

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZ ARAÇLARINDA KULLANIM POTANSİYELİNE
SAHİP FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
TiB₂/Al-Si KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

Hasan CEVHER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi. İlknur KESKİN ÖNER

Eş Danışman

Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ ARAÇLARINDA KULLANIM POTANSİYELİNE
SAHİP FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ TiB₂/Al-Si
KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Hasan CEVHER tarafından hazırlanan tez çalışması 01.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi İlknur KESKİN ÖNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Ömer SAVAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi İlknur KESKİN ÖNER, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin ELÇİÇEK, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Engin KOCAMAN, Üye

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlknur ÖNER KESKİN ve eş danışmanım Prof. Dr. Ömer SAVAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Deniz Araçlarında Kullanım Potansiyeline Sahip Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al-Si Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hasan CEVHER

İmza



Biricik eşime

ve

Canım aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda destek olan ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi İlknur ÖNER KESKİN ile eş danışmanım Prof. Dr. Ömer SAVAŞ'a minnettarım. Ayrıca, doğduğum günden itibaren hayatımın her aşamasında yanımda olan ve bana her türlü imkânı sağlayan değerli canım aileme ve çalışmalarım boyunca hep yanımda olarak destek veren sevgili canım eşim Zehra CEVHER'e de teşekkürlerimi sunarım.

Hasan CEVHER



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
2 KOMPOZİT MALZEMELER	6
2.1 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Avantajları.....	7
2.2 Metal Matrisli Kompozitler.....	7
2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	8
2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	10
2.4.1 Seramik Matrisli Kompozitler.....	11
2.4.2 Polimer Matrisli Kompozitler	11
2.4.3 Metal Matrisli Kompozitler	12
2.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması	13
2.5.1 MMK'larda Yaygın Olarak kullanılan Matrisler	14
2.6 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi	23
2.6.1 Sıvı Hal Yöntemleri.....	26
2.6.2 Katı Hal Yöntemleri.....	30
3 AŞINMA	32
3.1 Adhezif Aşınma	33
3.2 Aşınma Aşınması.....	33
3.3 Yenme Tipi Aşınma	33
3.4 Abrasif Aşınma.....	34
3.5 Eroziyon Aşınma.....	34
3.5.1 Katı Partiküllerin Oluştığı Eroziyon Aşınma	34

3.5.2	Kavitatif Aşınma	34
3.6	Çukurcuk (Pitting) Aşınması.....	35
3.7	Titreşim Aşınması.....	35
3.8	Yorulma Aşınması	36
3.9	Korozi Aşınma	36
4	KOROZYON	38
4.1	Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarında Korozyon	39
4.2	Alüminyum Alaşımlarında En Sık Görülen Korozyon Türleri	39
4.2.1	Üniform Korozyon.....	39
4.2.2	Galvanik Korozyon	39
4.2.3	Aralık Korozyonu	39
4.2.4	Çukurlanma Korozyonu.....	40
4.2.5	Taneler Arası Korozyon	40
5	TAGUCHİ YAKLAŞIMI	41
5.1	Ortogonal Diziler	42
5.2	Sinyal/Gürültü Oranı.....	42
5.3	Etkileşimin Belirlenmesi	43
5.4	Varyans Analizi	43
5.5	Hesaplamalar	44
5.5.1	Kareler Toplamı.....	44
5.5.2	Serbestlik Derecesi.....	44
5.5.3	Varyans	45
5.5.4	F Testi	45
5.5.5	Toplam Değişime Etki Eden Faktörlerin Yüzdesi.....	45
5.5.6	Doğrulama Testleri	46
6	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
6.1	Mastır Kompozit ve Alaşımların Oluşturulması	47
6.2	Mikroyapı İncelemesi	50
6.3	Sertlik Ölçümleri.....	53
6.4	Yoğunluk Ölçümleri	53
6.5	Aşınma Deneyleri ve Taguchi Deney Reçetesi	54
6.6	Korozyon Deneyleri.....	57
7	DENEY SONUÇLARI	58
7.1	Makro Yapı Analizi	58
7.2	Optik Mikroskop Görüntüleri.....	58

7.3	XRD Analizi.....	60
7.4	SEM Görüntü Analizi	61
7.4.1	TiB ₂ 'ce Fakir Bölgesinin EDAX Analizi.....	64
7.4.2	TiB ₂ 'ce Zengin Bölgesinin EDAX Analizi	66
7.5	Yoğunluk Analizleri.....	67
7.6	Sertlik Değerleri.....	68
7.7	Korozyon Değerleri	68
7.8	Deney Sonuçları.....	72
7.8.1	Aşınma Deneyi Sonuçları	72
7.8.2	Sürtünme Katsayısı Değerlerine Göre Deney Sonuçları.....	78
8	SONUÇ	85
	KAYNAKÇA	88
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	91

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Al-Si	Alüminyum-Silisyum
Al-Ti	Alüminyum-Titanyum
Cu	Bakır
Be	Berilyum
Fe	Demir
Db	Desibel
d/dk	Devir/Dakika
G	G Kuvveti
g/cm ³	Gram/santimetreküp
HCl	Hidroklorik Asit
kg	Kilogram
M	Metre
m/gr	Metre/Gram
m/s	Metre/Saniye (aşınma ömrü)
Mm	Mikrometre
mm	Milimetre
N	Newton
Ni	Nikel
K ₂ TiF ₆	Potasyum Florotitanat
°C	Santigrat Derece
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
Ti	Titanyum
TiB ₂	Titanyum Diborür
TiO ₂	Titanyum dioksit
Al ₃ Ti	Titanyum Tri-alümnit

KISALTMA LİSTESİ

FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
S/N	Oranı Sinyal Gürültü Oranı
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
ANNOVA	Varyans Analizi
XRD	X-Işını Kırınım Analizi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Takviye oranlarına göre kompozit malzemeler [16]	8
Şekil 2.2	Matris elemanlarına göre kompozit malzemeler [16]	8
Şekil 2.3	Takviye oranlarına göre kompozit malzemeler.....	11
Şekil 2.4	Matris elemanlarına göre kompozit malzemeler	11
Şekil 2.5	MMK üretim yöntemlerine ait akım şeması [5].....	25
Şekil 2.6	Duralcan yöntemi şematik gösterimi [23][24]	27
Şekil 2.7	(a) santrifüj döküm işlemi, (b) dönen kalıp ve (c) enine kesiti [23].....	28
Şekil 2.8	MMC'lerin basınçsız infiltrasyonu: (a) parçacık önformunun alaşım matris infiltrasyonu ve (b) metalik alaşım partikülünün ve seramik partikül ön formunun saf matris infiltrasyonu[23].....	29
Şekil 2.9	SiC takviye parçacıklarının Al sıvı damlacıkları üzerine püskürtülmesi [23]	30
Şekil 2.10	Toz metalurjisi işleme yöntemi [23].....	31
Şekil 6.1	Kompozitin üretim adımının şematik gösterimi	47
Şekil 6.2	Alüminyum-Bor faz diyagramı [40].....	48
Şekil 6.3	Alüminyum-titanyum faz diyagramı [41].....	48
Şekil 6.4	Ergitme fırını.....	49
Şekil 6.5	Savurma işlemi.....	50
Şekil 6.6	Al-Si-TiB ₂ kompozitinin temsili görüntüsü.....	51
Şekil 6.7	Zımpara cihazı.....	51
Şekil 6.8	Parlatılmış Numune Örnekleri	52
Şekil 6.9	Optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleri	52
Şekil 6.10	JEOL JSM 6060 LV marka SEM cihazının görüntüsü	53
Şekil 6.11	Sertlik ölçüm cihazı	53
Şekil 6.12	Yoğunluk ölçüm cihazı.....	54
Şekil 6.13	Aşınma test cihazı.....	55
Şekil 6.14	Korozyon test düzeneği	57
Şekil 7.1	Kesilen kompozit numunesi.....	58
Şekil 7.2	Takviyeli bölge mikro yapı görüntüsü.....	59
Şekil 7.3	Ara bölge mikro yapı görüntüsü	59
Şekil 7.4	Takviyesiz bölge mikro yapı görüntüsü	59
Şekil 7.5	Numunelerden alınan XRD sonuçları, mavi TiB ₂ 'ce zengin bölge, yeşil TiB ₂ 'ce fakir bölge.....	60
Şekil 7.6	Kompozitin zengin bölge görüntüsü-1	61

Şekil 7.7 Kompozit SEM görüntüsü fakir bölge-2	62
Şekil 7.8 Kompozit SEM görüntüsü asitle yakıldıktan sonra.....	63
Şekil 7.9 Partikül dağılımları grafiği.....	63
Şekil 7.10 TiB ₂ 'ce fakir bölgesinin sem görüntüsü	64
Şekil 7.11 Al-Si matrisi içerisindeki Al ve Cu'nun dağılımı	65
Şekil 7.11(a) Matris kısım içerisinde Al kısmın dağılımı	65
Şekil 7.11(b) Matris kısım içerisinde Si kısmın dağılımı	65
Şekil 7.12 Al-Si- TiB ₂ kompozitinin zengin kısmı SEM görüntüsü.....	66
Şekil 7.13 Al-Si-TiB ₂ matrisinin zengin tarafının EDAX görüntüsü.....	67
Şekil 7.13(a) Al-Si-TiB ₂ matrisinin zengin bölge içerisinde Al elementinin görüntüsü	67
Şekil 7.13(b) Al-Si-TiB ₂ matrisinin zengin bölge içerisinde Si elementinin görüntüsü	67
Şekil 7.13(c) Al-Si-TiB ₂ matrisinin Zengin bölge içerisinde Ti elementinin görüntüsü	67
Şekil 7.14 Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımının (Ecor, Icor) ölçülmesi.....	70
Şekil 7.15 Faktörlere bağlı hesaplanmış ortalama S/N oranları grafiği	75
Şekil 7.16 Faktörler ve aşınma direncinin değerleri ortalaması grafiği	76
Şekil 7.17 S/N Oranı	78
Şekil 7.18 Faktörlere bağlı hesaplanarak bulunan ortalama s/n oranları grafiği ...	81
Şekil 7.19 Faktörler ve sürtünme katsayısı değerlerinin ortalamasını gösteren grafik	82
Şekil 7.20 Sürtünme Katsayısı S/N Oranı	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 MMK’larda kullanılan tipik takviyeler	13
Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan metallerin yoğunluk ve akma mukavemeti ..	15
Tablo 2.3 Yaygın olarak kullanılan metallerin erime ve kaynama noktası [5]	16
Tablo 2.4 Metallerin erime ve kaynama noktası değerleri [5]	22
Tablo 2.5 Eğme, basma, çekme ve kırılma modülü değerleri [5]	23
Tablo 3.1 Korozyon çeşitleri	36
Tablo 5.1 Tablo L8 ortogonal dizisi [36], [38]	42
Tablo 6.1 Deneysel çalışmaların seviyeleri	55
Tablo 6.2 L8(2 ⁴) ortogonal seri	56
Tablo 6.3 L8 Deney reçetesi	56
Tablo 7.1 Yoğunluk Oranı	68
Tablo 7.2 Numunelerden alınan sertlik ölçümleri ve sonuçların ortalama değeri	68
Tablo 7.4 Aşınma deney sonuçları	73
Tablo 7.5 En yüksek ağırlık kaybı	73
Tablo 7.6 En düşük ağırlık kaybı	74
Tablo 7.7 ANOVA tablosu	74
Tablo 7.8 Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu	77
Tablo 7.9 Sürtünme katsayısı sonuçları	79
Tablo 7.10 En yüksek sürtünme katsayısı değeri	79
Tablo 7.11 En düşük sürtünme katsayısı değeri	80
Tablo 7.12 ANOVA Tablosu	80
Tablo 7.13 Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu ..	83

Deniz Araçlarında Kullanım Potansiyeline Sahip Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al-Si Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Hasan CEVHER

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlknur KESKİN ÖNER

Eş-Danışman: Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve denizcilik sektörlerinde yoğun talep görmektedir. Bu durum, alüminyum ve alaşımlarını demir esaslı malzemelerden sonra en çok kullanılan malzemeler arasına sokmuştur. Ancak, aşınma dirençlerinin düşük olması nedeniyle bu alaşımlar, aşınmaya maruz kalan makine parçalarında sınırlı kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının tribolojik, korozyon direnci ve mekanik özellikleri, Al₂O₃, SiC, TiB₂, TiC ve ZrC parçacıklarının eklenmesiyle iyileştirilerek fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler elde edilebilir. Bu kompozitlerin en büyük sorunlarından biri, artan takviye oranı ile birlikte gevrekleşmesi ve kırılma tokluğunun önemli ölçüde azalmasıdır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, yüksek yüzey aşınma direnci ve yeterli iç kırılma tokluğu gerektiren mühendislik uygulamaları için özel bir performans sunar. Kırılma tokluğu, şekillendirme kabiliyeti, kaynak

yapılabilirlik, korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek aşınma dayanıklılığı, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği özellikleri, bu kompozit malzemeleri özellikle denizcilik sektörü için cazip hale getirmektedir. Bu çalışmada, fırkateynler ve denizaltılarda kullanılma potansiyeline sahip fonksiyonel derecelendirilmiş $TiB_2/Al-4Si$ kompozitinin savurma döküm yöntemi ile üretilmesi, korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, $1200^{\circ}C$ 'de $Al-Ti-B-Si$ çözeltisi oluşturulmuş, ardından sıcaklık $800^{\circ}C$ 'ye düşürülerek $Al-Si$ ergiyi içinde TiB_2 partikülleri doğrudan sentezlenmiştir. Eriyik, savurma mekanizmasıyla merkezkaç kuvveti altında katılaştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu, optik mikroskop, SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve XRD (X-ışını difraksiyonu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin yoğunlukları ölçülmüş, sertlik değerleri belirlenmiş, aşınma direnci ve korozyon dayanımları incelenmiştir. Aşınma testleri, kuru kayma ortamında farklı yük, kayma hızı ve kayma mesafelerinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Korozyon testleri ise deniz koşulları dikkate alınarak %3,5 NaCl çözeltisi içinde Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım, az sayıda deney ile genel perspektifin anlaşılabilmesi için Taguchi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, kompozitin TiB_2 ile güçlendirilmemiş iki farklı bölgeye sahip olduğunu göstermiştir. TiB_2 bakımından zengin bölgelerde takviye oranının ağırlıkça %20 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, $Al-Si$ alüminyum alaşımına ilave edilen TiB_2 partikülleri ile sertlik değerinin 52 HB'den 103 HB'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Sonuçlar, TiB_2 partiküllerinin kompozitlerin aşınma ve korozyon özelliklerini geliştirdiğini de ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: TiB_2 , savurma döküm, tipoloji, korozyon

Production and Characterization of Functional Graded Composites $\text{TiB}_2/\text{Al-Si}$ with Potential for use in Marine Vehicles

Hasan CEVHER

Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science

Supervisor: Dr. İlknur KESKİN ÖNER

Co-supervisor: Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Aluminum alloys are in high demand in the automotive, aviation and marine industries thanks to their low density and high mechanical properties. This has made aluminum and its alloys among the most used materials after iron-based materials. However, due to their low wear resistance, these alloys are used limitedly in machine parts subject to wear. Functionally graded composites can be obtained by improving the tribological, corrosion resistance and mechanical properties of aluminum alloys by adding Al_2O_3 , SiC , TiB_2 , TiC and ZrC particles. One of the biggest problems of these composites is that they become brittle and fracture toughness decreases significantly with increasing reinforcement ratio. Functionally graded materials offer special performance for engineering applications requiring high surface wear resistance and adequate internal fracture toughness. Fracture toughness, forming ability, weldability, corrosion resistance, high temperature resistance, low density, high wear resistance, high thermal and electrical conductivity properties make these composite materials especially attractive for the maritime industry. In this study, it was aimed to produce functionally graded $\text{TiB}_2/\text{Al-4\%Si}$ composite, which has

the potential to be used in frigates and submarines, by centrifugal casting method and to examine its corrosion and wear behaviors. First, Al-Ti-B-Si solution was formed at 1200°C, then the temperature was reduced to 800°C and TiB₂ particles were directly synthesized in the Al-Si melt. The melt is solidified under centrifugal force by the winnowing mechanism. Characterization of the produced composites was carried out using optical microscopy, SEM (scanning electron microscopy) and XRD (X-ray diffraction). Additionally, the densities of the composites were measured, hardness values were determined, and their wear resistance and corrosion resistance were examined. Wear tests were carried out in a dry sliding environment at room temperature under different loads, sliding speeds and sliding distances. Corrosion tests were carried out using the Tafel extrapolation method in 3.5% NaCl solution, taking into account sea conditions. The experimental design was made using the Taguchi technique to understand the general perspective with a small number of experiments. The results showed that the composite had two distinct regions that were not reinforced with TiB₂. It was determined that the reinforcement rate in TiB₂-rich regions was 20% by weight. Additionally, it was determined that the hardness value increased from 52 HB to 103 HB with TiB₂ particles added to the Al-Si aluminum alloy. The results also revealed that TiB₂ particles improved the wear and corrosion properties of composites.

Key Words: TiB₂, centrifugal casting, typology, corrosion

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum, yüksek dayanım/ağırlık oranıyla kompozit malzeme üretiminde dikkat çeken bir malzemedir [1]. Hafif olması yapıların maliyetini ve taşıma maliyetlerini azaltmakta, yüksek mukavemeti yüksek dayanımı da sağlamlık ve güvenlik sağlarken, korozyon direnci, aşınma direnci, kolay işlenebilirliği, gemi inşaa sektöründe gemi çeliğine göre hafif olduğundan gemi ağırlık merkezini aşağı çekmesi vb. özellikleriyle kompozit malzeme üretiminde sık bir şekilde tercih edilen bir malzemedir. Yapı malzemeleri, havacılık, otomotiv endüstrisi, gemi üst bina inşaatında ve birçok başka alanda bu özelliklerinden dolayı kullanım alanı bulmuştur [1][2].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM), son yıllarda malzeme bilimi ve mühendisliği dalında çok mühim bir gelişmedir. Bu teknoloji, farklı özelliklere sahip olan malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan bir kompozit malzeme türünü ifade eder [3], [4]. FDM, çeşitli mikro yapısal fazlara sahip olan malzemelerin, belirli bir uygulamaya uygun olarak dizayn edilmesini sağlar [3], [4]. Bu farklı yapısal fazlar, malzemenin belirli bölgelerinde farklı işlevlere sahip olabilir. Örneğin, bir FDM'de sertlik, esneklik, iletkenlik gibi özellikler, malzemenin farklı bölgelerine göre farklı olabilir.

Metal ve seramik bileşenlerin kombinasyonu, FDM'lerin yüksek mekanik performans sağlayabilmesini ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklı ortamlara dayanabilmesini mümkün kılar [4]. Metal bileşenler genellikle yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlarlar. Bu, malzemenin kırılma direncini artırır ve mekanik yükler altında daha iyi performans göstermesini sağlar [4]. Özellikle mühendislik uygulamalarında, metal bileşenler malzemenin dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü artırabilir.

Metal Matrisli Kompozitler (MMK), alüminyum gibi metallerin yapısal özelliklerini artırmak maksadı ile sık bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Bu kompozitler, alüminyum matris içine karbon, metal veya seramik gibi takviye malzemelerinin eklenmesiyle oluşturulur[5]. Alüminyum matrisli kompozitlerin

bu şekilde oluşturulması, birçok avantaj sunar [5][6]. Öncelikle, takviye malzemeleri eklenerek kompozitin mukavemeti artırılır [5], [6]. Özellikle karbon, metal veya seramik gibi yüksek mukavemetli malzemeler, alüminyumun mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir [5], [6].

MMK'lar (Metal Matrisli Kompozitler), alüminyum gibi düşük yoğunluğa sahip metallerin dayanım, sertlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerini seramik takviye malzemeleriyle birleşmesiyle iyileşirler [7]. Seramik takviyeler, genellikle karbon fiber, silisyum karbür veya alüminyum oksit gibi malzemelerdir ve aşınma dayanımı, sıcaklık dayanımı ve sertlik gibi özelliklere sahiptirler. MMK(Metal matrisli kompozit)'lerin dezavantajları sayılacak olursa sünekliğin (akıcılığın) azalması ve fazla maliyeti, geleneksel olan alüminyum alaşımlarından takribi olarak 3 kat fazla- zuhur etmektedir [5], [7]. Alüminyum matrisi TiB_2 , SiC , Al_2O_3 , B_4C gibi takviyelerin ilavesi, genellikle malzemenin yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirmez, ancak kompozitin modüllüsünü, özgül mukavemetini, mekanik ve termal özelliklerini artırmaktadır [5], [7], [8].

Titanyum borür (TiB_2), alüminyum matrisli kompozitlerde sıkça kullanılan bir takviye elemanıdır [5], [7], [8]. TiB_2 yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sertlik ve kimyasal inertlik gibi özelliklere sahip bir seramiktir. Alüminyum matrisli kompozitlerde TiB_2 'nin kullanımı, genellikle malzemenin mekanik özelliklerini ve termal dayanıklılığını artırmak amacıyla yapılır [3], [4], [5], [7], [8]. TiB_2 takviyesi, alüminyum matrisli kompozitin sertliğini ve mukavemetini artırarak aşınma direncini ve korozyon direncini iyileştirebilir [4], [5], [7], [8], [9]. Ayrıca, yüksek sıcaklık dayanımı, TiB_2 'nin yüksek sıcaklıkta çalışan uygulamalarda kullanımını da teşvik eder. TiB_2 partiküllerinin eriyik alüminyum ile tepkimeye girmemesi, alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde önemli bir avantajdır. Bu özellik, takviye-matris ara fazında kırılgan tepkime ürünlerinin oluşmasını önler ve kompozitin mekanik özelliklerini kötü bir şekilde etkileyebilecek potansiyel sorunları azaltır. Bu, kompozit malzemelerin üretiminde ve kullanımında önemli bir faktördür çünkü kırılgan reaksiyonlar veya bileşenler arasındaki uyumsuzluklar, malzemenin dayanıklılığını ve performansını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu özellik, malzemenin istikrarını artırarak ve olası sorunları azaltarak, kompozitin daha güvenilir olmasını ve kalıcı olmasını sağlar.

Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) üretimi için kullanılan iki ana yöntem Ex-situ ve İn-situ yöntemleridir. Ex-situ yönteminde, takviye fazı ayrı olarak hazırlanır ve sonra matris içerisine ilave edilir. Takviye malzemesi önceden hazırlanmış bir şekilde matris içerisine dağıtılır ve genellikle toz metalurjisi veya kompaktlaştırma gibi işlemlerle birleştirilir. Bu yöntemde, takviye fazı genellikle tanecikler veya lifler şeklinde olabilir. Ex-situ yönteminde karşılaşılan termodinamik kararsızlık problemi, takviye matris içerisinde sentezlenerek in-situ yönteminde çözülür. İn-situ yönteminde ise takviye fazı doğrudan matrisin içinde oluşturulur. Yani, takviye malzemesi matris içerisine eklenmeden önce matrisin içinde oluşur. Bu genellikle bir reaksiyon ile gerçekleşir ve matris içindeki önceden belirlenmiş bir kimyasal reaksiyon sonucunda takviye fazı oluşur. Bu yöntemde, takviye fazı genellikle bir bileşik veya alaşım halinde oluşur. İn-situ yöntemi, özellikle bu termodinamik (sıcaklık) kararsızlık sorununu aşmak için geliştirilmiş olup termodinamik stabilite, reaksiyonun (hareketin) kinetik kontrolü, düşük takviye boyutları ve üniform dağılım, ara yüz bağının iyi oluşu ve ekonomik olması gibi avantajlara sahiptir.

Savaş ve ekibi yapmış olduğu çalışmada alüminyuma TiB_2 ilavesinin ortalama aşınma kayıplarını belirgin şekilde azalttığı, Cu ve TiB_2 ilavesinin kombinasyonu ile bu kayıpların daha da düşürüldüğü gözlemlenmiştir [3].

Shimaa El-Hadad ve ekibi, alüminyum ana yapıya Al_3Ti takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin üretimi için savurma döküm yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışma sırasında, malzemenin mikro yapı özelliklerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Savurma döküm yöntemi, malzeme üretiminde yararlanılan bir tekniktir ve genellikle metal alaşımlarının veya kompozitlerin üretiminde tercih edilir. Bu yöntemde, eriyik haldeki malzeme bir kalıba dökülerek şekillendirilir ve soğutulur. Bu süreçte malzemenin mikro yapı özellikleri, döküm koşulları ve kullanılan malzeme bileşimi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Elde edilen ve ortaya çıkan sonuçlar, malzemenin özelliklerini kavramak ve optimize etmek için önemli olmaktadır ve genellikle malzeme mühendisliği ve üretim süreçlerinde kullanılır. Bu değişikliklerin, kompozitlerin sertlik dayanımı ve aşınma dayanımı gibi önemli özelliklerinin savurma yönüne göre değiştiğini gözlemlenmiştir [10].

Savaş ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş TiB_2/Al ve $TiB_2/Al-4Cu$ kompozitlerini üreterek her iki kompozitin de TiB_2 ile zenginleşmiş ve fakir bölgelerden oluştuğunu gözlemlemiştir [11].

Taguchi deney tasarımı, malzeme aşınma davranışlarının incelenmesinde sıkça kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu tasarım yaklaşımı, deney sayısını azaltarak ve deneylerin sonuçlarını daha verimli bir şekilde analiz ederek sonuçlara daha hızlı ulaşmaya olanak tanır. Bu, araştırmacıların daha az kaynak kullanarak daha geniş bir parametre alanını keşfetmelerine ve malzeme özelliklerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur [12][13][14]. Yapılan çalışmalara göre, fonksiyonel derecelendirilmiş Al_3Ti takviyeli kompozitlerin üretimi üzerine yapılan araştırmaların sınırlı olduğu ve bu alanda henüz tam olarak keşfedilmemiş veya yeterince çalışma yapılmamış olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit, malzeme bilimcileri ve araştırmacıları, bu özel kompozitlerin üretimi, özellikleri ve uygulamaları hakkında daha fazla çalışma yapmaya teşvik etmektedir. Bu alandaki daha fazla araştırma, bu kompozitlerin potansiyel avantajlarını ve uygulama alanlarını daha iyi anlamamıza ve gelecekteki malzeme geliştirme süreçlerini yönlendirmemize yardımcı olabilir.

1.2 Tezin Amacı

Tamamlanan tez çalışmasının amacı:

- Merkezinden dış tarafa doğru farklı mikro yapı ve aşınma özelliklerine sahip malzemeler üretmek ve aşınma davranışı inceleyerek belirlemek.
- $Al-Si$ gibi matrisli kompozitler elde ederek TiB_2 'ce takviyelendirilmiş metal matrisli kompozitler üretmek.
- Elde edilen kompozitlerin savurma döküm makinesiyle santrifüj kuvvetinin etkisiyle savurma yönünde TiB_2 takviye miktarını artırmak.
- Üretilen metal matrisli kompozitlere aşınma deneylerinin Taguchi yöntemiyle deney reçetesi oluşturularak, aşınma deneylerini bu reçeteye göre yapmak.
- ANOVA (Analysis of Variance), genellikle birden veya daha fazla bağımsız değişkenin bir bağımlı değişken üzerindeki tesirini saptamak için faydalanan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Aşınma direnci gibi bir

bağımlı değişken üzerinde etkili ve etkisiz olan deney parametrelerini belirlemek için ANOVA kullanılabilir.

1.3 Hipotez

Metal matrisli kompozitler ve fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler birçok endüstriyel uygulamada önemli bir rol oynamak için yoğun bir şekilde araştırılan ve geliştirilen bunun yanında birçok üretim tekniği bulunan malzeme alanlarıdır. Bu kompozitlerin daha geniş bir kullanımına olanak sağlaması için maliyetlerin azaltılması ve üretiminin artırılarak yaygınlaştırılması gerekmektedir. Gemi inşasında üst bina üretiminin yanında geminin daha mukavim yerlerinde kullanılabilmesi için korozyon ve aşınma direncinin yanında makine parçalarında kullanılan aşınma kayıplarının azaltılması için metal matrisli kompozitler ve fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin üzerinde yapılan araştırmaların artırılması gerekmektedir. Kompozitlerin üretimi ve geliştirilmesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalara fayda sağlamak amacı ile Al-Si matrisli TiB₂ takviyeli kompozitler elde etmek, savurma döküm yönteminin santrifüj kuvveti etkisiyle takviyenin savurma kuvveti yönünde dış çepere doğru arttığı ve mekanik özelliklerinin iyileşeceği öngörülmektedir.

KOMPOZİT MALZEMELER

Uzun yıllardır kompozit malzemeler, birçok endüstride ve mühendislik uygulamasında önemli bir rol oynamıştır. İşte bu malzemelerin tarih boyunca önemli kilometre taşları:

- Antik Dönemler: İnsanlar, tarih boyunca kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Örneğin, MÖ 1500'lü yıllarda Mısır'da kullanılan papirüs, bitki liflerinin bir araya getirilmesiyle meydana getirilmiş bir kompozit malzemedir. Ayrıca, taş devri insanları tarafından yapılan obsidyen bıçaklar da bir tür kompozit malzeme olarak kabul edilebilir.
- Çağlar boyunca, ahşap ve metal kombinasyonları gibi çeşitli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Özellikle gemi yapımında, ahşap gövdelere metal kaplamaların eklenmesi yaygın bir uygulamaydı.
- 20. yüzyılın ilk yarısı: 20. yüzyılın başlarında, kompozit malzemelerin modern endüstriyel uygulamaları gelişmeye başladı. Özellikle uçak endüstrisinde, ahşap ve metal yerine hafif ve güçlü kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaştı.
- Endüstriyel devrim ve sonrası: 20. yüzyılın ikinci yarısında, polimer matrisli kompozitlerin gelişimiyle birlikte kompozit malzemelerin kullanımı daha da yaygınlaştı. Otomotiv, denizcilik, inşaat, spor malzemeleri ve birçok başka endüstride kompozit malzemelerin kullanımı arttı.
- 21. Yüzyıl: 21. yüzyılın başlarından itibaren, kompozit malzemelerin kullanımı daha da genişledi ve çeşitlendi. Yeni materyal kombinasyonları, üretim teknolojilerindeki ilerlemeler ve sürdürülebilirlik odaklı talepler, kompozit malzemelerin önemini artırmıştır [15], [16].

Kompozit malzemeler makroskobik düzeyde birleşik etki prensibine göre, birbiri içerisinde çözünmeyen birden fazla malzemenin daha üstün özelliklere kavuşması maksadıyla ve uygun oranlarda bir araya getirilmesidir. Birbiri içinde çözünmeyen bileşenler kompozit malzeme içerisinde yapısal özelliklerini korurlar [16].

[15]. Bu faktörler arasında takviyenin boyutu, hacimsel oranı, tipi, şekli, partiküllerin yerleşimi gibi malzeme parametreleri bulunur [15].

Bu dışsal ve içsel faktörlerin bir kombinasyonu, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin aşınma davranışını belirler [15].

2.1 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Avantajları

Etkileşim içinde olan ve birbirine göre bağlı hareket eden, kuru kayma yüzeylerinde dahi diğer aşınma türlerinin önleildiği

Kompozit malzemeler mukavemet dayanımı, sertlik direnci, korozyon ve aşınma dayanımı gibi kabiliyetleriyle havacılık, savunma ve denizcilik sektöründe hafif ve dayanıklı malzemeye duyulan ihtiyaç bu alanda kompozit malzeme kullanımını arttırmakta bunun yanında araştırma geliştirme çalışmaları hızlandırmaktadır [5].

Kompozit malzemelerin avantajları şu şekildedir:

- Yüksek elastite modülü
- Yüksek mukavemet
- Yüksek korozyon dayanımı
- Yüksek sertlik
- Yüksek darbe direnci
- Kuvvetli yorulma dayanımı
- Kuvvetli aşınma dayanımı [17][18]

Kompozit malzemeler birinci faz(matris) ve ikinci faz(takviye malzemesi) olmak üzere iki fazdan oluşur. Takviye malzemesi matris fazının dayanımını artırır. Kompozit matris elemanlarına göre üçe takviye oranlarına göre dörde ayrılırlar[18].

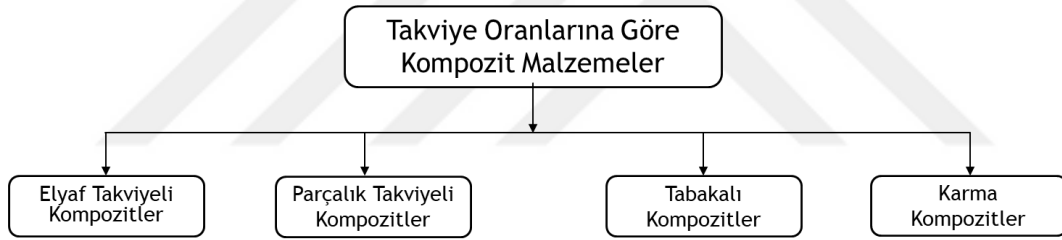
2.2 Metal Matrisli Kompozitler

Malzemelerinden en az bir bileşenin metal olmak üzere birden fazla malzemenin belirli değerlerde bir araya getirilmesiyle oluşturulan bu tür kompozit malzemelere Metal Matrisli Kompozitler (MMK'ler) denir. Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemelerin geliştirilmesindeki ana nedenlerden biri, mevcut malzemelerin sınırlarının aşıldığı veya belirli uygulamalarda yetersiz kaldığı

yüksek sıcaklık ortamlarında kullanım gereksinimleridir[5]. Metal matrisli kompozitlerde genellikle matris malzemesi olarak Ti, Mg, Al, Cu, Co, Mo, Fe ve Ni gibi metaller ve alaşımları kullanılır. Metal matrisli malzemelerde takviye malzemeleri yaygın olarak kullanılanlar Al_2O_3 , SiC, B_2C , WC, TiB_2 , TiC, W, MgO ve karbon esaslı malzemelerdir [5].

Metal matrisli kompozitlerin avantajları aşağıda olduğu gibidir [5]:

- Yüksek Mukavemet
- Yüksek esneklik modülü
- Düşük yoğunluk
- Yüksek yorulma direnci
- Aşınma dayanımı
- Yüksek sıcaklık mukavemeti
- Yüksek deformasyon dayanımı
- Yüksek yüzey sertliği



Şekil 2.1 Takviye oranlarına göre kompozit malzemeler [16]



Şekil 2.2 Matris elemanlarına göre kompozit malzemeler [16]

2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Kompozit malzemelerin polimerik bileşenlerle üretilmesi fikri, malzemelerin iç yapısı ve davranışını taklit etme arzusundan kaynaklanmaktadır [17][18]. Bu fikir, 1972 yılında polimerik malzemelerin üretimi amacıyla düşünülmüş olup,

uygulamada ilk kez 1984 yılında uzay mekaniği tasarımında kullanılmıştır [17][18].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM'ler), genellikle seramiklerin metal matrisli kompozitler şeklinde veya metallerin karışımı olarak elde edilen kompozit malzemelerdir[17][18]. Bu malzemelerin temel özelliği, içerdikleri bileşenlerin oranlarının ve dağılımlarının belirli bir şekilde ayarlanmasıdır. Bu tip özellik sergileyen malzemelere ise (FDM) fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme adı verilir [17][18].

FDM'lerin yapısı ve içeriği, genellikle derecelendirilmiş bir yapıya sahiptir, yani bileşenlerin oranları veya dağılımları belirli bir düzen veya gradyan izler [17][18]. Bu, malzemenin belirli özelliklerini istenildiği gibi gözden geçirmeyi mümkün kılar. Örneğin, bir FDM'de metal matrisin içine seramik takviyeler eklenerek malzemenin sertlik, dayanıklılık ya da termal iletkenlik gibi özellikleri istenilen şekilde ayarlanabilir. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM'lerin) mekanik özellikleri, yüzeylerdeki mikroskobik incelemeler sonucunda farklılık gösterebilir [17][18]. Bu malzemeler genellikle heterojen bir yapıya sahiptir, yani bileşenlerin homojen olmayan bir şekilde dağıldığı görülür [17][18]. FDM'lerin en belirgin özelliklerinden biri, dereceli olmayan malzemelere göre özellikle ısı şoklamalara karşı daha dirençli olmalarıdır, [17][18].

FDM'ler eski yöntemler ile üretilmiş alaşımlara kıyasla birçok avantaja sahiptir [17][18]:

- **Dinamik Yüklemelere Dayanıklılık:** FDM'ler, dinamik yüklemelere karşı daha dayanıklı olabilir. Özellikle, farklı bileşenlerin uygun bir şekilde birleştirilmesi ve düzenlenmesiyle, malzemenin mukavemeti ve dayanıklılığı artırılabilir.
- **Korozyona ve Aşınmalara Dayanıklılık:** FDM'ler, korozyon ve aşınma gibi ortamsal tesirlere karşı daha etkilenmez olabilir. Metal matrisli FDM'lerde, seramik takviyelerin eklenmesiyle malzemenin korozyon direnci artırılabilirken, aşınma dayanıklılığı da artırılabilir.
- **Termal Bariyer Sağlama:** Bazı FDM'ler, termal bariyer sağlama özelliğine sahiptir. Özellikle seramik takviyeli FDM'ler, yüksek

sıcaklıklara karşı dayanıklılık sağlayabilir ve termal izolasyon özelliği sunabilir.

- **Çizilme Direnci ve Artık Gerilimli Kaplama Malzemesi:** FDM'ler, çizilme dayanımı ve artık gerilimli kaplama malzemesi olarak da kullanılabilirler. Bu özellikler, özellikle yüzeylerin dayanıklılığını artırmak ve aşınma dayanımını yükseltmek için önemlidir.

Tüm bu avantajlar, FDM'lerin geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesini sağlar. Özellikle ağır yük altında çalışan parçaların, yüksek sıcaklık ve aşınma ortamlarında kullanılan bileşenlerin ve korozyona karşı hassas parçaların üretiminde FDM'lerin kullanımı giderek artmaktadır [17][18].

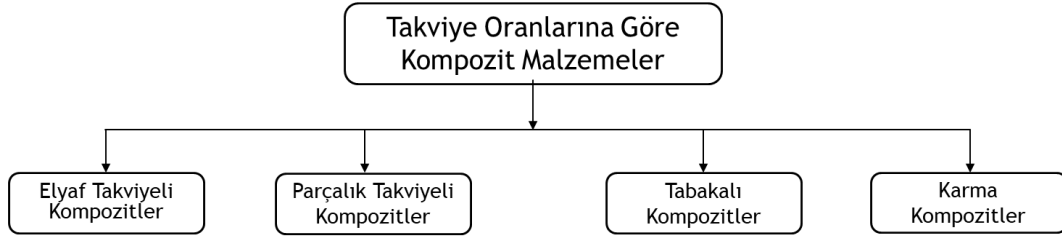
2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri tanımlamak için, takviye geometrisi ve matris tipine bakılarak iki temel kategori kullanılabilir [5], [19], [20].

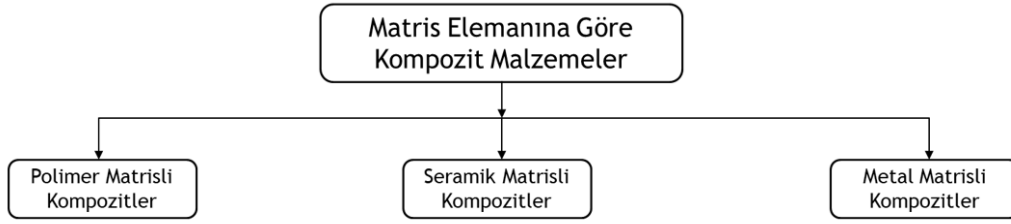
- **Matris Tipine Göre Sınıflandırma** [5], [19], [20]: Matris, kompozit malzemenin ana bileşenidir ve genellikle şekil verilebilirlik ve dayanıklılık sağlamak için seçilir. Matris, kompozit malzemenin genel yapısal dayanıklılığını ve şekil almasını sağlar. Matris malzemesi genellikle polimerler, seramikler veya metaller olabilir. Matrisin amacı, takviye fazını korumak ve kompozit malzemenin istenen yapısal özelliklerine katkıda bulunmaktır.
- **Takviye Geometrisine Göre Sınıflandırma** [5], [19], [20]: Takviye fazı, matris içinde bulunan daha güçlü ve sert malzemelerdir. Bu takviye malzemeleri genellikle lifler, parçacıklar veya levhalar şeklinde olabilir. Takviye fazının amacı, kompozit malzemenin mukavemetini, sertliğini ve diğer özelliklerini arttırmaktır. Takviye malzemeleri genellikle cam, karbon ve aramid elyafı, seramikler veya bazı metalik malzemelerden oluşur.

Bu sınıflandırmalar, kompozit malzemelerin tasarımı ve seçimi açısından önemlidir. Örneğin, belirli bir uygulama için uygun bir kompozit malzeme seçilirken, matris tipi ve takviye geometrisi göz önünde bulundurulmalıdır çünkü

bu faktörler malzemenin performansını, dayanıklılığını ve özelliklerini etkiler [5], [19], [20].



Şekil 2.3 Takviye oranlarına göre kompozit malzemeler



Şekil 2.4 Matris elemanlarına göre kompozit malzemeler

2.4.1 Seramik Matrisli Kompozitler

SMK'lar silisyum karbür ve alümina kilikat lif takviyesi ile güçlendirilmiş olduklarından düşük yoğunlukları, hafif olmaları ve yüksek oksidasyon dirençleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda kullanılmak için uygun olan malzemelerdir. Ancak kırılğan doğalarından dolayı diğer özelliklerine rağmen arka planda kalmakta ve kullanım alanlarını sınırlamaktadır [21].

2.4.2 Polimer Matrisli Kompozitler

Günümüzde yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozitler genellikle petrokimyasal ürünler olup ikincil fazın tanecik, elyaf veya parçacık olarak içine yerleştiği birincil fazı polimer olan kompozittir [19], [20], [22]. Polimer matrisli kompozitler düşük maliyetli olmaları korozyon direnci sayesinde uzun süre kullanıma uygun olmaları ve basit imalat yöntemleriyle üretilebilir olmaları nedeniyle kompozit malzemeler içerisinde en çok kullanılan kompozitlerdir [19], [20], [22].

Polimer matrisli kompozitler, genellikle termoset ve termoplastik matrisli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır [19], [20], [22].

Termoset Matrisli Kompozitler: Termoset matrisli kompozitler, termoset polimerlerden oluşur. Bu tür polimerler, bir kere sertleştikten sonra geri dönüşümsüz bir şekilde sertleşir ve erimezler. Bu nedenle, termoset matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç sağlamak için uygundur. Ancak, bu tür kompozitlerin işlenebilirliği ve geri dönüşümü sınırlı olabilir.

Termoplastik Matrisli Kompozitler: Termoplastik matrisli kompozitler, termoplastik polimerlerden oluşur. Bu tür polimerler, ısıtıldığında yumuşar ve tekrar şekillendirilebilir. Bu nedenle, termoplastik matrisli kompozitlerin işlenebilirliği daha yüksektir ve geri dönüşümü daha kolaydır. Ancak, termoplastik matrisli kompozitler genellikle termoset matrisli kompozitlere göre daha düşük sıcaklık dayanımına ve mekanik özelliklere sahip olabilir.

2.4.3 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, mevcut olan malzemelerin kullanım sıcaklıklarının üzerinde kullanılabilecek yüksek mukavemete sahip tek fazda sahip olunamayan özelliklerin elde edilmesi amacıyla, ikincil bir faz tarafından metal matris fazına kimyasal ve fiziksel özellikli farklı olan birden farklı takviye fazının elde edilmesiyle oluşturulurlar [5], [19], [20], [23]. Metal matrisli kompozitler çelik ve alüminyuma avantaj sağlamak için geliştirilmişlerdir [5], [19], [20], [23].

Metal matrisli kompozitler: Al, Si, Ti, B, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi metaller ve alaşımlar matris malzemesi olarak kullanılırken parçacık takviye elemanları ise Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiB_2 , TiC, WC, W, MgO ve karbon esaslı malzemelerdir [5], [19], [20], [23].

Metal matrisli kompozitlerin seramik ve polimer kompozitlere göre avantajları:

Yüksek mukavemet

Düşük yoğunluk

Esneklik Modülü

Yüksek aşınma dayanımı

Yüksek ısı iletkenlik

Yüksek aşınma direnci

Yüksek yorulma direnci

Az nem soğurma

Yüksek yanma direnci

Yüksek tokluk ve darbe dayanımıdır.

2.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması

MMK'lar 4'e ayrılırlar:

- Parçacık takviyeli kompozitler
- Whisker kısa lif takviyeli kompozitler
- Levha takviyeli ve sürekli fiber ve kompozitler
- Lamine ve plaka takviyeli kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında önemli bir parametre en-boy oranıdır. Bu parametre, takviye malzemelerinin şekline ve yapısına göre belirlenir.

Tablo 2.1 MMK'larda kullanılan tipik takviyeler [23]

TAKVİYE TİPİ	EN-BOY ORANI	ÇAP	ÖRNEKLER
Parçacık Takviyesi	1-4	1-25 Mm	WC, BN, SiC, Al ₂ O ₃ , B ₄ C,
Kısa Lif Takviyesi	10-10,000	1-5 Mm	C, SiC, Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ + SiO ₂
Sürekli Lif Takviyesi	>1,000	3-150 Mm	SiC, Al ₂ O ₃ , W, Nb-Ti, C, B, Nb ₃ Sn
Nanopartiküller Takviyesi	1-4	< 100 nm	C, Al ₂ O ₃ , SiC
Nanoyüpler Takviyesi	> 1,000	< 100 nm	C

Parçacık takviyeli kompozitler aşağıdaki nedenlerden dolayı malzeme alanında ilgi görmektedirler [23].

- Parçacık takviyeli kompozitler sürekli lifli kompozitlere göre ucuzdur.
- Yüksek sıcaklıkta kullanılırlar
- İyi aşınma direnci
- Yüksek ısıl stabilite
- Lif takviyelilere göre daha izotropiktir.
- Döküm veya toz metalurjisi ile işleme, akabinde dövme, haddeleme, ve ekstrüzyon aracıyla geleneksel ikincil işlemler kullanılabilir.

Matris fazına eklenen takviyelerin iki temel önde gelen özelliği ise, dayanıklılık (mukavemet) ve elastisite modülüdür [23].

- Mukavemet: Takviyeler, matris malzemesine eklenerek kompozitin genel mukavemetini artırır. Takviyelerin yüksek mukavemet özellikleri, kompozitin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini artırabilir. Bu şekilde, kompozit malzeme daha yüksek mekanik performans gösterebilir.
- Elastisite Modülü: Elastisite modülü veya Young'un modülü, malzemenin şekil değiştirme yeteneğiyle ilgilidir. Takviyelerin elastisite modülü, kompozitin rijitliğini ve deformasyon davranışını etkiler. Yüksek elastisite modülü, kompozitin daha sert ve mukavim olmasını sağlar.

Düşük yoğunluğa sahip olan takviyeler, genellikle kompozitin yoğunluğunu artırmadan mukavemet ve elastisite modülünü artırabilirler [23]. Bu, kompozit malzemenin yüksek performanslı ve hafif olmasını sağlar [23]. Örneğin, karbon fiber gibi yüksek mukavemetli ve hafif takviyeler, matris içinde dağıtılarak kompozitin mukavemetini artırabilir ve yoğunluğunu azaltabilir [23]. Bu, özellikle uçak, araba ve uzay endüstrilerinde hafif ve dayanıklı malzemelerin talep edildiği yerlerde avantajlıdır [23].

2.5.1 MMK’larda Yaygın Olarak kullanılan Matrisler

Metal matrisli kompozitler (MMK'lar), matris malzemesine göre sınıflandırılabilir ve farklı matris malzemeleri farklı uygulama alanlarına ve özelliklere sahip olabilir [5], [23]. MMK üretiminde sık kullanılan bazı matris malzemeleri şunlardır [5], [23]:

- Alüminyum alaşımları
- Magnezyum alaşımları
- Titantum ve titanyum alaşımları
- Gümüş
- Kobalt
- Bakır
- Nikel
- Niyomyum

Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan metallerin yoğunluk ve akma mukavemeti [5]

Metal	Yoğunluk (g/cm³)	Akma Mukavemeti Değeri (MPa)	Spesifik Mukavemet Değeri (Nm/kg)
Magnezyum(Mg)	1,74	69	39,6
Berilyum(Be)	1,85	120	64,9
Titanyum(Ti)	4,51	140	31,0
Nikel(Ni)	8,90	148	16,6
Bakır(Cu)	8,93	69	7,7
Tungsten(W)	19,25	550	28,6
Molibden(Mo)	10,22	345	33,8
Niobium(Nb)	8,57	105	12,3

Tablo 2.3 Yaygın olarak kullanılan metallerin erime ve kaynama noktası [5]

Alaşım Elementi	Ergime Sıcaklığı °C	Kaynama Sıcaklığı °C	Brinell Sertlik MPa	Yoğunluk g/cm³
Çinko (ZN)	420	907	412	7,13
Magnezyum (Mg)	649	1107	260	1,74
Alüminyum (Al)	660	2467	245	2,70
Bakır (Cu)	1083	2567	874	8,96
Mangan (Mn)	1245	1962	196	7,43
Silisyum (Si)	1410	2355	7	2,33
Demir (De)	1535	2750	490	7,87
Titanyum (Ti)	1660	3287	716	4,54
Krom (Cr)	1857	2672	1120	7,19

Titanyum, havacılık endüstrisinde en önemli malzemelerden biridir [23]. Saf titanyum yoğunluğu 4,5 g/cm³ olup elastite modülü ise 115 GPa'dır [23]. Titanyum alaşımlarında yoğunluğun değeri 4,3 ila 5,1 g/cm arasında değişmektedir [23]. Elastite modülü ise 80 ila 130 GPa aralığında değişmektedir [23]. Saf titanyum sahip olduğu özellikler nedeniyle, havacılık uygulamaları için oldukça idealdir [23]. İşte bazı önemli özellikleri [23]:

- **Yüksek Spesifik Mukavemet ve Modül/Ağırlık Oranı:** Titanyum ve titanyum alaşımları, yüksek dayanıklılık ve ağırlık oranına sahiptir, bu da hafif ancak güçlü malzemeler olduğunu gösterir. Bu özellik, havacılıkta önemlidir çünkü uçakların hafif olması, yakıt verimliliğini artırır.
- **Yüksek Eritme Noktası:** Titanyumun yüksek erime noktası (1.672°C), yüksek sıcaklıkta stabilitesini korumasını sağlar. Bu özellik, motor ve diğer parçaların yüksek sıcaklıkta güvenli şekilde çalışmasına imkan verir.

- **İyi Korozyon Direnci:** Titanyum, oksidasyon ve korozyona karşı doğal olarak dirençlidir. Bu özellik, uçak parçalarının uzun süreli kullanımında dayanımını yükseltir ve bakım maliyetlerini azaltır.
- **Geniş Uygulama Alanı:** Titanyum ve titanyum alaşımları, uçak motorlarında (türbinin ve kompresörün kanatlarında), gövde yedek parçalarında ve gövde parçalarında ve diğer kritik bileşenlerde yaygın olarak kullanılır. Yüksek performansları ve güvenilirlikleri sebebiyle havacılık sanayinde kullanılan bir malzemedir.

Ancak, titanyumun pahalı bir malzeme olması dezavantajıdır [23]. Bu nedenle, uygulama gereksinimleri ve bütçe faktörleri dikkate alınarak titanyumun kullanımı planlanmalıdır [23]

Magnezyum ve alaşımlarının hafif metallerin bir grubunu oluşturmanın yanında magnezyum en hafif metallerden biridir ve yoğunluğu 1,74 g/cm³'tür [23]. İşte magnezyumun bazı önemli olan özellikleri ve kullanım alanları [23]:

- **Hafiflik:** Magnezyum, en hafif yapı malzemelerinden biridir. Yoğunluğu düşüktür, bu da hafif ve taşınabilir ürünlerin üretiminde ideal bir seçenek olmasını sağlar.
- **Geniş Uygulama Alanı:** Magnezyum alaşımları, birçok üretim sanayisinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle döküm endüstrisinde, otomotiv ve uçak bileşenlerinde, elektronik ekipmanlarda ve hafif yapı malzemelerinde sıkça kullanılırlar. Örneğin, otomotiv sektöründe, magnezyum alaşımları motor muhafazaları, vites kutuları ve süspansiyon parçaları gibi birçok parçada kullanılır.
- **Sınırlı Plastik Deformasyon Kabiliyeti:** Magnezyumun altıgen, sıkı paketlenmiş bir yapıya sahip olması, oda sıcaklığında kayma nedeniyle sınırlı plastik deformasyon kabiliyetine sahip olduğu manasına ortaya çıkar. Bu özellik, bazı uygulamalarda göz önüne getirilmesi gereken bir faktördür ve uygun tasarım ve işleme teknikleri ile ele alınır.

Magnezyumun hafifliği ve dayanıklılığı, birçok endüstriyel ve tüketici ürününün üretiminde tercih edilmesini sağlar [23]. Ancak, bazı uygulamalarda sınırlı plastik deformasyon kabiliyeti dikkate alınmalıdır, bu nedenle uygun üretim ve işleme teknikleri kullanılmalıdır [23].

Kobalt, kesici takımlar ve diğer endüstriyel uygulamalar için WC/Co kompozitleri oldukça yaygındır [23]. İşte kobaltın WC/Co kompozitlerindeki rolü ve üretimini üzerine daha fazla bilgi [23]:

- **Kullanım Alanı:** Kobalt, tungsten karbür (WC) ile birlikte kullanılarak sert metal bileşikler elde etmek amacıyla sıklıkla kullanılır. Bu bileşikler genellikle kesici takımlar, matkap uçları, freze uçları ve diğer kesici araçlar için kesici uçlar olarak kullanılır. Ayrıca, petrol sondajında kullanılan sement karbürlerin üretiminde de kobalt önemli bir bileşendir.
- **Matris Malzemesi:** Kobalt, WC parçacıklarını bir arada tutan matris malzemesi olarak işlev görür. WC parçacıkları, sertlik ve aşınma direnci sağlarken, kobalt matrisi parçacıkları bir arada tutar ve kompozitin mekanik dayanıklılığını artırır.
- **Üretim:** Kobalt tozu, genellikle kobaltın hidrojenin indirgenmesi veya kobalt sıvısının atomizasyonu yoluyla kimyasal olarak üretilir. Bu toz daha sonra WC parçacıkları ile karıştırılarak ve uygun bir sinterleme işlemiyle birleştirilerek WC/Co kompozitleri üretilir.

Kobalt, sert metal bileşiklerdeki matris malzemesi olarak kritik öneme sahiptir ve kesici takımların ve diğer aşınma direnci gerektiren uygulamaların performansını artırmaya yardımcı olur [23]. Bu nedenle, kobaltın kimyasal olarak doğru şekilde üretilmesi ve kompozitlerde dengeli bir şekilde dağıtılması önemlidir [23].

Gümüşün birçok önemli özelliği ve uygulama alanları bulunmaktadır. İşte gümüşün bazı temel özellikleri ve uygulamaları [23]:

- **Yüksek Elektrik İletkenliği:** Gümüş, bakır gibi yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu özellik, gümüşün elektrik iletkeni olarak yaygın kullanılmasını sağlar. Elektrik kabloları, elektrik devreleri ve elektronik bileşenler gibi birden fazla uygulamada istifade edilir.
- **İyi Termal İletkenlik:** Gümüş, aynı zamanda güzel ısı iletkenliğine sahiptir. Bu özellik, gümüşün ısı transferi uygulamalarında kullanılmasını sağlar. Termal arayüz malzemeleri, soğutma sistemleri ve termal yalıtım gibi uygulamalarda kullanılır.

- **Süneklik ve İşlenebilirlik:** Gümüş, oldukça sünek bir metaldir ve kolayca şekillendirilebilir ve işlenebilir. Bu özellik, gümüşün mücevherat, gümüş eşyalar ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmasını sağlar.
- **Korozyon Direnci:** Gümüş, iyi bir korozyon dayanımına haizdir, bu da onu çeşitli ortamlarda dayanıklı hale getirir. Bu özellik, gümüşün çatal-bıçak takımları, sofras eşyaları ve kimyasal işlemler gibi uygulamalarda kullanılmasını sağlar.
- **Süperiletken Uygulamaları:** Bazı yüksek sıcaklıktaki oksit süperiletkenlerde matris malzemesi olarak gümüşün yeni bir kullanım alanı bulunmuştur. Bu uygulama, elektrik iletimi ve manyetik alan uygulamalarında etkin bir görev üstlenir.

Bu kabiliyetler ve uygulamalar, gümüşün yaygın kullanılmasını sağlar [23]. Elektrik iletkenliği, ısı iletkenlik, esneklik ve korozyon dayanımı gibi avantajları, gümüşün elektronik, endüstriyel, tıbbi ve dekoratif uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlar [23].

Nikel ve nikel bazlı alaşımların birçok önemli özelliği ve uygulama alanları bulunmaktadır. İşte bunlardan bazıları [23]:

- **Süneklik:** Nikel, iyi bir süneklığe sahip bir metaldir. Bu özellik, nikelin şekillendirme işlemlerinde kolayca işlenmesini sağlar ve çeşitli şekillerde şekillendirilmesine olanak tanır.
- **Yüksek Sıcaklık Dayanımı:** Nikel bazlı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda mükemmel dayanıklılık gösterebilir. Özellikle nikel-demir-kobalt alaşımları, yüksek sıcaklıkta yüksek sürünme dayanımına sahiptir. Bu özellik, havacılık, enerji üretimi ve endüstriyel fırınlar gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmalarını sağlar.
- **Korozyon Direnci:** Nikel ve nikel bazlı alaşımlar, genellikle korozyona karşı dirençlidirler. Bu özellik, deniz suyu, asitler ve yüksek sıcaklık gibi agresif ortamlarda kullanılmalarını sağlar.
- **Manyetik Özellikler:** Nikel, manyetik özelliklere sahip bir metaldir. Bu özellik, manyetik uygulamalarda kullanılmalarını sağlar.

- **Elektriksel ve Termal Özellikler:** Nikel, iyi bir elektrik iletkeni ve termal iletkenidir. Bu özellikler, elektrik ve ısı transferi uygulamalarında kullanılmalarını sağlar.
- **Korozif Ortamlar için Uygunluk:** Nikel bazlı alaşımların birçoğu, korozif ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu özellik, kimyasal endüstrilerde, denizcilikte ve petrokimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmalarını sağlar.

Nikel ve nikel bazlı alaşımların bu özellikleri, birden fazla olan endüstriyel ve teknolojik uygulama alanlarında yaygın olarak kullanımını sağlar [23]. Havacılık, enerji üretimi, kimya endüstrisi, tıp, elektronik ve savunma sanayi gibi birçok alanda nikel bazlı malzemelerin önemi büyüktür [23].

Niyobyum alaşımları, metal matrisli kompozitlerde (MMC'lerde) matris malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmazlar [23]. Ancak, niyobyumun önemli bir uygulama alanı süperiletkenlik alanındadır [23]. Süperiletken malzemeler, belirli eşik termal altında elektrik direncini sıfıra indirebilen malzemelerdir [23]. Bu tür malzemeler, manyetik alanlarda kullanım için idealdir ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) cihazları ve parçacık hızlandırıcıları gibi birden çok endüstriyel alanda yaygın olarak yararlanılmaktadır [23]. Niyobyum, süperiletkenlik özelliğine sahip niyobyum-titanyum (Nb-Ti) veya niyobyum-tin (Nb₃Sn) alaşımları içeren süperiletken kompozitlerde filament olarak kullanılır [23]. Bu kompozitler, yüksek manyetik alanlarda stabilite ve mükemmel süperiletkenlik sağlamak için tasarlanmıştır [23]. Bu nedenle, niyobyumun süperiletken kompozitlerde filament olarak kullanılması, önemli bir uygulama alanıdır [23].

İntermetalik bileşikler metal elementler arasındaki belirli kimyasal bağlanmalar sonucu oluşur [23]. Genellikle stokiyometrik bir orana sahiptirler ve belirli bir bileşimde kristal yapısına sahiptirler [23]. Bu bileşiklerin kristal yapısı karmaşık olup bu bileşikteki bağlanma genellikle iyonik, kovalent ve metalik bağlar içerirler [23]. İntermetalikler genellikle stokiyometrik bir bileşime sahip olmakla birlikte faz diyagramlarında bir çizgi bileşik olarak gözlemlenirler [23]. Bu özellikleri nedeniyle intermetalikler genellikle kovalent ve iyonik bağlar nedeniyle kırılabilirler [23]. Ancak, bazı intermetalik bileşiklerin yüksek sıcaklık mukavemeti, sertlik, düşük yoğunluk ve mükemmel oksidasyon dayanımı gibi

benzersiz kabiliyete haiz olduğu saptanmıştır [23]. Bu özellikler, intermetaliklerin kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılar [23]. Bu şekilde, geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksek çalışma sıcaklıklarını destekleyebilirler ve daha iyi mekanik kabiliyetler edindirirler [23]. Bu nedenle, intermetaliklerin kompozit malzemelerin üretiminde kullanılması, malzemenin performansını yükseltmek için bir strateji olarak kullanılırlar [23].

Alüminyum işlenmesi kolay doğada bol olan, hafif ve korozyon dayanımı fazla bir metaldir [5], [23]. Alüminyum alaşımları ise bu özelliklere ek olarak yüksek dayanıma ve korozyon direncine sahiptirler [5], [23]. Bu özellikler, alüminyum ve alaşımlarını birçok endüstride tercih edilen malzemeler haline getirir [5], [23]. Alüminyum alaşımları ve alüminyumun mevcut kabiliyetlerini geliştirmek için takviye elemanları kullanılabilir [5], [23]. Bu takviyeler, kompozit malzemelerin oluşturulmasına olanak tanır ve çeşitli mekanik, termal ve kimyasal özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olabilir [5], [23]. Örneğın, karbon fiber gibi yüksek mukavemetli takviye elemanları, alüminyumun çekme mukavemetini artırabilir [5], [23]. Ayrıca, çeşitli seramikler veya metal partikülleri eklenerek alaşımın ısıl kararlılığı ve dayanımı artırılabilir [5], [23]. Bu şekilde, takviye elemanlarının kullanılmasıyla alüminyum ve alaşımlarının özellikleri genişletilebilir ve çeşitli endüstriyel alanlarda daha verimli kullanılabilir hale getirilebilir [5], [23].

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek maksadıyla matris içerisine ikinci faz olarak [5]:

- SiC-Silisyum karbür
- Si₃N₄-Silisyum karbür
- TiN-Titanyum nitrür
- B₄C-Bor karbür
- TiB₂-Titanyum diborür
- AlN-Alüminyum nitrür
- B-Bor
- Al₂O₃-Alüminyum oksit
- W-Wolfram
- Mo-Molibden

gibi takviye fazları kullanılır [5]. Bu takviye fazları, matris malzemesi olan alaşımın mekanik ve aşınma kabiliyetini geliştirmek için tasarlanmıştır [5]. Özellikle araba endüstrisinde içten yanmalı motorlarda kullanılan parçalar için, tribolojik özelliklerin önemi büyüktür [5]. Triboloji, yüzeyler arasındaki sürtünme, yağlama ve aşınma gibi etkileşimlerle ilgilenen bir bilim dalıdır [5]. Pistonlar ve silindir kafaları gibi içten yanmalı motor parçaları, yüksek termal ve basınç altında çalışırken aşırı sürtünme ve aşınmaya maruz kalabilirler [5]. Bu nedenle, bu parçaların malzeme bileşimi ve tribolojik özellikleri önemlidir [5].

Tablo 2.4 Metallerin erime ve kaynama noktası değerleri [5]

Malzeme	Esneklik Modülü GPa	Yığın Modülü GPa	Kayma Modülü GPa
AlN	330	212	133
Si ₃ N ₄	310	152	120
SiC	460	219	200
B ₄ C	450	217	195
TiB ₂	556	233	249
Al ₂ O ₃	435	228	175
WC	690	386	287

Tablo 2.5 Eğme, basma, çekme ve kırılma modülü değerleri [5]

Malzemenin Adı	Eğme Mukavemeti Değeri (MPa)	Basma Mukavemeti Değeri (MPa)	Çekme Mukavemeti Değeri (MPa)	Kırılma Mukavemeti Değeri (MPa)
AlN	310	1500 - 4000	390	3,70
Si ₃ N ₄	490 - 980	3000	550	5,60
SiC	580	588 - 4116	200	2,80
B ₄ C	310	2600	600	3,00
TiB ₂	277	2400	-	2,70
Al ₂ O ₃	294-392	2000	248	2,80-4,50
WC	1000	4100-5850	-	7,00

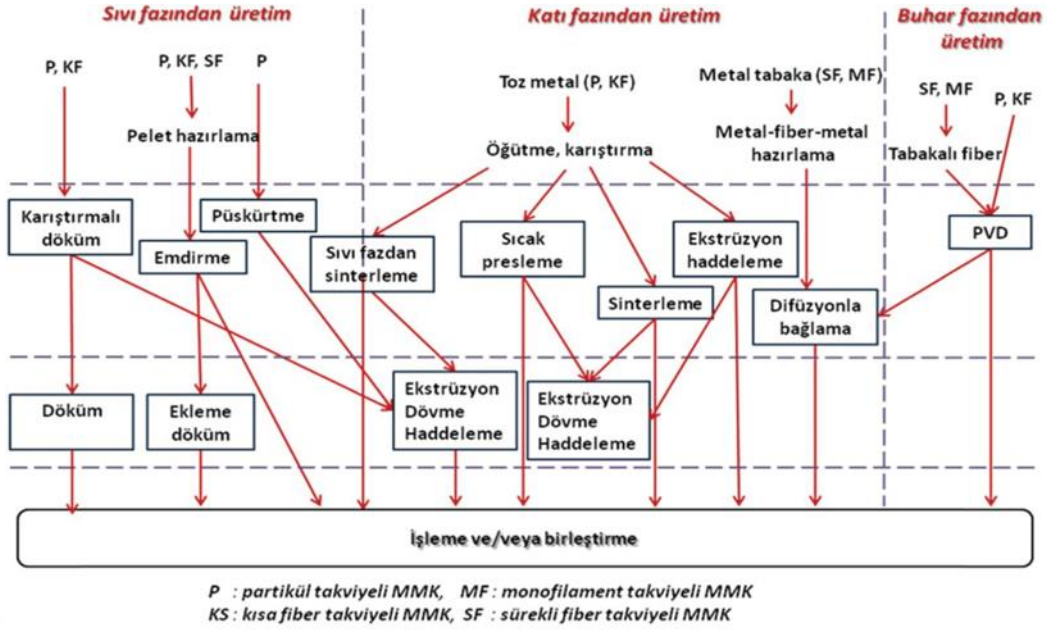
2.6 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi

MMK üretim yönteminin seçimi, elde edilecek üründen beklenen özelliklere ve uygulama gereksinimlerine bağlıdır [5]. Aşağıdaki önemli etkenler göz önüne alınarak üretim yöntemi belirlenir [5]:

- **Boyutsal Özellikler:** Elde edilecek ürünün boyutları ve geometrisi, üretim yönteminin belirlenmesinde etkin bir rol oynar. Örneğin, döküm veya dövme gibi yöntemler daha büyük parçaların üretiminde tercih edilebilirken, ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplama daha karmaşık geometrilere haiz parçaların elde edilmesinde kullanılabilir.
- **Kullanım Sıcaklık Aralığı:** MMK'nın kullanılacağı ortamın sıcaklık aralığı, üretim yönteminin seçiminde dikkate alınmalıdır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı parçalar için özel döküm veya metal enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler tercih edilebilir.

- **Takviye Malzemesinin Şekli:** Takviye malzemesinin şekli ve boyutu, üretim sürecindeki zorlukları ve farklı yöntemlerin uygulanabilirliğini etkiler. Lifler, parçacıklar veya levhalar gibi farklı şekillerdeki takviyeler farklı üretim yöntemlerini gerektirebilir.
- **Matris ve Takviye Malzemesinin Uyumu:** Matris ve takviye malzemeleri arasında uyum, ürünün mekanik özelliklerini etkiler. Uygun bir üretim yöntemi seçilmeli ve malzemelerin homojen bir şekilde dağılması sağlanmalıdır.
- **Ek İşlem Gereksinimi:** Üretim sürecinde ek işlem gereksinimleri, üretim maliyetlerini ve zamanını etkileyebilir. Özel işlemlerin gerekliliği, üretim yönteminin seçiminde önemli bir faktördür.
- **Tepkimeler:** Matris ve takviye malzemeleri arasında olası kimyasal veya fiziksel tepkimeler, üretim sürecini etkileyebilir. Bu tepkimelerin kontrol altında tutulması ve istenmeyen sonuçların önlenmesi önemlidir.
- **Dağılım:** Takviye malzemesinin matris içinde homojen bir şekilde dağılması, ürünün mekanik özelliklerini etkiler. Üretim yöntemi, takviye malzemesinin homojen dağılımını sağlayabilmelidir.
- **Arayüzey Bağlanması:** Matris-takviye arayüzey bağlanmasının güçlü olması, kompozit malzemenin dayanıklılığını ve performansını artırır. Üretim yöntemi, bu bağlanmanın tam olarak sağlanabilmesini sağlamalıdır.

Bu faktörler dikkate alınarak, uygun üretim yöntemi seçilerek istenen özelliklere sahip MMK'lar elde edilebilir.



Şekil 2.5 MMK üretim yöntemlerine ait akım şeması [5]

Metal matrisli kompozitlerin üretimi gaz, sıvı ve katı olmak üzere üç çeşide ayrılır [23]:

1. Katı faz üretim yöntemleri

- Toz metalurjisi işleme
- Ekstrüzyon yöntemi
- Dövme yöntemi
- Presleme ve sinterleme
- Rulo yapıştırma ve co-ekstrüzyon
- Difüzyon bağlaması
- Patlayıcı şok konsolidasyonu

2. Sıvı faz üretim yöntemleri

- Döküm veya sıvı sızıntısı
 - 1) Geleneksel döküm
 - 2) Santrifüj döküm
 - 3) Basıncsız sıvı infiltrasyon
 - 4) Sıkıştırma döküm ya da basınçlı infiltrasyon yöntemi
- Püskürtme tekniği ile sıvı matris içinde partikül oluşumu
- Yerinde süreçler
- Sızma mekaniği
- Sıvı fazlı işleme sırasında mikro yapının gelişimi

- Döküm
3. Gaz fazı üretim yöntemleri
- Fiziksel buhar yöntemi

Yukarıda sayılan metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerinde en çok kullanılanı katı ve sıvı faz üretim yöntemleri olup onlardan da en çok kullanılanlar aşağıdaki maddelerde açıklanmıştır [23][24], [25].

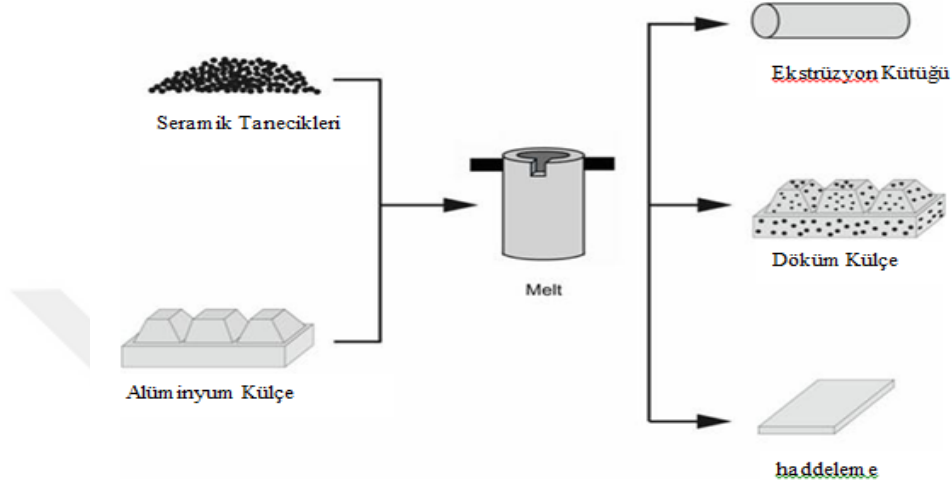
2.6.1 Sıvı Hal Yöntemleri

MMK'ların sıvı işlenmesi genellikle takviye metalin sıvı haldeki metal matrisinin içinde birleştirilmesiyle gerçekleşir [23][24], [25]. Bu yöntem, takviye metalin ergime sıcaklığının matris metalininkinden düşük olduğu durumlarda sıklıkla tercih edilir. Özellikle magnezyum ve alüminyum gibi hafif metaller, düşük ergime noktaları nedeniyle sıvı matris olarak kullanılabilirler [23][24], [25]. Bu, kompozitin oluşturulması ve şekillendirilmesi sürecinde işleme kolaylığı sağlar ve son ürünün mekanik özelliklerini iyileştirebilir [23][24], [25]. Bu yöntem, özellikle araba ve uçak sektörü gibi endüstrilerde hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı malzemelerin imalatında sıklıkla kullanılmaktadır [23][24], [25].

2.6.1.1 Döküm ve Sıvı İnfiltrasyon

Döküm yöntemi ile sıvı infiltrasyon yöntemi, sıvı metal bir lif demetinin infiltrasyonu ile gerçekleşir [23]. Ancak seramik liflerin eriyik metal ile ıslanması zor olduğundan bu işlem biraz karmaşıktır [23]. Lif infiltrasyonu başladığı zaman, lifler ile eriyik metal arasında gerçekleşen reaksiyonlar liflerin özelliklerini azaltır. İnfiltrasyon evvelinde liflerin kaplanmasıyla, ıslanma problemini azaltabilir ve reaksiyonların kontrolünü sağlayabilir [23]. Bu, liflerin eriyik metal ile daha tesirli şekilde etkileşim geçirmemesini sağlar ve son ürünün homojenliğini artırabilir [23]. Bu tür gelişmeler, seramik takviyeli metal matrisli kompozitlerin imal edilmesinde daha güvenilir ve verimli bir süreç sağlayabilir [23]. Ticari piyasada en iyi infiltrasyon yöntemi Duralcan infiltrasyon yöntemidir [23][24]. Duralcan yöntemi, sıvı alüminyumun seramik takviye lif demeti üzerine yüksek basınç veya vakum altında infiltrasyonunu içerir [23][24]. Bu yöntem, homojen bir kompozit yapı üretmek amacı ile seramik liflerin alüminyum matrisine düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar [23][24].

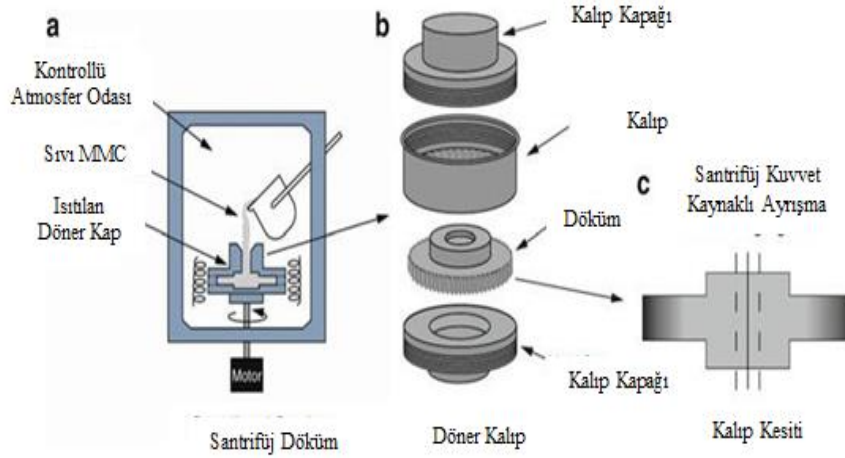
Duralcan yöntemi, alüminyum matrisli kompozitlerin yüksek performanslı ve hafif malzemeler olarak kullanıldığı birçok endüstriyel uygulamada başarıyla kullanılmıştır [23]. Bu yöntem, özellikle uçak, araba ve askeri endüstrilerinde, yüksek dayanım, düşük ağırlık ve iyi termal özellikler gerektiren uygulamalarda tercih edilir [23][24].



Şekil 2.6 Duralcan yöntemi şematik gösterimi [23][24]

2.6.1.2 Santrifüj Sıvı Hal Yöntemi

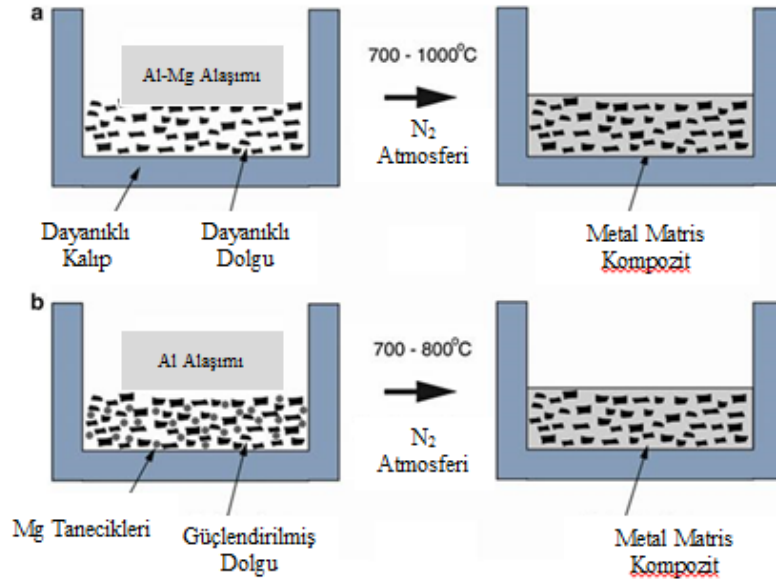
Takviyelendirilmemiş metal matrisli kompozitler seramik takviyeli metal matrisli kompozitlere göre daha yumuşak olurken seramik takviyeli metal matrsili kompozitlerin işlenmesi daha zordur [23]. Savurma dökümü, takviyelerin yerleştirilmesi için döküm esnasında oluşan savurma kuvvetinden yararlanır. Bu kuvvet, takviyelerin dış kısımlarda yoğunlaşmasını sağlar [23]. Böylece, takviye bulunması gerektirmeyen alanlar daha az yoğunlukta olur hem de takviye parçacıkları eriyik matris içerisinde optimum konuma gelir ve işlenebilmesi daha basit hale gelir [23].



Şekil 2.7 (a) santrifüj döküm işlemi, (b) dönen kalıp ve (c) enine kesiti [23]

2.6.1.3 Basınçsız Sıvı İnfiltrasyonu

Basınçsız sıvı infiltrasyon yöntemi, bir takviye preformunun reaktif olmayan veya reaktif sızmasını içerir [23]. Bu işlemde, parçacıklı bir dolgu maddesine, Şekil 2.8'da gösterildiği gibi saf Al veya Al-Mg alaşımı süzülür. Saf Al dahil edildiğinde Mg partikülleri takviye partikülleri de karıştırılarak bir Al-Mg alaşımı matrisi oluştururlar [23]. Özellikle basınçsız işlem uzun süre gerektirdiğinden, arayüzey reaksiyonlarını minimize etmek için atmosfer yüksek sıcaklıklarda sızma süreleri. Saf Al infiltre edildiğinde infiltrasyon sıcaklıkları 700 ila 800 °C arasındadır. Al-Mg alaşımlarının infiltrasyonu ise 700 ila 1.000 arasında gerçekleştirilmektedir [23]. Tipik sızma oranları 25 cm/saatten azdır [23].



Şekil 2.8 MMC'lerin basınçsız infiltrasyonu: (a) parçacık önformunun alaşım matris infiltrasyonu ve (b) metalik alaşım partikülünün ve seramik partikül ön formunun saf matris infiltrasyonu[23]

2.6.1.4 Püskürtme Yöntemi İle Sıvı Matris İçerisinde Partikül Oluşumu

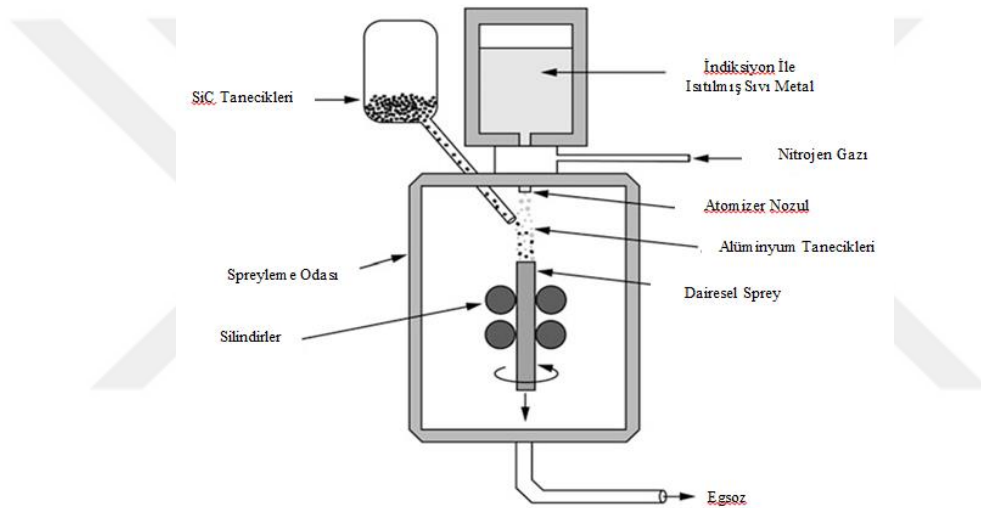
Püskürtme yöntemi, metalik alaşımların toz halinde temin edilmesinde faydalanılan bir yöntemdir [23]. Bu yöntemde, metal veya metal alaşımı ilk aşamada eritilip sıvı hale getirilir [23]. Akabinde, sıvı metal veya alaşımı su veya inert bir gazla atomize edilir, yani çok küçük parçacıklara ayrılır [23]. Bu parçacıklar hızla katılaşır ve ince bir katı toz elde edilir [23].

Bu tekniğin birkaç avantajı vardır [23]:

- **Yüksek Üretim Hızı:** Püskürtme yönteminde, metal tozları hızlı bir şekilde elde edilir. Bu, endüstriyel üretim süreçlerinde önemli bir avantajdır çünkü üretim verimliliğini artırır.
- **Reaksiyonları En Aza İndirgeme:** Hızlı katılaşma süreci, partikül ile matris arasında olabilecek tepkimeleri minimumda tutar. Bu, istenmeyen kimyasal değişikliklerin önlenmesine ve son ürünün istenilen özelliklerinin korunmasına yardımcı olur.
- **Homojenlik:** Püskürtme yöntemi, homojen bir toz yapısının üretilmesini sağlar. Bu, son ürünün daha tutarlı ve istikrarlı olmasını sağlar.

- **Çeşitli Uygulamalar:** Bu yöntem, farklı metal alaşımlarının ve bileşenlerinin üretiminde kullanılabilir. Ayrıca, çeşitli endüstriyel alanlarda popüler olarak kullanılan çok çeşitli malzemelerin üretimine katkıda bulunabilir.

Sonuç olarak, püskürtme yöntemi metalik alaşımların toz halinde üretilmesinde sıklıkla kullanılan bir tekniktir ve birçok avantajı vardır [23]. Bu yöntem, endüstriyel üretim süreçlerinde sık olarak kullanılmakta ve metalurji alanında önemli bir yer tutmaktadır [23]. Ancak yöntemin en önemli dezavantajı pahalı olmasıdır [23]. Aşağıdaki örnekte SiC partikülünün sıvı damlacık şeklinde olan Al üzerine püskürtülmesi şematik olarak gösterilmektedir [23].



Şekil 2.9 SiC takviye parçacıklarının Al sıvı damlacıkları üzerine püskürtülmesi [23]

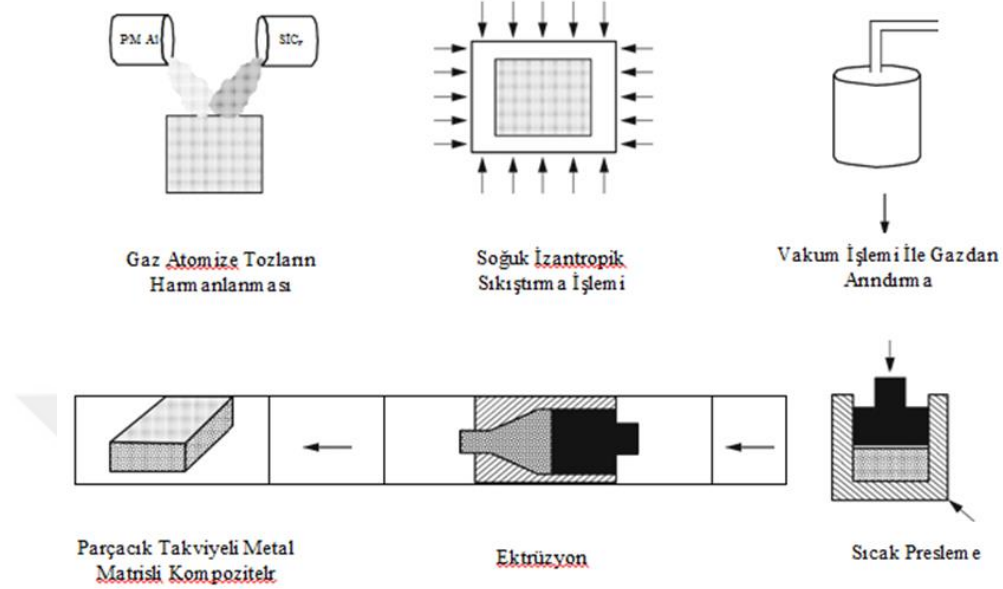
2.6.2 Katı Hal Yöntemleri

Sıvı hal üretimlerindeki dezavantaj takviye dağılımının kontrol edilememesi, düzgün matris mikro yapısının elde edilememesi ve sıvı işlemede yüksek sıcaklıklarda matris ile takviye arasında olumsuz arayüzey reaksiyonlarının meydana gelmesi gibi sebeplerin istenmediği durumlarda katı hal yöntemi seçilir [23]. Katı hal üretim tarzında en çok faydalanılan yöntem ise toz metalurjisi işleme yöntemidir [23].

2.6.2.1 Toz Metalurjisi İşleme Yöntemi

Toz metalurjisi yönteminde, matris içerisine metal ve seramik tozları eklenerek karıştırılır [23]. Akabinde soğuk şekilde sıkıştırma işlemi yapılır. Sıkıştırma

eyleminin akabinde sıcaklık uygulanarak presleme gerçekleşir [23]. Homojen olan parça daha sonra dövme veya ekstrüzyon işlemleri gibi ikinci bir işlemden geçer [23].



Şekil 2.10 Toz metalurjisi işleme yöntemi [23]

2.6.2.2 Ekstrüzyon Yöntemi

Ekstrüzyon işlemi, Metal Matrisli Kompozitlerin (MMC'lerin) şekillendirilmesinde sıklıkla faydalanan bir yöntemdir. Özellikle alüminyum matrisli kompozitlerde (Al/Al ve Al/SiC gibi) kullanılan bu işlem, ikincil deformasyon işleminin bir vasıtası olarak önemlidir.

Ekstrüzyon işlemi, yüksek basınç altında bir metal bloğun bir kalıptan geçirilerek şekillendirilmesini sağlar. Bu sırada malzeme, yüksek sıcaklıkta işlenir, bu da metal matrisi ve takviye malzemeleri arasındaki arayüzey bağlanmasını güçlendirir. Ayrıca, ekstrüzyon basıncı ve sıcaklığının birleşimi, takviye malzemeleriyle matris arasındaki kaymayı artırır, böylece kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir.

Aşınma, birbiriyle temasta bulunan elemanlar arasında, farklı aşınma etkileriyle ortaya çıkan ve istenmeyen malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır [15][26], [27], [28]. Aşınma hareket içerisindeki bir yüzey ile başka bir yüzey arasında olan kimyasal, fiziksel ve mekanik yolla gerçekleşen malzeme kaybına denmesinin yanında katıda boyut kaybı ve ağırlık kaybı yaratan bir süreçtir [15][26], [27], [28]. Ancak bu tanıma korozyon girmemektedir. Aşınma için gerekli koşullar hız, sıcaklık, yük, temas türleri vb örnek verilebilir [15][26], [27], [28]. Aşınma endüstride taşlama, talaşlı imalat ve traşlıma gibi istenilerek kontrollü yapıldığı durumların yanında yatak, conta, dişliler, rulman, eklem ve dizlerde istem dışı gelişen istenmeyen bir durumdur [15].

Aşınmayı meydana getiren tribolojik mekanizmalar genel olarak [15]:

- Adhezif aşınma
- Alışma Aşınması
- Abrazif aşınma
- Eroziv aşınma :
 - 1) Katı partiküllerin oluşturduğu erozyon
 - 2) Akışkanların oluşturduğu erozyon
 - 3) Kavitatif erozyon
 - 4) Elektro erozyon(Kıvılcım erozyonu)
- Sürtünme oksidasyonu
- Koroziv aşınma
- Yorulma Aşınması
- Yenme Aşınması(pitting (çukurcuk)) vb.

Aşınma performansı, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerde çeşitli tribolojik etkenler tarafından etkilenir [15]. Bu parametreler genellikle harici ve dahili sebepler olarak ikiye ayrılır [15]. İçsel parametreler, aşınma sürecini etkileyen dış mekanik ve fiziksel faktörleri ifade eder[15]. Bu faktörler arasında uygulanan kuvvet, kayma sürati, kayma mesafesi gibi mekanik faktörler yer alır [15]. Ayrıca, takviye partiküllerinin oryantasyonu, ortam koşulları

(örneğin, nem, sıcaklık), numunenin ve karşı malzemenin yüzeyinin engebelikliyi gibi fiziksel faktörler de dışsal parametreler arasında sayılabilir[15]. İçsel faktörler ise malzeme içindeki yapısal özellikleri ve takviye partiküllerinin özelliklerini ifade eder[15]. Bu faktörler arasında takviyenin şekli, boyutu, tipi, partiküllerin dağılımı ve hacimsel oranı gibi malzeme parametreleri bulunur [15].

Bu dışsal ve içsel faktörlerin bir kombinasyonu, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin aşınma davranışını belirler [15].

3.1 Adhezif Aşınma

Etkileşim içerisinde yer alan ve birbirine göre bağıl hareket eden, kuru kayma alanlarında dahi diğer aşınma türlerinin önlendiği bir aşınma türüdür [15][26], [27], [28]. Bu aşınma türü bazı dokümanlarda kayma aşınması olarak isimlendirilmiştir [15][26], [27], [28]. İşleme kusurları nedeniyle temas yüzeylerinde pürüzlülük olması ve bu da gerçek temas alanının küçük olmasına sebep olurken yükün etkisiyle, temas halindeki bu bölgelerde aşırı gerilmeler oluşur [26], [27], [28]. Özellikle akma sınırı geçildiğinde küçük kaynak bağları oluşturur (soğuk kaynak adhezyonu). Adhezyon, malzeme yüzeylerinin veya farklı moleküllerin oluşturduğu karşılıklı etkileşimi ve bağlar şeklinde de tanımlanır [26], [27], [28].

3.2 Alışma Aşınması

Sınır sürtünme bölgesinde çalışan ve genellikle katkılı yağlayıcılarla yağlanan içten yanmalı motorların, dişli çarkların, yatakların ve kızakların sürtünme yüzeylerinde, alışma süreci boyunca gözlemlenen yüzey pürüzlerinin düzgünleşmesi, istenilen ve tesir altına alınabilen bir aşınma türüdür [15].

3.3 Yenme Tipi Aşınma

Yenme tipi aşınması, birden oluşan bir olaydır [15]. Birbiri üzerinde kayan etki yüzeylerindeki basınç ve kayma sürati kritik değerini aştığında veya ortam sıcaklığının çok yüksek olması durumunda yüzeylerde meydana gelir [15].

3.4 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, birbirinin üzerinde sıyrılan yüzeyler arasında aşındırıcı sert parçacıkların yer alması ile oluşmaktadır [15], [26], [27], [28]. Sert parçacıklar ya dışarıdan sisteme dahil olur veya adhezif aşınma ürünleri olarak sistemde meydana gelir [15], [26], [27], [28]. Ayrıca yağlayıcı içinde bulunabilecek sert partiküller veya türbin kanatlarından geçen akışkan içerisindeki partiküller bu tip aşınma mekanizmasını meydana getirir [15], [26], [27], [28]. Yüzeylere yapışan pürüzlü çok sert bir kirin yada yüzeylerde mevcut olan çok set bir pürüzün karşı yüzeyde meydana getirdiği aşınma şeklidir [15], [26], [27], [28]. Bu tanıma göre abrasif aşınma [15], [26], [27], [28]:

2 elemanlı (sürtünen yüzey çiftlerinde sert ve pürüzlü olanın yada yüzeylerden birisinin içine gömülmüş sert bir parçanın diğer yüzeyi kazınması).

3 elemanlı (sürtünen yüzey çiftlerinin dışında üçüncü bir değişkenin serbest aşındırıcı olarak yüzeylerin arasında yer alması ve kazıyıcı etki yapmasıyla) meydana gelmekte.

3.5 Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, abrasif aşınmayla pek çok yönüyle benzerlik göstermektedir [15], [27], [28]. Eroziyon aşınmanın, üç elemanlı abrasiv aşınmadan temel farklılığı, aşınmanın sert parçacıkların satışı kaldırmasından ziyade yüzeye çarpması neticesinde meydana gelmedir [15], [27], [28]. Eroziyon aşınma partiküllerin oluştuğu ve taşındığı ortama göre dörtte ayrılır [15], [27], [28].

3.5.1 Katı Partiküllerin Oluşturduğu Eroziyon Aşınma

Çok yüksek hızlı parçacıkların etki yüzeylerine çarpması sonucu ortaya çıkar. Genellikle çarpma açısı küçüktür [15]. Örnek verecek olursak su türbini veya pompalarında çark veya difüzer yüzeylerini yalayan ve içinde eroziyon partiküller bulunan suyun aşınması gösterilebilir [15]. Özellikle dar kanal ve borularda bu aşınmaya rastlanır [15].

3.5.2 Kavitatif Aşınma

Kavitasyona yol açan nedenler, basınç değişimleri (akım kavitasyonu) ve akışkan içinde meydana gelen alçak basınç dalgaları (titreşim kavitasyonu) şeklinde

adlandırılır [15]. Her iki durumda da kavitasyon olayının iki fazı vardır [15]. Birinci faz, gaz habbelerinin meydana gelişini teşkil etmektedir [15]. Genel bir metal profil yada yüzey civarında hareketli veya hareketsiz sıvı ortamda harekete ve titreşime bağlı olarak ortam sıcaklığındaki sıvının buharlaşma basıncının altına düştüğünde orada buhar habbecikleri oluşur [15]. Daha sonra basıncın yükselmesiyle ikinci faz başlayarak basıncın belli bir değerinde ani yoğunlaşma sonucunda habbecikler parçalanarak ortaya çıkan sıvı darbeleri çok kuvvetli bir aşındırıcı etki ve tahribat yaratır [15].

3.6 Çukurcuk (Pitting) Aşınması

Pittinglenme aşınması, sıklıkla yuvarlanma sürtünmesine maruz kalan ve çizgisel veya noktasal etkileşim halinde olan küçük temas yüzeyine sahip yüzey çiftlerinde oluşmaktadır [15]. Genel görünüşü, yüzey küçük parçacıkların koparak çukurların meydana gelmesi şeklindedir [15]. Bu aşınma asıl olarak dinamik zorlanmanın etkisiyle oluşan bir malzeme yorulması sonucunda meydana gelir [15]. Bu aşınmanın oluşumu belirli bir kuvvet tekrarının akabinde meydana gelir [15].

3.7 Titreşim Aşınması

Titreşim aşınması döngüsel olarak sürtünen iki yüzeyin birinden yada her ikisinden birden malzemenin eksildiği bir aşınmadır [15]. Titreşimli aşınma genellikle yuvarlak, silindirik veya küresel yüzeylerde oluşur, özellikle rulman yatakları gibi uygulamalarda görülür [15].

Titreşimli aşınma sürecinde, tekrarlayan temas ve sürtünme, yüzeylerden malzeme kaybına neden olur [15]. Bu malzeme eksilmesi sonucunda yorulma meydana gelir [15]. Sürekli titreşim ve sürtünme, temas yüzeylerinde çatlak oluşumuna yol açabilir [15]. Titreşimli aşınma süreci, partiküllerin temas nedeniyle dışarı atılması durumunda hızlanabilir [15].

Bu nedenle, titreşimli aşınma, yüzeyler arasındaki tekrarlayan temasın ve sürtünmenin sebebiyet verdiği malzeme kaybının bir kenara bırakacak olursak yorgunluk çatlaklarının oluşmasıyla karakterizedir [15]. Bu süreç, özellikle dönen veya hareketli parçalar arasındaki temasın olduğu uygulamalarda önemlidir ve

malzeme dayanıklılığı ve performansı açısından dikkat edilmesi lazım olan bir faktördür [15].

3.8 Yorulma Aşınması

Yıllara sari meydana gelen temas yüzeyindeki zorlanma sonucunda yüzeyin alt bölgelerinde mikro çatlaklar meydana gelir [15], [27], [28]. Bu çatlaklar zamanla büyüyerek yüzeye ulaşır ve yüzeyde parçacıkların ayrılmasına ve çukurcuklar oluşmasına sebebiyet verir [15], [27], [28]. Bu aşınmanın uzun sürmesinin nedeni elastik deformasyon bölgelerinde olmasındandır [15], [27], [28]. Bir çok makine parçalarında ve özellikle eski cihazların parçalarında sıkça görülmektedir [15], [27], [28].

3.9 Korozi Aşınma

Kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler akabinde özellikle metallere etki eden istenmeyen bir malzeme kayıp mekanizmasıdır [15], [27]. Korozyon diğer aşınma türlerinden farklı olarak çok fazla formda önümüze çıkmaktadır [15], [27]. Diğer aşınma mekanizmalarının hepsinde korozyon farklı oranlarda etki etmektedir [15], [27].

Tablo 3.1 Korozyon çeşitleri [15], [27]

Genel Korozyon Çeşitleri	Lokal Korozyonlar Çeşitleri	Metalurjik Etkili Korozyonlar Çeşitleri
Atmosferik korozyon Çatlak akımlı korozyonlar Genel biyolojik korozyon Tuz Korozyon Galvanik korozyonlar Sıvı metallerde korozyon Oksidasyon Sülfidasyon	Lokal biyolojik korozyon Çatlak korozyon Pitting(çukurcuk kalkması)	Ara granül korozyon

Tablo 3.1 Kozyon çeşitleri (devamı) [15], [27]

Genel Korozyon Çeşitleri	Lokal Korozyonlar Çeşitleri	Metalurjik Etkili Korozyonlar Çeşitleri
Yüksek sıcaklık korozyonu Karbürizasyon Diğer formlar		
Mekanik destekli bozulma	Ortam tarafından teşvik edilen çatlaklar	
Erozyon korozyon Fretting korozyon(sürtünme oksidasyonu) Korozyon yorulma Kavitasyon	Katı metal destekli geçekleşme Gerilme ve korozyon çatlağı Sıvı metal yarığı Hidrojen bozulması	

Korozyon metal ile metal alaşımlarının bulunduğu ortam ile elektrokimyasal ve kimyasal etkileşimiyle bozulması ile malzemenin karakteristik özelliklerini kaybederek kullanılmaz hale gelmesidir [29], [30]. Bu süreçte, metal veya alaşım yüzeyinde oluşan kimyasal reaksiyonlar genellikle oksidasyon veya redüksiyon reaksiyonlarıdır [29], [30]. Korozyon metal özellik gösteren malzemelerin zarar görmesine yol açan doğal bir süreçtir [29], [30]. Özellikle su ve havadaki nem gibi çevresel faktörler korozyon sürecini hızlandırabilir [29], [30]. Korozyonun sonucunda, metal veya alaşımın yüzeyinde pas, leke veya çatlaklar oluşabilir [29], [30]. Bu, malzemenin özelliklerini bozabilir ve kullanılamaz hale getirebilir [29], [30]. Özellikle yapısal veya işlevsel öneme sahip parçalar için korozyon mühim bir problem olabilir, çünkü bu parçaların güvenliği ve performansı korozyonun etkilerine bağlı olabilir [29], [30]. Bu nedenle, malzemelerin korozyona karşı korunması ve uygun bakımın yapılması önemlidir [29], [30].

Metaller içinde bulandıkları ortama göre korozyona maruz kalırlar. Başlıca korozyon çeşitleri aşağıda sunulmuştur [30]:

- Üniform korozyonu
- Galvanik korozyonu
- Çatlak korozyonu
- Filiform korozyonu
- Çukur korozyon
- Taneler arası korozyonu
- Seçimli korozyonu
- Erozyonlu korozyon
- Aşınmalı korozyonu
- Stres korozyon
- Yorulmalı korozyon
- Hidrojen kırılabilirliği
- Mikro biyolojik korozyon
- Yüksek sıcaklık korozyonu

4.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarında Korozyon

Alüminyum ve alüminyum alaşımı genellikle korozyona karşı oldukça dirençlidir [31], [32]. Bu direnç, alüminyum yüzeyinde doğal oluşan bir pasif oksit tabakası sayesinde sağlanır [31], [32]. Bu pasif oksit tabakası, alüminyum yüzeyinde kendiliğinden oluşur ve metalin çevresiyle tepkime oluşturarak bir koruyucu yüzey meydana getirir [31], [32].

Bu pasif oksit tabakası, alüminyum yüzeyine iyi yapışır ve gözeneksizdir, yani su ve diğer korozyon etkenlerinin metal yüzeyine nüfuz etmesini engeller [31], [32]. Bu sayede, alüminyum ve alaşımları atmosfer ortamda genellikle korozyona karşı yüksek dayanıma sahip olurlar [31], [32]. Ancak, bazı özel koşullar altında, tuzlu su veya agresif kimyasalların bulunduğu ortamlarda alüminyum ve alaşımları korozyona uğrar [31], [32]. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında en yaygın rastlanılan korozyon çeşidi müteakip maddelerde açıklanacaktır [31], [32].

4.2 Alüminyum Alaşımlarında En Sık Görülen Korozyon Türleri

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında en çok gözlemlenen korozyon türleri müteakip maddelerde sunulmuştur.

4.2.1 Üniform Korozyon

En sık rastlanan korozyon türüdür [29], [30]. Metal yüzeyde bulunan her noktada aynı hızla yayılarak yürümekte olup metal kalınlığı her yerde aynı oranda düşmektedir [29], [30]. Bu korozyon türünün tespit edilmesi ve gözlemlenmesi kolaydır [29], [30].

4.2.2 Galvanik Korozyon

Bu korozyon çeşidi, iki ayrı metal veya alaşımın birbirine elektriksel şekilde bağlı olduğu ve aynı korozif ortamda bulunduğu durumlarda ortaya çıkar [29], [30]. Elektronegatifliği fazla olan anot daha soy olanı katot görevi görür [29], [30]. Ortam iletkenliği arttıkça korozyon artmaktadır [29], [30].

4.2.3 Aralık Korozyonu

Birbiri ile temas halinde olmayan ancak birbiri üzerinde bulunan iki yüzey arasında gerçekleşen korozyon türüdür [29], [30]. Korozyonun gerçekleşebilmesi için yüzeyler arasındaki söz konusu açıklığın ortam çözeltisini iç bölgelere dahil

edebilecek kadar geniş ancak sıvı akışına da müsaade etmeyecek kadar dar olması gerekmektedir [29], [30]. Çözelti bu arada sabit tutunarak oksijen geçişini engelleyerek bu bölgeler anot gibi davranırken diğer bölgeler katot gibi davranır [29], [30].

4.2.4 Çukurlanma Korozyonu

Bölgesel bir korozyon tipi olup korozyona maruz kalmış metal ile film ara yüzeyindeki kusurlu alanda meydana gelir [29], [30]. En tehlikeli korozyon türü olup çok az oranda malzeme kaybı yaşanmasına rağmen malzeme ve ekipman devre dışı kalabilir [29], [30]. Çukurlar korozyon ürünleri tarafından dolu olduğundan tespit edilmesi oldukça zordur [29], [30]. Çukurdaki dar bölge anot geniş olan bölge katot görevi görür [29], [30].

4.2.5 Taneler Arası Korozyon

Metaller eriyerek soğuduktan sonra birbirine yapışık çok miktarda küçük kristal gruplar halinde katılaşır [29], [30]. Bu gruplara tane adı verilir. Fazla miktarda tanelerden oluşan bu yapı tane sınırlarıyla birbirinden ayrılmıştır [29], [30]. Bu tane sınırları arasındaki dar olan boşlukta yada bölgede kristal yapı düzensiz durumdadır buda korozyona yol açmaktadır [29], [30]. Bu korozyon tane sınırındaki elektrokimyasal potansiyel farktan kaynaklanmaktadır [29], [30].

Sisteme etki eden deney parametrelerinin sayısı arttıkça deney sayısı hızla artar. Bu durumda, deneylerin maliyeti artar ve uygulanması zorlaşır [33], [34], [35]. Taguchi yöntemi, deney parametrelerinin etkilerini azaltarak daha az deney yapılmasını sağlayan bir tasarım yaklaşımıdır [33], [34], [35]. Bu yöntem, sistemin performansını iyileştirmek veya istenen hedeflere ulaşmak için deneylerin planlanması, uygulanması ve analiz edilmesi sürecini optimize eder [33], [34], [35]. Faktörlerin kombinasyonlarını incelemek için klasik tekniklere göre daha az deney yapılmasını sağlar [33], [34], [35]. Bu, maliyeti düşürür ve zamanı azaltır [33], [34], [35]. Ayrıca, az sayıda deney yapılmasına rağmen, geniş bir faktör kombinasyonunu kapsayan bilgi elde etmek mümkündür [33], [34], [35]. Deney sonuçlarının çözümlenmesi ve yorumlanması için istatistiksel tekniklerin kullanımını içerir [33], [34], [35]. Bu sayede, sistemin performansını iyileştirmek için hangi faktörlerin önemli olduğu belirlenebilir ve süreçteki değişkenlerin etkisi daha iyi anlaşılabilir [33], [34], [35]. Özetlemek gerekirse az sayıda deneyle sistemin iyileştirilmesini sağlayarak maliyeti ve zamanı düşürürken, istenen sonuçlara daha çabuk ve etkili şekilde ulaşmayı mümkün kılar [33], [34], [35].

Taguchi yönteminde parametre sistemlerini incelemek için özel olarak tasarlanan ortogonal dizilerden yararlanılır [33], [34], [35]. Ortogonal diziler, değişken sayılarına ve sonuçlarına göre kullanılan kontrol faktörlerinin en elverişli değerlerini saptamak maksadıyla kullanılır [33], [34], [35]. Bu diziler deney sayısının azaltılmasında önemli görev üstlenirler [33], [34], [35].

Taguchi metodolojisinde, deney sonuçlarını değerlendirmek maksadıyla S/N oranı kullanılır [35]. Proses değerlerinin her bir seviyesi için S/N analizi ve S/N oranı kullanarak değerler elde edilir [35]. Deneydeki farklı faktörlerin ve etkileşimlerinin istatistiksel olarak anlamlılığını değerlendirmek maksadıyla ANOVA (Analysis of Variance) kullanılır [35].

5.1 Ortogonal Diziler

Birden fazla unsurun aynı anda incelendiği metot olan ortogonal diziler metodunda, bu sonuçlar belirli bir ortogonal dizi ile değişir. Böylece çalışan sona erdiğinde değişkenlerin etkisi değerleri ile mukayese edilir. Taguchi metodu maliyetten tasarruf sağlarken aynı zamanda da üretim toleransları seçimini daha verimli hale getirir [33], [36], [37]. Deneysel çalışmada sıklıkla L4,L8,L9,L16,L18 ve L27 dizileri kullanılır [8].

Tablo 5.1 Tablo L8 ortogonal dizisi [36], [38]

Deney Numarası	Kolonlar						
	A/1	B/2	C/3	D/4	E/5	F/6	G/7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Ortogonal dizinin seçilebilmesi için serbestlik derecesinin bilinmesi gerekmektedir.

5.2 Sinyal/Gürültü Oranı

Taguchi metodunda sonuçların incelenmesinde ve performansın karakteristiği olarak Sinyal/Gürültü oranı (S/N) kullanılır [34], [36]. S/N oranı standart sapmanın minimum olduğu değişken seviyesi kombinasyonunu verir [34], [36].

S/N oranının 3 adet hesaplaması mevcuttur:

- Performans karakteristiğinin en düşük-en iyi olduğu durum [8].

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.1)$$

- Performans karakteristiğinin en yüksek-en iyi olduğu durum [8].

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2)$$

- Performans karakteristiğinin nominal-en iyi olduğu durum [8].

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^{-2}}{s^2} \right) \quad (5.3)$$

5.3 Etkileşimin Belirlenmesi

Deney düzeneğinde etki eden bulunan değişkenler birbiriyle etkileşim içerisinde bulunurlar [8][39]. Etkileşim durumları AXB şeklinde gösterilir [8]. Deneylerde karşılıklı etkileşimin belirlenmesi için karşılıklı etkileşim sütununun ortogonal seri üzerine eklenmesi gerekmektedir [8].

5.4 Varyans Analizi

Deney sonuçlarının tesirlerini saptamak için varyans analizi (ANOVA) kullanılır [8], [34], [35]. Bu yöntem, hangi faktörlerin etkili olduğunu belirlemeye yardımcı olur ve test edilen öge gruplarının ortalamalarındaki farkları istatistiksel olarak değerlendirir [8], [34], [35]. ANOVA, belirli güven seviyelerinde deneysel hataları tahmin ederek ve gruplar arasındaki ortalama karelerin karşılaştırılmasıyla tüm ana etkilerin önemini ve etkileşimlerini denemeye yardımcı olur [8], [34], [35]. Bu hesaplamalar, karelerin toplamı, serbestlik derecesi ve karelerin ortalaması gibi kriterler kullanılarak yapılmalıdır [8], [34], [35]. Bu şekilde, ANOVA, sonuçlarının analizine ve sonuçlara tesir eden faktörlerin belirlenmesine olanak sağlar [8], [34], [35].

5.5 Hesaplamalar

5.5.1 Kareler Toplamı

A ve B faktörleri için AxB dikkate alınarak toplam varyans denklemi[8]:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_e \quad (5.4)$$

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.5)$$

T: Toplam sinyal/gürültü oranını(S/N) ifade etmektedir.

N: Deney sayısını ifade etmektedir.

y_i :Her bir deneyin S/N oranını ifade etmektedir.

Yukarıdaki ifadelere göre A faktörünün varyans denklemi[8]:

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.6)$$

ANOVA tablosunda bulunan hata varyasyon denklemi[8]:

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AXB} \quad (5.7)$$

5.5.2 Serbestlik Derecesi

ANOVA tablosunun oluşturulmasında gerekli bir nicelik olan serbestlik derecesinde toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşittir[8].

Toplam serbestlik derecesinin denklemi [8]:

$$v_T = N - 1 \quad (5.8)$$

A ve B faktörlerinin serbestlik derecesini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır [8]:

$$v_A = K - 1 \text{ ve } v_B = K - 1 \quad (5.9)$$

İki faktörün serbestlik dereceleri çarpımına eşit olan etkileşim serbestlik derecesi denklemi aşağıda sunulmuştur [8]:

$$v_{AXB} = (v_A)(v_B) \quad (5.10)$$

Toplam serbestlik derecesinden faktörlerinin serbestlik derecelerinin çıkarılma işleminden sonra hata serbestlik derecesi hesaplanır [8]:

$$v_e = v_a - v_b - v_{AxB} \quad (5.11)$$

5.5.3 Varyans

Değişkenlerin analizi ANOVA tablosunda hesaplanırken gerekli bir etken olan hata varyansının denklemi aşağıda sunulmuştur [8]:

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} \quad (5.12)$$

A ve B faktörlerine ait varyans formülü [8]:

$$V_A = \frac{SS_A}{v_A} \text{ ve } V_B = \frac{SS_B}{v_B} \quad (5.13)$$

5.5.4 F Testi

Kalite özelliğine önemli bir tesiri olan ANOVA tablosunda tasarım parametrelerini istatistiksel olarak belirlemek için Fisher'ın adını taşıyan F yönteminden yararlanılır [8].

A faktörüne ait F testi denklemi [8]:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (5.14)$$

ANOVA tablosunda bulunan niceliklerle hesaplanan F testi değeri, tablodaki F(F tablo) değeriyle mukayese edilerek analiz edilir ve iki analiz yöntemi vardır [8]:

- Eğer hesaplanan F test değeri, tabloda bulunan F (F tablo) değerinden büyük olduğunda, faktörün ürünün prosesinde ve ürüne tesiri olduğu kanısına varılır.
- Eğer hesaplanan F test değeri, tabloda bulunan F (F tablo) değerinden küçük olduğu durumda, faktörün ürünün prosesinde ve ürün üzerinde tesire haiz olmadığı kanısına varılır.

5.5.5 Toplam Değişime Etki Eden Faktörlerin Yüzdesi

Faktörlerin değişime olan etkisi aşağıdaki denklem kullanılarak bulunur ve böylece faktörlerin etkinlik yüzdesi elde edilmiş olur [8]:

$$(A \text{ Faktörü İçin}) \quad SS'_A = SS_A - [(V_e)(V_A)] \quad (5.15)$$

$$(A \text{ Faktörü İçin}) \quad P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (5.16)$$

5.5.6 Doğrulama Testleri

Doğrulama deneylerinin son adımı olan Taguchi yaklaşımında, optimum koşullarla yapılan doğrulama deneylerinde elde edilen kalite karakteristik değeri, hesaplanan güven aralığında mı yoksa haricinde mi olduğuna bakılır [34]. Eğer değer hesaplanan güven aralığında ise, deney doğru kabul edilir; ancak eğer değer güven aralığının dışında ise, deneysel tasarımda hata olduğunu gösterir [34]. Bu durumda, deney yeniden gözden geçirilerek hatanın belirlenmesi ve düzeltilmesi gerekir [34]. Deneye tesir eden parametrelerin orta düzey seviyesinden faydalanarak bulunan S/N aşağıdaki şekilde hesaplanır [34]:

$$\hat{\eta} = \eta_{mean} + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_{mean}) \quad (5.17)$$

$\bar{\eta}_i$: optimal seviyeden faydalanarak bulunan S/N oranı

η_{mean} : Toplam S/N oranının ortalaması

k : kalite karakteristiğine etki eden ana tasarım parametrelerinin sayısı

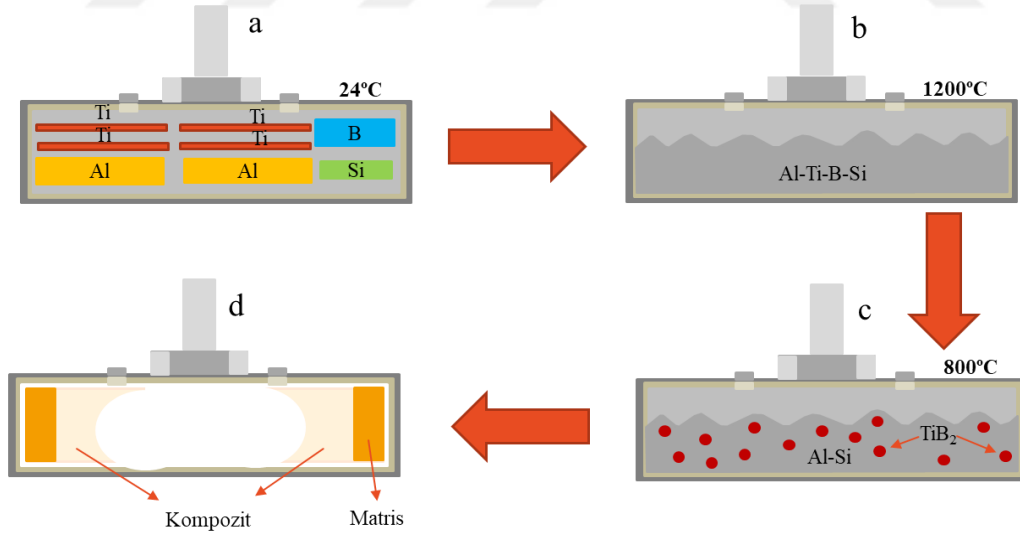
6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

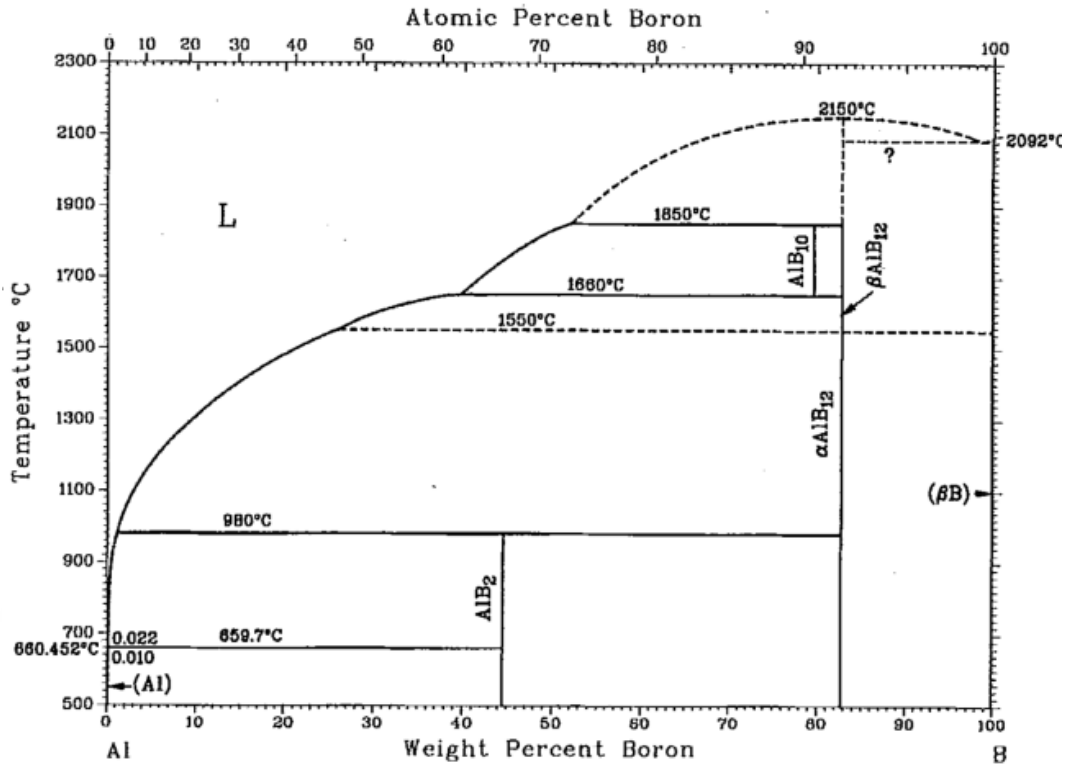
6.1 Mastır Kompozit ve Alaşımların Oluşturulması

Kompozit malzemelerin üretim aşamalarında Al-Ti-B-Si çözeltisi oluşturmak için, birinci aşamada hazırlanan Al-%10Ti, Bor verici olarak Al-3B master alaşımı ve Etial 161 alüminyum alaşımı Şekil 6.1'de temsili olarak üretim şeması sunulmuştur.

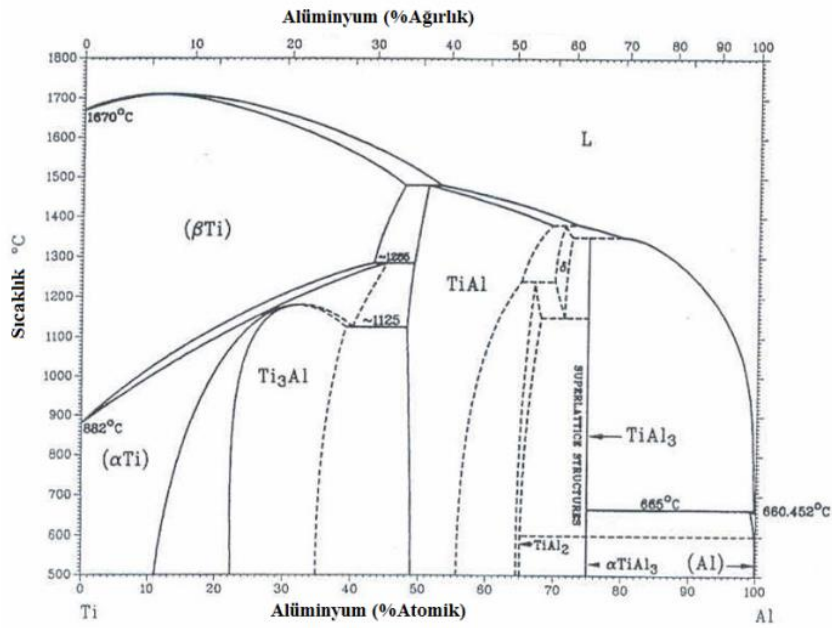
Belirli ölçülerde kesilen alaşımlar şekil 6.1 de gözlemlendiği üzere çelik pota içerisine konulmuştur. Pota ile birlikte elektrik ertitme fırını içerisine konularak Al-Ti-B-Si alaşımı elde etmek için 1200 °C'de ertitme işlemine alınmıştır. Şekil 6.2'de [4] Al-B faz diyagramı ve Şekil 6.3'de [5] Al-Ti faz diyagramları gözlemlenmiştir. Faz diyagramlarında bor çözünürlüğünün çok düşük olduğu görölmektedir. Alüminyum ancak 1200°C'de %1 oranında bor çözebilmektedir. Bu nedenle çalışmada Al-2Ti-1B-4Si oluşturacak şekilde bir çözelti oluşturulması hedeflenmiştir.



Şekil 6.1 Kompozitin üretim adımının şematik gösterimi



Şekil 6.2 Alüminyum-Bor faz diyagramı [40]



Şekil 6.3 Alüminyum-titanyum faz diyagramı [41]

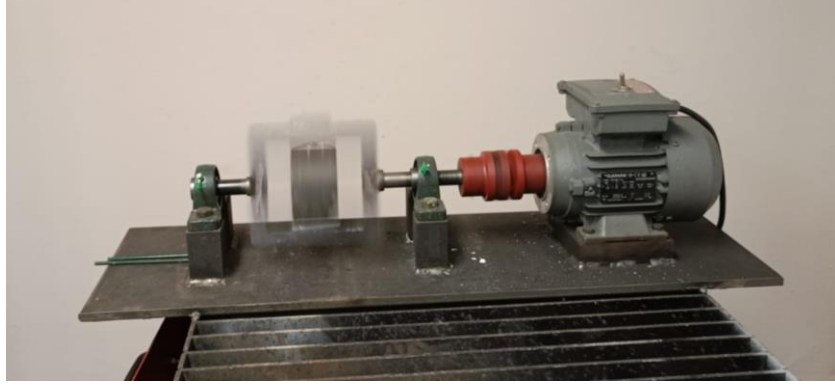
Ayrıca faz diyagramlarında alaşımların içerisinde AlB₂, AlB₁₂ ve Al₃Ti gibi intermetalik bileşiklerin yer aldığı görülmektedir. Bu intermetalik bileşiklerin çözünerek Al-B-Ti-Si çözeltisine dönüşebilmesi için 1200°C’de 2 saat beklenmiştir(Şekil 6.1 b).

TiB₂ partiküllerinin insuti tekniği ile alüminyum içerisinde sentezlenmesi amacı ile eriyik sıcaklığı fırın içerisinde 800°C'ye düşürülmüştür (şekil 6.1 c). Dönüşümün bitirilmesi için bu sıcaklıkta 2 saat beklenmiştir. Akabinde eriyik pota ile birlikte şekil 6.1-d de gözlemlendiği üzere savurma döküm makinasına alınmıştır. TiB₂ partiküllerinin fonksiyonel olarak derecelendirilmesi maksadıyla 1500 RPM dönme hızında katılaşmaya kadar savrulmuştur.



Şekil 6.4 Ergitme fırını

Deneylerde kullanılan çelik potanın ölçüleri 120x25x25 mm'dir. Ve çelik potanın alüminyumla tepkimeye girmesini önlemek maksadıyla potanın iç yüzeyi bor nitrür boya ile kaplanmıştır.

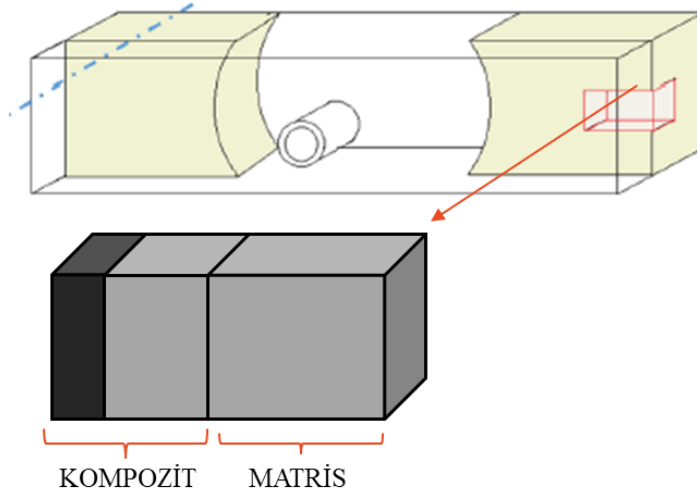


Şekil 6.5 Savurma işlemi

Savurma işlemi sona erdiğinde fonksiyonel derecelendirilmiş $TiB_2/Al-4Si$ olan kompozit malzeme meydana getirilmiştir. Oluşan kompozit kalıptan çıkarıldıktan sonra kompozit malzemeden elektrikli testere ve demir testeresiyle numuneler alınmıştır. Akabinde alınan numuneler yoğunluk, X-Ray Diffraction (XRD) testi, sertlik, Scanning Electron Mikroskop incelemesi (SEM), optik mikroskop, aşınma testleri ve korozyon testi için kullanılmıştır.

6.2 Mikroyapı İncelemesi

Savurma işlemi sonrasında elde edilen kompozitlerin özelliklerini incelemek ve TiB_2 parçacıklarının savurma yönünde savrulup savrulmadığını gözlemlemek için Şekil 6.7 de görülen yerlerden numuneler alınmıştır. Şekil 6.9’de gösterildiği gibi alınan kompozit numuneler 1200 grid zımpara kademesine kadar zımparalanmanın akabinde hidroklorik asit (HCl) çözeltisiyle dağlanmıştır.



Şekil 6.6 Al-Si-TiB₂ kompozitinin temsili görüntüsü

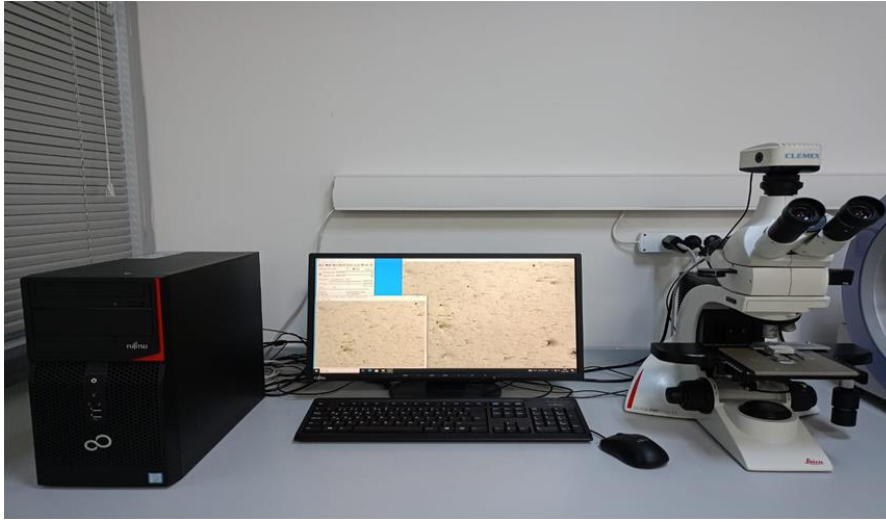


Şekil 6.7 Zımpara cihazı

Mikroskobik inceleme için test numuneleri zımpara cihazında sırası ile 120, 180, 300, 600, 800 ve 1200 gritlik SiC zımparalama işlemine tabi tutulmuş akabinde net bir görüntü yakalamak için 0.2µm'lik elmas pasta süspansiyonu ile 15 dk parlatılmıştır. Parlatılan numune örnekleri Şekil 6.8'de görüldüğü gibidir. Mikro analizi ve mikro yapı görüntüleri alınması için numuneler hazırlanmıştır. Clemex Vision görüntü analiz sistemi ile donatılmış bir Şekil 6.9'de görüldüğü gibi LEİCA DM 1750M optik mikroskop kullanılarak mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

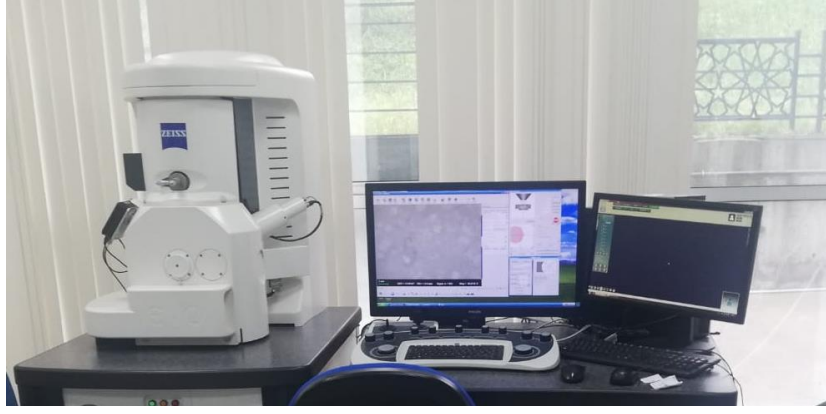


Şekil 6.8 Parlatılmış Numune Örnekleri



Şekil 6.9 Optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleri

Kompozitlerin içerdikleri fazları ve oranlarını belirlemek için alınan numunelerden D/MAX 2200/PC model X-ışını kırınım analizi (XRD) cihazından yararlanılarak testler yapılmıştır. Kompozitlerin taramalı (SEM) elektron mikroskobu sonuçları için JEOL JSM 6060 LV marka SEM cihazından yararlanılmıştır, bu görüntüler Şekil 6.10'de gösterilmiştir.



Şekil 6.10 JEOL JSM 6060 LV marka SEM cihazının görüntüsü

6.3 Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçüm deneyleri, Brinell sertlik ölçüm yöntemine göre 62,5 Kg'lık yük uygulanarak 2,5 mm çaplı çelik karbür bilyeyle malzemelerin sertlik sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 6.11 Sertlik ölçüm cihazı

6.4 Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluklarının belirlenmesi için şekilde gösterilen Arşimet düzeneği kullanılmıştır. Yoğunluk ölçüm deneyleri numunelerin kuru ve yaş ağırlıkları ölçülerek aşağıdaki eşitlikte de yer alan formül yardımıyla saptanmıştır.

Oluşturulan bu arşimed düzeneğinde yoğunluk 0,998 kg/mm³ değerinde saf sudan yararlanılmıştır.



Şekil 6.12 Yoğunluk ölçüm cihazı

$$d = \frac{m(kuru)}{m(kuru) - m(yavaş)} \quad (6.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte

d; yoğunluk, g/cm³, mkuru; Kuru Ağırlık, myaş; Yaş Ağırlık

6.5 Aşınma Deneyleri ve Taguchi Deney Reçetesi

Kompozitlerin aşınma özellikleri, Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle araştırılmıştır. Bu yöntem sayesinde, az sayıda deney ile kompozitlerin aşınma özellikleri daha güvenli ve tesirli şekilde belirlenmiştir. Aşınma testleri, git-gel (reciprocating) modunda Şekil 6.13'deki cihaz ile gerçekleştirilmiş olup, kuru kayma aşınma tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada, aşınma parametreleri olarak bölgesel değişim, uygulanan kuvvet ve kayma sürati faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Kuru kayma aşınma deneylerinin sonuçlarına göre aşınma oranları ve sürtünme katsayılarına ulaşılmıştır.



Şekil 6.13 Aşınma test cihazı

Aşınma deneyleri için, kompozitin iki farklı bölgesi için belirlenen değişkenlerle bir Taguchi deney planı oluşturulmuştur. Aşağıdaki Tablo 6.1 de gözlemlenmekte olan optimum parametrelerin tayin edilmesinde kullanılması için parametreler A,B,C,D olarak adlandırılmıştır. Aşınma deneylerinde numuneler deney evvelinde ve deney akabinde ağırlıkları 0,0001g hassasiyete haiz terazi ile ölçülecek ve aşınma değerleri bu ölçümlerin farkı alınarak belirlenmiştir.

Tablo 6.1 Deneysel çalışmaların seviyeleri

Parametreler	Kolon	Seviyeler	
		Seviye 1	Seviye 2
Bölge	A	Matris	Kompozit
Yük, N	B	2	6
Hız m/sn ²	C	20	60
Yol, m	D	100	200

Yukarıda tablo 6.1 de verilen faktör ve seviyelerin L8 ortogonal serisi için uygun olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmada aşağıda Tablo 6.2 de verilen L8 ortogonal serisi seçilmiştir.

Tablo 6.2 L8(2⁴) ortogonal seri

Deney Numarası	Kolonlar						
	A	B	AXB	D	5	6	E
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tablo 6.3 L8 Deney reçetesi

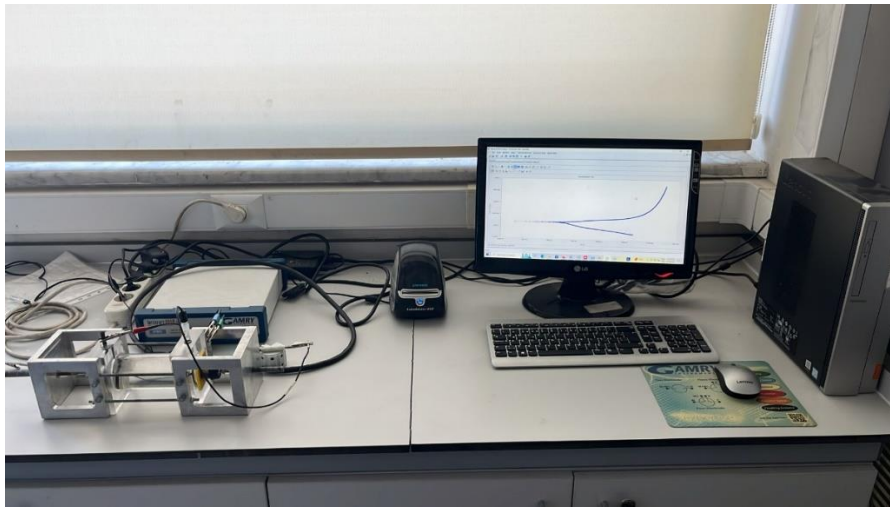
Deney No	Bölge-A	Yük-B	Hız-C	Yol-D
1	Matris	2	20	100
2	Matris	2	60	200
3	Matris	6	20	200
4	Matris	6	60	100
5	Kompozit	2	20	200
6	Kompozit	2	60	100
7	Kompozit	6	20	100
8	Kompozit	6	60	200

L8 Tablo 6.2 deki ortogonal serisine göre dizayn edilmiştir. L8 ortogonal serisine göre hazırlanan deney reçeteleri Tablo 6.3 de verilmiştir.

L8 ortogonal serisinden faydalanarak, 2 seviyeli 4 parametre için deneme sayısı 16'dan 8'e indirilmiştir. Aşınma direncini saptamak için her deneyin yenilenmesiyle elde edilen ağırlık kayıpları, kat edilen yola bölünerek hesaplanmıştır. Aşınma deneyi çalışmaları, Tablo 6.3'te verilen toplam 8 deney içeriği göz önüne alınarak, sistemsel ve çevresel hataları minimize etmek maksadıyla yapılmış ve hataların minimize edilmesi için her deney reçetesi en az üç kez tekrarlanmıştır.

6.6 Korozyon Deneyleri

Bu tezde, farklı katmanlardan alınan kompozit numunelere potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Bu testler için Gamry 1010E potansiyostat kullanılmıştır. Üç elektrot yöntemiyle yapılan testlerde, 0.1 M, 0.5 M ve 1 M olmak üzere konsantrasyona haiz NaCl çözeltileri kullanılmıştır. Korozyon testlerinde, %3,5'luk NaCl çözeltisinde üç elektrotlu bir düzenekte modellenmiş olup, üç elektrotlu deney mekanizmasında, referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot, karşıt elektrot olarak ise grafit elektrot seçilmiştir. Diğer test parametreleri arasında tarama hızı 1 mv/sn ve tarama aralığı -0.5V ile 0.5V olarak belirlenmiştir. Korozyon testi, mikro yapı görüntülerinde kullanılacak test numunesinin üzerinde uygulanmıştır.



Şekil 6.14 Korozyon test düzeneği

7

DENEY SONUÇLARI

7.1 Makro Yapı Analizi

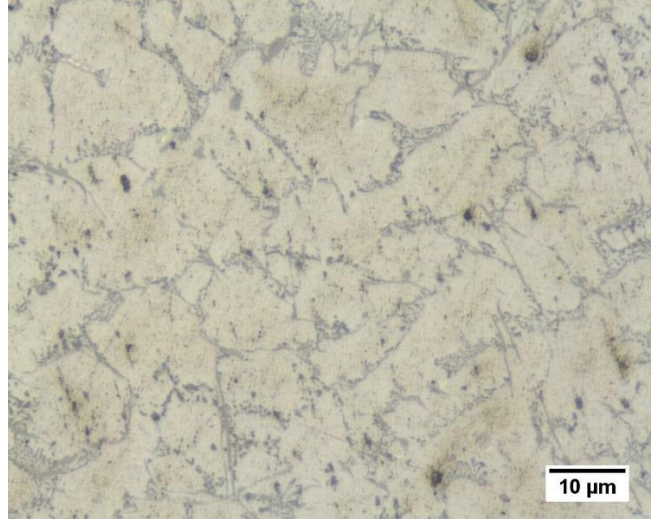
Mastır kompozit malzemeler çelik kalıba yerleştirildikten sonra savurma döküm yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş TiB₂ takviyeli Al-%4Si matrisli kompozit elde edilmiştir. Daha sonra savurmaya tabi tutularak TiB₂ partiküllerinin savurma yönünde birikmesi sağlanmıştır. Üretilen kompozit malzemeler savurma işleminden sonra kalıbı kesilerek çıkarılan parçadan, numuneler kesilmiştir. Üretilen kesit görüntüleri Şekil 7.1 de görülmektedir. Numuneler kesildikten sonra Savurma yönünde koyu kısım dışarda açık kısım içerde olacak şekilde farklı iki renkli bölgeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni sıvı Al-Si göre (Al-Si : $(2.68 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3)$) ağırlıkça fazla olan TiB₂ (TiB₂ : $(4.5 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3)$) partiküllerinin savurma kuvvetinin etkisiyle dışarıda toplanmasıdır.



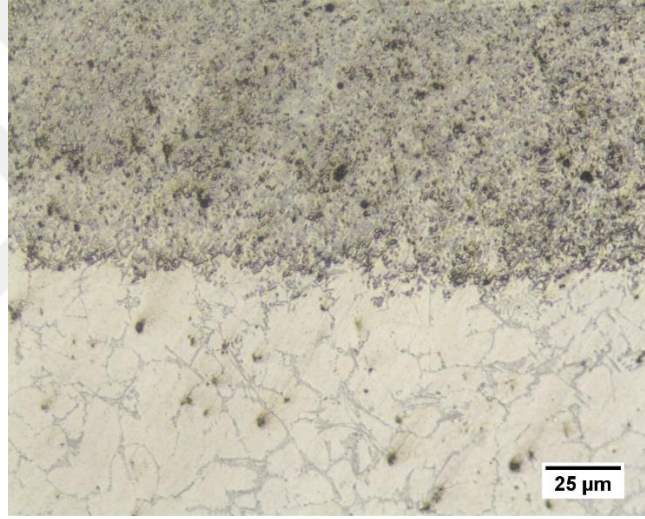
Şekil 7.1 Kesilen kompozit numunesi

7.2 Optik Mikroskop Görüntüleri

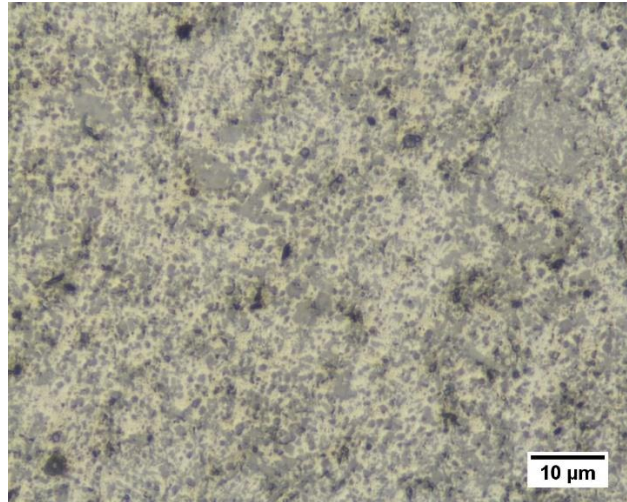
Üretilmiş olan numuneler 3 bölge olarak ayrılarak optik mikroskop görüntüleri incelenmiş ve Şekil 7.2 takviyeli bölge, Şekil 7.3 geçiş bölgesi ve Şekil 7.4 takviyesiz bölge resimleri elde edilmiştir.



Şekil 7.2 Takviyeli bölge mikro yapı görüntüsü



Şekil 7.3 Ara bölge mikro yapı görüntüsü



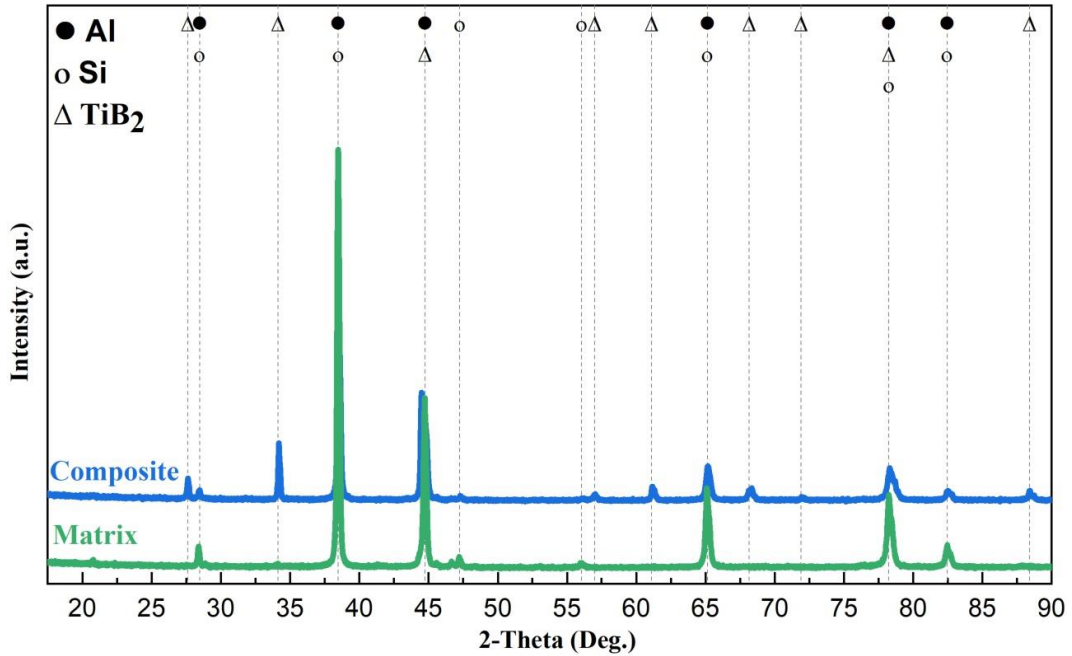
Şekil 7.4 Takviyesiz bölge mikro yapı görüntüsü

Resimler ayrıntılı gözlemlendiğinde Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 de TiB_2 'ce zengin bölgeler savurma kuvvetinin etkisiyle net olarak gözlenmiştir. Şekil 7.3 de ise TiB_2 'ce zengin bölge ile fakir bölgenin net olarak ayrıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 de ise beyaz olan bölgelerde Al-Si alaşımının olduğu TiB_2 'ce fakir bölge gözlemlenmiştir. Bu keskin ayrışmanın olası nedeninin, savurma kuvveti ile taşınan TiB_2 partiküllerinin kalıp dış zarına birikerek viskoziteyi arttırması ve TiB_2 yapılarının belirli alanda ve belirli bir oran yüzdesinde yoğunlaşmasına yol açmasından kaynaklanmıştır.

Yapılan mikroskobik incelemede TiB_2 'ce zengin bölgede partikül oranı %20 iken fakir bölgede bu oranın yok denecek kadar az olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.5'te XRD sonuçları verilmiştir.

7.3 XRD Analizi

Üretilen kompozit malzemede net olarak ayrıştığı görünen bu açık ve koyu renkli alanlarda hangi fazların meydana geldiğini belirlemek amacıyla bu bölgelere XRD (X Işını Kırınım) analizleri yapılmıştır.



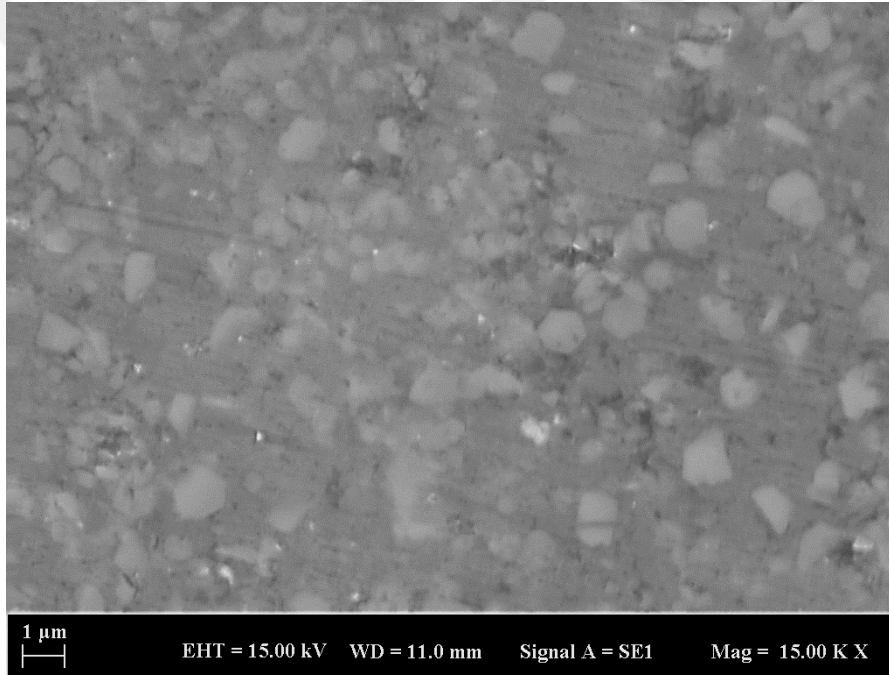
Şekil 7.5 Numunelerden alınan XRD sonuçları, mavi TiB_2 'ce zengin bölge, yeşil TiB_2 'ce fakir bölge

Şekil 7.5'de gösterilen XRD sonuçları incelendiğinde mavi grafikte TiB_2 'ce zengin olan bölgenin XRD sonucu verilmiş olup TiB_2 ve Al-Si fazının pikleri

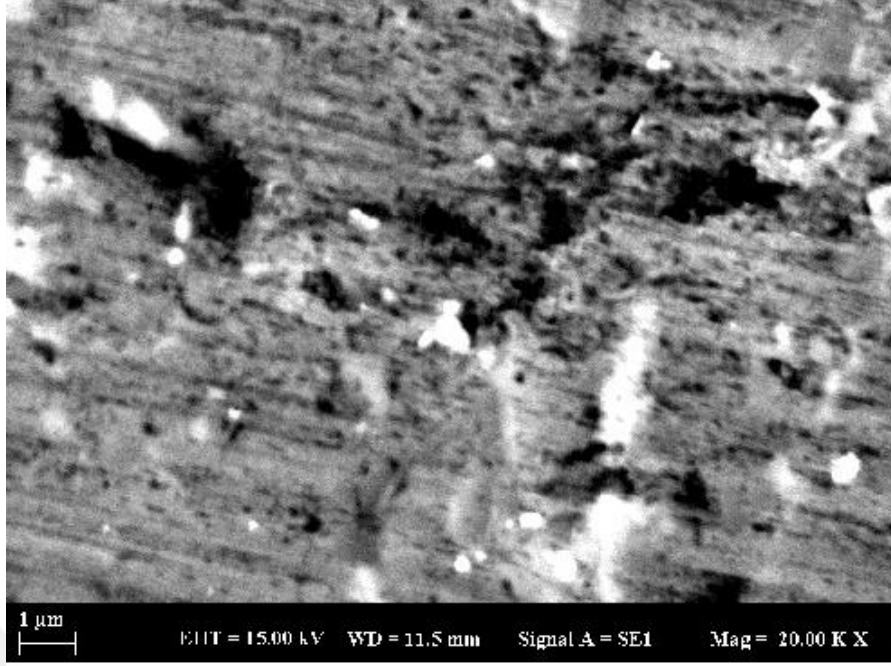
gözlenmiştir. Yeşil grafik olan TiB_2 ce fakir olan bölgede Al-Si fazının pikleri ve bu bölgede sadece Al-Si fazının olduğu gözlemlenmiştir. Savurma işlemi, sırasında TiB_2 partiküllerinin dış kenara doğru sürüklenerek kalıp dış kenarında 0,8 cm kalınlığındaki bölgede bir tabaka oluşturduğu gözlemlenmiştir.

7.4 SEM Görüntü Analizi

TiB_2 parçacıkları SEM görüntüleri Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’da verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde TiB_2 parçacıklarının temiz bir yüzey görüntüsüne sahip olup küresele yakın oval bir şekil yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekillerde TiB_2 ’ce zengin bölge numunesinin %20 HCL ile yakıldıktan sonraki partikül sem görüntüleri gösterilmiştir.

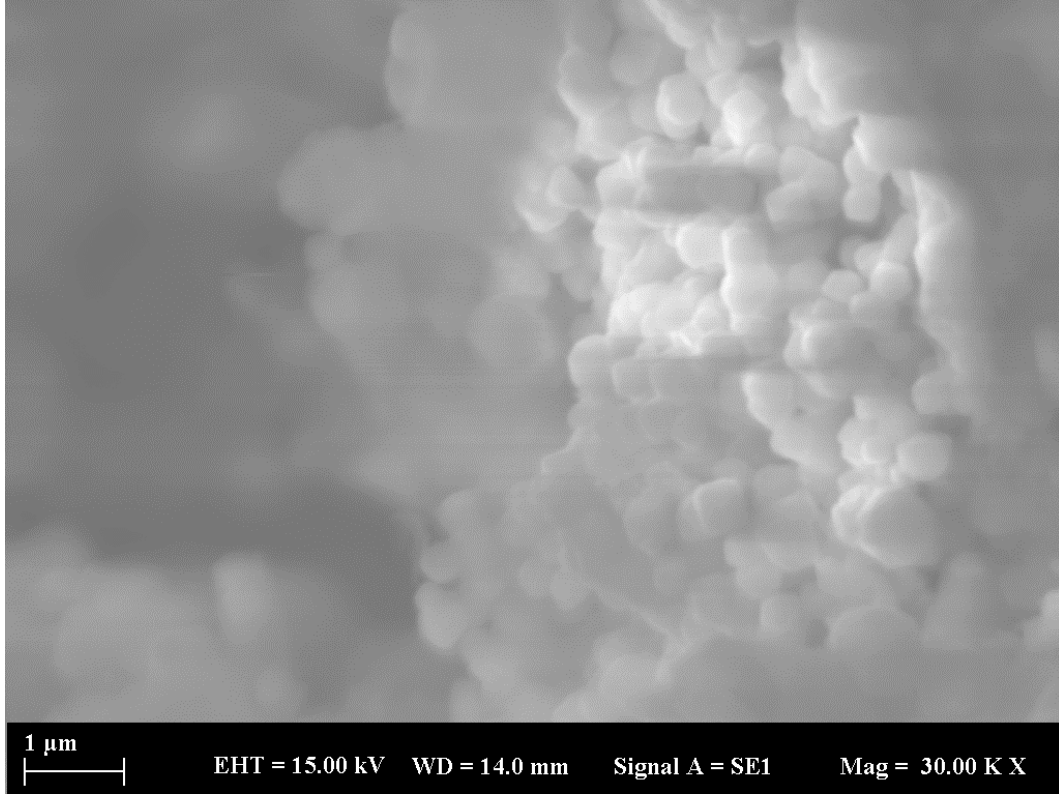


Şekil 7.6 Kompozitin zengin bölge görüntüsü-1



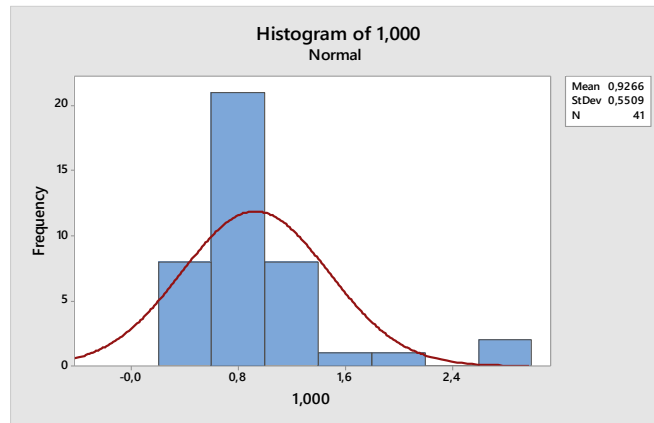
Şekil 7.7 Kompozit SEM görüntüsü fakir bölge-2

Şekil 7.6'de zengin bölgelere ait ve Şekil 7.7'de fakir bölgeye ait ve 15000 kx büyütme oranına sahip SEM görüntüleri yer almaktadır. Zengin olan bölge içerisindeki matris içinde homojen olarak dağılmış olan küresel formda beyaz renkli TiB2 partikülleri koyu renkteki alüminyum içerisinde göze çarparken fakir bölge içerisinde ise TiB2 partiküllerinin yer almadığı görülmüştür.



Şekil 7.8 Kompozit SEM görüntüsü asitle yakıldıktan sonra

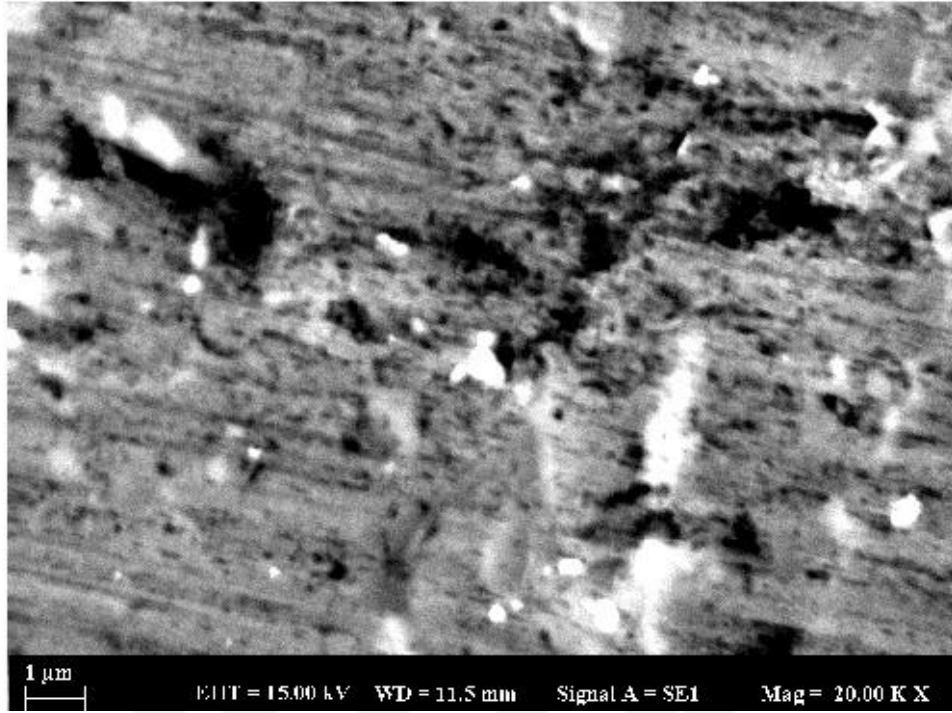
Zengin bölgeden alınan numunenin 30 dk boyunca %20 HCl çözeltisinde dağlanan görüntüsü Şekil 7.8 görülmektedir. Dağlama işlemiyle alüminyumun tamamı HCl çözeltisi tarafından çözündüğü ancak TiB_2 partiküllerini ise çözünüp dejenerasyona uğramadığı görülmektedir. Yapılan incelemede partiküllerin şeklinin eş merkezli olduğu görülmektedir.



Şekil 7.9 Partikül dağılımları grafiği

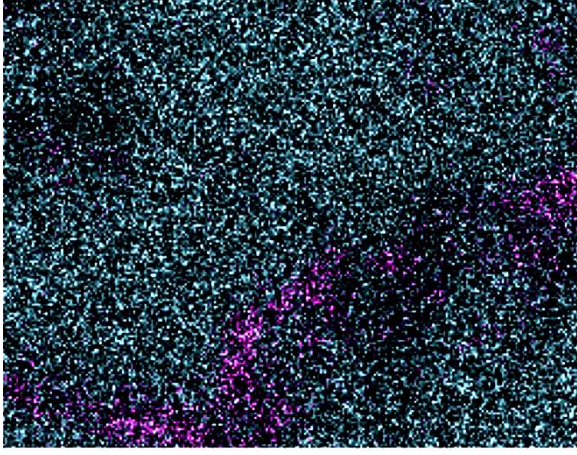
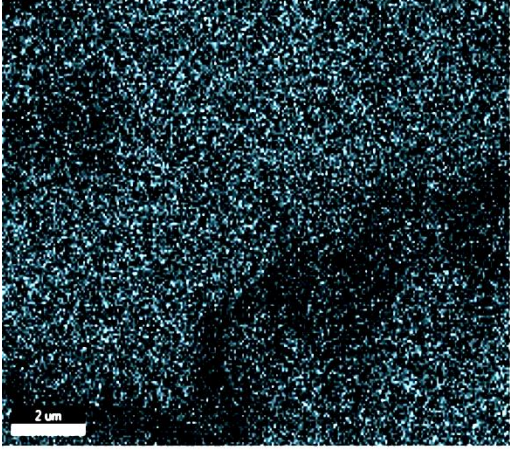
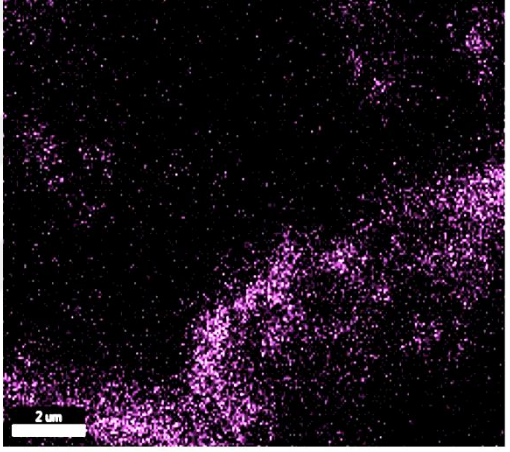
Şekil 7.9 da partiküllerin boyut dağılım grafiği verilmiştir. Partiküllerin ortalama boyutunun 0.9266 μm , standart sapmasının ise 0,5509 değerinde olduğu tespit edilmiştir. Partiküllerin %20 ortalama değerinde olduğu dikkat çekmektedir.

7.4.1 TiB₂'ce Fakir Bölgesinin EDAX Analizi



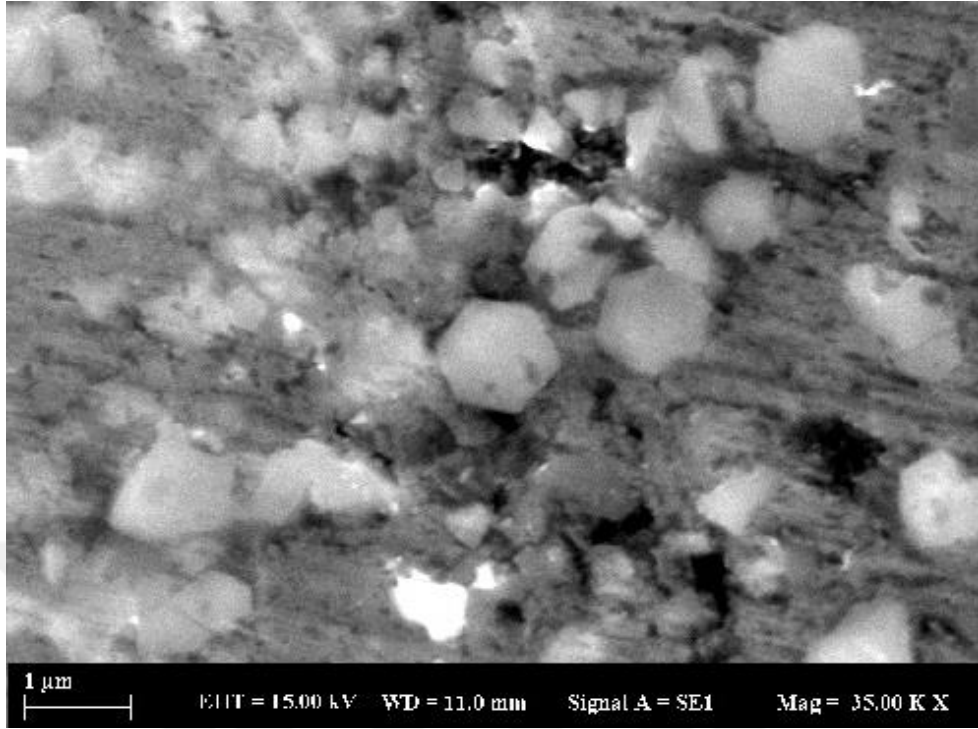
Şekil 7.10 TiB₂'ce fakir bölgesinin sem görüntüsü

Şekil 7.10'da Alüminyum-silisyum matrisli kompozitin TiB₂'ce fakir bölgesinin sem görüntüsü görülmektedir. Görüntünün element haritası Şekil 7.11'de verilmiştir. Resimlerde yoğun bir şekilde alüminyum ve kısmen silisyum elementi gözlemlenmektedir. Bu bölgede titanyum ve bor elementleri saptanmamıştır.

 Al-Si	
Şekil 7.11 Al-Si matrisi içerisindeki Al ve Cu'nun dağılımı	
 Al	 Si
Şekil 7.11(a) Matris kısım içerisinde Al kısmın dağılımı	Şekil 7.11(b) Matris kısım içerisinde Si kısmın dağılımı

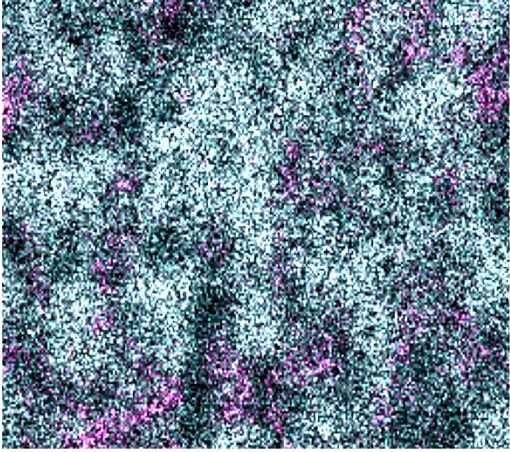
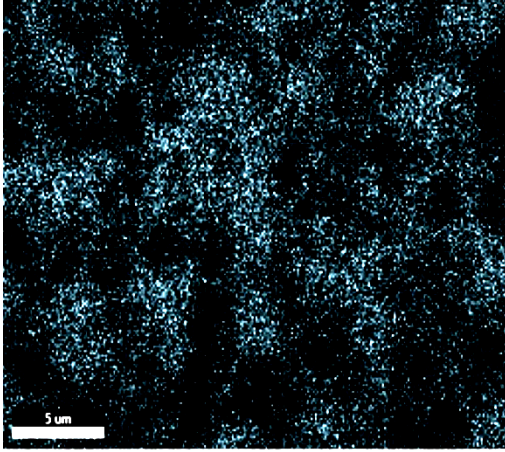
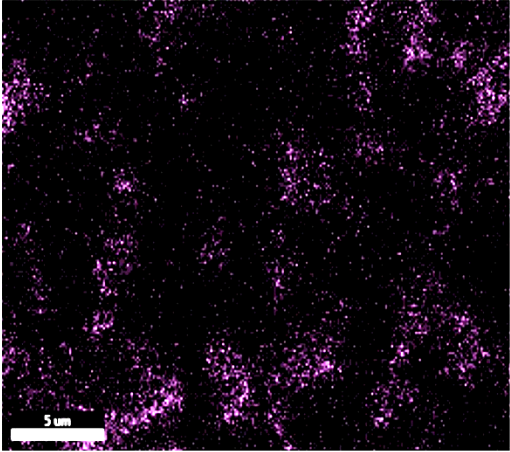
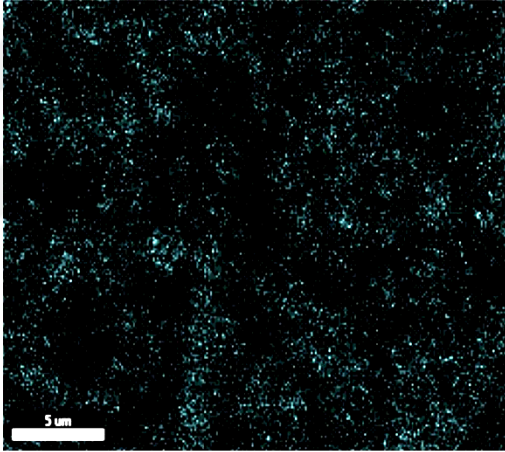
TiB₂ açısından fakir bölgeye ait Şekil 7.11'de SEM görüntüsüne bakıldığında, matris yüzeyinde mavi renkte alüminyum elementleri ve kırmızı renkte silisyum elementleri görülmektedir. Silisyumun belirli alanlarda bir hat boyunca yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Alüminyum elementinin, silisyumun yoğun olduğu bölgelerde daha seyrek dağıldığı, diğer bölgelerde ise homojen ve yoğun bir dağılım gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu sonuca göre, silisyumun alüminyum çözeltisi içinde bulunmadığı ve alüminyum ile intermetalik bileşik yaratarak belirli alanlarda toplandığı belirlenmiştir.

7.4.2 TiB₂'ce Zengin Bölgesinin EDAX Analizi



Şekil 7.12 Al-Si- TiB₂ kompozitinin zengin kısmı SEM görüntüsü

Şekil 7.12' de zengin bölgeye ait element analiz haritası görülmektedir. Haritalarda mavi renkte alüminyum elementleri, kırmızı renkte silisyum ve açık mavi renkte ise titanyum elementleri görülmektedir. Titanyum elementlerinin Şekil 7.13 de görülen partiküllerin olduğu yerlerde titanyum elementinin yoğunlaştığı dikkati çekmektedir.

 Al-Si/TiB₂	 Al
Şekil 7.13 Al-Si-TiB₂ matrisinin zengin tarafının EDAX görüntüsü	Şekil 7.13(a) Al-Si-TiB₂ matrisinin zengin bölge içerisinde Al elementinin görüntüsü
 Si	 Ti
Şekil 7.13(b) Al-Si-TiB₂ matrisinin zengin bölge içerisinde Si elementinin görüntüsü	Şekil 7.13(c) Al-Si-TiB₂ matrisinin Zengin bölge içerisinde Ti elementinin görüntüsü

7.5 Yoğunluk Analizleri

TiB₂ takviyeli Al-%4Si kompozitinden ölçülerek hazırlanan yoğunluk değeri tablosu Tablo 7.1’de görülmektedir. Tabloda TiB₂’ce zengin olan bölgenin yoğunluğunun fakir olan bölgeye göre yüksek olduğu görülmektedir. Yoğunluğu 4,52 g/cm³ olan TiB₂ partiküllerinin yoğunluğu matris (2.68g/cm³) alaşımdan daha fazla olduğundan takviyeli bölge takviyesiz bölgeye kıyasla daha fazla

yoğunluk değerine sahiptir. Yoğunluk değerleri dikkate alındığında TiB_2 'ce zengin bölgelerin yoğunluk değerlerinin ağırlıkça %20 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.1 Yoğunluk Oranı

	Matris/Kompozit	TiB_2 Partikül Oranı	Yoğunluk (Birim)
$TiB_2/Al-Si$	Kompozit	%20	d=2.920
	Matris	%0	d=2.680

7.6 Sertlik Değerleri

Çalışmada numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik ölçüm yöntemine göre 62,5 Kg'lık yük uygulanarak 2,5 mm çaplı çelik karbür bilye kullanılarak yapılmıştır. Tabloda kompozitlerin zengin ve fakir bölgelerinden alınan sertlik değerleri görülmektedir. Tabloda takviyesiz bölgenin ortalama sertlik değerinin 51.8 Hb. Takviyeli bölgede ise 103.24 Hb. olduğu görülmektedir. Bu sonuç Al-Si matrise ağırlıkça %20 oranında TiB_2 ilavesinin sertlik değerini 2 kat arttırdığını göstermiştir.

Tablo 7.2 Numunelerden alınan sertlik ölçümleri ve sonuçların ortalama değeri

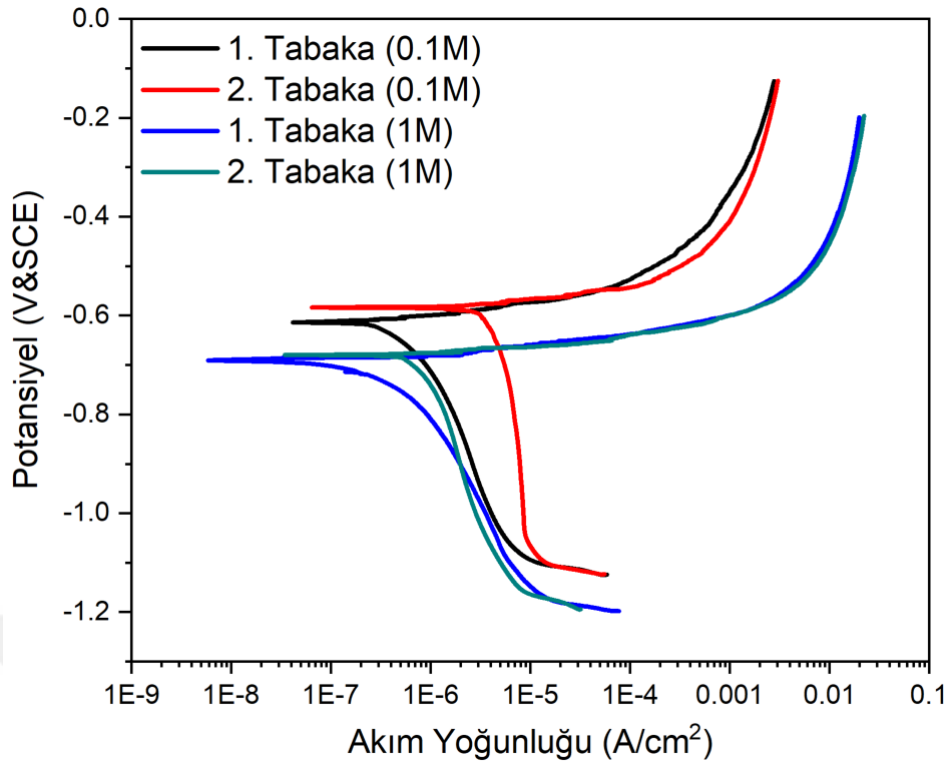
	TiB_2 Partikül Oranı	Kompozit/Matris	Sertlik Değeri 1	Sertlik Değeri 2	Sertlik Değeri 3	Sertlik Değeri 4	Sertlik Değeri 5	Ortalama HB
$TiB_2/Al-Si$	%15	Kompozit	98,4	102,2	110	104,2	101,4	103,24
	%0	Matris	50,5	45,7	55,9	53,2	53,7	51,8

Tablo 7.2 incelendiğinde matrise TiB_2 eklendiğinde sertliklerin arttığı görülmüştür.

7.7 Korozyon Değerleri

Şekil 7.14'de farklı konsantrasyonlara sahip çözeltilerde potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanan alüminyum metal matriksli kompozit malzemelere ait Tafel eğrileri verilmiştir. Tafel eğrilerinde çözelti konsantrasyonunun

değişmesi sonucu kaymaların olduğu görülmektedir. Tafel eğrilerinde oluşan kaymalar eğrilerin üzerinden elde edilen Tafel test parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Tablo 7.3'te verilen Tafel test parametrelerine göre çözelti konsantrasyonunun artması sonucu korozyon potansiyeli negatif yönde kaymaktadır. Literatüre göre düşük korozyon potansiyeli daha yüksek elektrokimyasal aktiviteye işaret etmektedir[42]. Bu sebeple korozyon potansiyelinde oluşan negatif yönde kayma kompozitin korozyon direncinde bir kötüleşmeye işaret etmektedir. Bu durumun NaCl konsantrasyonunun artması ile ortamın daha asidik bir hal alması sonucu ileri geldiği söylenebilir. 1 M NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen testlerde korozyon ortamının daha agresif bir yapıya sahip olması sebebiyle Tafel eğrilerinde aktif bölgeye yani korozyona uğrama potansiyelinin daha yüksek olduğu tarafa doğru kayma olmuştur. Öte yandan numunelerin alındığı tabakaların yerlerinin değişmesi ile korozyon potansiyellerinde büyük bir değişim olmadığı fakat TiB₂ takviye fazı içeren kompozit yapıdaki numunenin her iki farklı çözeltide gerçekleştirilen testlerde de daha pozitif çıktığı görülmektedir.



Şekil 7.14 Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımının (E_{cor} , I_{cor}) ölçülmesi

Tablo 7.3'te verilen akım yoğunluğu değerlerine göre çözelti konsantrasyonunda yapılan değişimin akım yoğunluğu üzerinde doğrusal bir etkiye neden olmadığı anlaşılmaktadır. Numunelerin alındığı bölgelerin ise akım yoğunluğu üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu ve kompozit karakterli bölgelerden alınan numunelerin akım yoğunluğu değerlerinin daha düşük çıktığı anlaşılmaktadır. Akım yoğunluğu değerleri korozyonun kinetik açıdan yorumlamasında kritik bir parametredir ve doğrudan korozyon hızı hakkında bilgi vermektedir. Tafel eğrilerinden elde edilen akım yoğunluğu değerinin düşük olması korozyon hızının daha düşük olacağını göstermektedir [42], [43]. Literatürde genel kanı alüminyum matrisli kompozit malzemelere takviye faz oranının artması ile korozyon direncinin kötüye gittiği yönündedir. Fakat bu durum sadece takviye faz oranına bağlı olmayıp takviye fazın çeşidi, üretim yöntemi, mikroyapı içerisindeki miktarı, dağılımı, geometrisi gibi pek çok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Öte yandan literatürde yapılan bazı çalışmalarda TiB_2 'nin yüksek korozyon direnci sebebiyle alüminyum matrisli kompozitlerde korozyon direncini artırmada etkili olduğu bildirilmiştir. Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise ilave edilen TiB_2 partikülleri sonucu kompozitin korozyon kanallarını boyunca

çatlak ilerlemesini engellediğinden, partiküller arası korozyonuna karşı direnci artırdığı bildirilmiştir. Fakat aynı çalışmada TiB₂/7075Al kompozitinin elektrokimyasal korozyon direnci, anot olarak davranan alüminyum matrisin yüzeyinde oluşan oksitin TiB₂ parçacıkları tarafından tahrip edilmesinden dolayı matrise göre yani alüminyuma göre düşük olduğu rapor edilmiştir. Chen ve arkadaşları korozyona karşı direnci daha yüksek olan TiB₂ içeriğinin artmasıyla kompozitin elektrokimyasal korozyon direncinin artacağını bildirmiştir. Alüminyum matrisli kompozitlerde korozyon direncini negatif yönde etkileyen diğer bir durum ise matris ve takviye fazı arasındaki galvanik etkidir. Takviye fazı ile matris fazı arasında oluşan galvanik uyumsuzluk genelde korozyon direncinin azalmasına neden olmaktadır. Fakat TiB₂ içeren alüminyum matrisli kompozitlerde bu etki oldukça daha düşüktür. Huo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise alüminyum matris ve seramik karakterli TiB₂ partikülleri arasında oluşan galvanik etkinin az olduğu bu sebeple matris içerisine ilave edilen TiB₂ takviye fazının korozyon direncini eser miktarda azaltacağı bildirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda genel kanı olarak takviye edilen TiB₂ fazının korozyon direnci üzerinde etkili olduğu fakat bu etkinin takviye fazın miktarı ile ilgili olacağı belirtilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen numunlerde TiB₂ takviye faz oranı %20 olarak tespit edilmiştir. Literatürde bu denli yüksek takviye faz oranına sahip bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Yüksek oranda TiB₂ takviye fazının bir sonucu olarak deneysel çalışmalar kapsamında üretilen kompozit numunlerinde korozyon direnci takviye edilmeyen matris alüminyuma göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Artan takviye oranı ile alüminyum matrisli kompozitlerde matrise göre korozyon direncinin arttığı çalışmaların literatürde olduğu görülmektedir [44].

Tablo 7.3 Tafel test parametreleri

Numune	Çözelti (NaCl)	Ekor (mV)	Ikor ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Ba (V/dec)	Bc (V/dec)	Cr (mpy)
1. Tabaka	0.1 M	-613.8	0.532	32	359.7	0.294
2. Tabaka	0.1 M	-584.9	3.643	29.8	650.1	2.013
1. Tabaka	1 M	-691.2	0.289	20.9	217.6	0.159
2. Tabaka	1 M	-680	-0.584	14.7	262.2	0.322

7.8 Deney Sonuçları

7.8.1 Aşınma Deneyi Sonuçları

Taguchi deney yöntemine göre, Al-%4Si matris tipinde, %0 ve %20 oranlarında TiB₂ partikül içeren bölgelerde 60m/s ve 20 m/s kayma hızlarında, 2N ve 6N yük tesiri sonucunda, 100m ve 200m kayma mesafelerinde uygulanan kuru kayma (reciprocating tekniği) Tablo 6.3 reçetesine bakılarak yapılan aşınma deneylerinin sonuçları aşağıda sunulmuştur. Deney sonrasında ve öncesinde hassas bir terazi kullanılarak numunelerin ağırlıkları ölçülmüş ve aşınma oranı, ölçülen ağırlıklar arasındaki farka göre hesaplanmıştır.

Tablo 7.4 Aşınma deney sonuçları

Deney Numarası	1. Ölçüm (mm ³ /m) 10 ⁻³	2. Ölçüm (mm ³ /m) 10 ⁻³	3. Ölçüm (mm ³ /m) 10 ⁻³	4. Ölçüm (mm ³ /m) 10 ⁻³	Ortalama (mm ³ /m) 10 ⁻³	SN (dB)
1	7,977	6,251	6,291	6,698	6,8040	43,2987
2	2,914	3,047	2,636	2,481	2,7700	51,12337
3	16,3	23,65	17,65	11,6	17,3000	34,97882
4	14,361	17	16,9	13,645	15,4770	36,16617
5	0,845	0,872	1,599	1,172	1,1220	58,69183
6	0,727	1,626	0,92	1,03	1,0760	58,96397
7	2,904	1,32	1,256	3,309	2,1970	52,45917
8	1,559	2,079	1,909	2,133	1,9200	54,27528

Yukarıdaki tabloya bakılarak en yüksek aşınma oranı 23,65 10⁻³mm³/m ile 3'üncü deney olurken, en düşük aşınma oranı 6'ncı deney 0,727 10⁻³mm³/m'dir. En yüksek ve en düşük aşınma oranlarına ait bilgiler Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 de aşağıda sunulmuştur.

Tablo 7.5 En yüksek ağırlık kaybı

Deney No.	Partikül Oranı	Matris Tipi	Kayma Hız Değeri	Uygulanan Yük Değeri	Kayma Mesafesi Değeri
3	%0	Al-Si	20 m/sn	6 N	200 m

Tablo 7.6 En düşük ağırlık kaybı

Deney No.	Partikül Oranı	Matris Tipi	Kayma Hızı Değeri	Uygulanan Yük Değeri	Kayma Mesafesi Değeri
6	%20	Al-Si-TiB ₂	60 m/sn	2 N	100 m

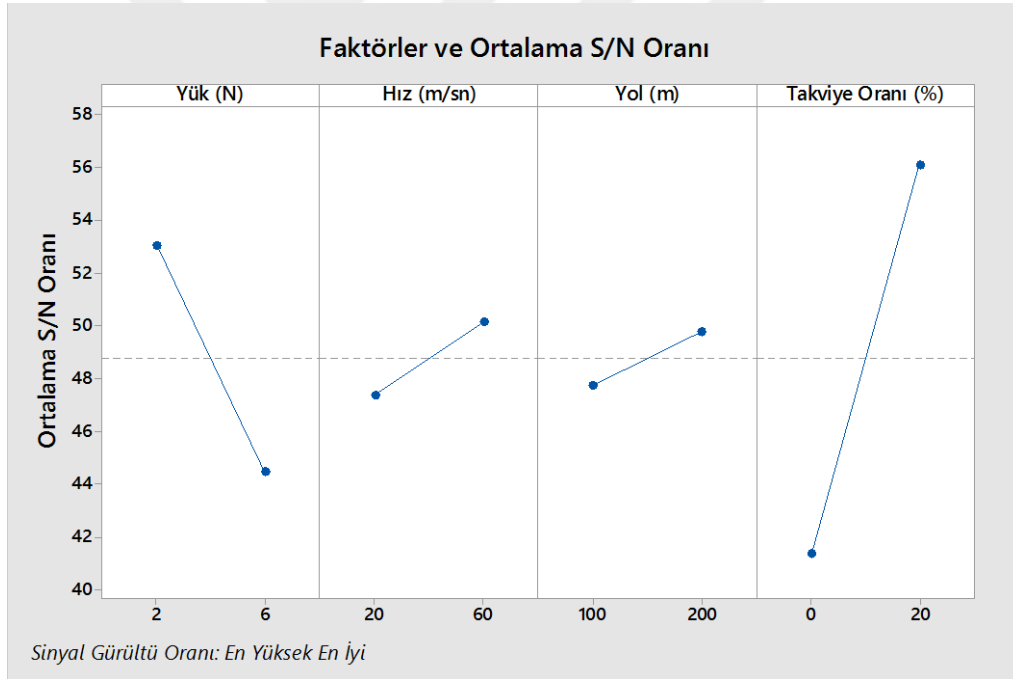
Tablo 7.7 ANOVA tablosu

ANOVA TABLOSU						
Değişim Kaynağı	Sutun	Serbetslik Derecesi Değeri	Kareler Toplamı Değeri	Kareler Ortalaması Değeri	F Değeri	P Değeri
Yük	1	146,192	146,192	146,192	15,49	0,029
Hız	1	15,402	15,402	15,402	1,63	0,291
Yol	1	8,367	8,367	8,367	0,89	0,416
Takviye oranı	1	432,521	432,521	432,521	45,82	0,007
Ölçüm hatası	3	28,318	28,318	9,439		
Toplam	7	630,800				

ANOVA tablolarının hazırlanmasında Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin aşınmaları üzerinde etkisi olduğu düşünülen TiB₂ kayma hızı, kayma mesafesi, uygulanan kuvvet ve takviye oranı parametreleri ele alınmıştır. Bu faktörlerin aşınma üzerindeki etkileri belirlemek için hazırlanan ANOVA tablosu, Taguchi yaklaşımına göre Tablo 7.7’de sunulmuştur. Bu ANOVA tablonun hazırlanmasında, (5.1)-(5.17) arasındaki denklemler kullanılmış ve kareler toplamı için (5.5)’deki denklem dikkate alınmıştır.

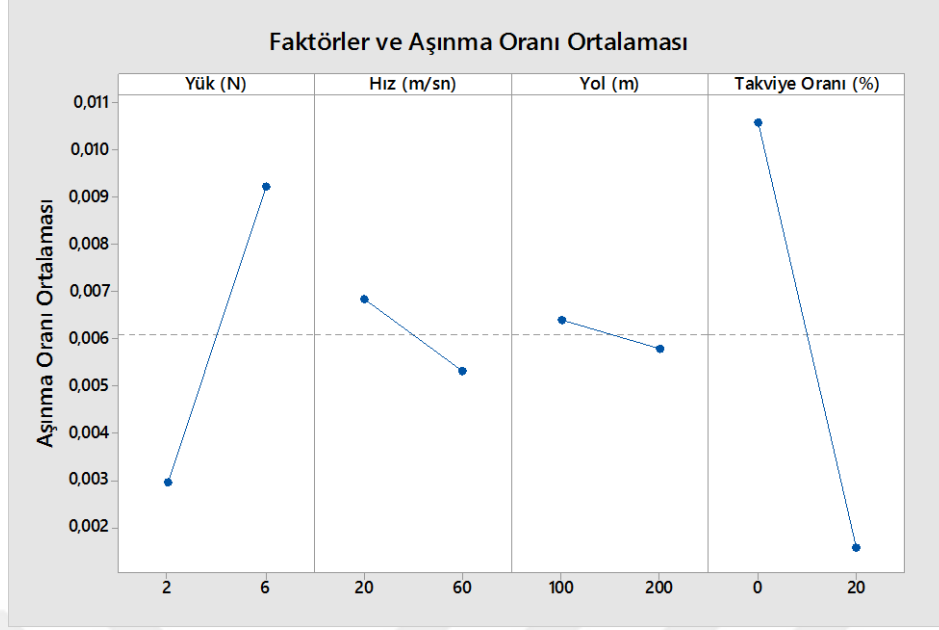
Denklem (5.13) kullanılarak (varyans) kareler ortalaması hesaplanmıştır. Denklem (5.14) kullanılarak F(hesap) değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan F değerinin tabloda görülen F değerinden büyük olduğu senaryoda o faktörün aşınma üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Altında yer aldığı senaryoda ise anlamlı tesire haiz olmadığını sergilemektedir. Bununla birlikte F(hesap) değeri arttıkça etkinlik değeri de doğru orantılı olarak artmaktadır.

Tablo 7.7’de S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış ANOVA tablosu verilmiştir. ANOVA tablosunda yük ve takviye oranı faktörlerinin etkili olduğu görülmektedir. Buna karşın hız ve yol faktörlerinin kompozitlerin aşınma oranları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Tabloda en etkili faktörün P değeri 0,07 olan takviye oranı iken onu sırası ile P değeri 0,029 olan yük faktörü izlemiştir. En az etkiye sahip faktörün ise 0,416 P değerine sahip olan yol faktörü olduğu görülmektedir.



Şekil 7.15 Faktörlere bağı hesaplanmış ortalama S/N oranları grafiğı

Şekil 7.15’de faktörlere bağı hesaplanarak bulunan ortalama S/N oranlarının grafiğı yer almaktadır. En yüksek S/N oranı değışimi yük ve takviye oranı faktörlerinde gözlemlenmektedir. Bölge faktörünün ardından fazla S/N oranına haiz faktör ise 53-44 dB değerine sahip olan malzemenin yol faktörüdür. Yük ve takviye oranı faktöründe şeyal gürlütü oranı 56 dB ile 41 dB aralığındadır.



Şekil 7.16 Faktörler ve aşınma direncinin değerleri ortalaması grafiği

Şekil 7.16 da aşınma oranlarının ortalamaları hazırlandığı faktör grafikleri görülmektedir. Şekilde etkili olan faktörlerin minimum ve maksimum değerleri arasındaki farkın daha yüksek olduğu görülmektedir. Etkisiz olan faktörlerde ise bu farkın daha düşük seviyelerde seyrettiği dikkati çekmektedir. Yük faktörü grafiğine bakıldığında artan yük ile birlikte aşınma oranının arttığı görülmektedir. 2 N yük altında ortalama aşınma oranı 0,03 seviyelerinde iken 6 N yük altında aşınma oranı 0,0094 seviyelerine çıkmıştır. Takviyesiz bölgelerde aşınma oranı ortalama 0,0105 iken takviyeli bölgede 0,001 değerine düşmüştür. Bu sonuç artan takviye oranı ile birlikte kompozitlerin aşınma oranını düşürdüğünü göstermektedir.

Bilgisayar programı yardımıyla farklı şartlarda aşınma deney sonuçları tahmin edilmesi amacı ile lineer regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu denklem yardımıyla farklı deney şartlarında aşındırılan malzemelerin aşınma oranları belirlenebilmektedir.

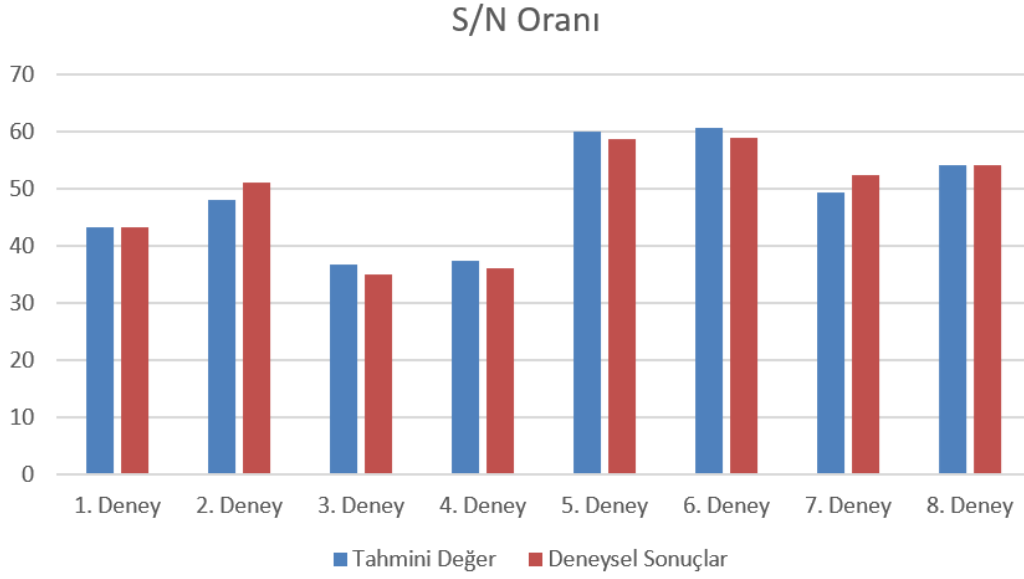
$$SN = 44,10 - 2,137 \text{ Yük} + 0,0694 \text{ Hız} + 0,0205 \text{ Yol} + 0,735 \text{ Takviye Oranı} \quad (7.1)$$

Denklem 7.1 kullanılarak tahmini değerler gerçek değerlerin karşılaştırılması için deney yapılmış Yapılmış olunan deneyler ile programsal hesaplamalar

karşılaştırılması Tablo 7.8 ve Şekil 7.17’de grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlara bakılarak analiz edildiğinde deneysel sonuçlarla programsal sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkılarak yapılan deneylerin başarılı olduğu programsal olarak da doğrulanarak doğru olduğu görülmüştür. Yapılacak olan diğer deneylere gerek duymadan programsal olarak faktör değerleri işlenerek aşınma oranları ve S/N oranları hesaplanabilecektir

Tablo 7.8 Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu

Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu				
Deney no	Deneysel aşınma miktarı (mm ³ /m) 10 ⁻³	Deneysel S/N oranı dB	Programsal hesaplanan aşınma miktarı (mm ³ /m) 10 ⁻³	Programsal hesaplanan S/N oranı dB
1	6,8043	43,2987	8,5253	43,2564
2	2,7697	51,1234	6,3693	48,0768
3	17,3000	34,9788	14,1954	36,7521
4	15,4765	36,1662	13,2604	37,4818
5	1,1221	58,6918	1,0940	60,0075
6	1,0756	58,9640	2,0290	60,7372
7	2,1974	52,4592	5,7970	49,4126
8	1,9200	54,2753	3,6410	54,2330



Şekil 7.17 S/N Oranı

Tablo 7.8 ve Şekil 7.17'den yola çıkarak Denklem 7.1, kullanılarak farklı parametrelerle S/N oranı ve aşınma oranı ait programsal tahmini deney sonuçları örnek olarak aşağıda hesaplanmıştır.

Uygulana kuvvet : 2 N

Kayma hızı : 20 m/s

Kayma Mesafesi :100 m

Takviye Oranı : %0

Sonuçlar :S/N : 43,2564 dB Aşınma oranı: $8,5253 \cdot 10^{-3}$

Uygulana kuvvet : 2 N

Kayma hızı : 20 m/s

Kayma Mesafesi :100 m

Takviye Oranı : %0

Sonuçlar :S/N : 43,2987 dB Aşınma oranı: $6,8043 \cdot 10^{-3}$

7.8.2 Sürtünme Katsayısı Değerlerine Göre Deney Sonuçları

Taguchi deney yöntemine göre, Al-%4Si matris tipinde, %0 ve %20 oranlarında TiB₂ partikül içeren bölgelerde 60m/s ve 20 m/s kayma hızlarında, 2N ve 6N yük tesirinde, 100m ve 200m kayma mesafelerinde uygulanan kuru kayma (reciprocating tekniği) Tablo 6.3 reçetesine bakılarak yapılan aşınma deneylerinin

sonuçları aşağıda sunulmuştur. Deney sonrasında sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

Tablo 7.9 Sürtünme katsayısı sonuçları

Deney Numarası	Sürtünme katsayısı 10^{-3}	Ortalama (mm ³ /m) 10^{-3}	SN (dB)
1	493,4	493,4	6,13539
2	464,9	464,9	6,65198
3	515,4	515,4	5,75647
4	519,5	461,0	5,68795
5	441,4	441,4	7,10378
6	434,2	465,0	7,24620
7	447,2	447,2	6,98930
8	434,0	433,9	7,25046

Yukarıdaki tabloya bakılarak en yüksek sürtünme katsayısı 515,4 10^{-3} mm³/m ile 3'üncü deney olurken, en düşük sürtünme katsayısı 8'nci deney 433,9 10^{-3} mm³/m dir. En yüksek ve en düşük sürtünme katsayısı değerlerine ait bilgiler Tablo 7.9 ve Tablo 7.10 da aşağıda sunulmuştur.

Tablo 7.10 En yüksek sürtünme katsayısı değeri

Deney No.	Partikül Oranı	Matris Tipi	Kayma Hız Değeri	Uygulanan Kuvvet Değeri	Kayma Mesafe Değeri
3	%0	Al-Si	20 m/sn	6 N	200 m

Tablo 7.11 En düşük sürtünme katsayısı değeri

Deney No.	Partikül Oranı	Matris Tipi	Kayma Hızı	Uygulanan Yük	Kayma Mesafesi
8	%20	Al-Si-TiB ₂	20 m/sn	2 N	200 m

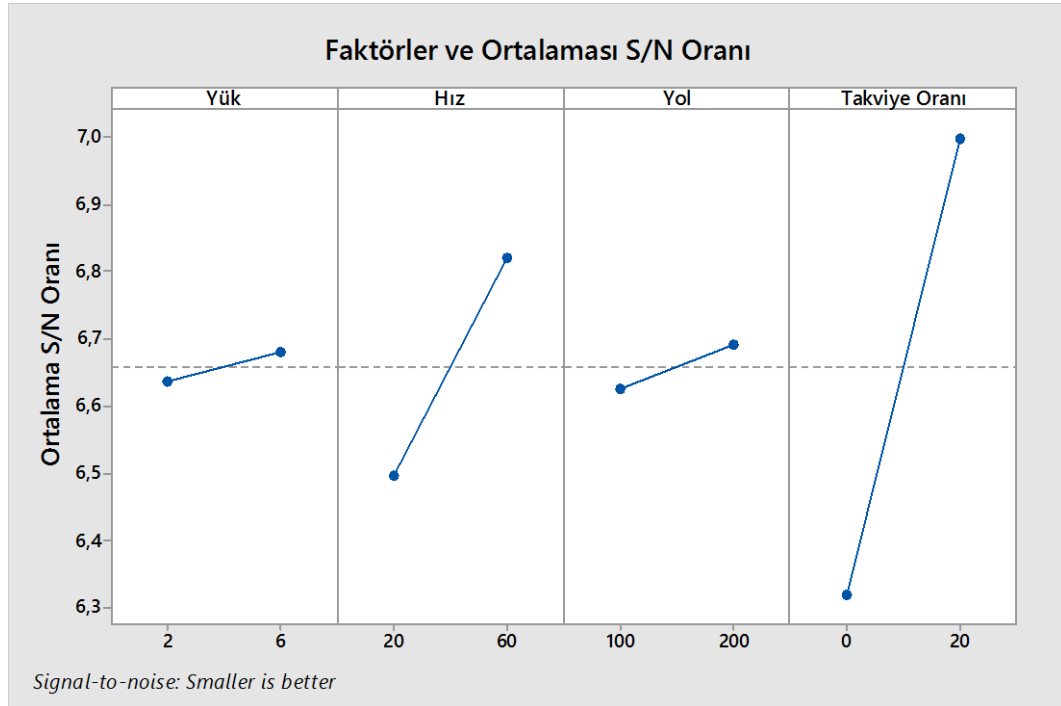
Tablo 7.12 ANOVA Tablosu

ANOVA TABLOSU						
Değişim Kaynağı Değeri	Sütun	Serbestlik derece Değeri	Karelerin Toplamı Değeri	Karelerin ortalaması Değeri	F Değeri	P Değeri
Yük	1	0,00415	0,004147	0,004147	0,02	0,895
Hız	1	0,20979	0,209787	0,209787	1,05	0,381
Yol	1	0,00862	0,008618	0,008618	0,04	0,849
Takviye oranı	1	0,92789	0,927894	0,927894	4,64	0,120
Ölçüm hatası	3	0,59994	0,599937	0,199979		
Toplam	7	1,75038				

ANOVA tablolarının hazırlanmasında Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin sürtünme katsayısı üzerinde etkisi olduğu düşünülen TiB₂ kayma hızı, kayma mesafesi, uygulanan kuvvet ve takviye oranı parametreleri ele alınmıştır. Bu faktörlerin aşınma üzerindeki etkilerini belirlemek için hazırlanan ANOVA tablosu, Taguchi yaklaşımına göre Tablo 7.12’de sunulmuştur. Hesaplanan F değerinin tabloda görülen F değerinden büyük olduğu senaryoda o faktörün sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğu gösterilmektedir. Altında yer aldığı senaryoda ise anlamlı tesire haiz olmadığını sergilemektedir. Bununla

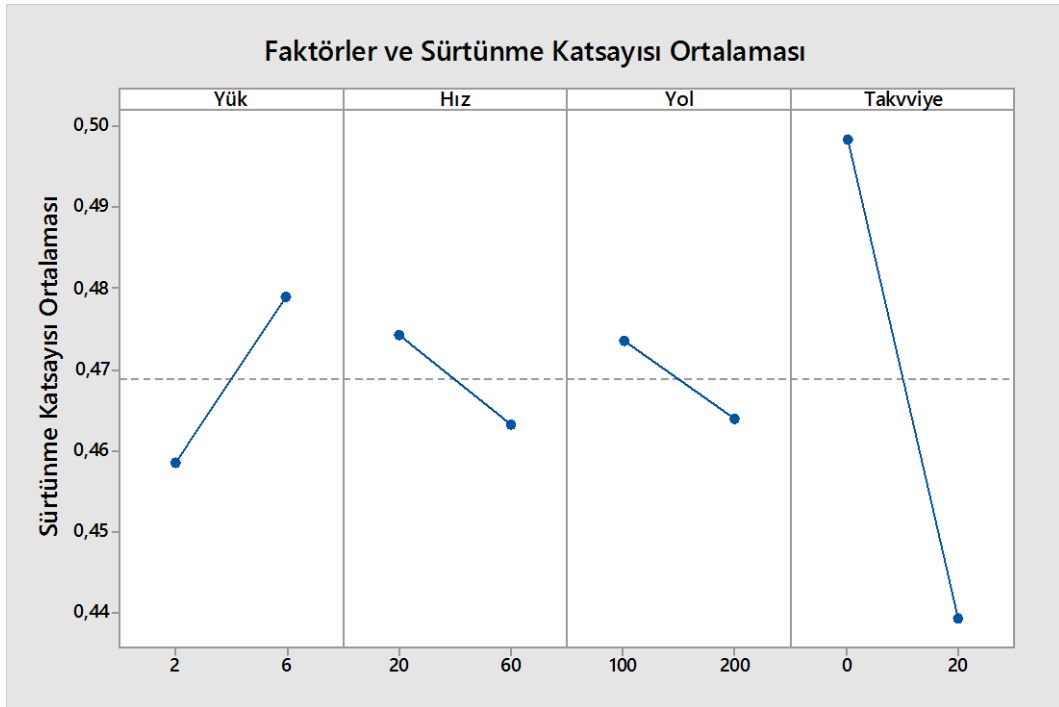
birlikte F(hesap) değeri arttıkça etkinlik değeri de doğru orantılı olarak artmaktadır.

Tablo 7.12’de S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış ANOVA tablosu verilmiştir. ANOVA tablosunda hız, yol ve yük faktörlerinin anlamlı bir etkili olmadığı görülmektedir. Buna karşın bu faktörler içerisinde en anlamlı faktörün takviye oranı faktörü olduğu dikkati çekmektedir. ANOVA tablosunda takviye oranı haricindeki faktörlerin etkisiz olması bu faktörlerin hiçbir etkiye sahip olmadığı anlamına gelmemektedir.



Şekil 7.18 Faktörlere bağlı hesaplanarak bulunan ortalama s/n oranları grafiği

Şekil 7.18’de faktörlere bağlı hesaplanarak bulunan ortalama S/N oranlarının grafiği yer almaktadır. En yüksek S/N oranı değişimi hız ve takviye oranı faktörlerinde gözlemlenmektedir. Yol faktörünün ardından fazla S/N oranına haiz faktör ise 6,645-6,655 dB değerine sahip olan malzemenin yük faktörüdür. Hız ve takviye oranı faktöründe sinyal gürültü oranı 6,3 dB ile 7,0 dB aralığındadır.



Şekil 7.19 Faktörler ve sürtünme katsayısı değerlerinin ortalamasını gösteren grafik

Şekil 7.19 da sürtünme katsayısı ortalamaları hazırlanmış faktör grafikleri görülmektedir. Şekilde etkili olan takviye ve hız faktörlerin minimum ve maksimum değerleri arasındaki farkın daha yüksek olduğu görülmektedir. Etkisiz olan faktörlerde ise bu farkın daha düşük seviyelerde seyrettiği dikkati çekmektedir. Hız faktörü grafiğine bakıldığında artan hız ile birlikte sürtünme katsayısı ortalamasının azaldığı görülmektedir. 20 m/sn hız altında ortalama sürtünme katsayısı ortalaması 0,475 seviyelerinde iken 60 m/sn yük altında sürtünme katsayısı ortalaması 0,465 seviyelerine düşmüştür. Takviyesiz bölgelerde sürtünme katsayısı ortalaması 0,498 iken takviyeli bölgede 0,440 değerine düşmüştür. Bu sonuç artan takviye oranı ile birlikte kompozitlerin sürtünme katsayısı değerinin düştüğünü göstermektedir.

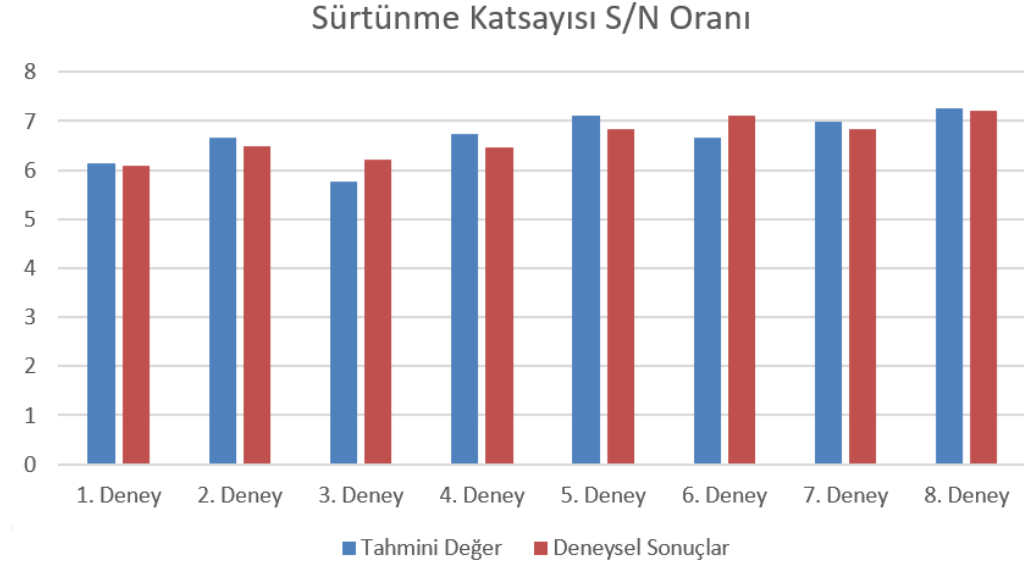
Bilgisayar programı yardımıyla farklı şartlarda sürtünme katsayısı deney sonuçları tahmin edilmesi amacı ile lineer regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bu denklem yardımıyla farklı deney şartlarında aşındırılan malzemelerin sürtünme katsayıları belirlenebilmektedir.

$$SN = 5,850 + 0,0114 \text{ Yük (N)} + 0,00810 \text{ Hız (m/sn)} + 0,00066 \text{ Yol (m)} \\ + 0,0341 \text{ Takviye Oranı (\%)} \quad (7.2)$$

Denklem 7.2 kullanılarak tahmini değerler gerçek değerlerin karşılaştırılması için deney yapılmış. Yapılan deneyler ile programsal hesaplamalar karşılaştırılması Tablo 7.13 ve şekil 7.20’da grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde deneysel sonuçlarla programsal sonuçların birbirine çok yakın çıktığı grlmştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak deneylerin başarılı olduğu programsal olarak da doğrulandığı grlmştir. Yapılacak olan diğer deneylere ihtiyaç duymadan programsal olarak faktör değerleri girilerek sürtünme katsayısı ve S/N oranları hesaplanabilecektir.

Tablo 7.13 Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu

Deneysel ve programsal hesaplama sonuçları karşılaştırma tablosu				
Deney no	Deneysel hesaplanan sürtünme katsayısı 10^{-3}	Deneysel S/N oranı dB	Programsal hesaplanan sürtünme katsayısı 10^{-3}	Programsal hesaplanan S/N oranı dB
1	493,4	6,13602	495,025	6,10045
2	464,9	6,65281	474,125	6,48997
3	515,4	5,75711	490,475	6,21163
4	461	6,72598	475,075	6,46986
5	441,4	7,10335	455,475	6,84723
6	465	6,65094	440,075	7,10546
7	447,2	6,98996	456,425	6,82713
8	433,9	7,25221	435,525	7,21664



Şekil 7.20 Sürtünme Katsayısı S/N Oranı

Tablo 7.13 ve Şekil 7.20’ten yola çıkarak Denklem 7.2 elde edilen denklemler kullanılarak farklı parametrelerle S/N oranı ve sürtünme katsayısına ait programsal tahmini deney sonuçları örnek olarak aşağıda hesaplanmıştır.

Uygulana kuvvet : 6N

Kayma hızı : 20m/s

Kayma Mesafesi :200 m

Takviye Oranı : %0

Sonuçlar : S/N : 6,21163 dB, Sürtünme Katsayısı: $490,47510^{-3}$

Uygulana kuvvet : 6 N

Kayma hızı : 60 m/s

Kayma Mesafesi :200 m

Takviye Oranı : %20

Sonuçlar S/N : 7,21664 dB, Sürtünme Katsayısı: $435,525 10^{-3}$

Bu yapılan çalışmada savurma döküm yöntemi tekniği kullanılarak $TiB_2/Al-Si$ fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit üretimi yapılmıştır. Kabinde üretilen kompozite ait numunelerden sertlik testi, optik mikroskop görüntüleri, Taramalı Elektron Mikroskonu (SEM), XRD testleri, aşınma ve korozyon testleri gibi çeşitli incelemeler yapılarak mikro, makro yapı, aşınma ve korozyon özellikleri karşılaştırılmıştır. Kuru kayma aşınma testlerinde Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak hız, mesafe, yük ve takviye oranı dikkate alınarak deney reçetesi oluşturulmuş ve akabinde uygulanan faktörlerin etkinlik değerini saptamak için ANOVA tablosu meydana getirilmiştir. Elde edilen bulgularla matematiksel doğrulama için MINITAB istatistiksel programından faydalanılarak Taguchi yaklaşımı ve ANOVA işlemleri tekrarlanarak değerler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki maddelerle özetlenebilir:

- $Al-10Ti$, Bor verici olarak $Al-3B$ mastır alaşımı ve %4 silisyum alaşımı kullanılarak $1200^{\circ}C$ 'de fırında ergimiş çözelti içerisine konulmuş, akabinde 2 saat beklendikten sonra ergimiş fırın sıcaklığı $800^{\circ}C$ 'ye düşürülerek, $800^{\circ}C$ 'de $Al-Si/TiB_2$ fonksiyonel derecelendirilmiş kompoziti elde edilmiştir. Üretilen bu kompozit $1500\ rpm$ 'de $800^{\circ}C$ de savrulup akabinde soğutularak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit malzemeye savurma işlemi uygulanarak üretilmiştir. Elde edilen kompozitin TiB_2 takviyeli ve takviyesiz olarak iki bölgeye ayrıldığı saptanmıştır. Takviyesiz bölgedeki TiB_2 partikül oranının yok denecek kadar az, takviyeli bölgedeki TiB_2 partikül oranının ise %20 olduğu bunun nedeninin ise savurma kuvvetinin etkisiyle sürüklenerek TiB_2 partiküllerinin dış cidarda birikmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.
- Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozitte TiB_2 takviyesiyle yoğunluğun arttığı gözlemlenmiş. $Al-Si$ matrisli TiB_2 'ce en zengin bölgesindeki yoğunluk oranı $2.92\ g/cm^3$ 'tür.
- $Al-Si$ kompozitine TiB_2 takviyesiyle sertliğinin arttığı görülmüştür. En sert bölge 104,2 HB değer ile $Al-Si$ matrisli TiB_2 takviyeli bölgede, en

yumuşak bölge ise 45,7 HB değer ile Al-%Si matrisli takviyesiz bölgede tespit edilmiştir.

- TiB₂ takviyesinin ve kayma hızının artırılmasıyla aşınma miktarının azaldığı gözlemlenirken, uygulanan kuvvet ve kayma mesafesi arttıkça aşınma miktarının arttığı saptanmıştır
- En yüksek aşınma değeri yüzdesi olan 23,65 10^{-3} mm³/m ile, alüminyum matrisli kompozitte, %0 TiB₂ partikül oranında, 20,0 m/s kayma hızında, 6 N uygulanan kuvvet altında ve 200 m kayma mesafesinde gözlemlenmiştir. En düşük aşınma oranı olan 0,727 10^{-3} mm³/m ile, Al-%4Si matrisli kompozitin %20 TiB₂ partikül oranında, 2 N uygulanan yük altında, 60,0 m/s kayma hızında ve 100 m kayma mesafesinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Yapılan çalışmada literatüre göre alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye oranının artmasıyla korozyon direncinin düşmesi beklenirken İlave edilen TiB₂ elemanı ile birlikte Al-Si alaşımında korozyon direncini arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin alüminyum matrisli kompozitlerde matris fazı ile takviye fazı arasında oluşan galvanik uyumsuzluk genel bir kanı olarak korozyon direncinin azalmasına neden olmaktadır. Ancak alüminyum matris ile seramik karakterli TiB₂ partikülleri arasında oluşan galvanik etkinin az olduğu buna ilaveten matris içerisine ilave edilen TiB₂ takviye fazının korozyon direnci azaltması gerekirken takviye miktarının artması ile üretilen kompozitlerde korozyon direnci matris alüminyuma göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Taguchi yaklaşımı ile regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler ile farklı şartlar altında oluşacak aşınma oranları ve sürtünme katsayıları tahmin edilebileceği görülmüştür.
- Yapılan çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeye aşınma, korozyon ve sertlik testleri yapılmış ve sonuçlar incelendiğinde artan takviye oranı ile saf alüminyuma göre bütün değerlerin iyileştiği saptanmıştır, üretilen kompozit malzemelerin gemi inşa sektöründeki makinaların imalatında, halihazırda savaş gemileri, denizaltı ve deniz altı

araçlarında aşınmaya ve korozyona maruz kalan parça, platform sacı ve aksamlarında kullanılabileceği tespit edilmiştir.



KAYNAKÇA

- [1] H. Kılıç and Ö. Savaş, “Abrasive Wear Behavior of Centrifugally Cast Al Alloy Composites with TiB₂ Reinforcement,” *Tribol. Ind.*, vol. 44, no. 3, pp. 461–469, 2022, doi: 10.24874/ti.1282.04.22.06.
- [2] M. Olgun, “Gemi İnşaatında Kullanılan Çelik - Alüminyum Birleşim Parçasının Mekanik Özelliklerine Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi,” 2018.
- [3] Ö. Savaş and Ö. Demirok, “Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 17, pp. 972–981, 2019, doi: 10.31590/ejosat.648682.
- [4] Ö. Savaş and Ö. F. Dem, “Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al Kompozitlerin Üretimi Üzerine Bir Çalışma,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 8, no. 3, pp. 1829–1839, 2020, doi: 10.29130/dubited.648333.
- [5] A. Kalemtaş, “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış,” *Putech Compos.*, vol. 8, no. December, pp. 18–30, 2014.
- [6] H. Toprak, “Geleneksel Ve Atık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Yorulma Davranışının İncelenmesi,” 2017.
- [7] H. S. İ. Uygur, “Aluminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri,” no. Mart, pp. 167–174, 2004.
- [8] Ö. Savaş, “Alüminyum Esaslı In-situ Borür Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi,” 2010.
- [9] B. Y. Özdemir, “Alüminyum 6082 Alaşımında Yaşlandırma Proseslerinin Mekanik Özellikler Ve Korozyon Dayanımına Etkisinin Araştırılması,” 2023.
- [10] S. El-Hadad, H. Sato, E. Miura-Fujiwara, and Y. Watanabe, “Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al functionally graded materials under a centrifugal force,” *Materials (Basel)*, vol. 3, no. 9, pp. 4639–4656, 2010, doi: 10.3390/ma3094639.
- [11] Ö. Savaş, “Investigation of Production and Abrasive Wear Behavior of Functionally Graded TiB₂/Al and TiB₂/Al–4Cu Composites,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 73, no. 3, 2020, doi: 10.1007/s12666-020-01870-7.
- [12] O. Savas, R. Kayikci, and S. Köksal, “Application of taguchi method to investigate the effect of some factors on in-situ formed flake structures of Al/AlB₂ composite,” *Adv. Compos. Lett.*, vol. 21, no. 2, 2012, doi: 10.1177/096369351202100202.
- [13] S. Koksall, F. Ficici, R. Kayikci, and O. Savas, “Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB₂/Al composite based on Taguchi’s method,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 124–130, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.048.
- [14] Ö. Savaş, “Application of Taguchi’s method to evaluate abrasive wear behavior of functionally graded aluminum based composite,” *Mater. Today*

- Commun., vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100920.
- [15] L. U. Yavuz Soydan, Temel Triboloji, Sürtünme-Aşınma-Yağlama Bilimi ve Teknolojisi, no. 1. 2013.
- [16] T. Özkan, “Alüminyum Matrisli İnsitu Kompozitlerin Üretilmesi Ve Yarı Katı Şekillendirilmesi,” 2023.
- [17] M. Sato, A. Inoue, and H. Shima, “Bamboo-inspired optimal design for functionally graded hollow cylinders,” PLoS One, vol. 12, no. 5, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0175029.
- [18] I. M. El-Galy, B. I. Saleh, and M. H. Ahmed, “Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view,” SN Appl. Sci., vol. 1, no. 11, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1413-4.
- [19] D. D. R. William D. Callister, “Materials Science and Engineering (Malzeme Bilimi ve Mühendisliği),” Nobel Akad. Yayıncılık, no. 8, p. 992, 2013.
- [20] M. Groover, “Principles of Modern Manufacturing (Modern İmalatın Prensipleri),” Nobel Akad. Yayıncılık, no. 4, p. 1118, 2016.
- [21] A. Kalemtaş, “Seramik matrisli kompozit malzemeler,” Putech Compos., no. May, pp. 20–26, 2015.
- [22] A. İ. Kaya, “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri,” Poliüretan ve Kompoz. Sanayi Derg., vol. 8, no. January, pp. 38–45, 2016.
- [23] N. Chawla and K. K. Chawla, Metal Matrix Composites 2nd Edition. 2013. [Online]. Available: www.TechnicalBooksPDF.com
- [24] S. Oller, S. A. Oller Aramayo, L. G. Nallim, and X. Martinez, Composite Materials, vol. 2. 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00220-0.
- [25] M. Rosso, “Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties,” J. Mater. Process. Technol., vol. 175, no. 1–3, pp. 364–375, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038.
- [26] Ö.F.Demirok, “Alüminyum Esaslı Titanyum Diborür Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Üretimi Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi,” p. 32, 2017.
- [27] S.Demirtaş, “İçten Yanmalı Motorda Üst Ölü Noktada Meydana Gelen Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi,” 2017.
- [28] E.Koroman, “Al-Fe-V-Si Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi,” 2011.
- [29] Ş. Yılmaz, “Alüminyum 2024 Ve 7075 Alaşımlarının Genel Korozyonuna Yüzey İşlemleri Ve Organik İnhibitörlerin Etkisinin Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi,” 2023.
- [30] T. K. Hayri Yalçın, “Mühendisler için Korozyon.” p. 321, 1997.
- [31] K. Karacif, H. Karabulut, and R. Çıtak, “Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşımlama Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi,” Uluslararası Muhendis. Arastirma ve Gelistirme Derg., pp. 576–583, 2019, doi: 10.29137/umagd.507023.

- [32] B. Yüksel, "Effect of artificial aging on hardness and intergranular corrosion of 6063 Al alloy," Pamukkale Univ. J. Eng. Sci., vol. 23, no. 4, pp. 395–398, 2017, doi: 10.5505/pajes.2016.05658.
- [33] S. K. Karna, "An Overview on Taguchi Method An Overview on Taguchi Method," no. August, pp. 10–17, 2016.
- [34] W. H. Yang and Y. S. Tarng, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," J. Mater. Process. Technol., vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00079-X.
- [35] M. Yılmaz and M. E. Keskin, "Optimal okuma şartlarının Taguchi yöntemiyle belirlenmesi," Acad. Platf. J. Eng. Sci., vol. 7, no. 1, pp. 1–1, 2019, doi: 10.21541/apjes.389744.
- [36] A. V. Metcalfe and K. Dehnad, "Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method," J. R. Stat. Soc. Ser. A (Statistics Soc.), vol. 153, no. 1, p. 110, 1990, doi: 10.2307/2983113.
- [37] Hernadewita, I. Rochmad, Hendra, Hermiyetti, and E. N. S. Yuliani, "An Analysis of Implementation of Taguchi Method to Improve Production of Pulp on Hydrapulper Milling," Int. J. Prod. Manag. Eng., vol. 7, no. 2, pp. 125–131, 2019, doi: 10.4995/ijpme.2019.10163.
- [38] C. Hamzaçebi, "Taguchi Method as a Robust Design Tool," Qual. Control - Intell. Manuf. Robust Des. Charts, no. February, 2021, doi: 10.5772/intechopen.94908.
- [39] T. Mori and S.-C. Tsai, "Taguchi Methods," Taguchi Methods, no. July, 2011, doi: 10.1115/1.859698.
- [40] O. Savas, R. Kayikci, and S. Köksal, "Application of taguchi method to investigate the effect of some factors on in-situ formed flake structures of Al/AlB 2 composite," Adv. Compos. Lett., vol. 21, no. 2, pp. 44–50, 2012.
- [41] N. Balaban, "Titanyum ve alaşımlarının biyouyumluluklarının incelenmesi," İstanbul Tek. Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [42] E. Kocaman, B. Kılınç, Ş. Şen, and U. Şen, "Effect of chromium content on Fe(18-x)Cr_xB₂(X=3,4,5) hardfacing electrode on microstructure, abrasion and corrosion behavior," J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ., vol. 36, no. 1, pp. 177–190, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.689230.
- [43] E. Kocaman, "Fe-Cr-Ti-B Esaslı İn-Situ Kompozit Sert Yüzey Alaşımlama Elektrotlarının Geliştirilmesi," 2020.
- [44] P. Senthil Kumar, V. Kavimani, K. Soorya Prakash, V. Murali Krishna, and G. Shanthos Kumar, "Effect of TiB₂ on the Corrosion Resistance Behavior of In Situ Al Composites," Int. J. Met., vol. 14, no. 1, pp. 84–91, 2020, doi: 10.1007/s40962-019-00330-3.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. H. Cevher, İ. Keskin Öner, E. Kocaman ve Ö. Savaş, “Production, Corrosion And Wear Behaviors Of Functionally Graded TiB₂/Al-4%Si Composites Using In Frigates And Submarines” International Research & Development Studies And Innovation Congress April 6-7, 2024 / Ankara, Türkiye

