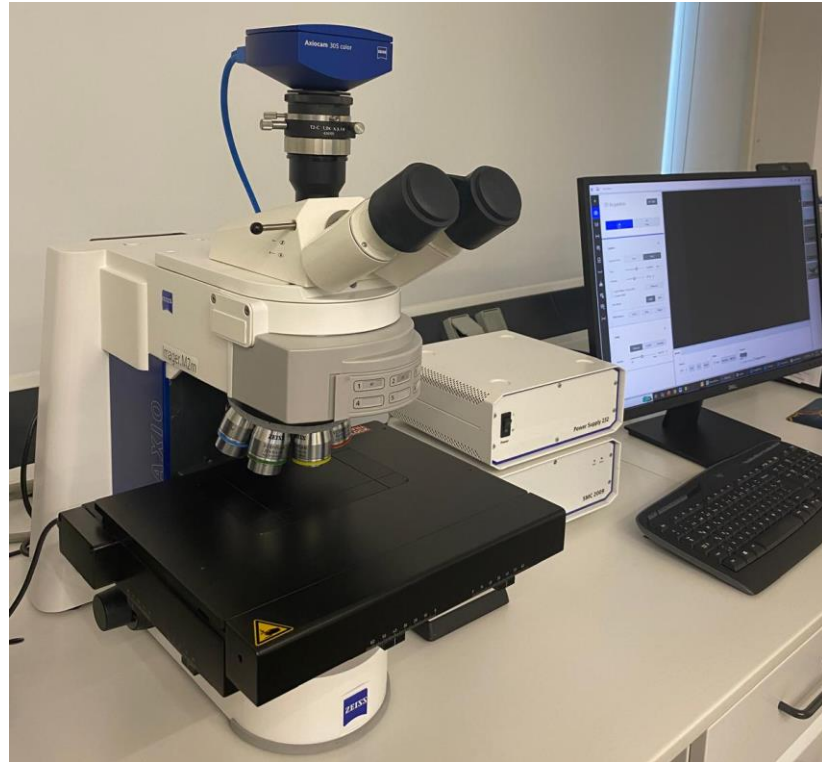
Kompozit malzemeler iki bileşenden oluşurken, hibrit kompozit malzemeler matriks, grafit partikülleri ve sert seramik SiC partikülleri olmak üzere üç ana bileşen içerir. Bu bileşenlerin farklı sertlik özelliklerine sahip olması, metalografik hazırlama işlemini oldukça zorlaştırır. Özellikle yumuşak grafit partikülleri ile sert ve kırılğan seramik takviyelerinin zımparalama ve parlatma işlemleri sırasında matriksten ayrılmasını önlemek için büyük bir titizlikle çalışılmalıdır. Metalografik incelemeler için numuneler, standart numune hazırlama yöntemlerine uygun şekilde hazırlanmıştır.

Şekil 5.2'teki Struers Tegramin-25 cihazı ile sırasıyla 320 SiC, Largo 9 μm , Dur 3 μm ve Nap 1 μm kademeleri kullanılarak işlenmiştir.



Şekil 5.2. Struers Tegramin-25 zımparalama ve parlatma cihazı.

Numuneler, kurutma işleminin ardından optik mikroskop ve SEM analizleri için %3 Nital çözeltisi (97 mL etanol ve 3 mL HNO₃ karışımı) ile 10 saniye boyunca dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numuneler yeniden yıkanmış ve kurutulmuş; ardından, Şekil 5.3'te gösterilen ZEISS – Imager.M2m optik mikroskobu ile ve Şekil 5.4'de belirtilen HITACHI SU7000 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. ZEISS – Imager.M2m optik mikroskobu.



Şekil 5.4. HITACHI SU7000 taramalı elektron mikroskobu.

5.2. Karakterizasyon İncelemeleri

5.2.1. Sertlik deneyleri

ZA27 alaşımı STK ve HTK'lerin, Brinell yöntemiyle Şekil 5.5'te görseli verilen Bulut Makina Digirock Hardness Tester cihazında brinell sertlik sonuçları ASTM B86 standarda göre alınmıştır. Ölçümler doğru değeri tespit edebilmek için beşer ödet ölçümden alınmış. Ortalama değer belirlenmiştir.



Şekil 5.5. Dıgirock makrosertlik cihazı.

5.2.2. Aşınma deneyleri

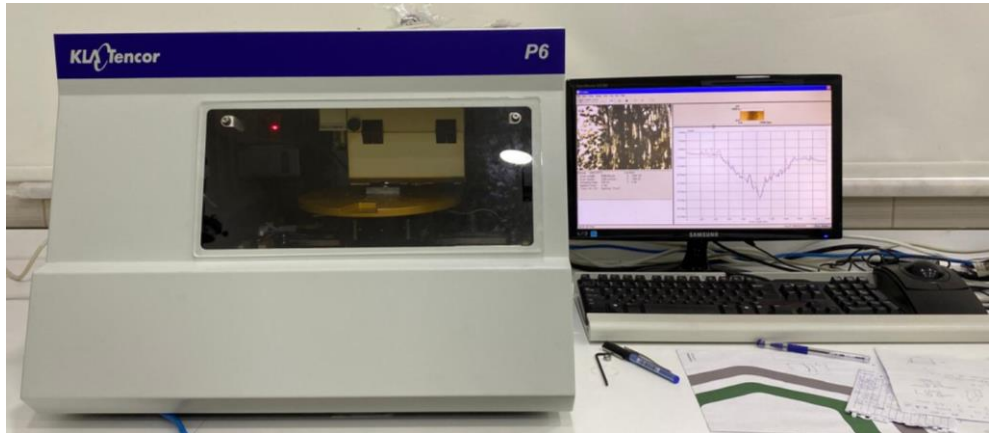
ZA27 alaşımı, STK ve HKM malzemelerinin sürtünme ve aşınma deneyleri, ASTM G 99-05 standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve Şekil 5.6’da gösterilen ball-on-disk prensibi ile çalışan ‘CSM Instruments Tribometer’ cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler kuru ve yağlı ortamda (5W30 Motor Yağı) her bir numune için 3-5 N yük ve 0,1 m/s kayma hızı uygulanmış olup, sabit 1000 m mesafede ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.6. CSM Instruments Tribometer aşınma cihazı.

5.2.3. Yüzey analizi

Aşınma işlemi görmüş numuneler, yüzey analizini gerçekleştirmek amacıyla Şekil 5.7’de verilen KLa Tencor P6 cihazı ile incelenmiştir. Bu cihaz, aşınma işlemi sonrası tüm numunelerin aşınma izlerinin ölçerek malzemenin aşınma davranışları hakkında detaylı veriler sunmaktadır.



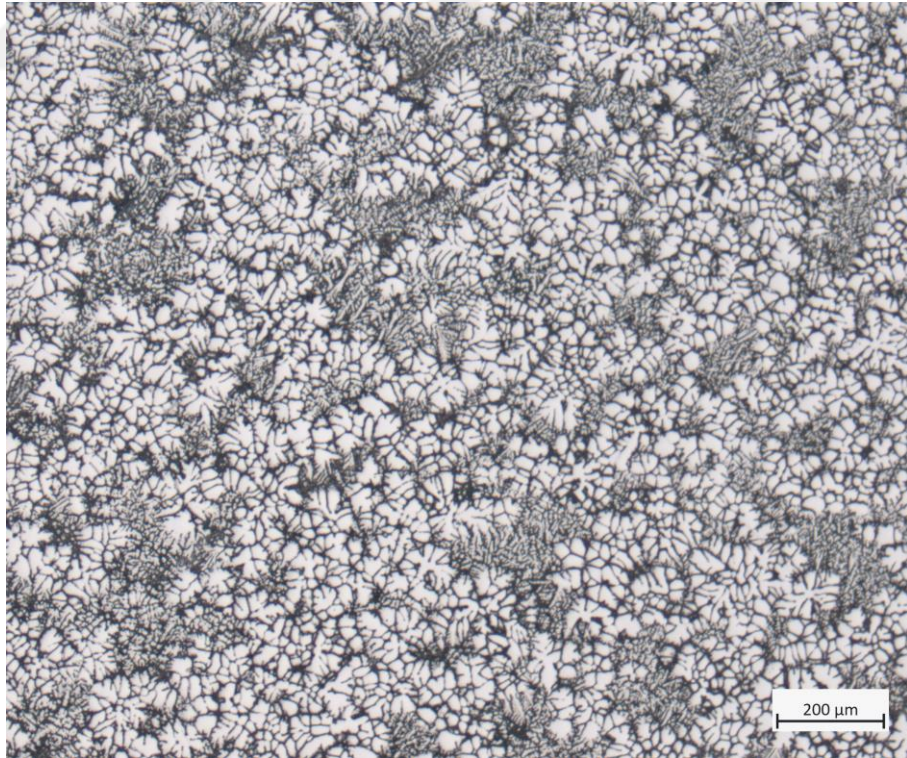
Şekil 5.7. KLa Tencor P6 profilometre cihazı.



6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

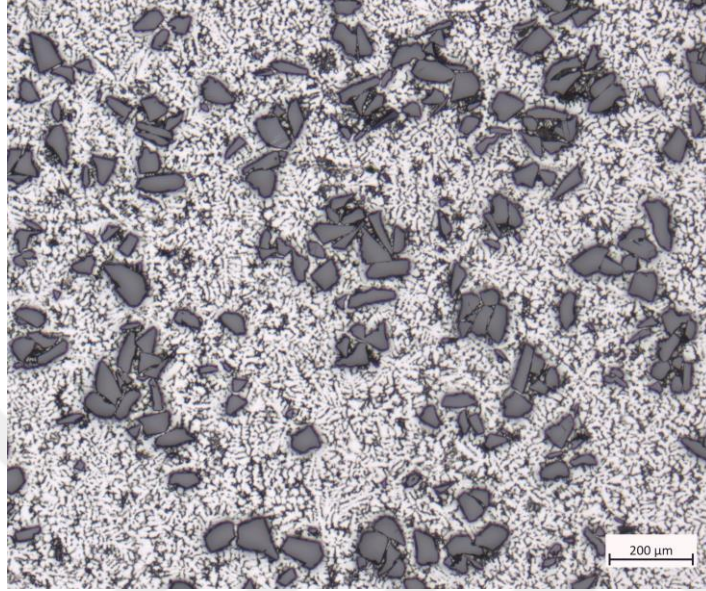
6.1. ZA27 Alaşımı ve Kompozitlerin Mikro Yapı İncelemesi

ZA27 alaşımı, yaklaşık ağırlıkça %27 alüminyum içeren bir alaşımdır. Bölüm 2'de belirtildiği gibi, peritektik reaksiyon 440°C'de gerçekleşir ve bu sıcaklıkta sıvı faz (L), alüminyumca zengin α fazı ile bir arada bulunur ($\alpha + L$). Soğuma sırasında sıvı fazın son katılan kısmı ötektik çizgiye ulaşmasından dolayı ötektik reaksiyon gerçekleşir. Katılma devam ederek çinko ve alüminyumun bir arada bulunduğu, karışık bir katı çözelti olan β fazına dönüşür. Ardından, 277 °C'de gerçekleşen ötektoid dönüşüm sırasında β fazı, alüminyumca zengin α fazı ve çinkoca zengin β fazı olarak ayrışır. Alaşım oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda, yalnızca α ve η fazları stabil hale gelir. Şekil 6.1' de görülen koyu renkler alüminyumca zengin α fazını içerir geriye kalan matris çinkoca zengin β fazıdır.



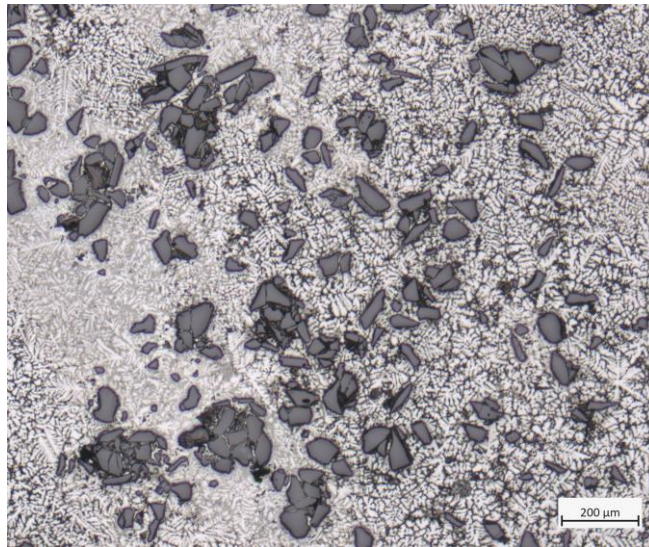
Şekil 6.1. ZA27 alaşımı optik mikroskop görüntüsü 100X.

Şekil 6.2’ de verilen görselde %20 SiC takviyeli ZA27 alaşımının optik görüntüsü verilmiştir. SiC tanelerinin homojen olarak yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu yapının homojen olarak dağılmasını sağlayan üretim yönteminin önemi yüksektir. SiC keskin köşeli olarak gözükmemektedir. Takviye fazının eklenmesiyle dentritik yapının

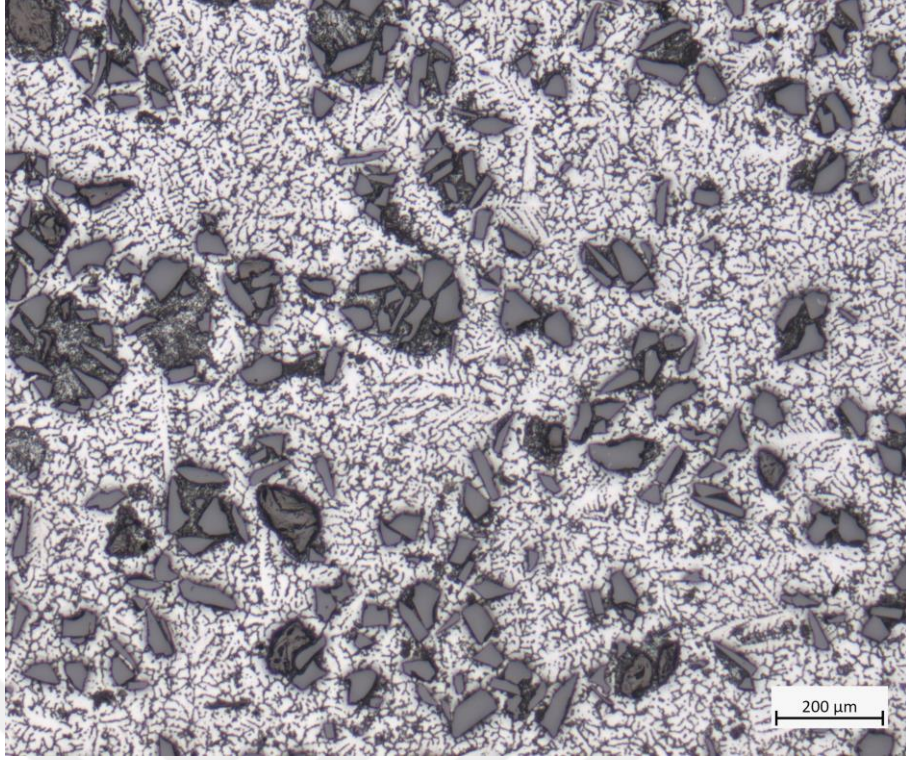


Şekil 6.2. SiC Takviyeli Kompozit 100X.

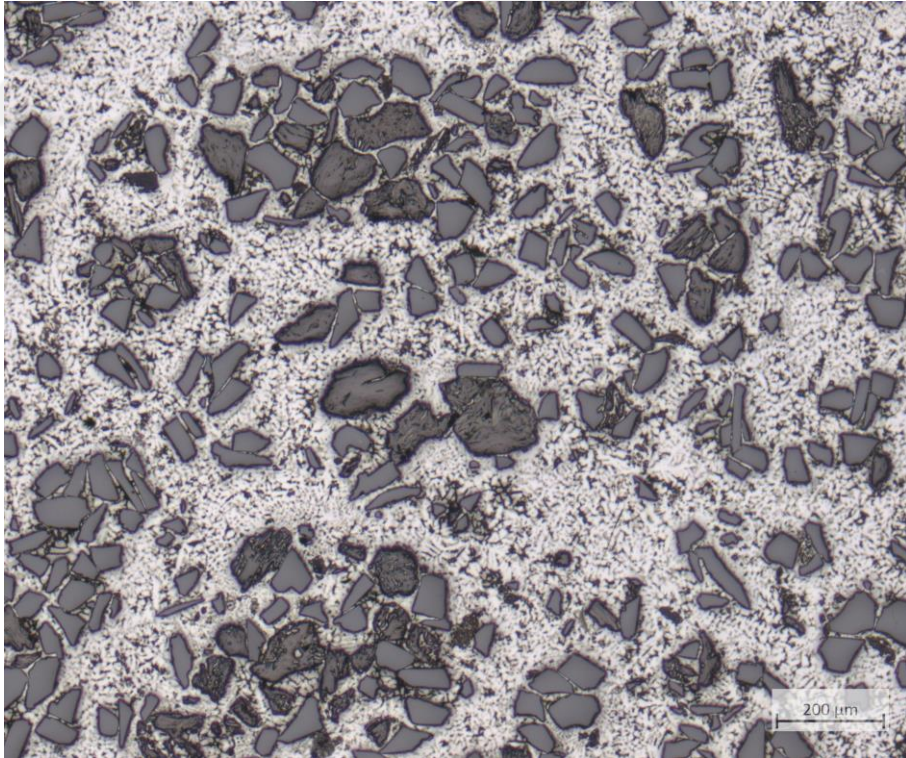
Şekil 6.3-6.6’te %10 SiC takviyesine farklı miktarlarda %2,5 -5-7.5-10 grafit takviyesiyle üretilmiş HTK numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Üretilen numunelerde grafit takviyesiyle birlikte dentritlerin grafitin iletkenliği yüzünden daha ince dentritik yapılar gözlemlenmiştir. Artan takviye oranıyla mikroyapıdaki segregasyonun azaldığı gözlemlenmiştir.



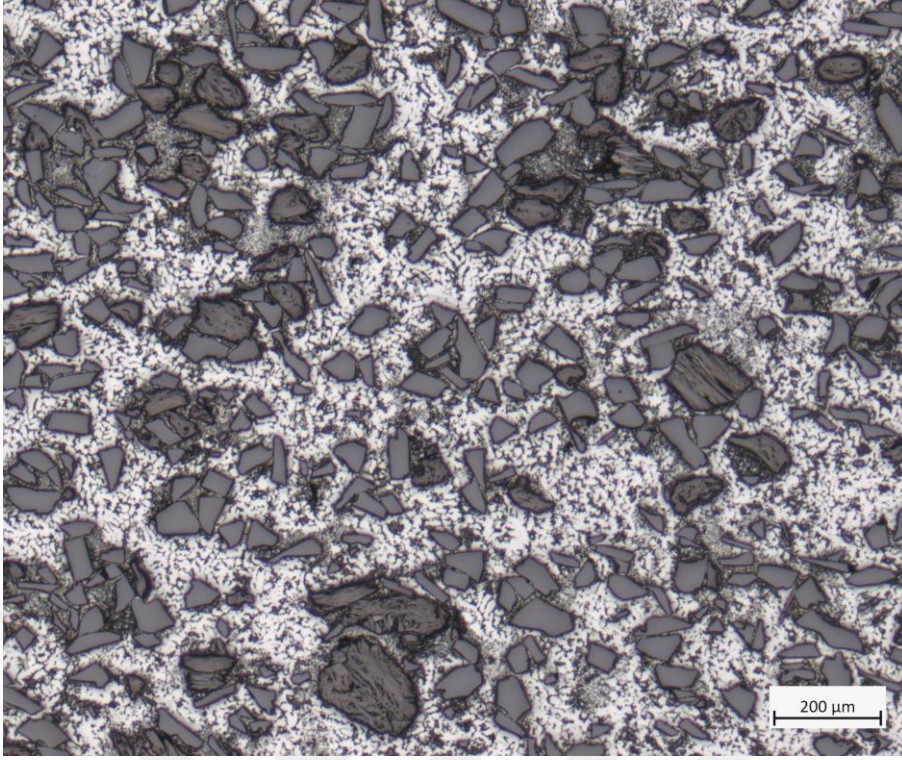
Şekil 6.3. %2.5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.



Şekil 6.4. %5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.



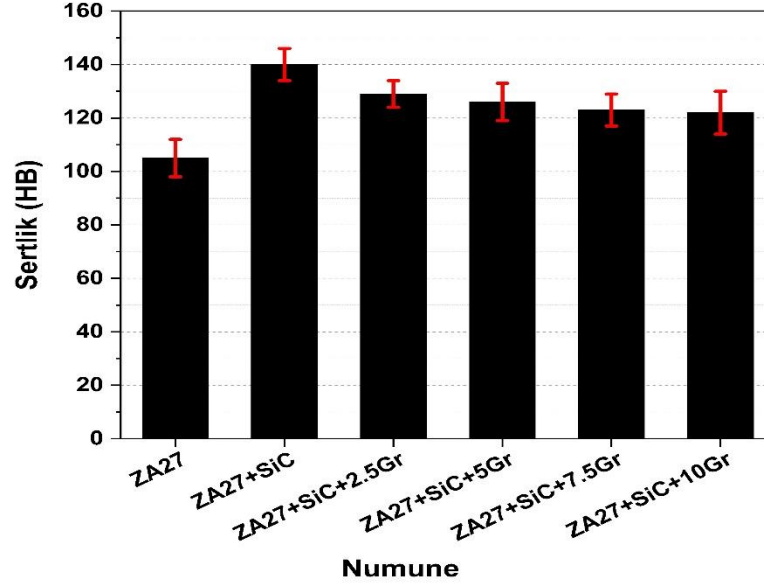
Şekil 6.5. %7.5 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.



Şekil 6.6. %10 Gr Takviyeli Hibrit Kompozit.

6.2. Sertlik Sonuçları

Şekil 6.7’de, ZA27 alaşımı, STK ve HKM malzemelerinin sertlik karşılaştırması sunulmaktadır. ZA27 alaşımının Brinell sertlik değeri 105 HB olarak belirlenmiş olup, bu değer alaşımın temel sertliğini gösterir. SiC takviyesiyle yapılan kompozit malzeme ise, ZA27 alaşımına kıyasla sertlik değerinde yaklaşık %33’lük bir artış göstererek 105 HB’den 140 HB’ye yükselmiştir. Ancak, grafit takviyesinin eklenmesiyle hibrit kompozit malzemelerde sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. %2,5 grafit takviyeli malzemenin sertlik değeri 130 HB, %5 grafit takviyeli malzemenin sertlik değeri 125 HB, %7,5 grafit takviyeli malzemenin sertlik değeri ise 123 HB olarak ölçülmüştür. Grafit oranının %10’a çıkarılması durumunda sertlik değeri yaklaşık 120 HB seviyesine düşmüştür. Bu eğilim, grafitin malzeme matrisinde yumuşak ve kaygan bir faz olarak davranmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, grafit takviyesinin artması, malzemenin sertlik değerlerinde düzenli bir azalmaya neden olmuş, ancak ZA27 alaşımına kıyasla hibrit kompozit malzemeler daha yüksek sertlik seviyeleri sergilemiştir.



Şekil 6.7. Numunelerin makro sertlik değerleri (HB).

6.3. Aşınma Deney Sonuçları

6.3.1. Grafit ilavesinin sürtünme katsayısı değerlerine etkisi

ZA27 alaşımı ile bu alaşımdan üretilen SiC takviyeli kompozit (STK) ve hibrit kompozit malzemeler, 3-5 N yük, 0,1 m/s kayma hızı ve 1000 metre test mesafesi koşullarında hem kuru hem de yağlı ortamlarda aşınma testine tabi tutulmuştur. Kuru ortamdaki 3-5N yük altındaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği test sonuçları Şekil 6.8-6.9'da, yağlı ortamdaki 3-5N yük altındaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği test sonuçları ise Şekil 6.10-6.11'de verilmiştir. ZA27 alaşımına uygulanan grafit takviyesi, her iki ortamda da sürtünme katsayısının düşmesine önemli katkı sağlamıştır. Özellikle kuru ortam testlerinde ZA27 alaşımı, 3 N yük altında 0,45 ve 5 N yük altında 0,55 sürtünme katsayısı sergilemiştir. Bu sonuçlar, ZA27 alaşımının sürtünme katsayısı açısından yüzeyle güçlü bir etkileşim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yağlı ortamda ise sürtünme katsayıları doğal olarak daha düşük ölçülmüştür; 3 N yük altında 0,35, 5 N yük altında ise 0,42 olarak kaydedilmiştir. Bu durum, yağlı ortamın malzeme ile karşı yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltarak iyileştirme sağladığını göstermektedir.

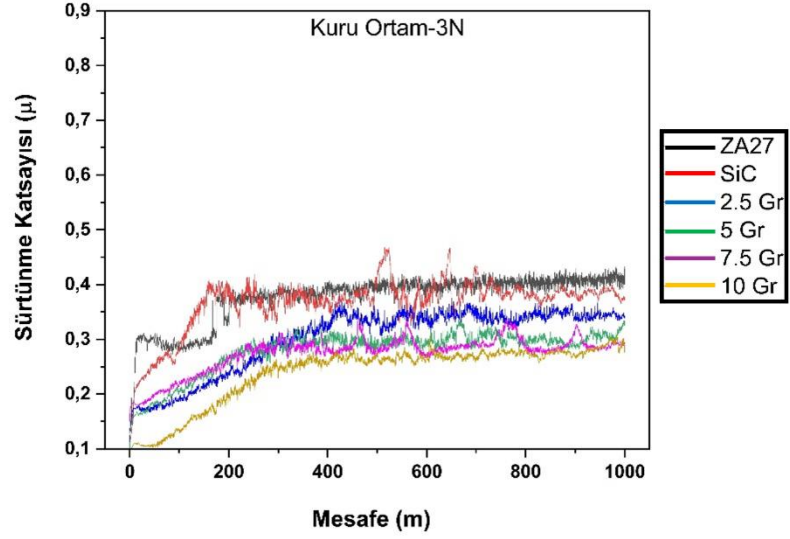
Grafit takviyesi, her iki ortamda ve her iki yük seviyesinde de sürtünme katsayısını azaltmada etkili olmuştur. Kuru ortamda, 3 N yük altında %2,5 grafit takviyesiyle sürtünme katsayısı 0,36, %5 grafitte 0,34, %7,5 grafitte 0,31 ve %10 grafitte 0,28 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, 5 N yük altında %2,5 grafit takviyesi ile sürtünme katsayısı 0,42, %5 grafitte 0,40, %7,5 grafitte 0,37 ve %10 grafitte 0,34 seviyelerine

düşmüştür. Bu veriler, grafit miktarının artışıyla birlikte sürtünme katsayısında düzenli bir azalma yaşandığını göstermektedir.

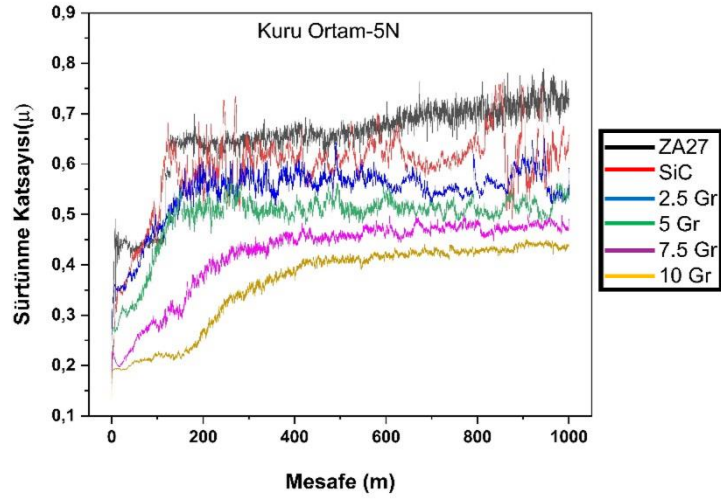
Yağlı ortamda ise grafitin etkisi daha belirgin hale gelmiştir. 3 N yük altında ZA27 alaşımının sürtünme katsayısı 0,35 olarak ölçülürken, %2,5 grafit takviyesiyle bu değer 0,28'e, %5 grafit takviyesinde 0,25'e, %7,5 grafitte 0,23'e ve %10 grafitte 0,20'ye düşmüştür. 5 N yük altında ise ZA27 alaşımının sürtünme katsayısı 0,42 olarak belirlenmiştir. %2,5 grafit takviyesiyle sürtünme katsayısı 0,35'e, %5 grafitte 0,30'a, %7,5 grafitte 0,27'ye ve %10 grafitte 0,24'e kadar düşmüştür. Bu sonuçlar, yağlı ortamın sürtünme katsayısını düşürmedeki katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

Grafitin etkisini daha ayrıntılı analiz edebilmek için, grafitin kuru ve yağlı ortamlardaki yüzey etkileşimleri dikkate alınmalıdır. Matris içinde kayganlaştırıcı bir faz oluşturan grafit, sürtünme katsayısının düşmesine katkı sağlamıştır. Özellikle yağlı ortamda, grafit ile yağın birleşik etkisi, sürtünme katsayısını daha da azaltmış ve bu etki hem 3 N hem de 5 N yüklerde belirgin şekilde gözlenmiştir. Grafitin bu kayganlaştırıcı özelliği, yük artışının neden olduğu sürtünme katsayısı artışını minimum düzeyde tutmayı başarmıştır. Kuru ortam ile yağlı ortam arasındaki fark, grafitin etkinliğini daha da vurgulamaktadır. Yağlı ortamda, %10 grafit takviyesinde 3 N yük altında 0,20, 5 N yük altında ise 0,24 sürtünme katsayısına ulaşılmıştır. Bu değerler, grafitin yağ ile birleşerek oluşturduğu kayganlaştırıcı etkisini göstermektedir. Buna karşılık, kuru ortamda aynı grafit oranında sürtünme katsayıları sırasıyla 0,28 ve 0,34 olarak ölçülmüştür. Bu durum, yağlı ortamda grafitin performansını artırdığını ve yüzeye olan sürtünmeyi daha da düşürdüğünü ortaya koymaktadır.

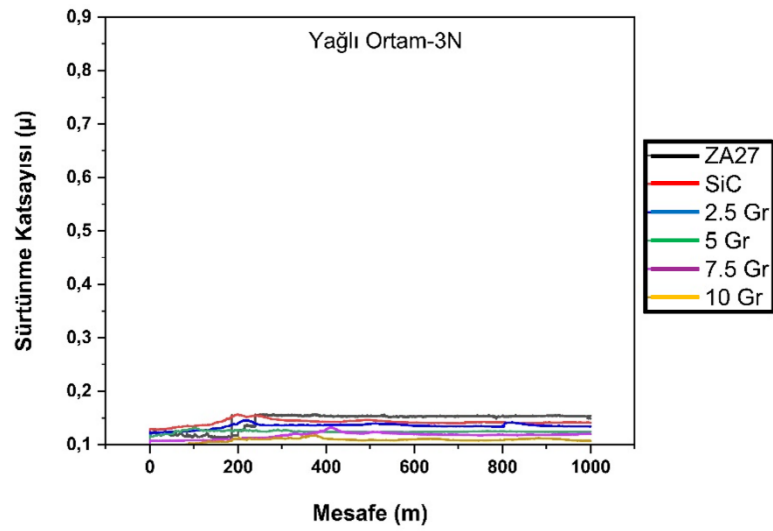
ZA27 alaşımında grafit takviyesi, her iki ortamda da sürtünme katsayısını düşürmek için etkili bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Ancak, grafitin etkisi yağlı ortamda daha belirgin hale gelmiştir. Artan grafit oranıyla birlikte sürtünme katsayısı azalmış ve bu da malzemenin, kayganlaştırma özelliklerinin önemli olduğu uygulamalar için uygunluğunu artırmıştır. Özellikle %10 oranında grafit takviyesi hem kuru hem de yağlı ortamlarda en düşük sürtünme katsayısı değerlerinin elde edilmesini mümkün kılmıştır.



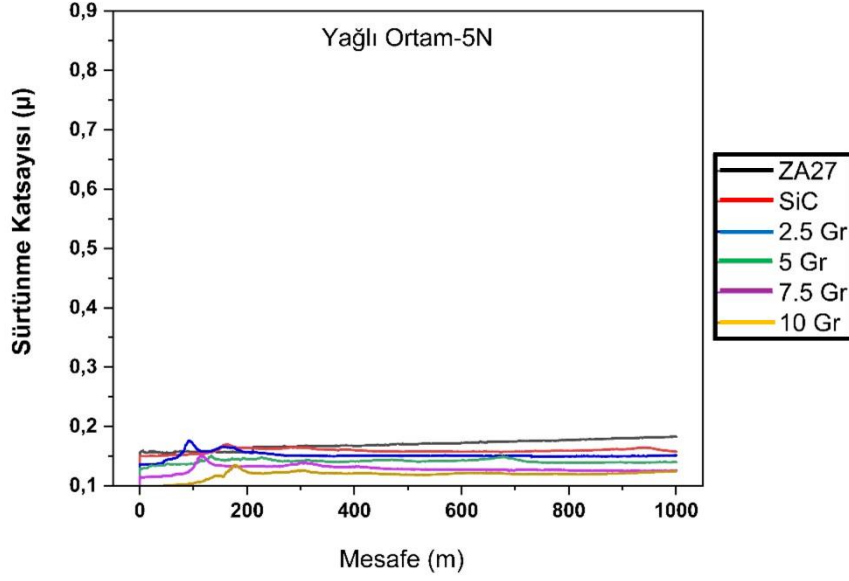
Şekil 6.8. Kuru ortamda 3N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.



Şekil 6.9. Kuru ortamda 5N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.



Şekil 6.10. Yağlı ortamda 3N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.



Şekil 6.11. Yağlı Ortamda 5N yük altında sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.

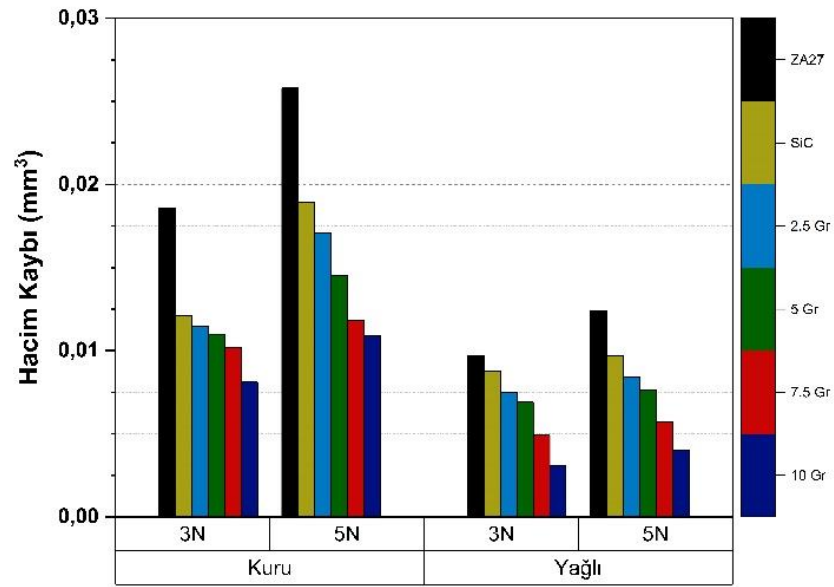
6.3.2. Grafit ilavesinin aşınmaya etkisi

Şekil 6.12’de verilen grafikte ZA27 alaşımına grafit takviyesinin aşınma davranışına etkisi, kuru ve yağlı koşullarda 3N ve 5N yükleme durumları için hacim kaybı (mm^3) verileriyle değerlendirilmiştir. Kuru ortamda 3N yük altında ZA27 alaşımı, yaklaşık $0,025 \text{ mm}^3$ ile en yüksek hacim kaybını göstermiştir. Buna karşın, grafit ilavesi ile hacim kaybında belirgin bir azalma yaşanmıştır. Örneğin, 2.5 gr grafit ilavesiyle hacim kaybı $0,02 \text{ mm}^3$ seviyesine düşerken, grafit miktarının 10 gr’a çıkarılması durumunda hacim kaybı $0,01 \text{ mm}^3$ ’ün altına kadar gerilemiştir. Bu, grafitin kuru koşullarda aşınmaya karşı etkili bir direnç oluşturduğunu göstermektedir.

5N yük altında ise kuru ortamda aşınma daha belirgin hale gelmiştir. ZA27 alaşımı bu durumda $0,028 \text{ mm}^3$ ’lük bir hacim kaybı yaşarken, grafit ilavesi bu kaybı önemli ölçüde azaltmıştır. 2.5 gr grafit eklenmesiyle hacim kaybı yaklaşık $0,023 \text{ mm}^3$ ’e düşerken, 10 gr grafit takviyesiyle bu değer $0,012 \text{ mm}^3$ seviyesine kadar gerilemiştir. Grafitin özellikle yüksek yük altında kuru ortamda aşınmayı azaltıcı etkisi oldukça dikkat çekicidir ve yük arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiği söylenebilir.

Yağlı ortamda ise aşınma değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu görülmüştür. 3N yük altında ZA27 alaşımı, yaklaşık $0,015 \text{ mm}^3$ ’lük bir hacim kaybı yaşarken, grafit ilavesi bu kaybı önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle 10 grafit içeren alaşımın hacim kaybı $0,005 \text{ mm}^3$ ’ün altına inmiştir. Bu durum, yağlı ortamda grafitin kayganlaştırıcı etkisinin aşınma direncine önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

5N yük altında yağlı ortamda benzer bir trend gözlemlenmiştir. ZA27 alaşımı yaklaşık $0,02 \text{ mm}^3$ 'lük bir hacim kaybı sergilerken, 10 gr grafit ilavesi ile bu değer $0,007 \text{ mm}^3$ 'e kadar düşmüştür. Bu durum, yağlı ortamda grafit katkısının yüksek yüklerde bile aşınmaya karşı etkili bir koruma sağladığını açıkça göstermektedir. Genel olarak, grafit katkısının her iki ortamda da aşınma davranışını iyileştirdiği, ancak bu etkinin yağlı ortamda daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle yük arttıkça, grafit miktarının artırılmasının aşınmayı daha fazla azalttığı sonucuna varılabilir.



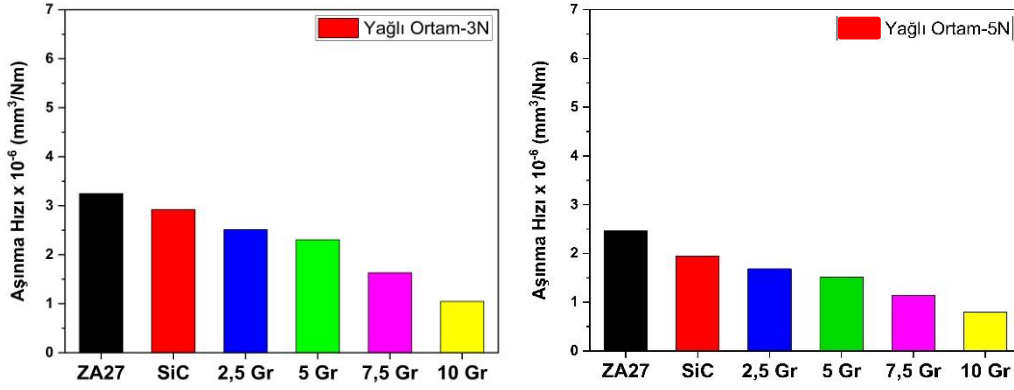
Şekil 6.12. Alaşım, kompozit ve hibrit kompozitlerine ait hacim kaybı grafiği.

6.3.3. Yükün ve ortamın aşınmaya etkisi

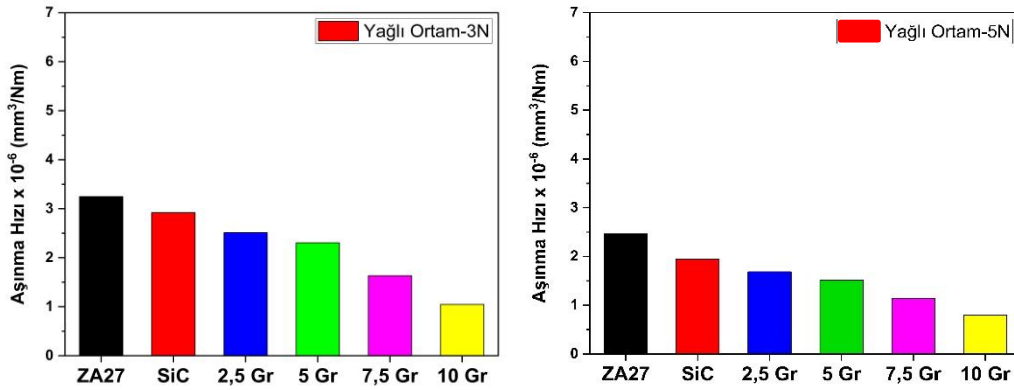
Aşınma üzerindeki yük etkisi hem kuru hem de yağlı ortamlar için değerlendirildiğinde açıkça ortaya çıkmaktadır. 3N yük ile karşılaştırıldığında, 5N yük altında aşınma oranının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yük artışı, temas yüzeyindeki basıncı ve sürtünme kuvvetlerini yükselterek malzemenin aşınma direncini zorlamaktadır. Daha yüksek yükler, temas bölgesinde daha fazla deformasyona yol açmakta ve bu da yüzeyden daha fazla malzemenin aşınmasına neden olmaktadır. Bu durum, yüklerle birlikte aşınma mekanizmalarının daha agresif hale geldiğini ve malzeme kaybının arttığını göstermektedir.

Grafit ilavesi bu etkiyi bir ölçüde azaltabilse de yükün aşınmayı artırıcı etkisi hem kuru hem de yağlı ortamlarda kendini hissettirmektedir. Yağlı ortamın kayganlaştırıcı etkisi yüklerle birlikte oluşan aşınma baskısını hafifletirken, yine de daha yüksek yüklerde grafitin performansı sınırlarına ulaşmaktadır. Yük artışı, yalnızca temas bölgesindeki

basıncı artırmakla kalmaz, aynı zamanda malzemeler arası mikro-kesme ve yüzey deformasyonu gibi mekanizmaları da güçlendirdiği için aşınmayı kaçınılmaz olarak artırır. Sonuç olarak, yük artışı aşınma davranışını etkileyen en kritik faktörlerden biridir.



Şekil 6.13. Kuru ortamda aşınma hızı a) 3N yük altında b) 5N yük altında.



Şekil 6.14. Yağlı ortamda aşınma hızı a) 3N yük altında b) 5N yük altında.

6.4. Profilometre Sonuçları

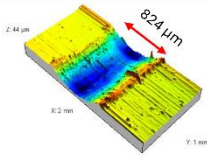
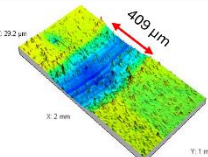
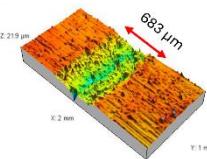
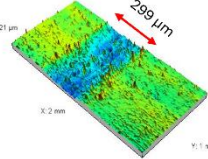
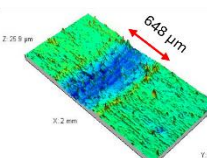
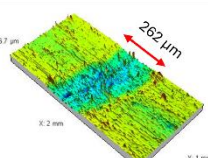
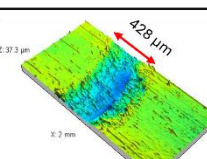
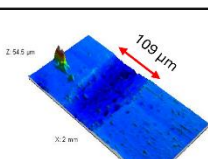
Tablo 1 ve Tablo 2’de 3N ve 5N yük altında kuru ve yağlı ortamlardaki aşınma işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzey analizlerinin sonuçları verilmiştir. Kuru koşullarda, ZA27 alalımın alümina aşındırıcının etkisiyle yüzey hasarının SiC takviyeli kompozite göre daha derin olduğu tespit edilmiştir. Grafit takviyesi ile yüzeyde ince bir yağlama tabakası oluşmuş ve bu durum sürtünme katsayısını ve aşınma miktarını azaltmıştır. Grafit oranı arttıkça, aşınma derinliğinin azaldığı ve yüzey izlerinin daha düzgün hale geldiği gözlemlenmiştir. Yağlı koşullarda ise tüm numunelerde aşınma derinliği belirgin şekilde azalmış, özellikle grafit takviyeli hibrit kompozitlerde en düşük aşınma derinlikleri elde edilmiştir.

SiC takviyesi, sertliği ile aşınma direncini artırmış; ancak sertlik farkı nedeniyle SiC parçacıklarının matrise gömülmesi ve matrisin aşınması gözlemlenmiştir. Buna karşılık, grafit takviyesi, yüzeyde mikro çatlakları ve deformasyonları azaltarak aşınma mekanizmasını olumlu yönde değiştirmiştir. Özellikle grafit oranının artırılması, kuru koşullarda daha üstün performans sağlamış, yağlı koşullarda ise aşınma izlerini minimuma indirmiştir.

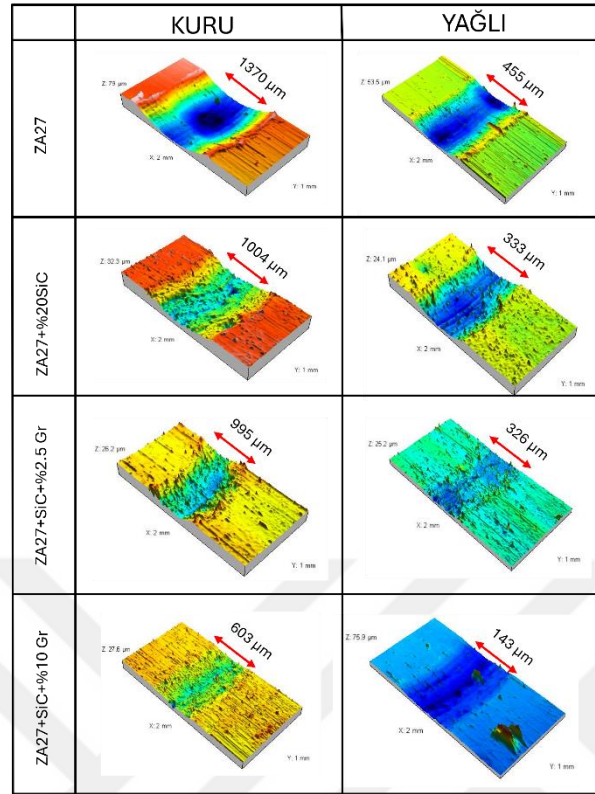
Aşınma mekanizmaları incelendiğinde, kuru koşullarda genellikle yapışmalı ve oksidatif aşınma gözlemlenirken, grafit takviyesinin etkisiyle bu mekanizma yumuşak aşınma olarak değişmiştir. Yağlı koşullarda ise yağlama etkisi, aşınma miktarını daha da azaltarak yüzey koruma mekanizmasını güçlendirmiştir. Profilometre analizleri, grafit takviyesi ile yüzey deformasyonunun azaldığını ve daha düzgün yüzey yapılarının oluştuğunu göstermiştir.

ZA27 alaşımına SiC ve grafit takviyesi eklenerek oluşturulan hibrit kompozitler hem kuru hem de yağlı koşullarda üstün aşınma direnci ve sürtünme performansı sergilemiştir. SiC'nin aşınma direncini artırıcı etkisi ile grafitin yağlama ve sürtünme azaltıcı etkisi bir araya geldiğinde, özellikle grafit oranı yüksek hibrit kompozitlerde, aşınma ve deformasyonun minimum seviyeye indiği görülmüştür.

Tablo 6.1. 3N yük altında kuru ve yağlı ortamda aşınan yüzeylerin profilometresi.

	KURU	YAĞLI
ZA27		
ZA27+%20SiC		
ZA27+SiC+%2.5 Gr		
ZA27+SiC+%10 Gr		

Tablo 6.2. 5N yük altında kuru ve yağlı ortamda aşınan yüzeylerin profilometresi.



6.3'te, farklı takviye içeriğine sahip numunelerin kuru ve yağlı ortamlar altında elde edilen aşınma iz genişlikleri karşılaştırılarak, yağlı ortamın sağladığı iyileşme oranları yüzdesel olarak verilmiştir. ZA27 alaşımı, yalnızca yağlama etkisiyle belirgin bir iyileşme gösterirken; SiC ve grafit takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerde bu iyileşme oranı önemli ölçüde artmıştır. Özellikle %10 grafit takviyesi içeren kompozit hem 3N hem de 5N yük altında en yüksek iyileşme yüzdesine ulaşarak, yağlı ortamın ve grafitin aşınma direncine katkısını net biçimde ortaya koymuştur. Bu durum, grafitin yüzeyde kaygan bir film oluşturarak sürtünmeyi azaltması ve deformasyonu önlemesiyle ilişkilidir.

Tablo 6.3. Farklı takviyeli numunelerin kuru ve yağlı ortamlar arasındaki aşınma iyileşme oranları (%)

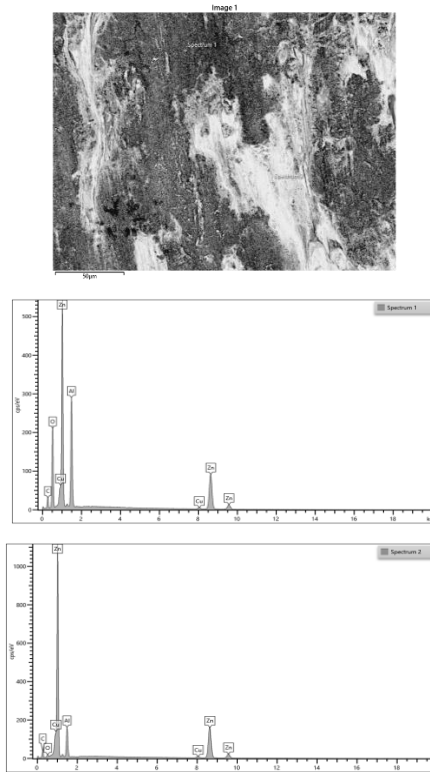
Numuneler	3N Yük Altında	5N Yük Altında
ZA27 Alaşımı	% 50.37	% 66.79
ZA27 + %20 SiC	% 56.22	% 66.83
ZA27 + SiC+2.5 Gr	% 59.57	% 67.24
ZA27 + SiC+10 Gr	% 74.53	%76.25

6.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

6.5.1. ZA27 alaşımının aşınma SEM görüntüleri ve EDS analizi

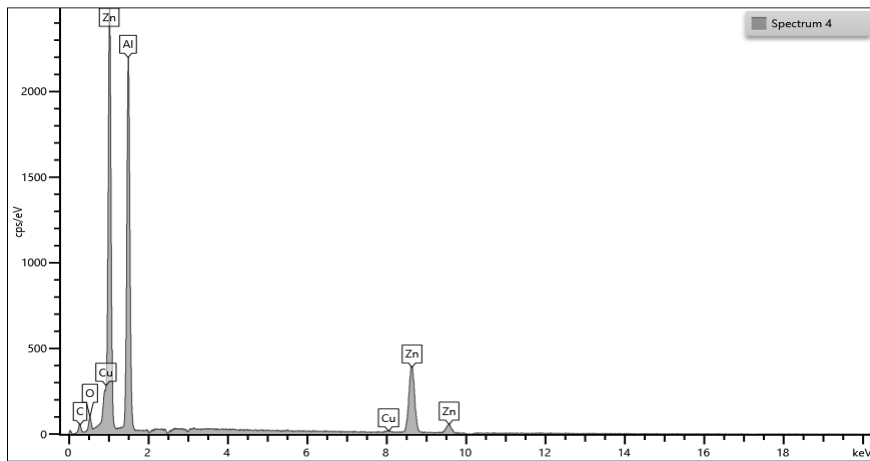
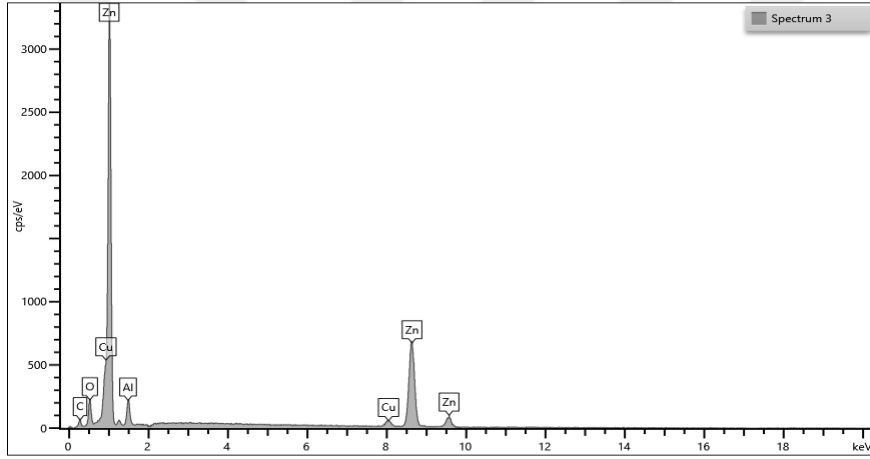
ZA27 alaşımının aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. 3N yük altında kuru aşınmada, yüzeyde belirgin oluklar ve ciddi deformasyonlar gözlemlenirken, yağlı aşınmada yüzeyin daha az hasar aldığı ve aşınmanın daha hafif olduğu tespit edilmiştir. 5N yük altında kuru aşınmada ise yük artışıyla birlikte yüzeyde derin oyuklar, kırılmalar ve aşınmanın daha belirgin hale geldiği fark edilmektedir. Buna karşın, 5N yük altında yağlı aşınmada yüzeyde daha az aşınma izi bulunmakta ve malzeme kaybı kuru aşınmaya kıyasla daha düşük seviyededir.

EDS analizleri incelendiğinde, kuru aşınma koşullarında oksijen (O) seviyesinin daha yüksek olduğu, bu durumun yüzeydeki oksitlenmenin artmasıyla ilişkili olduğu görülmektedir. Yağlı aşınmada ise oksijen seviyesinin daha düşük olması, yağın sürtünmeyi azaltarak oksitlenmeyi engellemesiyle açıklanabilir. Yük artışıyla birlikte aşınmanın daha şiddetli hale gelmesi nedeniyle, aşınma sonucu ortaya çıkan oksit bileşenlerinde ve yüzey deformasyonunda artış gözlemlenmiştir.



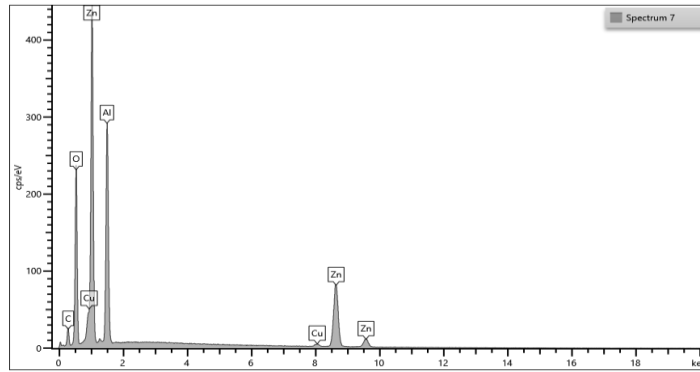
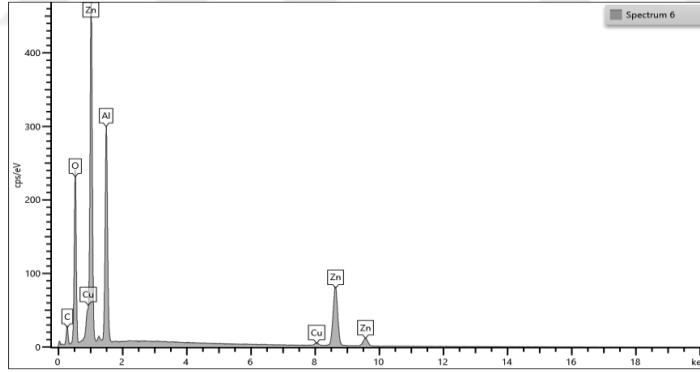
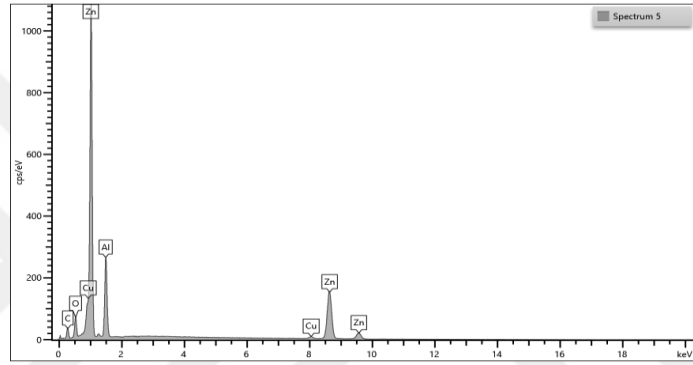
Şekil 6.15. ZA27 Alaşımına kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

Image 2

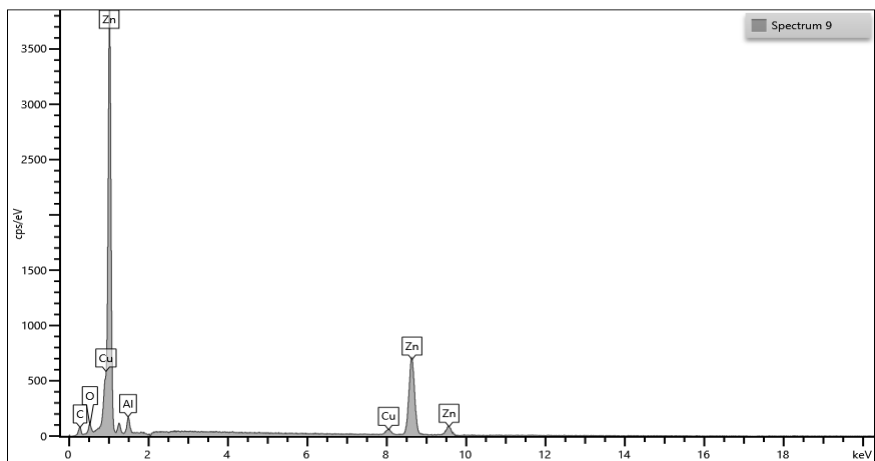
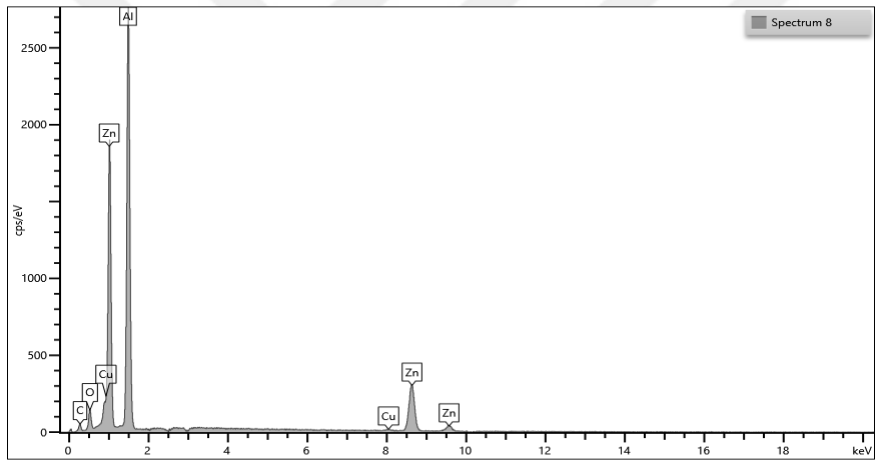
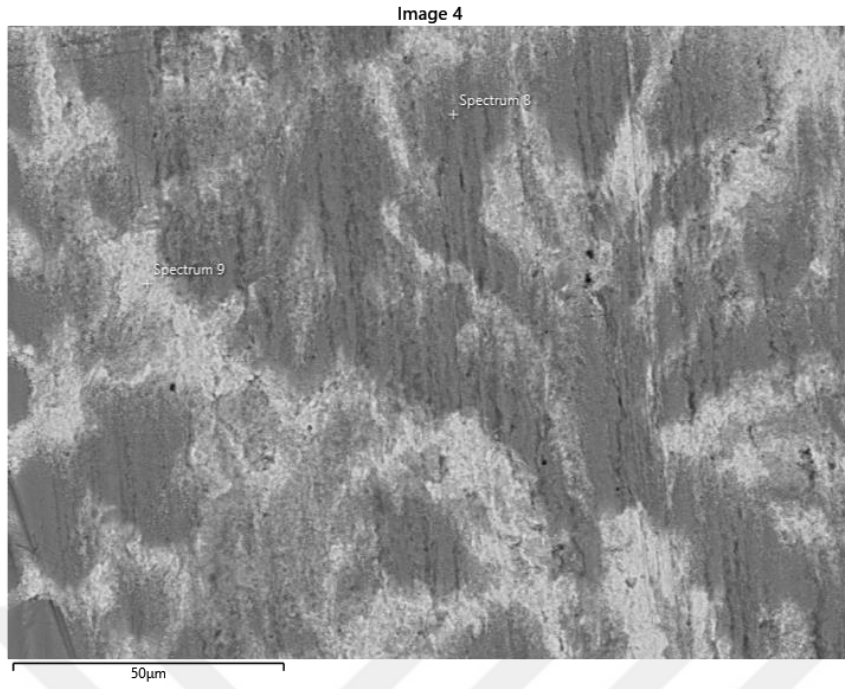


Şekil 6.16. ZA27 Alaşımına yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

Image 3



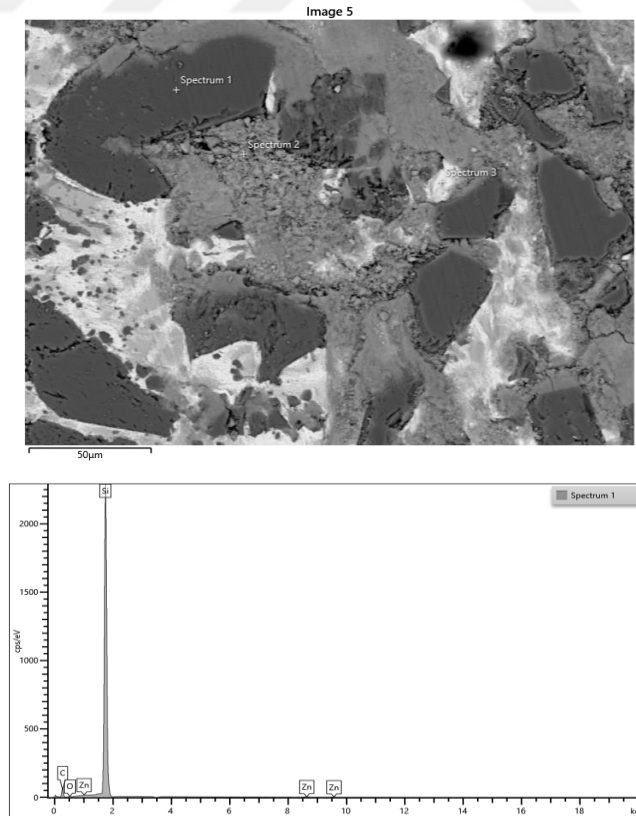
Şekil 6.17. ZA27 Alaşımına kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



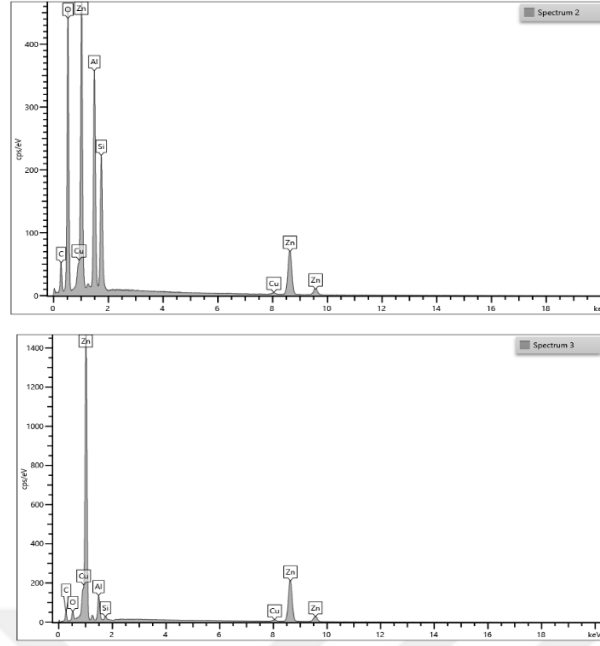
Şekil 6.18. ZA27 Alaşımına yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

6.5.2. STK aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi

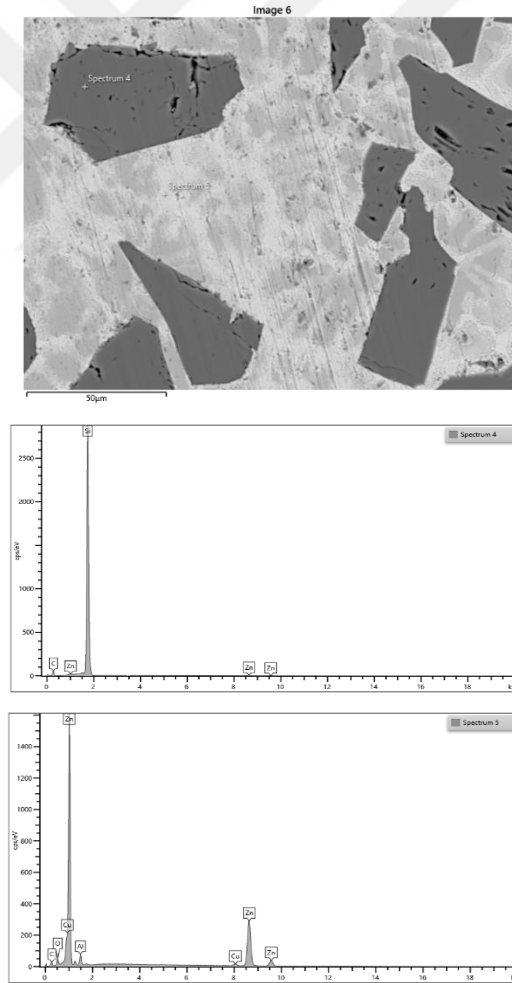
ZA27 + %20 SiC takviyeli kompozitin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. 3N yük altında kuru aşınmada, yüzeyde belirgin çatlaklar, parçalanmalar ve SiC parçacıklarının koparak matrise zarar verdiği gözlemlenmiştir. Buna karşın, 3N yük altında yağlı aşınmada, aşınma izleri daha az belirgin olup yağlama sayesinde SiC parçacıklarının daha stabil kaldığı ve yüzeyde daha az deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. 5N yük altında kuru aşınmada, aşınma etkisinin belirgin şekilde arttığı, SiC parçacıklarının koparak matrise zarar verdiği ve yüzeyde derin deformasyonların olduğu anlaşılmıştır. Yüksek yük ve sürtünmenin etkisiyle oksidasyonun arttığı, EDS analizlerinde oksijen (O) seviyesinin daha yüksek çıkmasından anlaşılmaktadır. 5N yük altında yağlı aşınmada ise yağın aşınmayı azalttığı, SiC parçacıklarının daha iyi korunduğu ve yüzey deformasyonunun kuru aşınmaya kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Genel olarak, SiC takviyesinin ZA27 alaşımının aşınma direncini artırdığı, yağlamanın aşınmayı önemli ölçüde azalttığı, ancak yük arttıkça aşınmanın daha şiddetli hale geldiği söylenebilir.



Şekil 6.19. STK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

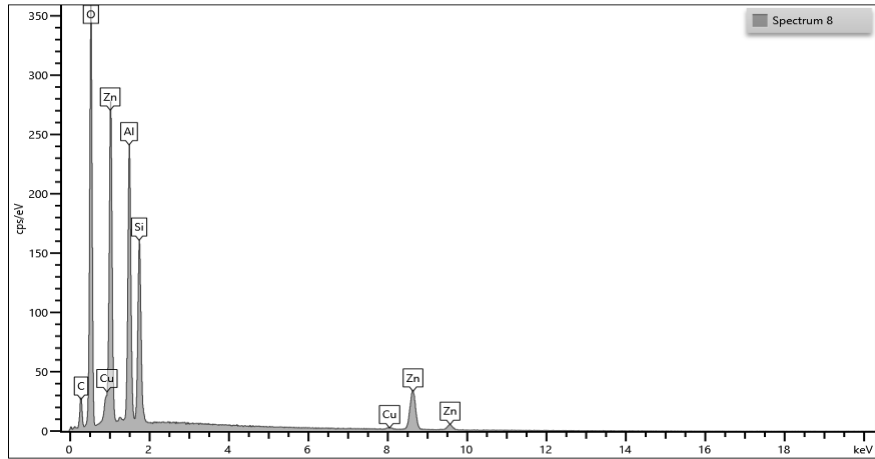
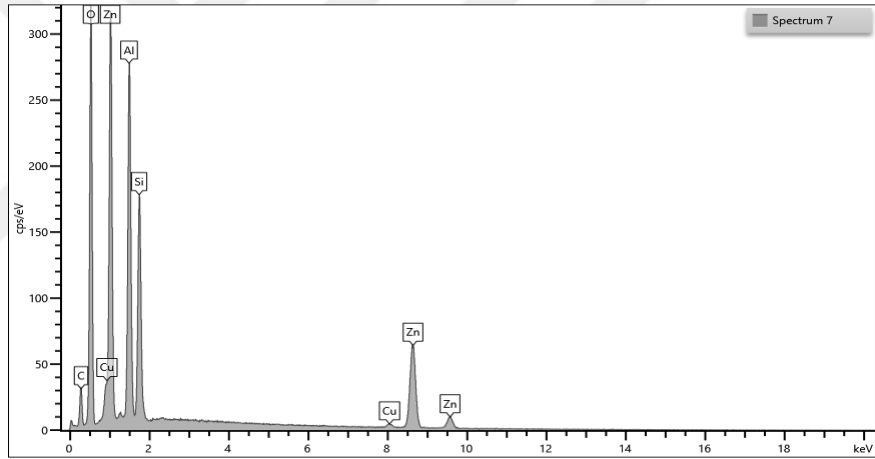
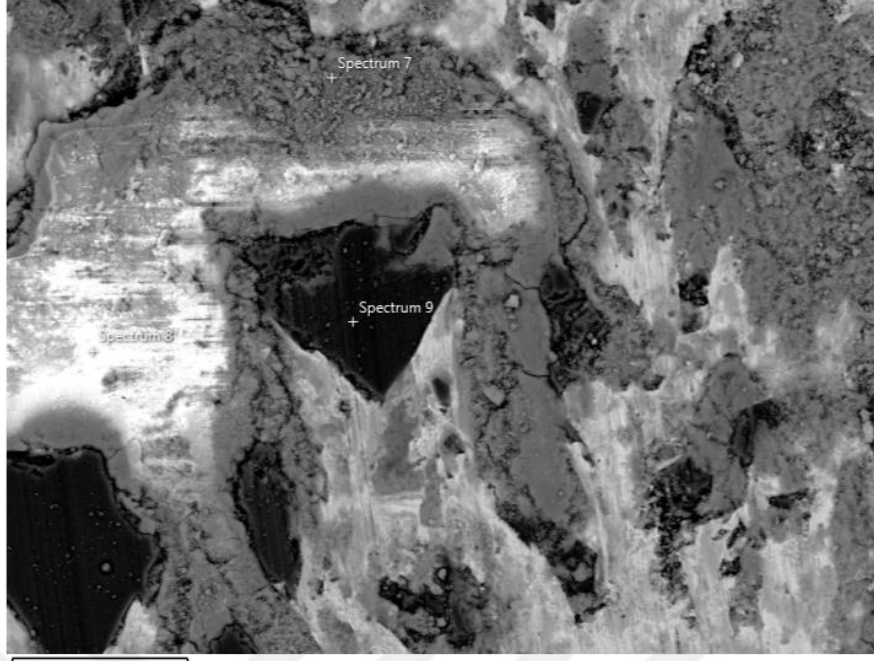


Şekil 6.19. (Devamı) STK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



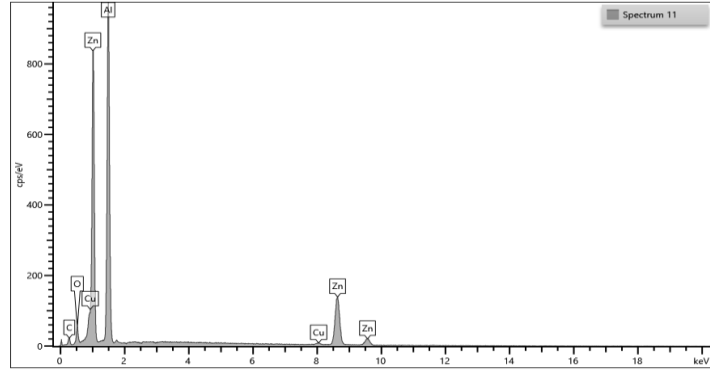
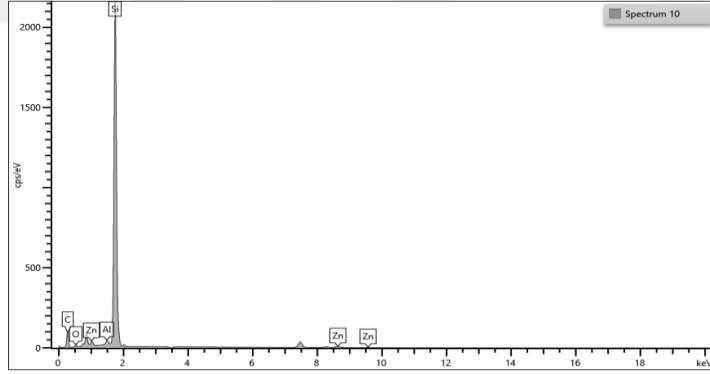
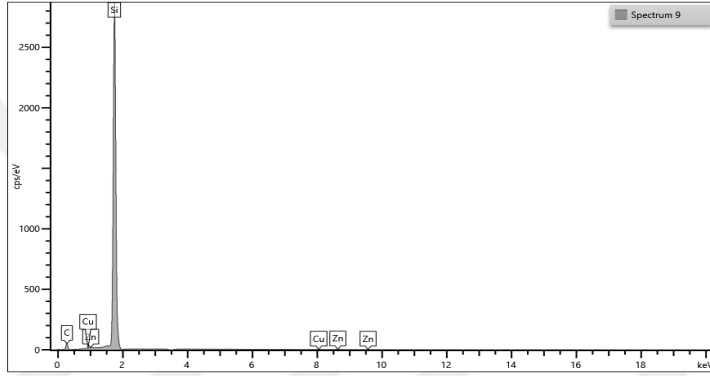
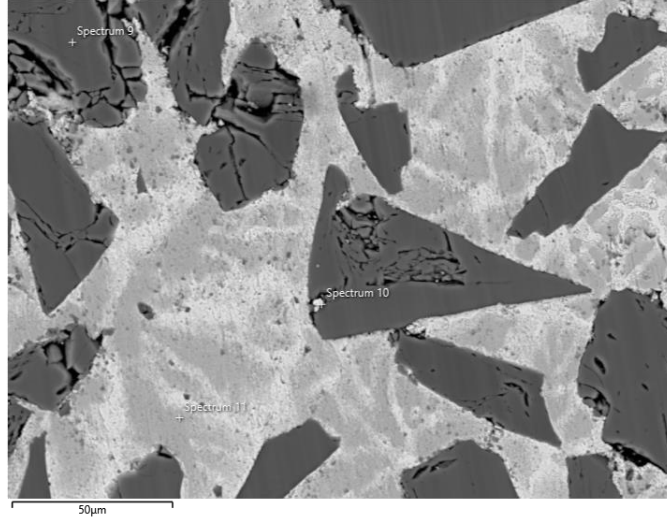
Şekil 6.20. STK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

Image 7



Şekil 6.21. STK kuru ortamda 5N yük altında aıt aşınma izi ve EDS analizi.

Image 8



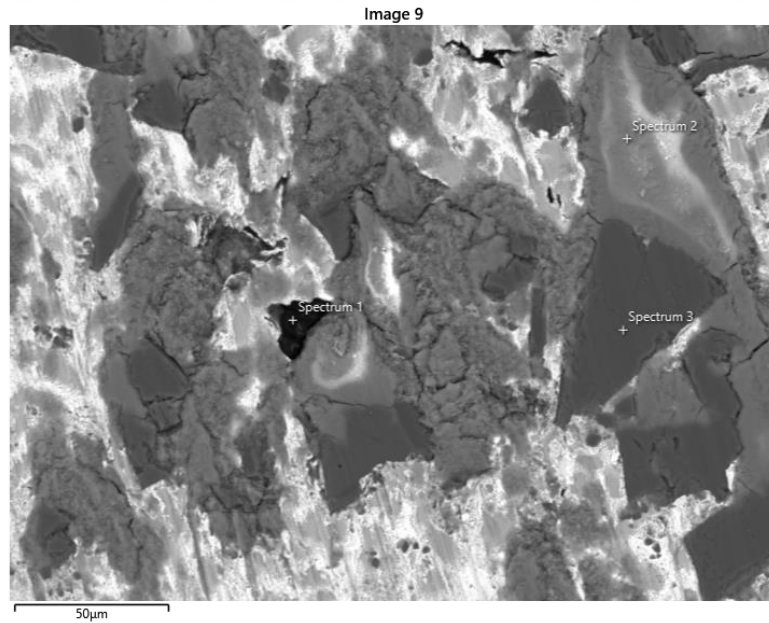
Şekil 6.22. STK yağlı ortamda 5N yük altında aıt aşınma izi ve EDS analizi.

6.5.3. HTK aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi

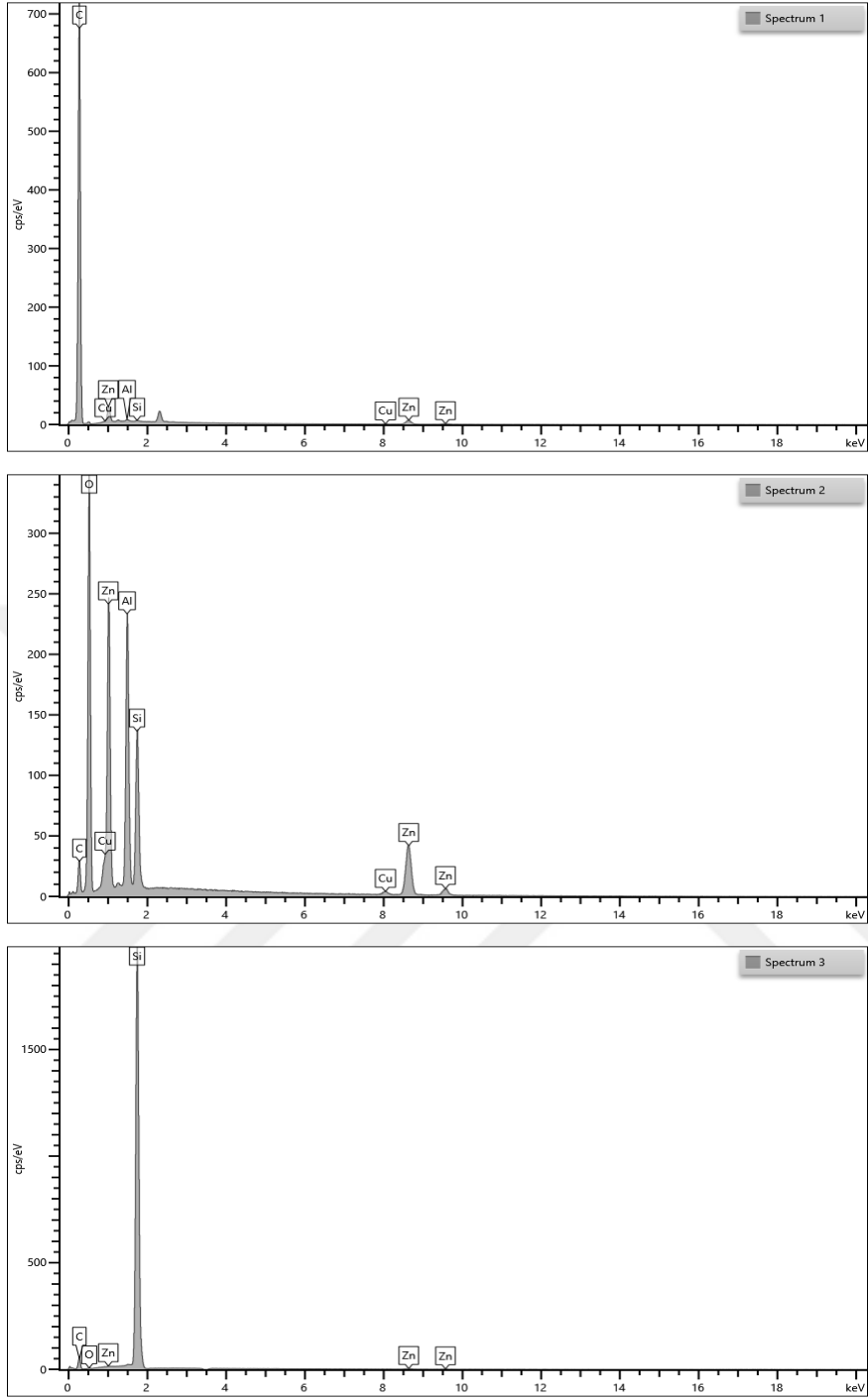
ZA27 + %20 SiC + %2,5 Gr takviyeli hibrit kompozitin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. Yapılan analizler, grafit miktarının düşük olmasının aşınma mekanizmasına etkisini ve ortam koşullarına bağlı olarak meydana gelen değişimleri ortaya koymaktadır.

SEM görüntüleri ve EDS analizleri, SiC fazında mikro çatlakların oluştuğunu, matris tabakasında ise mekanik deformasyon ve oksit tabakası geliştiğini göstermektedir. Grafit miktarının düşük olması, aşınma oranında belirgin bir değişiklik yaratmazken, yağlı ortamda yapılan testlerde mikro çatlakların daha az olduğu ve oksit tabakasının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Yağlı ortam, aşınmış partiküllerin taşınmasını sağlayarak aşınma sürecini etkilemiş ve SEM analizlerinde grafit fazına aşınmış matris partiküllerinin gömüldüğü tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, yağlı ortamın aşınma mekanizmasını değiştirerek yüzey hasarını azalttığını, ancak düşük grafit içeriğinin kuru ortamdaki aşınma performansını sınırlı ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

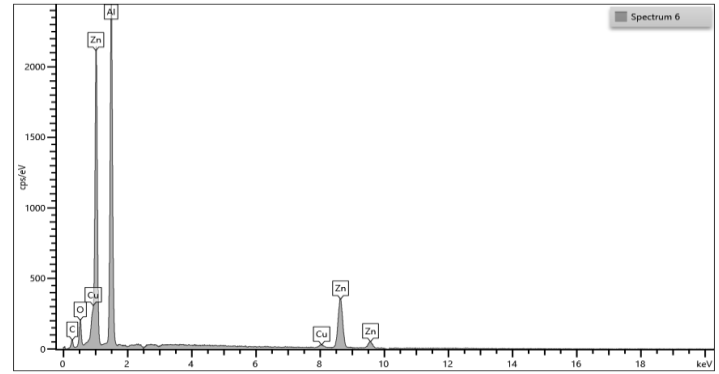
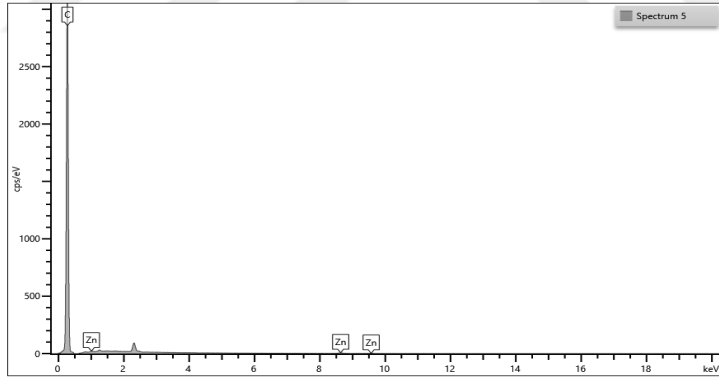
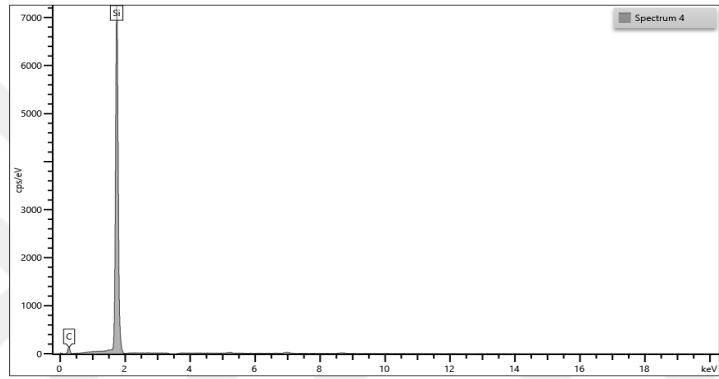
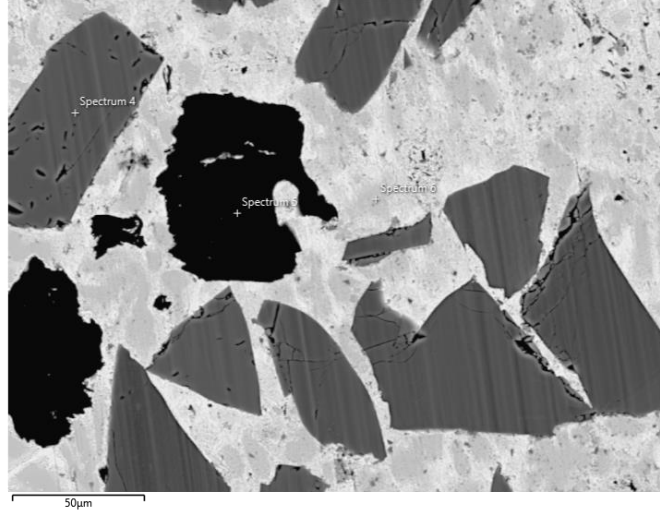


Şekil 6.23. %2,5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

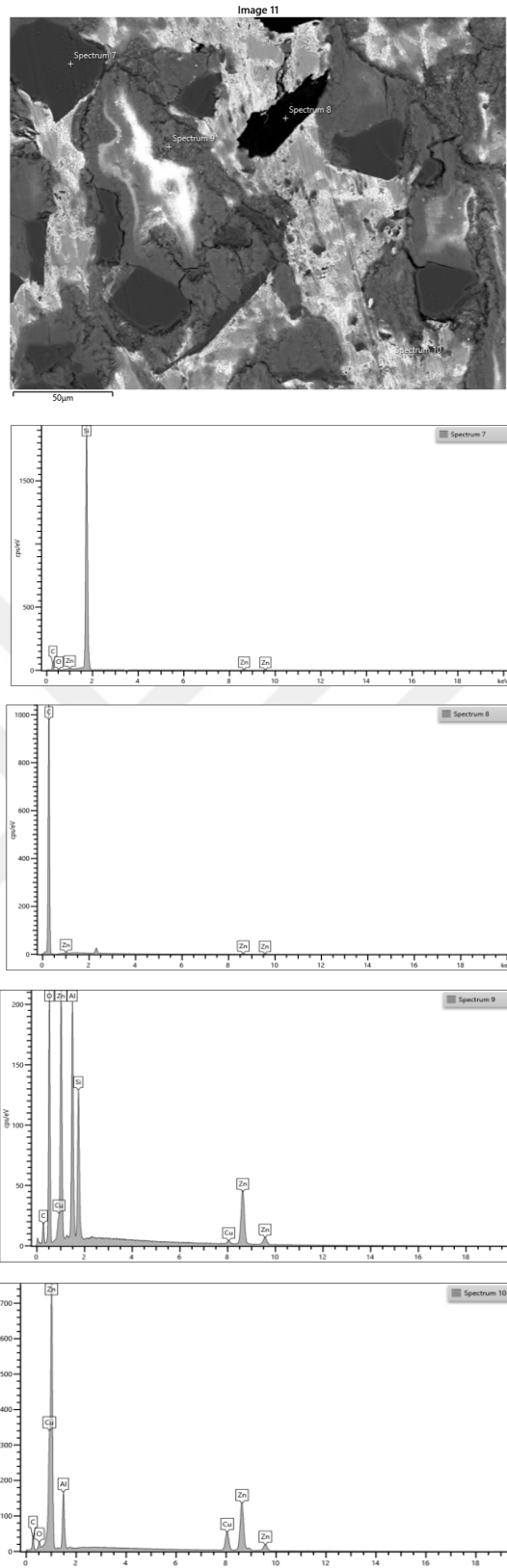


Şekil 6.23. (Devamı) %2,5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

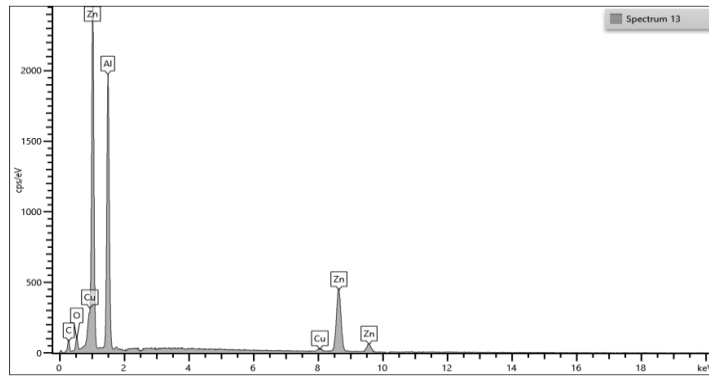
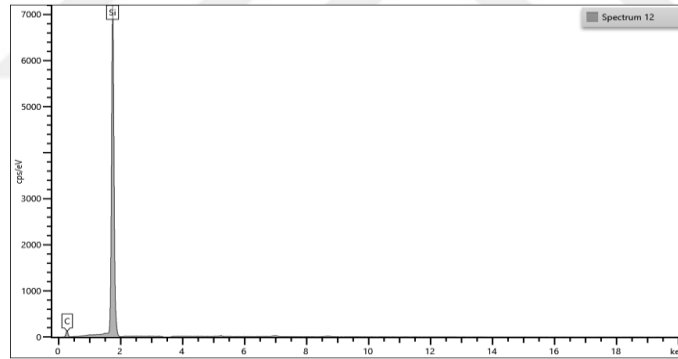
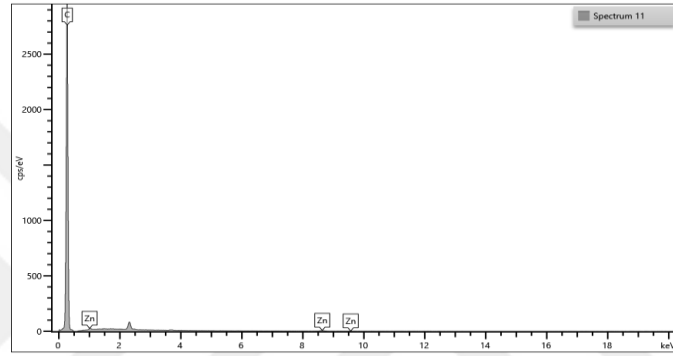
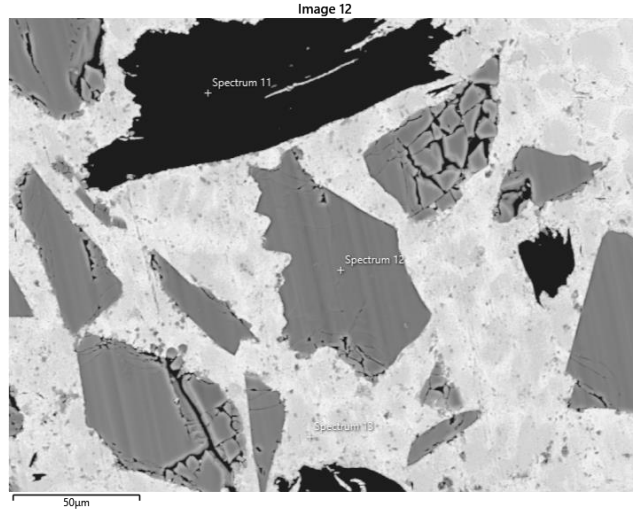
Image 10



Şekil 6.24. %2,5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

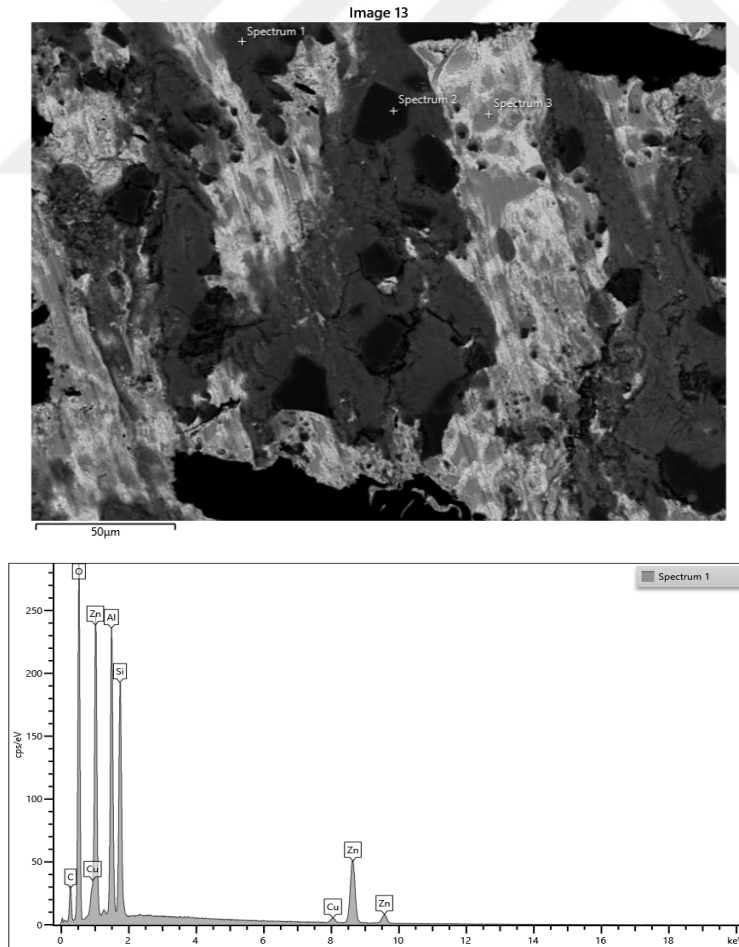


Şekil 6.25. %2,5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

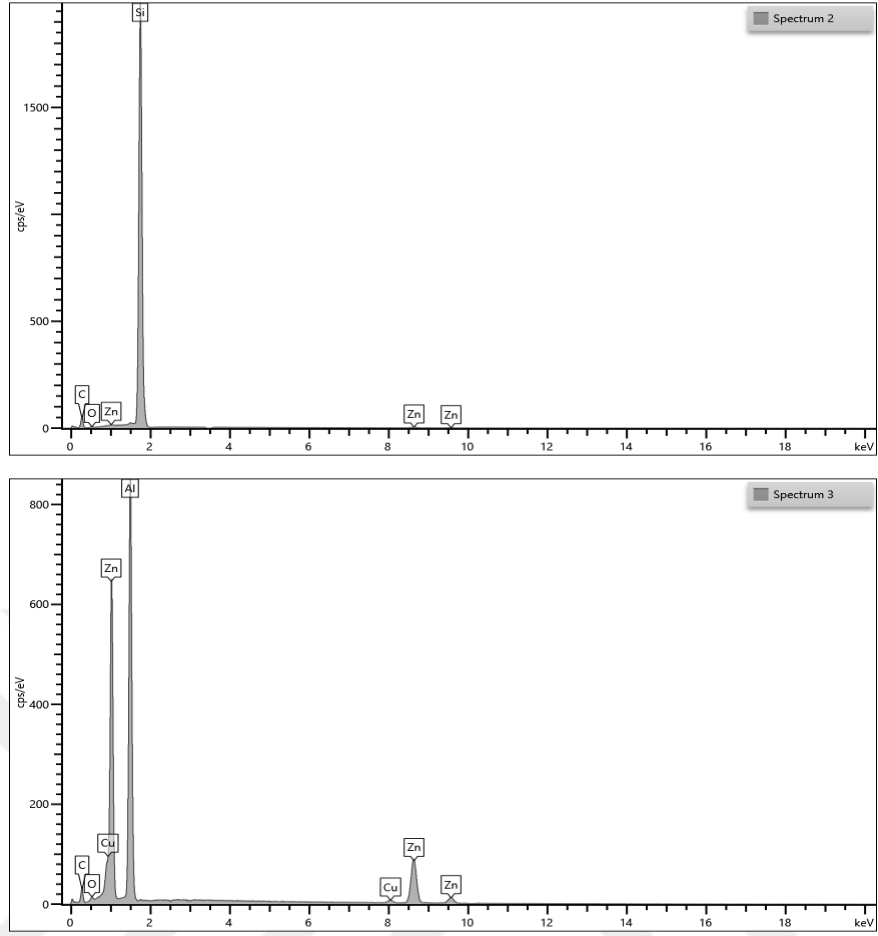


Şekil 6.26. %2,5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

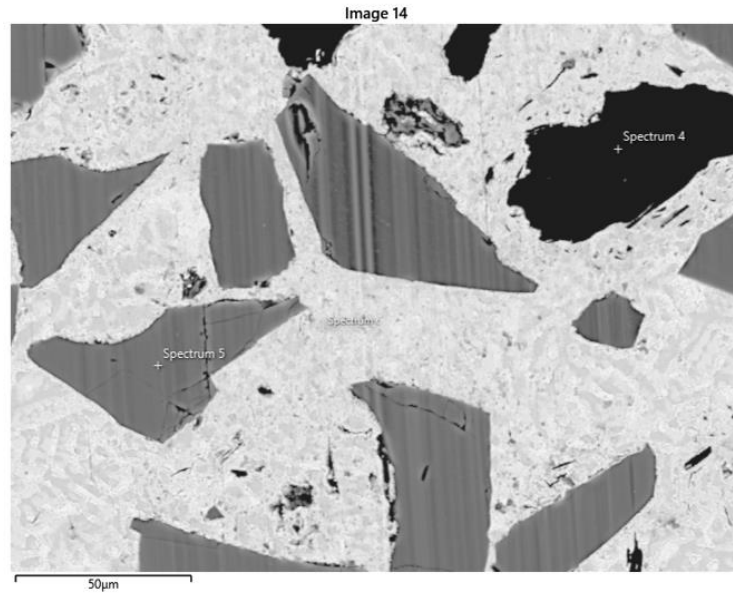
ZA27 + %20 SiC + %5 Gr takviyeli hibrit kompozitin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30’da ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. Yapılan analizler, yük ve ortam koşullarının aşınma mekanizmasına etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Kuru ortamda, oksit tabakalarının ve mikro çatlakların oluştuğu gözlemlenmiş, matris fazındaki karbon artışının grafitin yağlama etkisini desteklediği belirlenmiştir. EDS analizleri, Zn elementinin aşınma sırasında SiC fazına taşındığını göstermektedir. Yağlı ortamda ise oksit tabakalarının oluşmadığı, mikro çatlakların daha az olduğu ve aşınma izlerinin kuru ortama kıyasla daha hafif olduğu tespit edilmiştir. Yağın aşınmış partikülleri taşıyarak aşınma mekanizmasını değiştirdiği ve grafit takviyesinin yağlama etkisini destekleyerek aşınmayı azalttığı anlaşılmıştır. Genel olarak, yağlı ortam aşınma izlerini azaltarak yüzey hasarını minimize ederken, kuru ortamda oksidatif aşınma ve mekanik deformasyon daha belirgin hale gelmiştir.



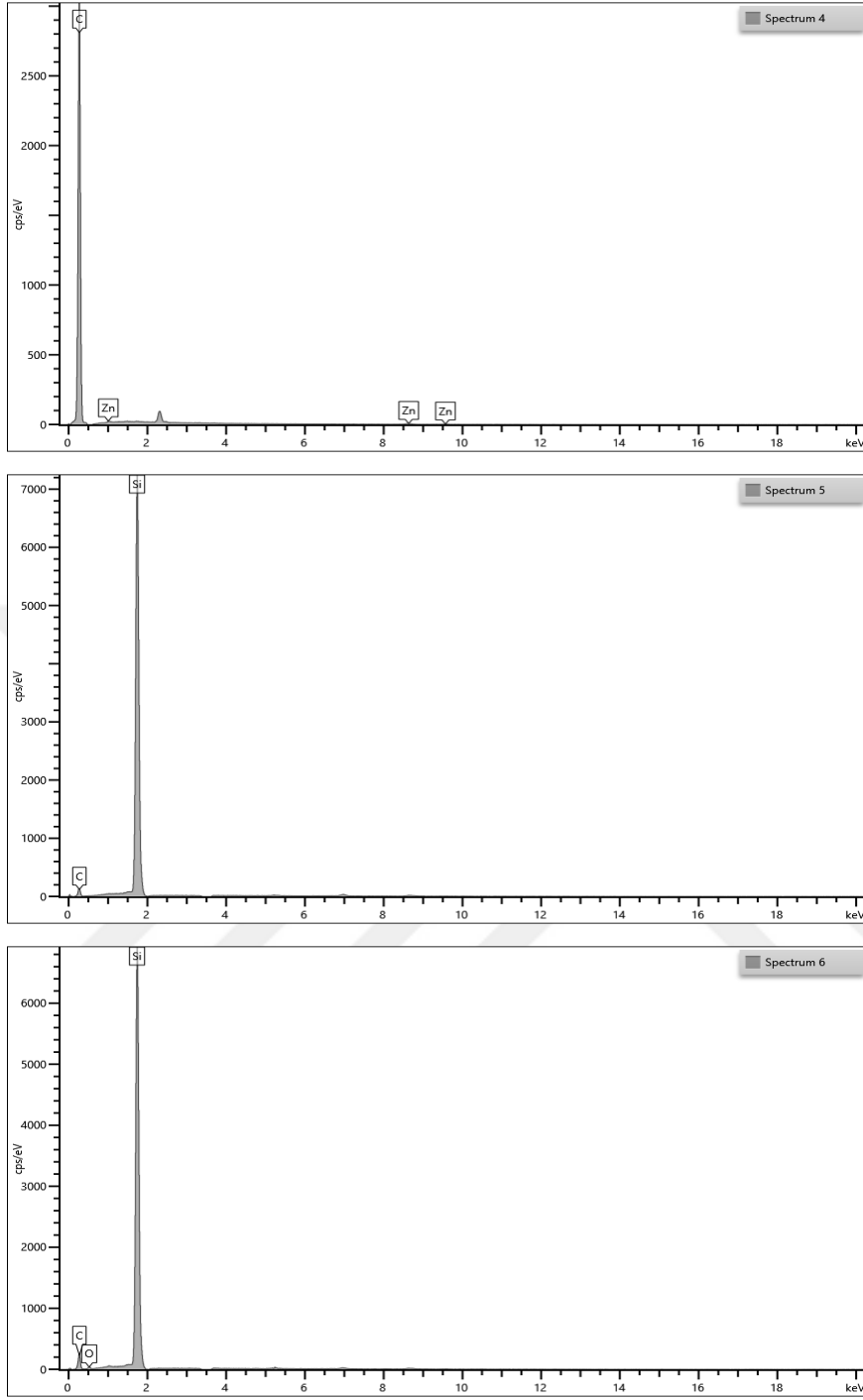
Şekil 6.27. %5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



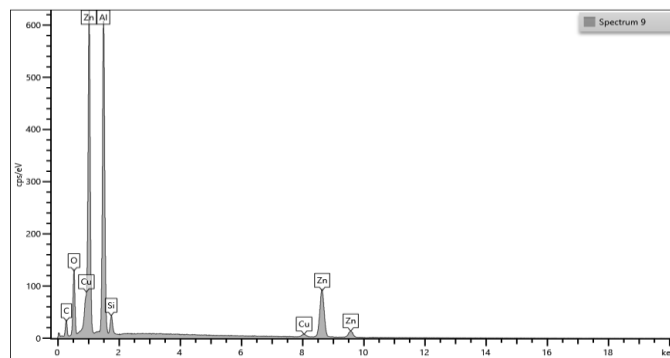
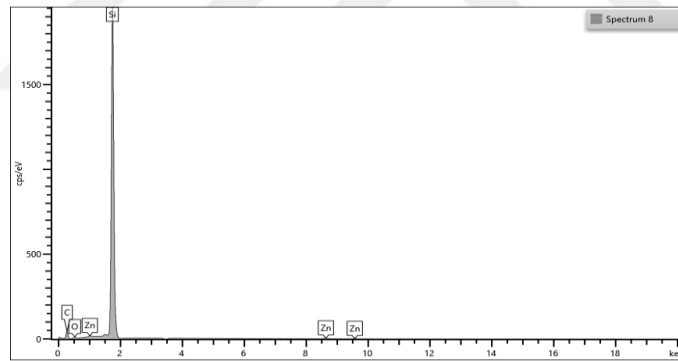
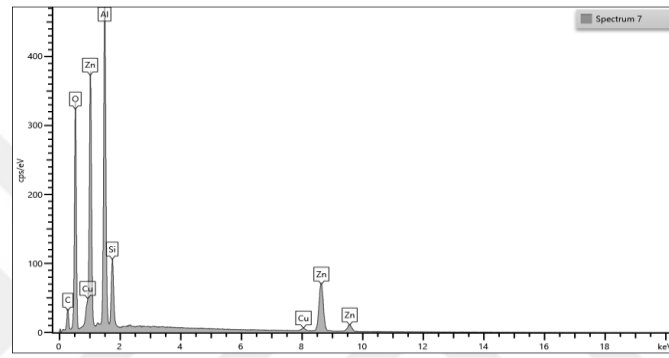
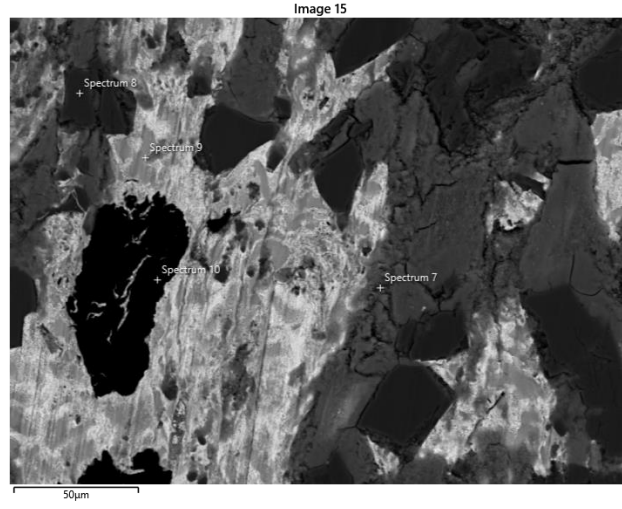
Şekil 6.27. (Devamı) %5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



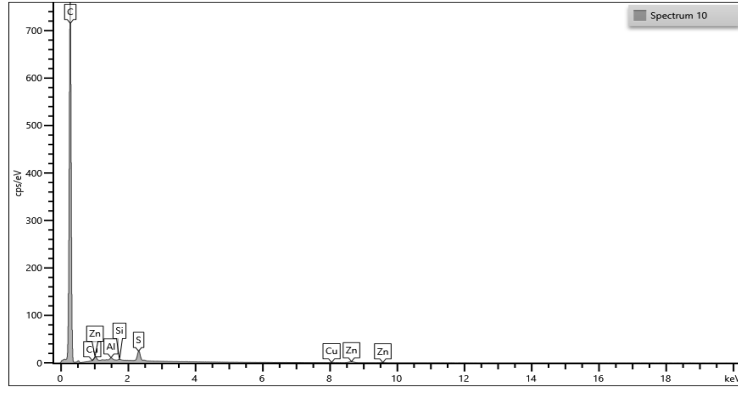
Şekil 6.28. %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



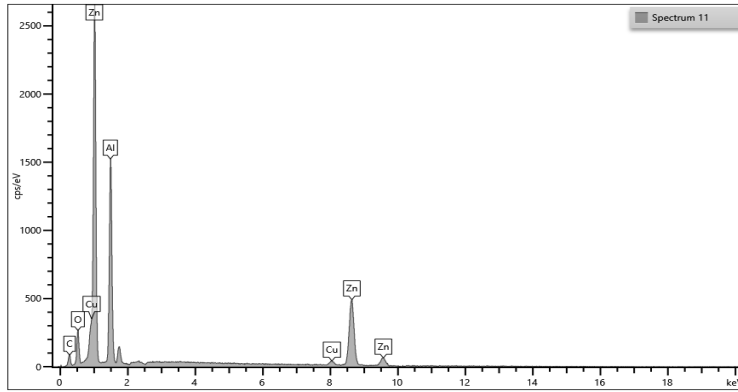
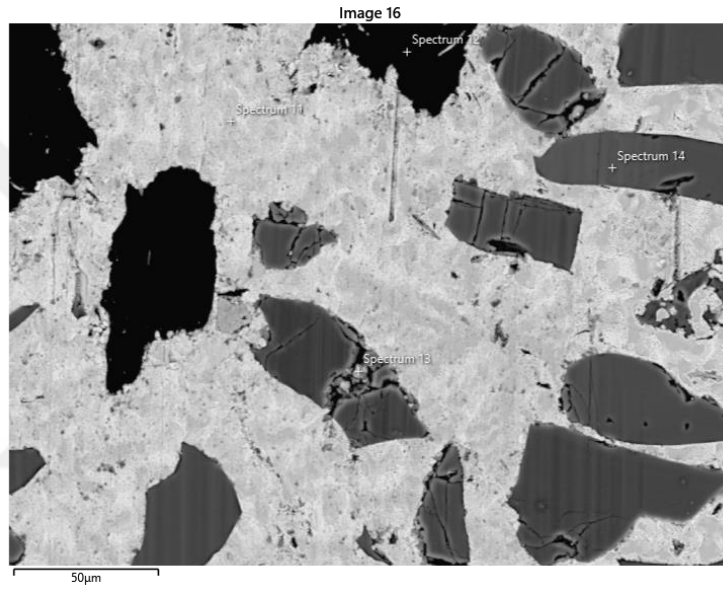
Şekil 6.28. (Devamı) %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



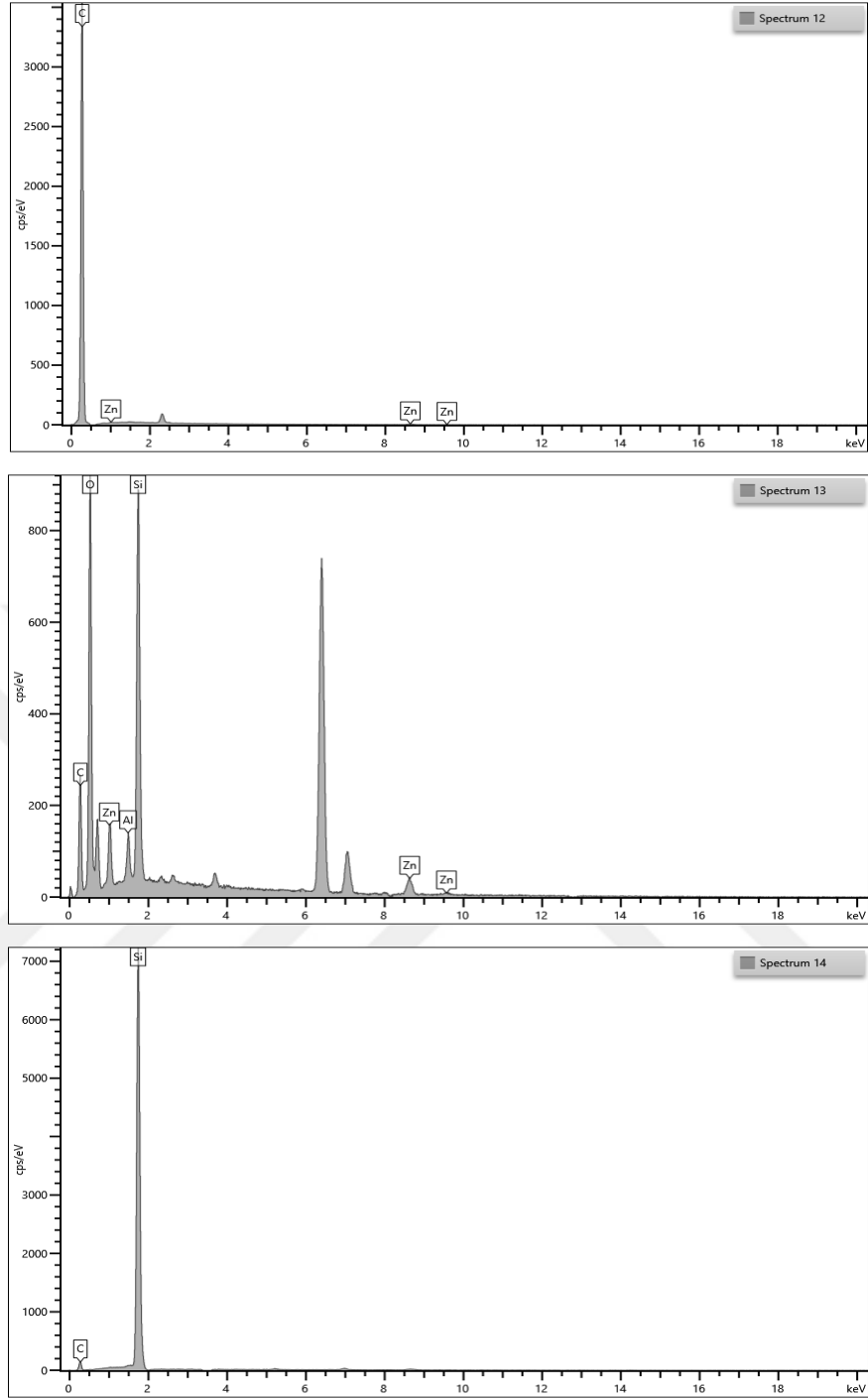
Şekil 6.29. %5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında aıt aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.29. (Devamı) %5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.30. %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

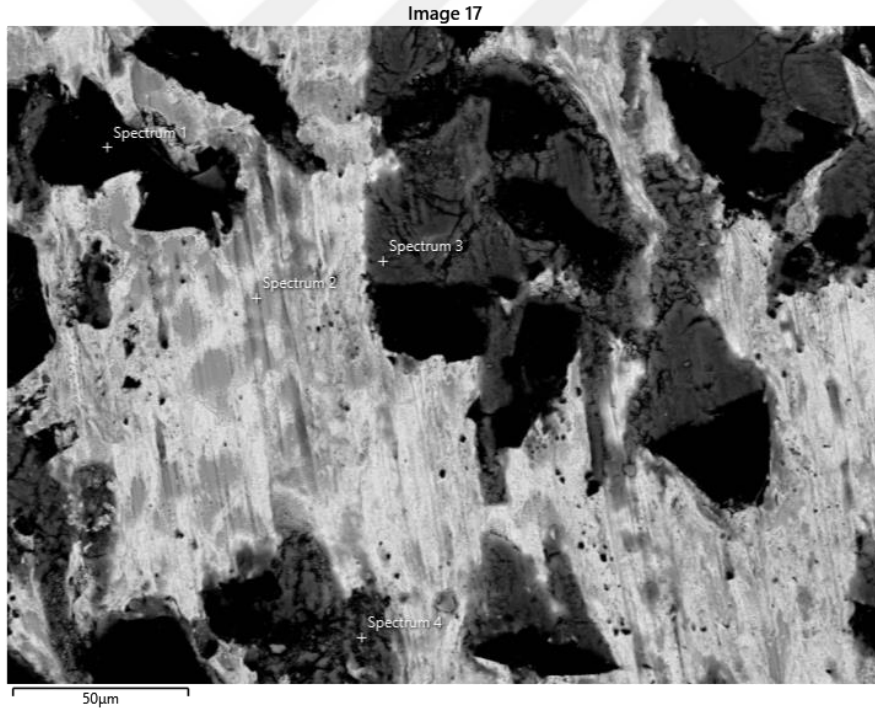


Şekil 6.30. (Devamı) %5 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

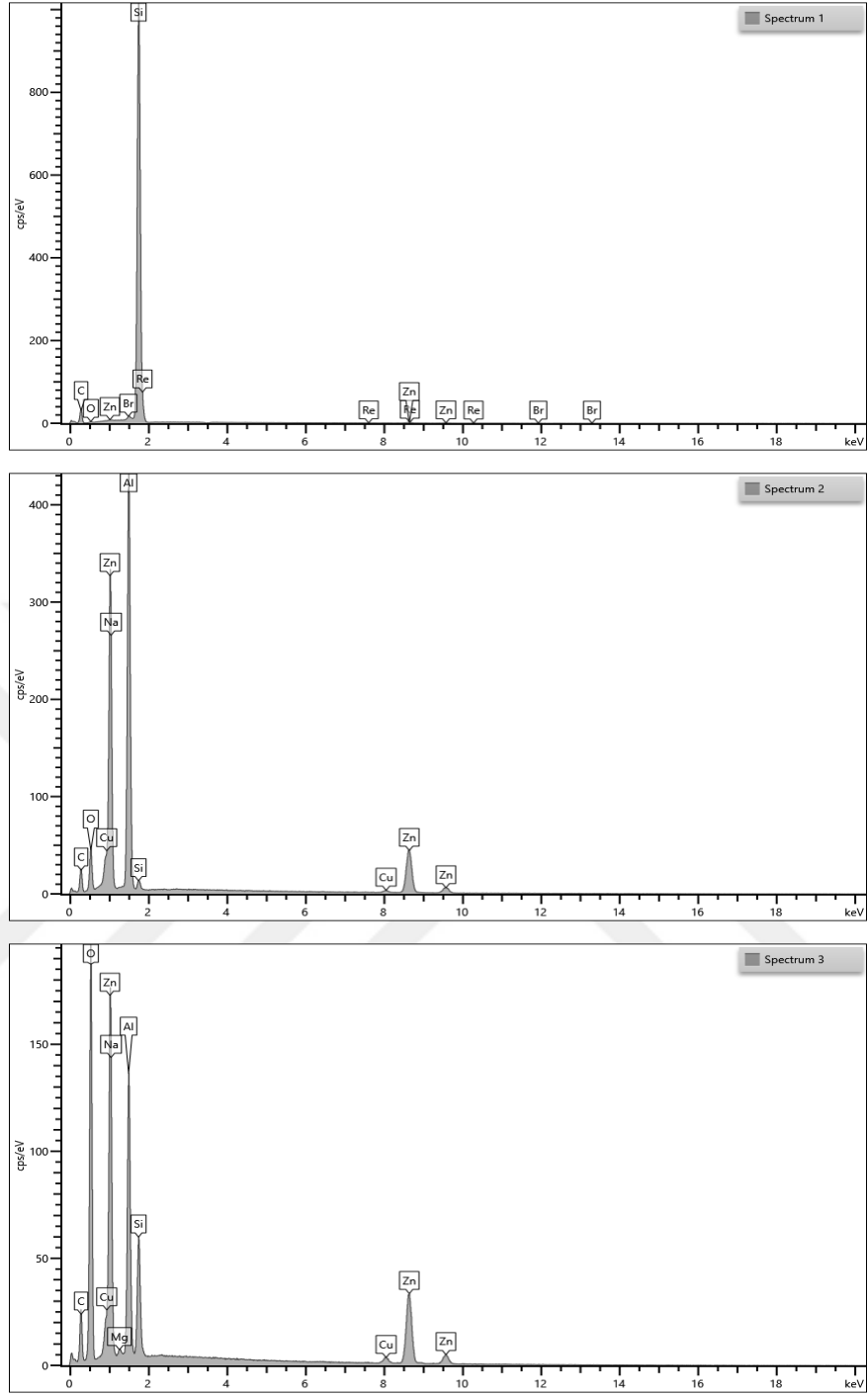
ZA27 + %20 SiC + %7.5 Gr takviyeli hibrit kompozitin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34’te ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. Farklı yük ve ortam koşullarında yapılan SEM ve EDS analizleri, aşınma mekanizmasının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

3N yük altında kuru ortamda, yüzeyde mikro çatlaklar ve oksitlenme belirtileri gözlemlenirken, yağlı ortamda oksit tabakası oluşmamış ve mikro çatlakların daha az olduğu tespit edilmiştir, bu da yağın aşınmayı azalttığını göstermektedir. 5N yük altında kuru ortamda aşınma izleri belirgin şekilde büyümüş, plastik deformasyon artmış ve SiC fazının yüzeyden koparak matrisle etkileşime girdiği görülmüştür. Buna karşın, 5N yük altında yağlı ortamda, yağın sunduğu kayganlık etkisi sayesinde aşınma izleri daha az belirgin olmuş ve aşınmış partiküllerin taşınarak yüzey hasarının azaldığı anlaşılmıştır.

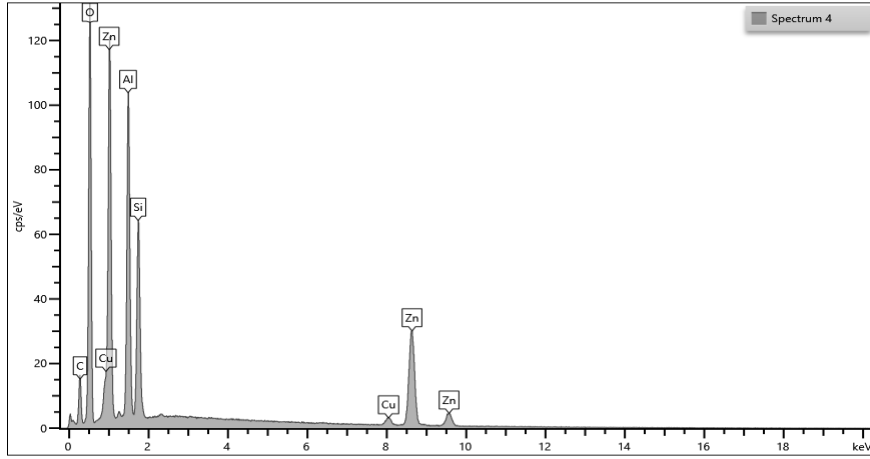
EDS analizleri, Zn, O ve Al fazlarının dağılımını inceleyerek aşınmanın oksidatif bileşenini ortaya koyarken, grafit miktarının artmasının yağlama etkisini güçlendirdiği ve aşınma oranını azalttığı belirlenmiştir. Genel olarak, yüksek grafit içeriği kuru ortamda aşınmaya karşı tam koruma sağlamazken, yağlı ortamda aşınma performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir.



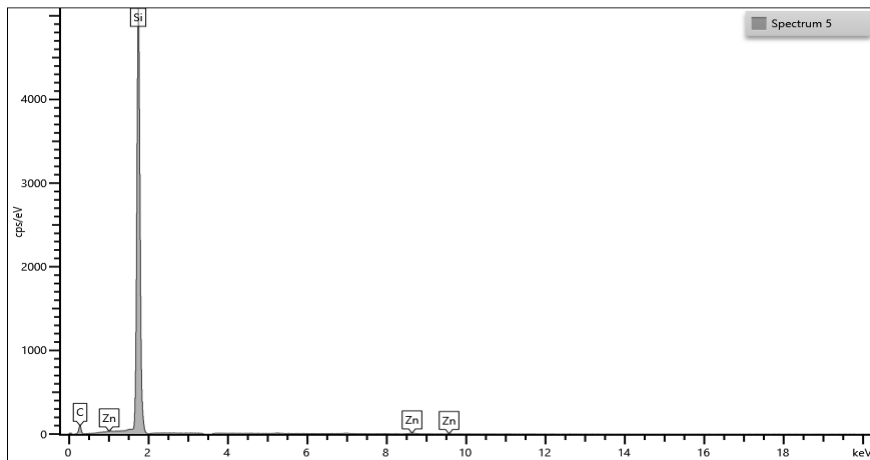
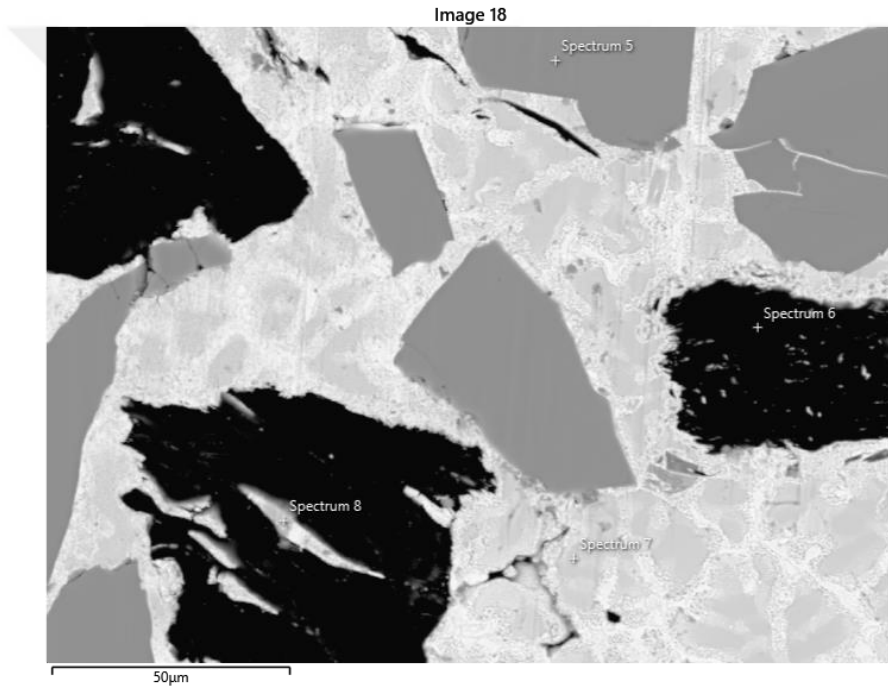
Şekil 6.31. %7.5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



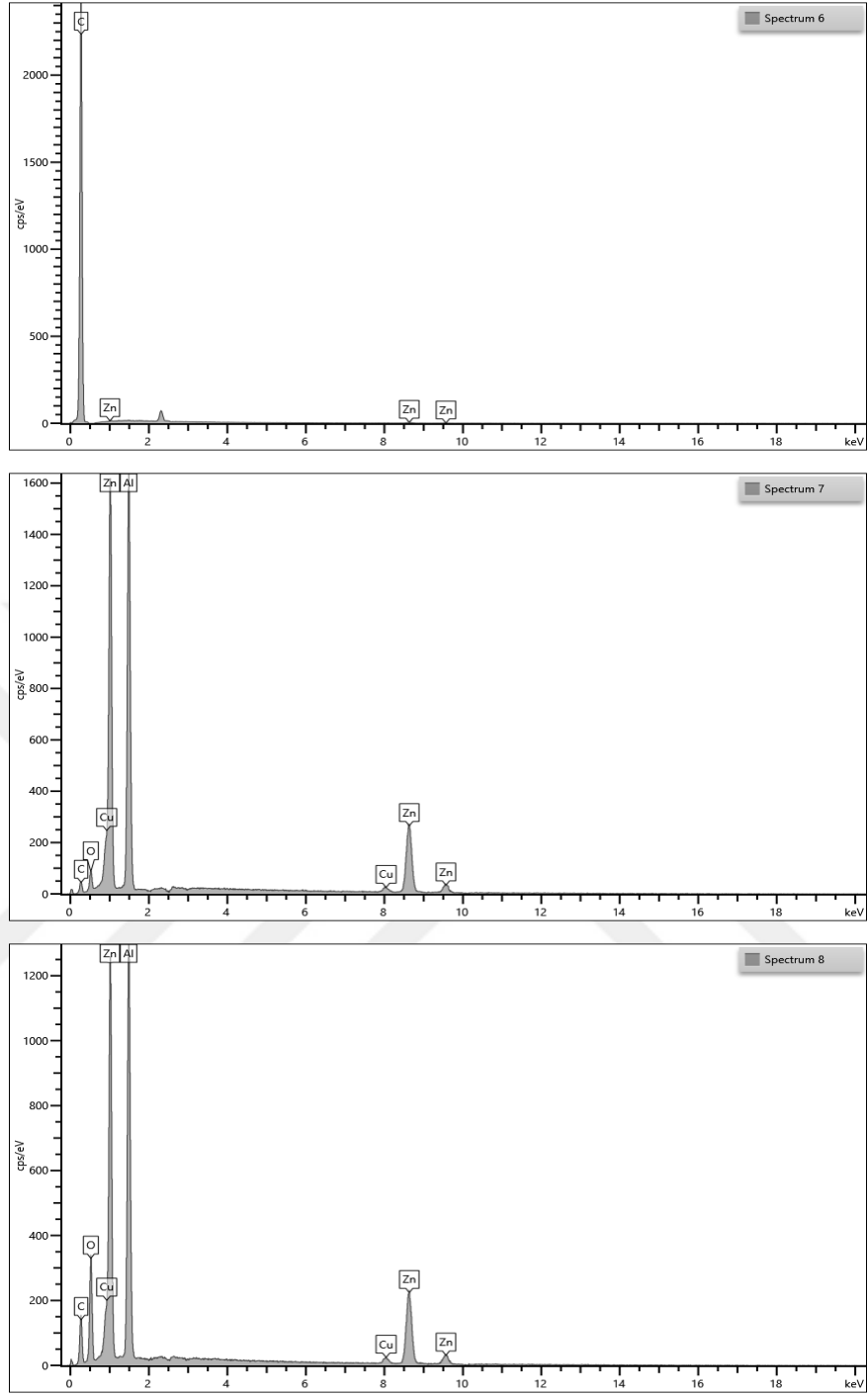
Şekil 6.31. (Devamı) %7.5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



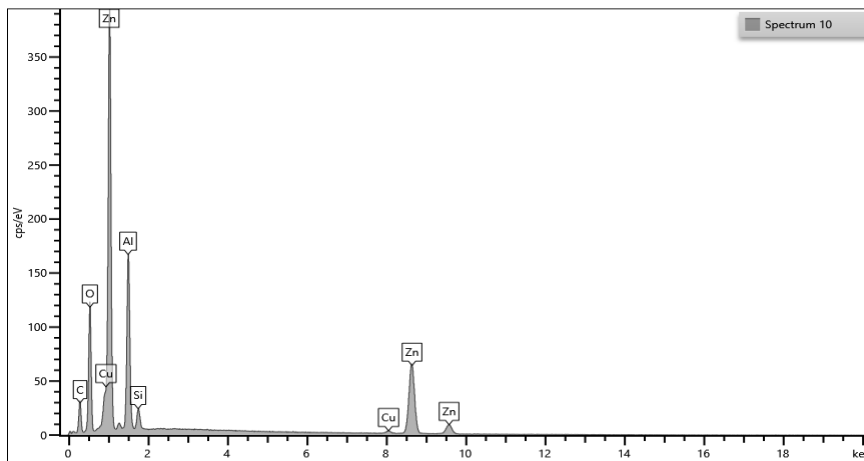
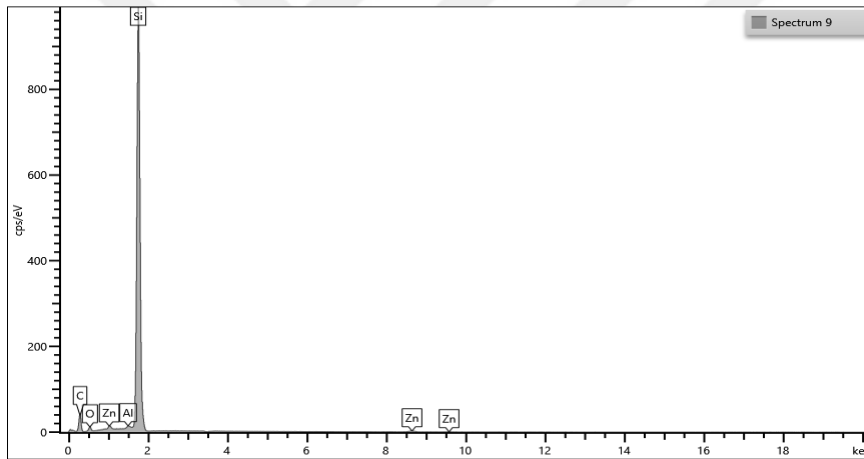
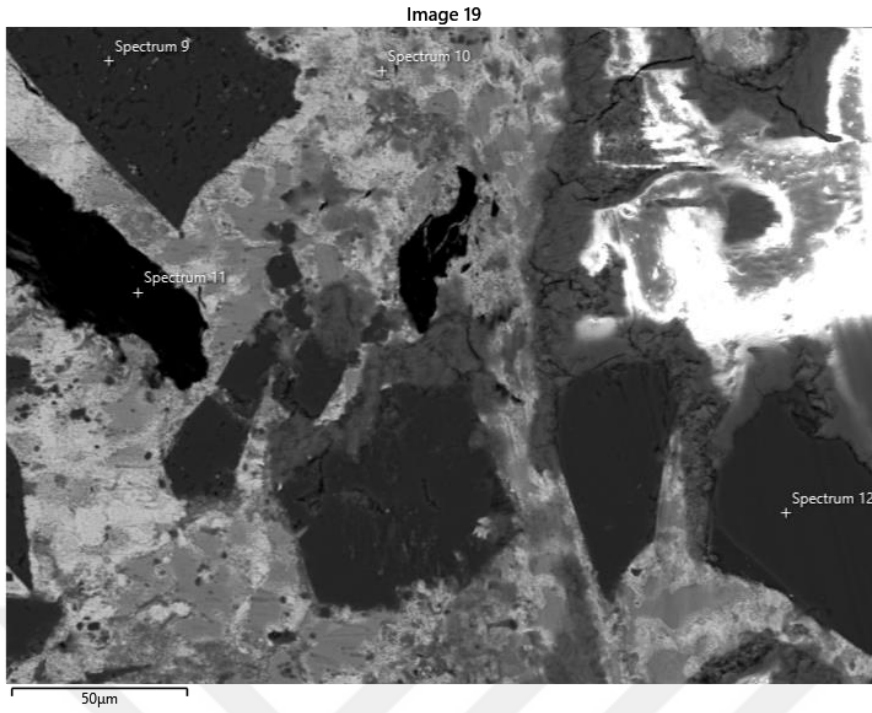
Şekil 6.31. (Devamı) %7.5 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



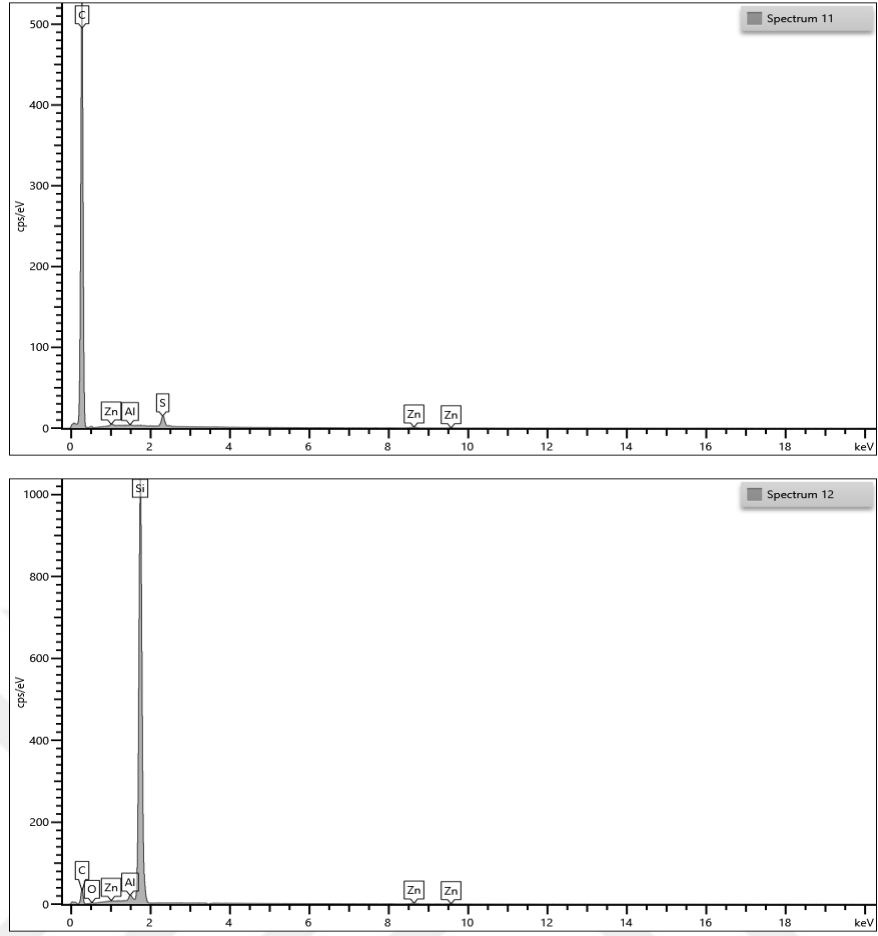
Şekil 6.32. %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



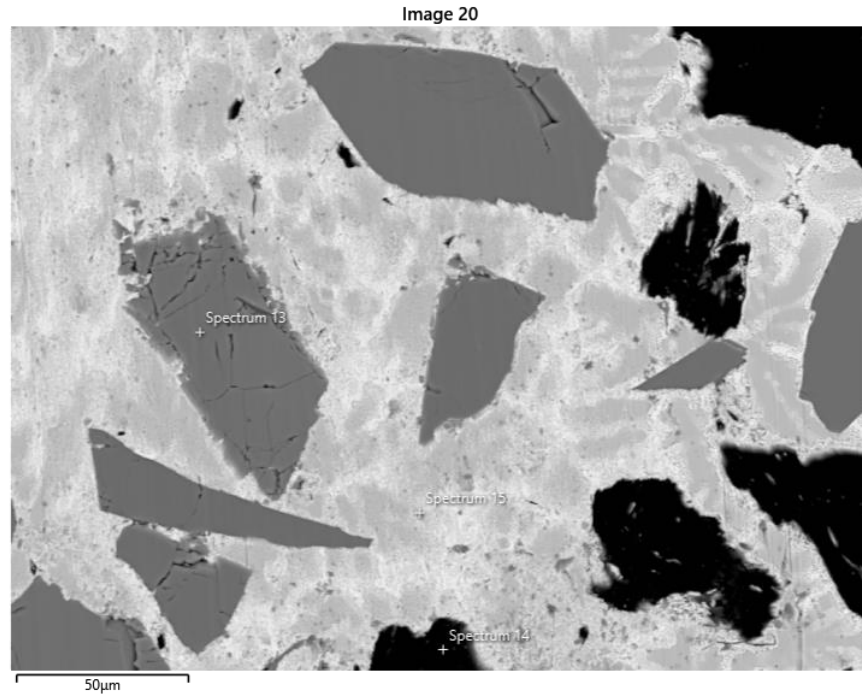
Şekil 6.32. (Devamı) %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



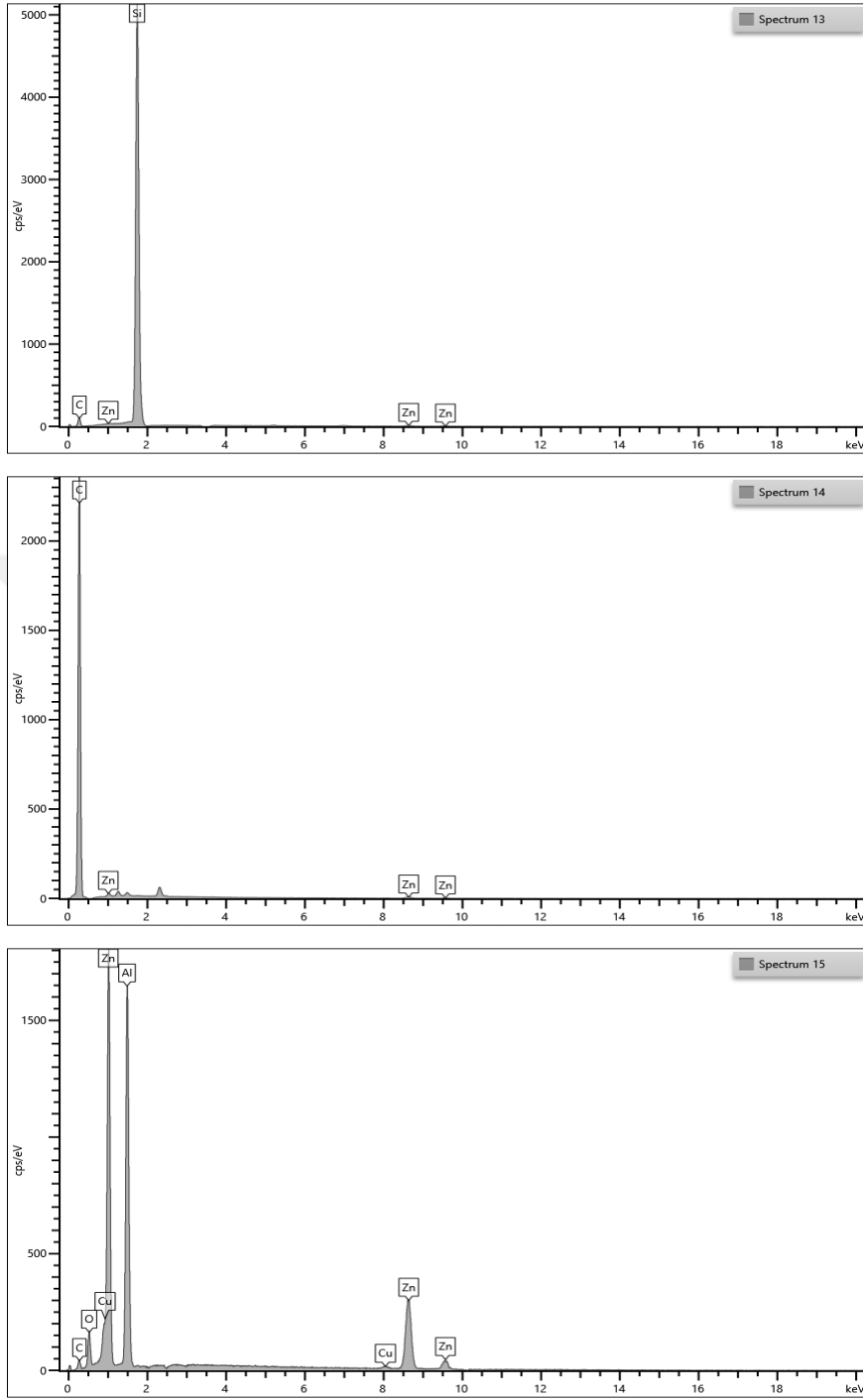
Şekil 6.33. %7.5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.33. (Devamı) %7.5 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



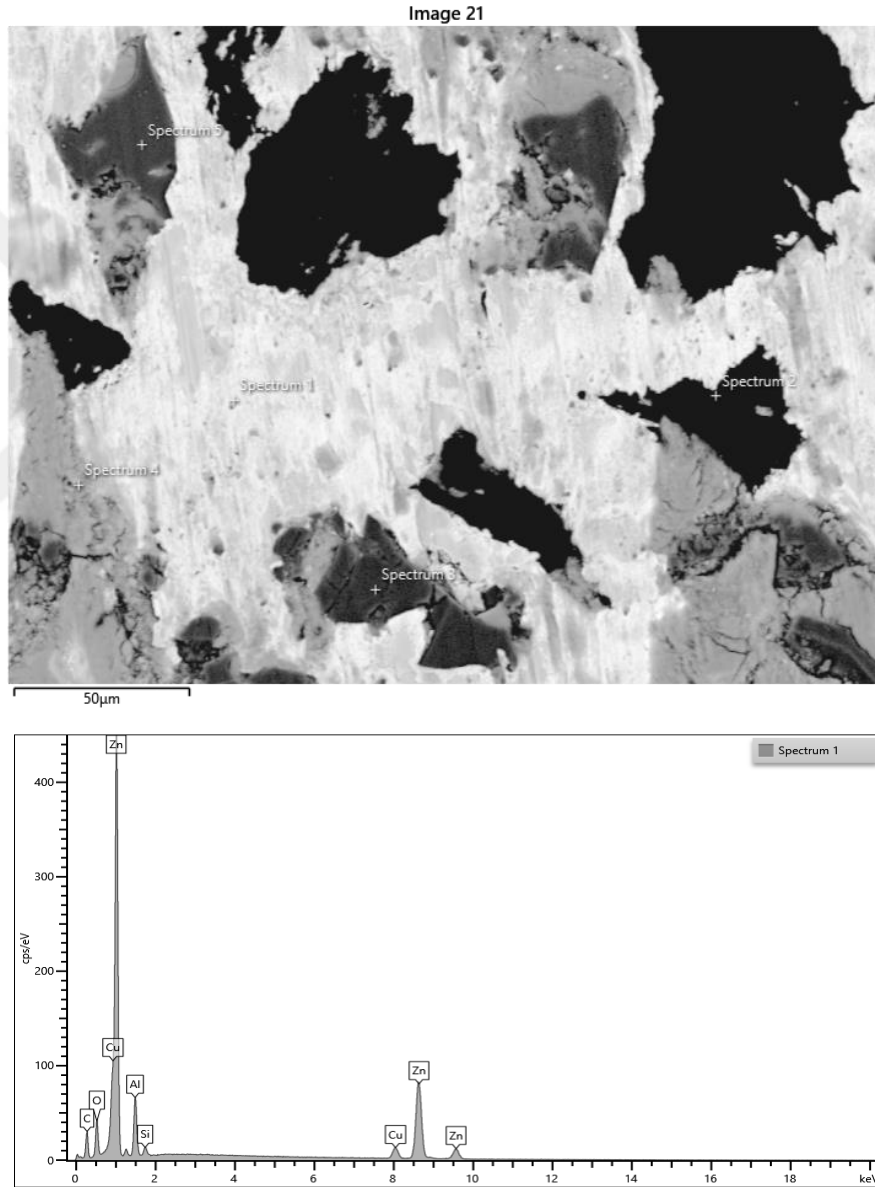
Şekil 6.34. %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



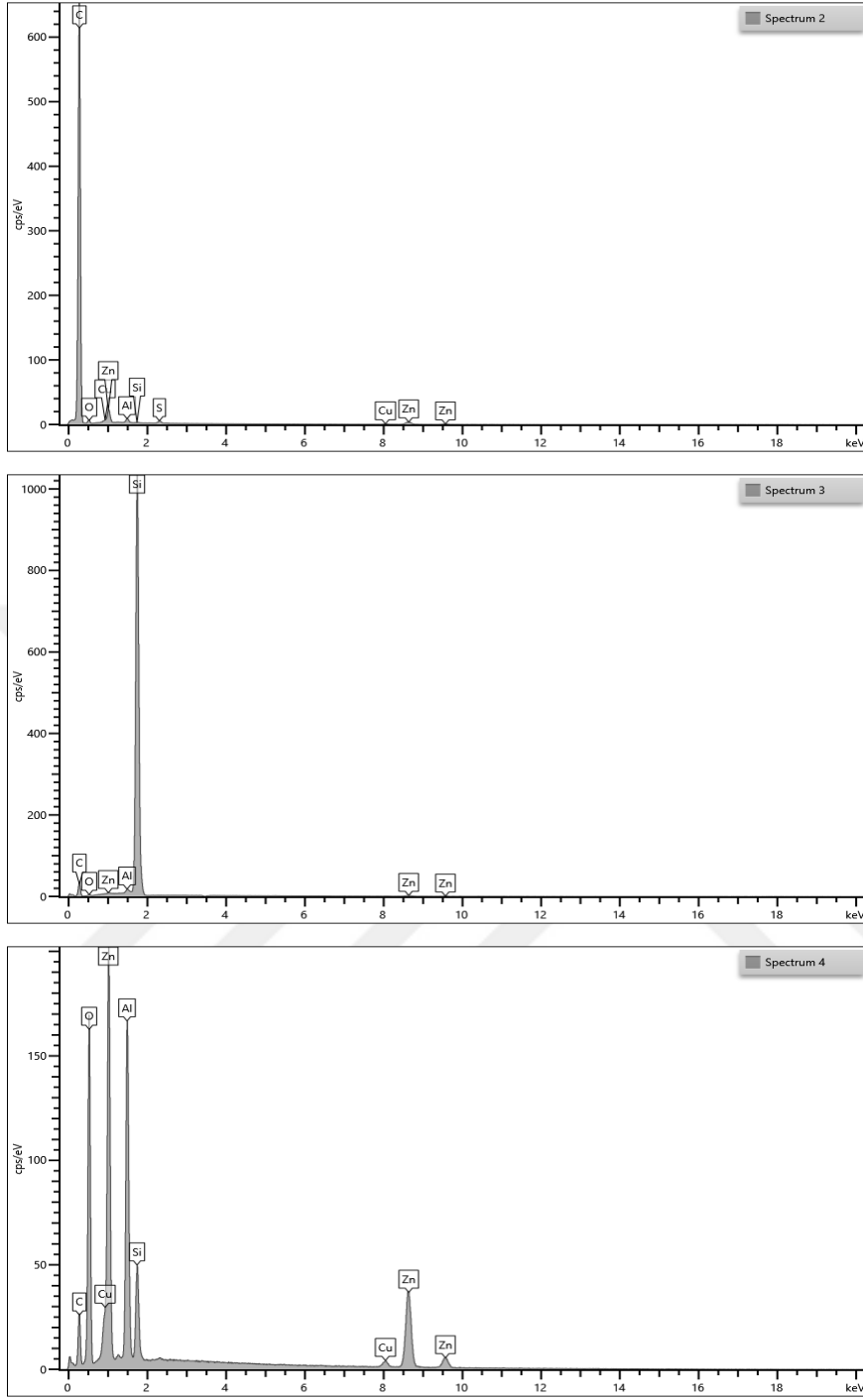
Şekil 6.34. (Devamı) %7.5 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.

ZA27 + %20 SiC + %10 Gr takviyeli hibrit kompozitin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da 3N yük altında kuru ve yağlı ortamlarda, Şekil 6.37 ve Şekil 6.38'de ise 5N yük altında hem kuru hem de yağlı aşınma koşullarında verilmiştir. Yapılan analizler, aşınma mekanizmasının yük ve yağlama koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Kuru ortamda düşük

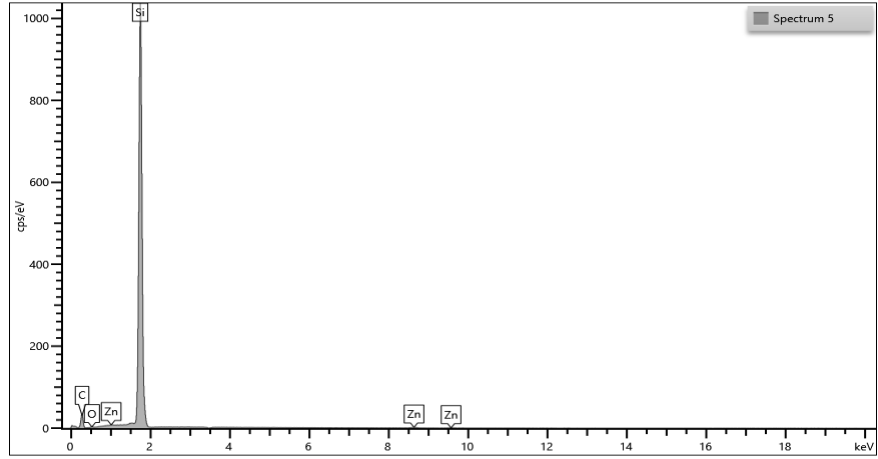
yükte (3N) aşınma izleri daha yüzeysel iken, yükün artmasıyla (5N) aşınma izleri belirgin şekilde derinleşmiştir. Yağlı ortamda ise sürtünmenin azalması nedeniyle aşınma izleri daha az belirgin olup, yüzey bütünlüğü daha iyi korunmuştur. EDS analizleri, özellikle kuru ortamda yüksek yük altında SiC parçacıklarının aşınmaya bağlı olarak yüzeyden ayrılabilirdiğini ve oksitlenmenin arttığını göstermektedir. Yağlı ortamda ise karbon içeriğinin yüzeyde daha fazla korunduğu ve oksitlenmenin daha az olduğu görülmektedir. Genel olarak, yağlama aşınmayı önemli ölçüde azaltırken, yük artışı aşınma mekanizmasını agresifleştirerek malzeme kaybını artırmaktadır.



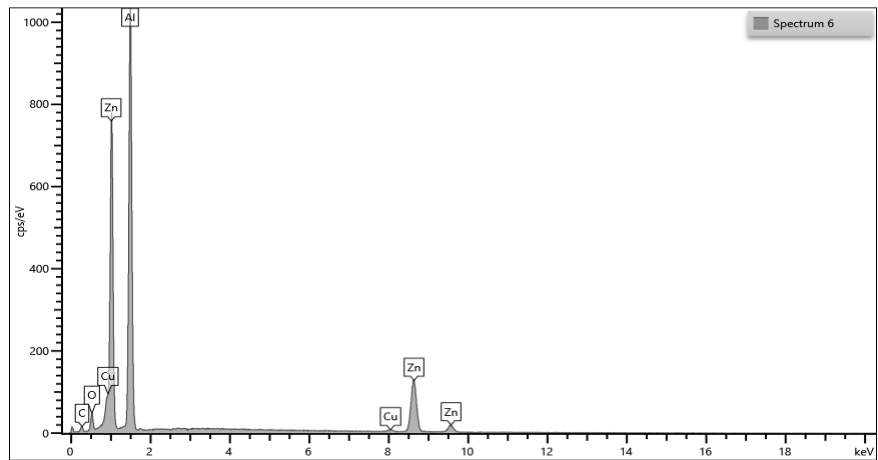
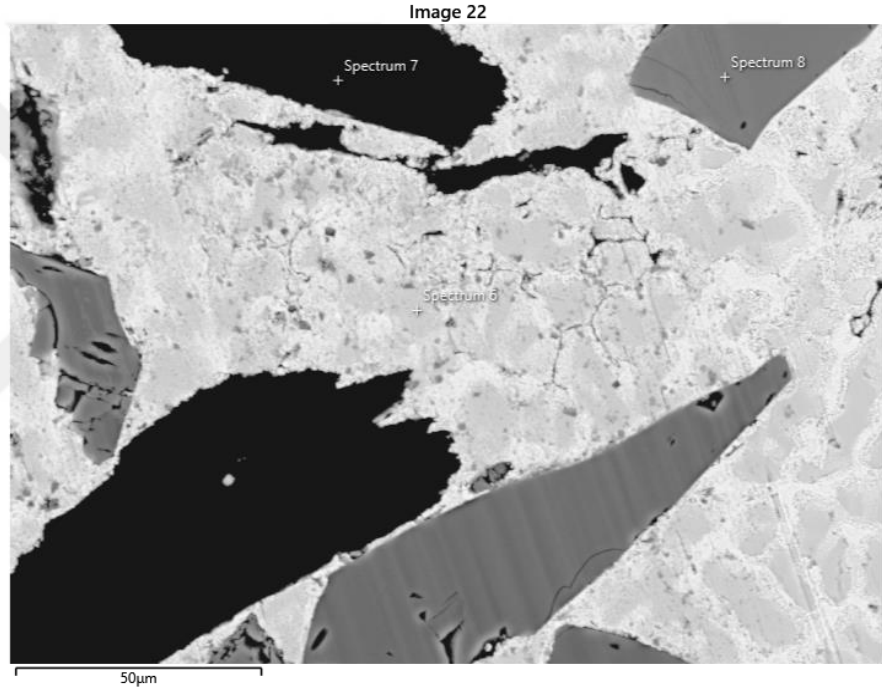
Şekil 6.35. %10 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



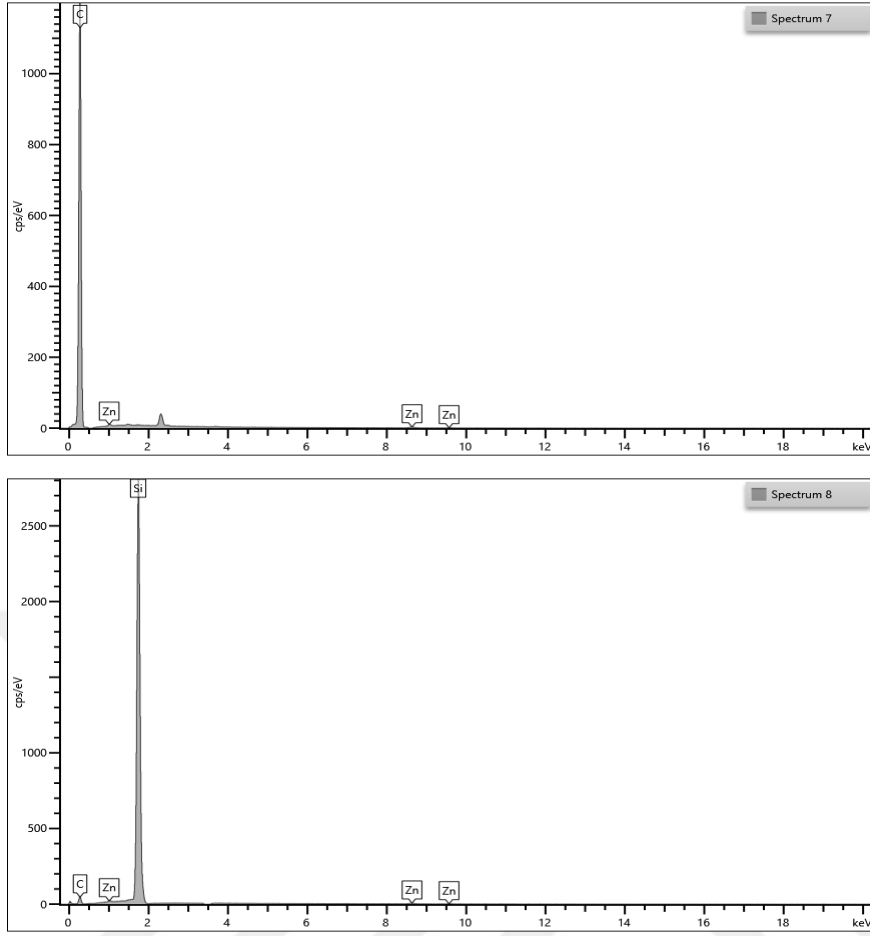
Şekil 6.35. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 3N yük altında aıt aşınma izi ve EDS analizi.



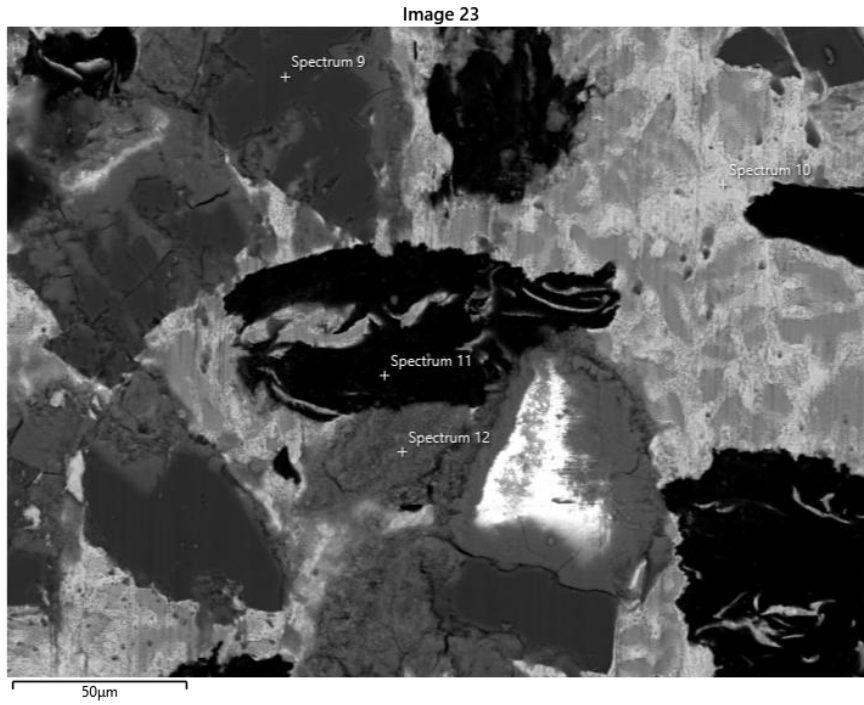
Şekil 6.35. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK Kuru ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



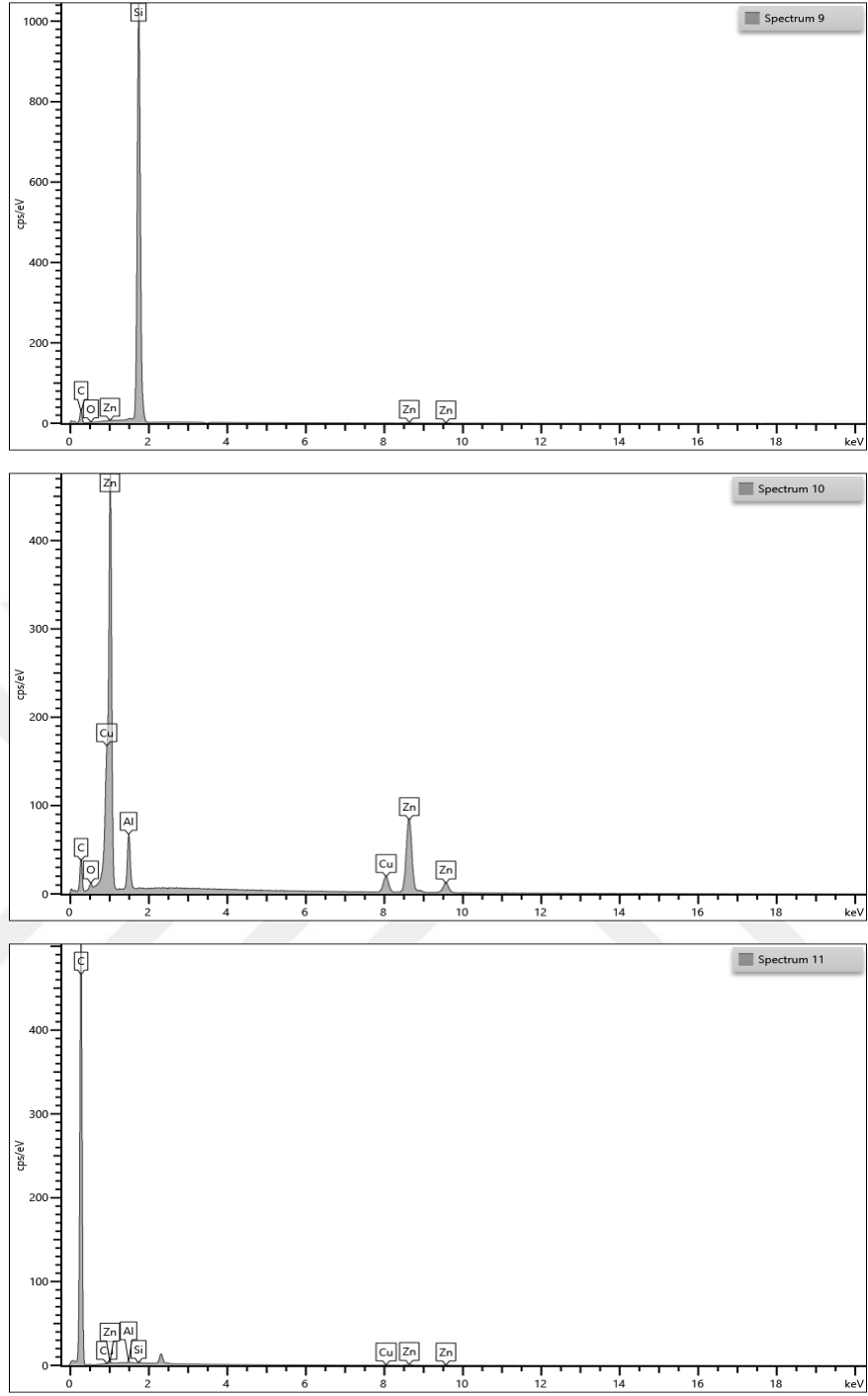
Şekil 6.36. %10 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



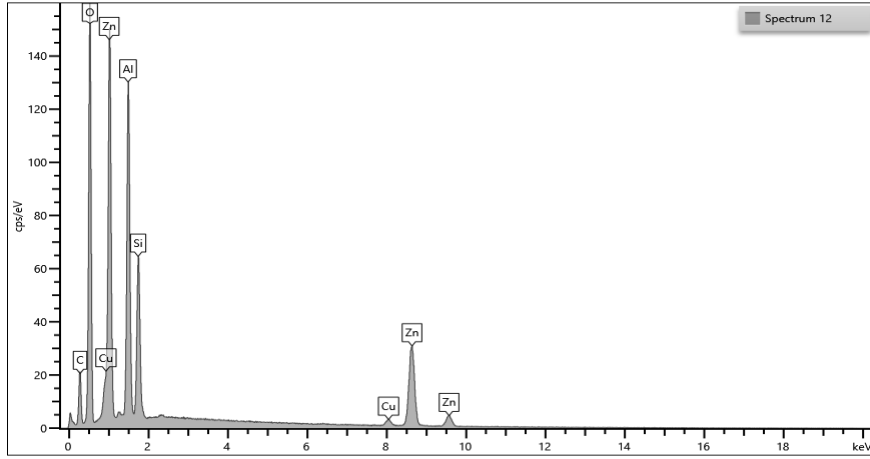
Şekil 6.36. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK yağlı ortamda 3N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



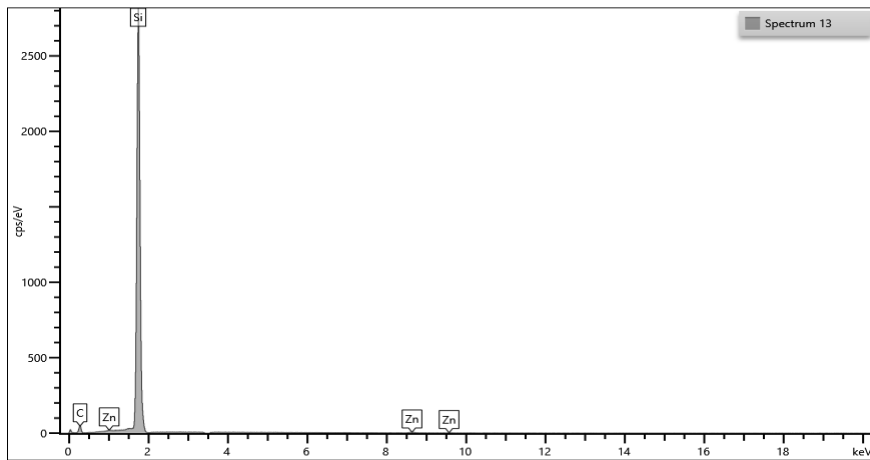
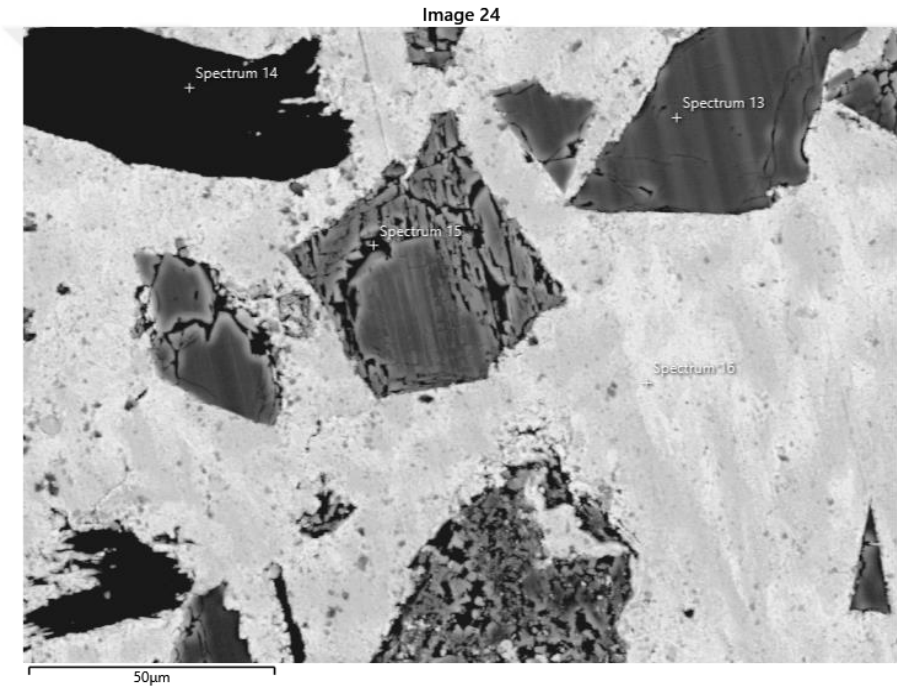
Şekil 6.37. %10 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



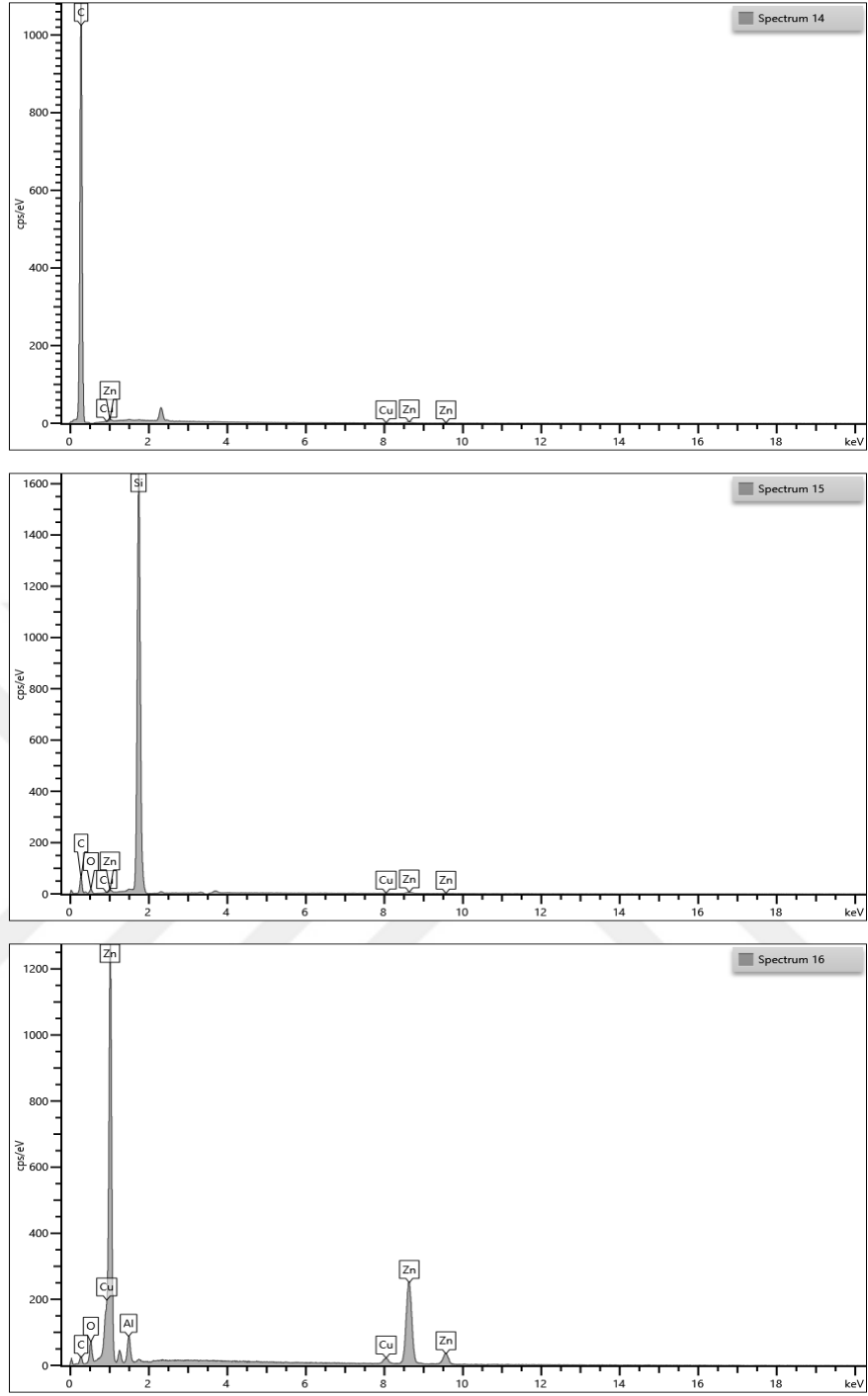
Şekil 6.37. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.37. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK kuru ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.38. %10 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında ait aşınma izi ve EDS analizi.



Şekil 6.38. (Devamı) %10 Gr takviyeli HTK Yağlı ortamda 5N yük altında aıt aşınma izi ve EDS analizi.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

ZA27 çinko-alüminyum alaşımına SiC ve grafit takviyeleri eklenerek üretilen STK ve HTK malzemelerin kuru ve yağlı ortamlar altında aşınma davranışları araştırılmıştır. Aşınma testlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için profilometre ölçümleri ve SEM analizleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Vortex üretim yöntemiyle üretilen sıkıştırma döküm yöntemiyle gerçekleştirilen kompozit ve hibrit kompozitlerin takviye fazlarının matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır.
- Yapılan incelemelerde grafit miktarının artmasıyla segregasyon oranının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Grafit takviyesi, ZA 27 alaşımının Brinell sertliğini azaltırken, SiC takviyesi sertlik değerini artırmıştır."
- Alaşıma eklenen takviye fazlarıyla dentritik yapının iyice küçüldüğü ve mekanik olarak mukavemet artışına sebep olmuştur.
- Eklenen takviye fazlarıyla alaşımın 105 HB değeri, %20 SiC eklenmesiyle 140 HB' ye kadar yükselmiş artan grafit takviyesiyle birlikte azalmalar görülmüştür. %2.5 Gr için bu değer 130 Hb'ye, %5 Gr için 125 HB ve %7.5 Gr için 123 HB son olarak %10 Gr takviyesiyle birlikte bu değer 120 HB değerine ulaşmıştır.
- Artan grafit miktarıyla hibrit kompozitlerde sertlikte düşüş gösterirken sürtünme katsayısında da düşüş göstermiştir.
- Tüm yapılan ortam ve yük parametrelerinde en çok aşınma miktarı ZA27 alaşımında gerçekleşmiştir.
- SiC ve Gr takviyesiyle birlikte ZA27 alaşımının aşınma hacim kaybı artan takviye miktarıyla azalmıştır.
- HTK'lerde SiC ve Gr takviyelerinin bir arada kullanılmasının, malzemenin aşınma direncini artırdığı görülmüştür. %20 SiC ve %10 Gr içeren HTK kompozitlerinde aşınma hacmi kaybı daha az tespit edilmiştir.

- Yük miktarının artmasıyla ZA27 alaşımı, kompozit ve hibrit kompozitlerde aşınmanın artış gösterdiği görülmüştür.
- Yağlı ortam şartlarında yapılan aşınma deneyinin kuru ortama göre daha az aşınma görldği anlaşılmıştır.
- Özellikle grafit eklenmesiyle matris üzerinde yağlaıcılık sağlanmış ve sürtünme katsayısını dşrdği gözlemlenmiştir. EDS analiz ile doğrulanmıştır.
- Çalışmalar sonucunda en iyi aşınma direnci gösteren %7,5 ve % 10 grafit iereren hibrit kompozit malzemeler olmuştur.

7.2. neriler

- Yapılan aşınma testleri farklı kayma hızları ve farklı yüklerde yapılabilir.
- Ortam şartlarında aşındırıcı kullanılarak değerlendirebilir.
- Malzemenin ısıl işlem görmüş halinin farklı ortamlarda aşınması incelenebilir.
- Artan SiC takviyesiyle malzemenin aşınma karakterizasyonu tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ashby, M. F. ve David, R. H. J. (2012). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications, and design*. Elsevier.
- [2] Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Zinc and zinc alloy metallurgy*. ASM International.
- [3] (2020). Zinc-based alloys for high-performance applications. *Materials Science Review*, 15(4), 423-435.
- [4] (1930). New jersey zinc cooperation. *Development and Applications of Zinc Alloys*. Metal Progress.
- [5] Smith, J. (2018). Properties of zamak alloys for industrial applications. *Journal of Engineering Materials*, 12(3), 155-162.
- [6] (2019). ZA alloys and their applications. *International Foundry Journal*, 18(2), 100-112.
- [7] Kumar, A., ve ark. (2021). Mechanical properties of ZA27 alloys. *International Journal of Advanced Research in Materials Science*, 4(1), 45-60.
- [8] Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. *ASM International*.
- [9] Jones, P. (2017). Tribological performance of zinc-aluminium alloys. *Tribology International*, 25(6), 289-296.
- [10] Liu, W., ve ark. (2022). Wear resistance of ZA27 alloys with SiC reinforcement. *Materials Today: Proceedings*, 5, 1023-1031.
- [11] Zhang, L. (2020). Impact of graphite particles on ZA27 hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 120, 45-55.
- [12] Brown, R. (2018). Applications of zinc-aluminium alloys in automotive industry. *Journal of Automotive Engineering*, 16(3), 200-210.
- [13] Thomas, G. (2019). *Light alloys in engineering applications*. Butterworth-Heinemann.
- [14] Nguyen, P. (2020). Innovative uses of ZA27 in industrial sectors. *Foundry Technology Journal*, 10, 34-45.
- [15] Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. Elsevier.
- [16] Brown, T. ve Jones, R. (2002). Zinc-aluminum alloys in engineering applications. *Materials Science Review*, 45(3), 120-135.
- [17] Lee, D., Smith, A. ve Kim, H. (2010). Advances in ZA alloys: Composition and application. *International Journal of Materials Research*, 72(4), 89-102.
- [18] Smith, J. (1998). The role of ZA alloys in modern manufacturing. *Journal of Alloy Engineering*, 34(1), 45-67.
- [19] Zhu, D., Suzuki, M. ve Hino, T. (1994). The study of zinc-aluminum eutectic alloys. *Materials Transactions*, 35(4), 87-92.

- [20] Barnes, J. ve Staley, J. (2000). Zinc and aluminum alloying fundamentals. *Alloy Research Journal*, 12(3), 45-62.
- [21] Carter, R. G. (1999). Wear resistance in advanced alloys: Zinc-aluminum applications. *Journal of Engineering Materials*, 56(2), 112-123.
- [22] Lee, Y. ve Park, H. (2003). Corrosion behavior of zinc-aluminum alloys in humid environments. *Corrosion Science*, 45(7), 1025-1038.
- [23] <http://www.eazall.com/diecastalloys.aspx>
- [24] Aslan, S. (2004). *SiC ve grafit takviyeli çinko alüminyum hibrit kompozit malzemelerin aşınma davranışlarının incelenmesi* [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [25] Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S. (2002). Dry sliding friction and wear properties of zinc-based alloys. *Wear*, 252, 894–901.
- [26] Gibson, R. F. (2010). A review of recent research on mechanics of multifunctional compositematerials and structures. *Composite Structures*, 92, 2793–2810.
- [27] Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Rao, K. V. N., Radhakrishana, R. ve Krishnaraj, V. (2006). Turning of particulate metal matrix composites – review and discussion. *IMechE*, 220, 1179-1204.
- [28] Demirkesen, E. (1991). *Kompozit malzemeler* (1. Baskı). İTÜ Kimya Fakültesi.
- [29] Chawla, N. ve Chawla, K. K. (2005). *Metal matrix composites*. Springer.
- [30] Kainer, K. U. (2003). *Metal Matrix composites: Custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Wiley-VCH.
- [31] Tekmen, Ç. (2006). *Metal matrisli kompozit malzemelerin sıkıştırma yöntemiyle üretilmesi* [Doktora tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [32] Öztürk, S. ve İcin, A. G. K. (2015). *Toz metalurjisi deneyi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [33] Toptan, F. (2006). *Alüminyum Matriksli B4C takviyeli kompozitlerin döküm yöntemi ile üretimi* [Yüksek Lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [34] Froyen, L. ve Verlinden, B. (1994). Aluminium Matrix composites materials. *TALAT Lecture*, 1402, 1-28.
- [35] Campbell, F. C. (2010). Structural composite materials. *ASM Internatonal*, 20-36.
- [36] Roth, S. (1993). Silicon carbide: A high-temperature semiconductor. *Journal of Materials Science*, 28(12), 3227–3235.
- [37] Bae, J. H. ve Wang, Y. (2012). The role of silicon carbide in power electronics and semiconductor devices. *Materials Science and Engineering B.*, 177(5), 334-340.
- [38] Zhang, Q. ve Xu, J. (2017). Silicon carbide for advanced applications in space exploration and power electronics. *Materials Science and Engineering R.*, 108, 1–15.
- [39] Boland, J. J. (2019). Graphite: Properties, uses and applications. *Science Direct*.

- [40] Debelle, D. A., ve ark. (2007). The lubrication properties of graphite. *Journal of Materials Science*.
- [41] Turcotte, J., ve ark. (2010). Graphite as a high-temperature material. *Journal of Refractory Materials*.
- [42] Kadam, R. (2014). Graphite in nuclear technology. *Nuclear Engineering and Technology*.
- [43] Çuhadaroglu, A. D. ve Kara, E. (2018). Grafit: Bir genel değerlendirme. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 8(1), 15-33.
- [44] Bhushan, B. (2013). *Principles and applications of tribology* (2. Baskı).
- [45] YTÜ. Triboloji Prensipleri ve Uygulamaları. <http://www.yildiz.edu.tr/~kaleli/TribolojiPrensipleriveUygulamalar.pdf>
- [46] Halling, J. (1977). Tribology science and practise. *Physics in Technology*, 8, 116-122.
- [47] Odabaş, D. ve Topal, E. S. (1995). 100Cr6 çeliğinin iki cisimli abrazif aşınma davranışının kuru veya sıvı sürtünme şartlarında deneysel araştırılması. 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Denizli.
- [48] Bhushan, B. (2000). *Tribology applications, modern tribology handbook, definition and history of tribology*. CRC Yayınevi.
- [49] Çuvalcı, H. (1996). *Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan imal edilen kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora tezi]. K.T.Ü.
- [50] Özkan, S. (2007). *Alüminyum Matriksli SiC parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretimi ve kuru aşınma davranışlarının incelenmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.
- [51] Burwell, J. T. (1957). Survey of possible wear mechanisms. *Wear*, 1, 119-141.
- [52] Bursa Teknik Üniversitesi (2024). Metalurji ve Malzeme Mühendisliği. [https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/A%C5%9F%C4%B1nma%20F%C3%B6y%C3%BC\(1\).docx](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/A%C5%9F%C4%B1nma%20F%C3%B6y%C3%BC(1).docx) 17/12/2024



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ümit KARATAŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2019,Sakarya Üniversite, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-2023 yılları arasında DÖKMAK Çelik Döküm firmasında 2 yıl dökümhane mühendisi olarak çalıştım.
- 2023'ten beri Diler Demir Çelik firmasında ürün geliştirme mühendisi olarak çalışmaktayım.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Karataş, Ümit. "SiC ve Farklı Oranlarda Grafit Takviyeli Çinko Alüminyum Alaşımlarının Kuru ve Yağlı Ortamda Aşınma Karakterizasyonunun İncelenmesi." *Dergi Adı*, cilt 10, no. 2, 2024, ss. 123-134, doi:10.xxxx/xxxxxx.

