

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEDİMENTASYON YÖNTEMİ İLE FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ $TiB_2/Al-Cu-Si$ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Uğur Ali AKYOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Eş Danışman

Doç. Dr. Engin KOCAMAN

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEDİMENTASYON YÖNTEMİ İLE FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ $TiB_2/Al-Cu-Si$ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİLE BİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Uğur Ali AKYOL 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** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer SAVAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Engin KOCAMAN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ömer SAVAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr. Üyesi İlknur KESKİN ÖNER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Çağlar YÜKSEL, Üye
Marmara Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Ömer SAVAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Sedimentasyon Yöntemi ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al-Cu-Si Kompozitlerin Üretilebilirliğinin Araştırılması” başlıklı çalışmada veri toplama ve 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.

Uğur Ali AKYOL

İmza



Aileme
ve
eşime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim sürecinde değerli vakitlerini esirgemeyen, rehberliği, bilgisi, destekleri ve tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer danışmanım Prof.Dr. Ömer SAVAŞ'a ve eş danışmanım Doç. Dr. Engin KOCAMAN'a içtenlikle teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince benzer konular üzerinde çalıştığımız ve ekip arkadaşlığı yaptığımız, fikir alışverişinde bulunduğum Sercan TÜRE ve Hasan CEVHER'e içtenlikle teşekkür ediyorum.

Ayrıca, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve hayatıma girdiği günden beri umut kaynağım, çalışmalarım boyunca yanımda olan değerli eşim Betül AKYOL'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Uğur Ali AKYOL

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
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	3
1.3 Hipotez	3
2 KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	6
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	7
2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	8
2.3.1 FDM'lerin Kullanım Alanları	9
2.3.2 FDM'lerin Üretim Metotları	10
2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.4.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	11
2.4.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	12
2.4.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	12
2.4.4 Karbon- Karbon Kompozit Malzemeler	12
2.4.5 Cam Matrisli Kompozit Malzemeler	13
2.5 MMK'lerde Kullanılan Matris Malzemeleri	13
2.5.1 Alüminyum Matrisli Kompozitler	14
2.5.2 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanacak Isıl İşlemler	14
2.6 MMK'larda Kullanılan Takviye Malzemeleri	18
2.6.1 Titanyum Dibörür (TiB ₂)	18
2.7 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi	20
2.7.1 Sıkıştırılmalı Döküm İnfiltrasyon Yöntemi	21
2.7.2 Karıştırılmalı (Vorteks) Döküm Yöntemi	22
2.7.3 İn-sute Yöntemi	22

3 AŞINMA	24
3.1 Aşınma Türleri	25
3.1.1 Adhezif Aşınma	26
3.1.2 Abrazif Aşınma	27
3.1.3 Yorulma Aşınması	28
3.1.4 Korozyon Aşınma	29
4 TAGUCHİ YÖNTEMİ	30
4.1 Sistem Tasarımı.....	31
4.2 Parametre Tasarımı	31
4.2.1 S/N Oranları	31
4.2.2 Faktör ve Etkileşimlerin Seçilmesi	32
4.2.3 Ortogonal Dizin Seçilmesi	32
4.2.4 Varyans (ANOVA) Analizi	33
4.2.5 Doğrulama Deneyleri	37
4.3 Tolerans Tasarımı.....	37
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
5.1 Kompozitlerin Oluşturulması.....	38
5.2 Mikro Yapı İncelemeleri.....	42
5.3 Yoğunluk Ölçümleri.....	45
5.4 Sertlik Ölçümleri.....	45
5.5 Aşınma Deneyleri.....	46
6 DENEYSEL SONUÇLAR	49
6.1 Makro Yapı Analizi.....	49
6.2 XRD Analizi.....	49
6.3 Mikro Yapı Analizi	50
6.4 SEM Analizi.....	52
6.4.1 TiB ₂ 'ce Fakir Bölgesinin EDAX Analizi	54
6.4.2 TiB ₂ 'ce Zengin Bölgesinin EDAX Analizi	55
6.5 Yoğunluk Ölçüm Analizi	56
6.6 Sertlik Ölçüm Analizi	57
6.7 Aşınma Deneyi Analizi	60
7 SONUÇ	67
KAYNAKÇA	69
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	75

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa
Al	Alüminyum
AlB ₂	Alüminyum Diborür
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
AlN	Alüminyum Nitrit
Cu	Bakır
β	Beta
B	Bor
B ₄ C	Bor Karbür
BN	Bor Nitrit
HB	Brinell Sertliği
Zn	Çinko
GPa	Gigapaskal
Ag	Gümüş
HCl	Hidroklorik Asit
kg	Kilogram
Cr	Krom
Mg	Magnezyum
Mn	Manganez
MPa	Megapaskal
μ m	Mikrometre
mm	Milimetre
m	Metre
m/s	Metre/saniye
Ni	Nikel
N	Newton
Ω	Omega
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SiC	Silisyum Karbür

Si_3N_4	Silisyum Nitrür
Ti	Titanyum
TiB_2	Titanyum Diborür
TiC	Titanyum Karbür
HV	Vickers Sertliği
%	Yüzde
ZrB_2	Zirkonyum Diborür
ZrO_2	Zirkonyum Dioksit
ZrC	Zirkonyum Karbür



KISALTMA LİSTESİ

AMK	Alüminyum Matrisli Malzemeler
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
CMK	Cam Matrisli Kompozitler
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskopi Analizi
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
KKK	Karbon-Karbon Matrisli Kompozitler
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
OM	Optik Mikroskop
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
S/N	Signal/Noise (Sinyal/Gürültü)
XRD	X-Işını Kırınım Analizi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kompozit malzemenin bileşenlerinin gösterimi.....	5
Şekil 2.2	Farklı malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması.....	6
Şekil 2.3	FDM'lerin sürekli ve kademeli olarak şemaya bağlı gösterimi	8
Şekil 2.4	FDM türleri ve uygulama alanları	9
Şekil 2.5	Takviye bileşenlerine göre kompozit malzemeler.....	11
Şekil 2.6	MMK'lerde kullanılan ana yapı malzemeleri.....	14
Şekil 2.7	A-B ikili faz diyagramı ve çökeltme ile sertleşebilen C_0 bileşimi.....	17
Şekil 2.8	A-B ikili alaşımındaki C_0 bileşiminin çökeltme sertleşme işlemi.....	18
Şekil 2.9	TiB ₂ tozuna ait SEM görüntüsü.....	20
Şekil 2.10	MMK'ların üretim yöntemleri akış şeması	21
Şekil 2.11	Sıkıştırılmalı döküm infiltrasyon yöntemi şematik gösterimi	21
Şekil 2.12	Karıştırılmalı (vorteks) döküm yöntemi şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.13	İn-sute yöntemi şematik gösterimi	23
Şekil 3.1	Malzemelerin kullanım dışı kalma nedenleri	24
Şekil 3.2	Aşınmanın olayının oluşumu.....	25
Şekil 3.3	Aşınma türleri.....	25
Şekil 3.4	Aşınma çeşitleri şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.5	Adhezif aşınma ürünü.....	26
Şekil 3.6	Pürüzlü sert yüzey veya iki cisimli abrazif aşınma	27
Şekil 3.7	Üç cisimli abrazif aşınma	27
Şekil 3.8	Yüzey yorulma mekanizması	28
Şekil 3.9	Korozif aşınma	29
Şekil 4.1	Taguchi tasarımının aşamaları.....	30
Şekil 5.1	Alüminyum alaşımı külçe Etial 110.....	38
Şekil 5.3	Al-Ti faz diyagramı	40
Şekil 5.4	Kompozit üretim adımlarının şematik gösterimi.....	41
Şekil 5.5	Ergitme fırını	42
Şekil 5.6	Üretilen kompozit malzeme.....	43
Şekil 5.7	Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler.....	43
Şekil 5.8	Optik mikroskop ile mikroyapı inceleme.....	43
Şekil 5.10	Spektrometre cihazı.....	44
Şekil 5.11	SEM analiz cihazı.....	44

Şekil 5.12 Arşimet düzeneği yoğunluk ölçüm cihazı	45
Şekil 5.13 Sertlik ölçüm cihazı	46
Şekil 5.14 Aşınma test cihazı.....	46
Şekil 6.1 Üretilen kompozit malzeme kesit görüntüsü	49
Şekil 6.2 A, B ve C bölgelerinden alınan XRD patern örnekleri.....	50
Şekil 6.3 A bölgesi (TiB_2 zengin)	51
Şekil 6.4 B bölgesi (geçiş bölgesi).....	51
Şekil 6.5 C bölgesi (TiB_2 fakir).....	52
Şekil 6.7 Kompozit SEM görüntüsü.....	52
Şekil 6.8 Partiküllerin boyutsal dağılımı grafiği.....	53
Şekil 6.9 Fakir bölgenin partikül dağılımları.....	54
Şekil 6.10 Zengin bölgenin partikül dağılımları.....	55
Şekil 6.11 Kompozitlerin bölgesel yoğunluk değişimi.....	57
Şekil 6.12 Kompozit bölgelerinin % TiB_2 oranları.....	57
Şekil 6.13 Sertlik oranları için faktörlere bağlı S/N grafiği.....	60
Şekil 6.14 Aşınma oranları için faktörlere bağlı S/N grafiği.....	64
Şekil 6.15 Faktörlere bağlı aşınma oranları	65

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Kompozitlerin avantaj ve dezavantajları.....	7
Tablo 2.2	Isıl işlemler için kullanılan kodlama ve bunların tanımları	15
Tablo 2.3	Titanyum dibörür özellikleri.....	19
Tablo 3.1	Aşınmayı etki eden faktörler.....	25
Tablo 4.1	L ₉ ortogonal dizisi.....	33
Tablo 5.1	Etial 110 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%).....	40
Tablo 5.2	Deney parametreleri ve seviyeleri.....	47
Tablo 5.3	Taguchi L18 deney reçetesi	48
Tablo 6.1	Üç farklı bölgeye ait yoğunluk ölçüm sonuçları.....	56
Tablo 6.2	Sertlik ölçümleri.....	58
Tablo 6.3	ANOVA tablosu (sertlik).....	59
Tablo 6.4	Aşınma deneyi sonuçları.....	61
Tablo 6.5	En yüksek aşınma oranı parametreleri	62
Tablo 6.6	En düşük aşınma oranı parametreleri.....	63
Tablo 6.7	ANOVA tablosu (aşınma).....	63
Tablo 6.8	A ₁ B ₂ C ₁ D ₁ E ₃ F ₃ optimum parametreleri.....	66

Sedimentasyon Yöntemi ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş $TiB_2/Al-Cu-Si$ Kompozitlerin Üretilebilirliğinin Araştırılması

Uğur Ali AKYOL

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Üyesi Engin KOCAMAN

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek spesifik mukavemetleri nedeniyle otomotiv, uçak ve denizcilik endüstrilerinde oldukça popüler malzemelerdir. Öte yandan alüminyum ve alaşımlarının aşınma özelliklerinin zayıf olması, aşınmaya maruz kalan parçaların üretiminin bu malzemelerin kullanımı sınırlamaktadır. Bu malzemelerin aşınma direncini artırmada kullanılan en önemli yöntemlerden biri de kompozit malzeme yaklaşımıdır. Artan takviye oranı ile birlikte kompozit malzemelerde kırılma tokluğu düşmektedir. Bu problem kompozitlerin fonksiyonel olarak derecelendirilmesi ile giderilmektedir. Bu çalışmada sedimentasyon yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum esaslı titanyum dibörür takviyeli ($TiB_2/Al-Si-Cu$) kompozitlerin üretimi hedeflenmiştir. Matris malzemesi olarak endüstride yaygın olarak kullanılan Etial 110 alaşımı tercih edilmiştir. Çalışmada takviye fazı olarak kullanılan TiB_2 partikülleri ergiyik Etial 110 alaşımı içerisinde in-situ tekniği ile oluşturulmuştur.

Bu sayede kompozit üretiminde önemli bir problem olan ıslatılabilirlik problemi aşılmış ve daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Kompozit üretimine yönelik olarak yaklaşık 1200°C'de Al-Cu-Si-Ti-B çözeltisi hazırlanmış, ardından 850°C'ye indirilerek sıvı Al-Si-Cu (Etial 110) eriği içinde TiB₂ partiküllerinin sentezlenmesi sağlanmıştır. Çözelti sonrasında 850°C'de 2 saat bekletildikten sonra katılaştırılmıştır. Bu sayede sıvı çözelti içerisindeki katı TiB₂ partikülleri kalıp dibine doğru çökeltilerek kompozitlerin fonksiyonel olarak derecelendirilmesi sağlanmıştır. Isıl işlem şartlarının kompozitlerin üzerine etkilerini ortaya koymak maksadıyla üretilen kompozitler doğal yaşlandırma (T4), yapay yaşlandırılma (T6) ve aşırı yaşlandırma (T7) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Çalışmada üretilen kompozitlerin karakterizasyonu OM (optik mikroskop), SEM (taramalı elektron mikroskobu), XRD (X-ışınları difraksiyonu) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kompozitlerin yoğunluk ve sertlik ölçümleri de yapılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgulara göre üretilen kompozit malzemelerin üç bölgeden oluştuğu gözlemlenmiş ve bu bölgelerin takviyeli (zengin) bölge, takviyeli geçiş bölgesi ve takviyesiz (fakir) bölge olarak farklı oranlarda TiB₂ takviye fazı içerdiği tespit edilmiştir. Takviyeli bölgelerin sertlik değerlerinin takviyesiz bölgeye göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada en düşük sertlik değeri doğal yaşlandırılmış (T4) TiB₂ takviye fazı bakımında fakir olan bölgede yaklaşık 64 HB olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri ise suni (T6) olarak yaşlandırılmış TiB₂ 'ce zengin bölgede 120 HB olarak ölçülmüştür. Çalışmada kompozit malzemeler 3 bölgeye ayrılarak tribolojik özellikleri incelenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda artan TiB₂ takviye oranı ile birlikte Etial 110 alaşımlarının tribolojik özelliklerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TiB₂, Kompozit Malzemeler, Sedimentasyon tekniği.

Investigation of the Productibility of Functionally Graded TiB₂/Al-Cu-Si Composites by Sedimentation Method

Uğur Ali AKYOL

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ömer SAVAŞ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Engin KOCAMAN

Aluminum alloys are highly popular materials in the automotive, aerospace, and maritime industries due to their low density and high specific strength. However, their poor wear properties restrict their use in components exposed to abrasion. One of the primary methods used to enhance the wear resistance of these materials is the composite material approach. Increasing the reinforcement ratio in composite materials typically results in decreased fracture toughness. This issue is addressed by functionally grading the composites. This study aims to produce functionally graded aluminum-based titanium diboride reinforced (TiB₂/Al-Si-Cu) composites using the sedimentation method. The matrix material chosen for the study is the widely used Etial 110 alloy in the industry. In the study, TiB₂ particles used as the reinforcement phase were created within the molten Etial 110 alloy using the in-situ technique. This method overcame the wetting issue, a significant problem in composite production, and resulted in a more homogeneous structure. For composite production, an Al-Cu-Si-Ti-B solution was prepared at approximately 1200°C, followed by lowering the temperature to 850°C to synthesize TiB₂ particles within the liquid Al-Si-Cu (Etial 110) melt. After holding the solution at 850°C for

2 hours, it was solidified. This allowed solid TiB_2 particles within the liquid solution to precipitate towards the mold bottom, thereby achieving functional grading of the composites. In order to reveal the composites under extreme heat treatment conditions, the produced composites are subjected to natural aging (T4), artificial aging (T6) and extreme aging (T7) heat treatments. The characterization of the produced composites was conducted using OM (optical microscope), SEM (scanning electron microscope), and XRD (X-ray diffraction) techniques. Additionally, density and hardness measurements of the composites were performed. According to the findings, the produced composite materials were observed to consist of three zones: reinforced (rich) zone, reinforced transition zone, and unreinforced (lean) zone, containing TiB_2 reinforcement phase in varying proportions. It was noted that the hardness values in the reinforced zones were higher compared to the unreinforced zone. The lowest hardness value measured in the study was approximately 64 HB in the TiB_2 lean region after natural aging (T4). The highest hardness value, measured at 120 HB, was observed in the TiB_2 rich region after artificial aging (T6). The tribological properties of the composite material were investigated by dividing it into three zones. As a result of wear tests, it has been determined that the tribological properties of Etial 110 alloys decrease with increasing TiB_2 reinforcement ratio.

Keywords: TiB_2 , Composite Materials, Sedimentation technique.

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum ve alaşımları, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, geri dönüşümlülük ve işlenebilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. [1-3]. Ancak, düşük aşınma direnci ve yüksek mekanik özellikleri bazı uygulamalarda malzemelerin kullanımını sınırlamaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, son yıllarda SiC, B₄C, Al₂O₃, TiC, AlB₂ ve TiB₂ gibi çeşitli seramik bileşiklerle güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin (AMK) geliştirildiği görülmektedir [4-8].

Alüminyum alaşımları bu bileşiklerle güçlendirildiğinde mukavemet ve aşınma özellikleri artmakta ancak kırılma tokluğu azalmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), malzemenin farklı bölgelerinde çeşitli özellikler sergiler ve bu sayede FDM'ler hem yüksek aşınma direncini ve kırılma tokluğunu aynı anda sağlayabilirler [9-14].

SiC, B₄C, Al₂O₃, TiC, AlB₂ ve TiB₂ bileşikleriyle güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin santrifüj döküm yöntemiyle fonksiyonel olarak derecelendirildiği literatürde görülmektedir [14-15]. Alüminyum alaşımlarının sedimantasyon tekniğiyle ise kısmen fonksiyonel derecelendirildiği çalışmalarda mevcuttur. Sedimantasyon tekniği, sıvı metal içindeki katı parçacıkların boyutlarına ve yoğunluklarına göre çökmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimi için ekonomik, basit ve etkili bir teknik olarak değerlendirilmektedir [16-17].

Maedeh Pourmajidian ve [18] arkadaşları, SiC parçacıklarının kademeli olarak dağıldığı SiC takviyeli alüminyum matris kompozitler üretmek için çökeltme yöntemini kullandılar. Çalışmada hacimce %5, %10, %15 ve %20 SiC ile güçlendirilmiş başlangıç kompozitleri 650°C sabit sıcaklıkta ergitilmiş ve farklı süreler boyunca tutularak düzgün bir SiC konsantrasyon gradyanı elde etmek için malzeme ürettiklerini bildirmişlerdir.

J. Simonet ve [19] arkadaşları, aşınmaya dayanıklı bir yüzey elde etmek amacıyla çökeltme yöntemini kullanmışlardır. Araştırmada, metal matrise ex-situ tekniğiyle

eklenen tungsten karbür (WC) parçacıkları, dökümün alt kısmında biriktirilerek fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzeme ürettiklerini bildirmişlerdir.

Bangzheng Wei [20] ve arkadaşları, sedimentasyon yöntemini kullanarak W-Cu fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimini araştırdıkları aynı zamanda elektriksel ve termal iletkenlik açısından farklılık gösteren bileşenlerin (W-Cu FGM'ler) başarıyla üretildiklerini bildirmişlerdir.

J. J. Sobczak ve [17] arkadaşları, yeniden eritme yoluyla A359/SiC, A359/Al₂O₃, A359/Gr ve C90300/Gr parçacık takviyeli metal matris kompozitlerinde takviye parçacıklarının, sedimentasyon ve yüzdürme davranışını araştırdıkları görülmektedir. Araştırmanın sonucunda, belirli bir prosedür uygulanarak kompozitlerin fonksiyonel olarak derecelendirilebileceği vurgulanmaktadır.

A. Ourdjini ve [21] arkadaşları, ortalama boyutları 25 ve 65 µm olan ağırlıkça %7 ve %20 SiC parçacıklarıyla güçlendirilmiş bir A356 matris kompoziti kullanarak parçacık çökmesini ve bu durumun katılaşma üzerindeki etkisini incelediği belirlemektedir. Sonuçlar, daha düşük takviye oranına sahip kompozitlerin, daha yüksek ergime sıcaklıklarında daha hızlı çökme eğiliminde olduğunu ortaya koymuştur.

TiB₂ partikülleri, yüksek mukavemet, yüksek aşınma, korozyon direnci, termal stabilite ve hafiflik gibi üstün özelliklerine sahip olmasından dolayı alüminyum matrisli kompozitlerin (MMC) üretiminde tercih edilmektedir [22-23].

Shyam Rangrej ve [24] arkadaşları, A713 matris alaşımına TiB₂ parçacıkları ilavesinin sertlikte %35,86, çekme mukavemetinde ise %21,81 artışa neden olduğunu rapor etmişlerdir. M. Thirumal Azhagan ve [25] arkadaşları, TiB₂/Al7075 kompozitinde TiB₂ oranının artmasıyla sertliğin ve mekanik özelliklerin arttığını belirtmişlerdir. V. S. Ayar ve [26] arkadaşları, hem in-situ ve hem de ex-situ yöntemlerle ile alüminyuma eklenen TiB₂ ilavesinin çekme dayanımını arttığını bildirmişlerdir. S. Kumar ve [27] arkadaşları, Al-4Cu alaşımında TiB₂ içeriği arttıkça abrasif aşınma direncinin arttığını bildirmişlerdir. Avinash Gavel [30] ve arkadaşları Al/TiB₂ kompozitindeki TiB₂ takviyesi miktarı arttıkça aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir. S.C. Tjong ve [28] arkadaşları, TiB₂/Al-%4Cu kompozitinde TiB₂ oranının artmasıyla çekme mukavemeti ve sertliğin arttığını gözlemlemişlerdir. K. Krishnamurthy ve [29] arkadaşları 6063

matrisinde TiB_2 parçacıklarının artmasının aşınma direncini arttırdığını ve sürtünme katsayısını azalttığını bildirmişlerdir.

Daha önceki çalışmalarda, fonksiyonel derecelendirilmiş TiB_2 takviyeli AMC'lerin savurma döküm yöntemi kullanılarak başarıyla üretildiği görülmektedir [30-32]. Ancak, işlevsel derecelendirilmiş TiB_2/Al AMC'lerin çökeltme yöntemiyle üretimine ilişkin çok az çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş TiB_2/Al 110 kompozitinin çöktürme yöntemiyle üretimi ve aşınma özellikleri incelenmesi ele alınmıştır. Kompozit üretiminde sıvı döküm teknikleri kullanılacaktır. İlk aşamada, sıvı alüminyum içerisinde TiB_2 parçacıkları in-situ tekniği ile sentezlenecek ve ardından çökeltilerek fonksiyonel olarak derecelenmesi sağlanacaktır. Üretilen kompozit malzemelerin özellikleri bölgesel olarak karakterize edilerek, tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmanın, yüksek performans gerektiren uygulamalara yönelik yeni malzeme geliştirmesini sağlamak için önemli bir adım olması beklenilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı aşağıda belirtilmiştir.

- Sedimentasyon yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum esaslı titanyum dibörür takviyeli Etial 110 matrisli ($TiB_2/Al-Cu-Si$) kompozitlerin üretimi hedeflemek,
- Üretilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik, makro ve mikro yapı gibi özelliklerini incelenerek karşılaştırmalar yapmak,
- Taguchi yöntemi ile malzemenin tribolojik özelliklerini araştırmak, ardından sonuçları karşılaştırmak,
- Farklı şartlarda aşınmaya maruz kalan kompozitlerin tribolojik özelliklerini tahmin eden bir lineer denklem elde etmek.

1.3 Hipotez

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler üzerinde araştırılmaların yapıldığı ve araştırmalarda üretim tekniği bakımından birçok farklı yöntemi içerisinde barındırdığı bir alandır. Makine parçalarında meydana gelen aşınma kayıplarının azaltılması amacıyla metal matrisli kompozitlere yönelik yapılan çalışmaların

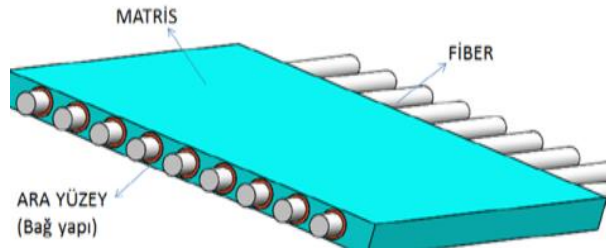
artması gerektiği öngörölmektedir. Kompozitlerin üretimine ilişkin bilimsel araştırmaların katkı sağlaması amacıyla, Al-Si-Cu matrisli (Etial 110) kompozitlerin üretimi gerçekleştirilerek sedimantasyon yöntemiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmesi ve buna bağlı olarak kompozit malzemelerin özelliklerinin (tribolojik, sertlik vb.) iyileştirilebileceği hipotezi üzerinde durulmaktadır.



2 KOMPOZİT MALZEMELER

Kullanılabilir nesneler oluşturmak için doğal veya sentetik olarak üretilen maddelere "malzeme" adı verilir. Günümüzde çeşitli malzeme türleri mevcuttur. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, günümüz toplumunun karşılanması gereken çok çeşitli mekanik özelliklere sahip yeni malzemelere olan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaç, kompozit malzemeler gibi yeni nesil malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Kompozit malzemeler, genellikle farklı kimyasal bileşimlere ve özelliklere sahip en az iki bileşenin birleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Bu bileşenler, birleştirildiklerinde kendi özelliklerini korur ve daha üstün performans sergileyen kompozit malzemelerin üretilmesine olanak tanırırlar.

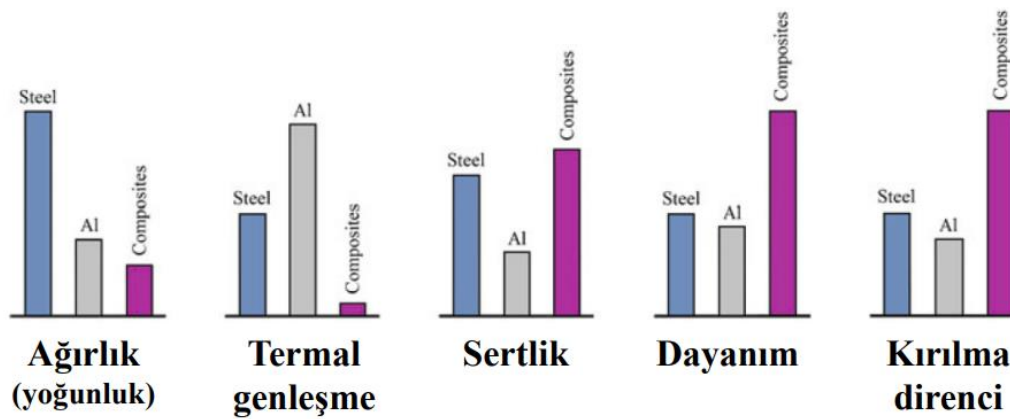
Kompozit malzemeler çözünen ve çözen bileşenlerden oluşmazlar. Alaşımlar, farklı malzemelerin birbiri içinde çözünebildiği malzemelerdir. Kompozitlerde genellikle atom alışverişi gerçekleşmez. İnsanlar tarafından üretilen kompozitlerin bileşenleri genellikle birbirlerini kimyasal olarak etkilemez. Ancak, bazı metalik sistemlerde, bileşenler arasında bir miktar çözünme olabilir ve bu çözünme, bileşenler arasında güçlü bağların oluşmasına katkıda bulunabilir. Kompozitler, Şekil 2.1’de gösterilen matris ve takviye oranı olarak gösterilen bileşenlerden oluşmaktadır. Matris, kompozitin büyük bir kısmını oluşturur ve yapısal dayanıklılığı sağlar. Matris bileşeni, malzemenin kullanım amacına göre seçilir. Takviye bileşeni ise kompozite uygulanan yükü taşıırken matrisin dayanıklılığını artırır. Ayrıca, matris takviye bileşenlerini dış etkilere korur, üzerine uygulanan yükü takviyeye ileterek plastik deformasyon sırasında çatlak oluşumunu engeller.



Şekil 2.1 Kompozit malzemenin bileşenlerinin gösterimi [33]

Kompozit malzemelerin üretim sürecinde matris ve takviye bileşenleri arasındaki etkileşim sonucunda ara yüzey kavramı önem kazanmıştır. Bu ara yüzey, kompozitin yapısal özelliklerini belirleyen önemli bir unsurdur; zira matris ve takviye bileşenleri arasındaki bağlantı gücü, kompozitin dış etkilere tepkisini belirler. Yüksek bağ kuvvetine sahip bir ara yüzey, kompoziti daha dayanıklı ve sert hale getirebilirken, düşük bağ kuvveti bu özellikleri zayıflatabilir ve daha az dayanıklı bir yapıya yol açabilir [33].

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin mekanik (dayanıklılık, esneklik vb.) ve/veya fiziksel (elektrik iletkenliği, termal iletkenlik vb.) özelliklerin bir araya getirilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Aşağıda Şekil 2.2’de endüstride sıkça kullanılan alüminyum, çelik ve kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 2.2 Farklı malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması

2.1 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozitler, yüksek mukavemet, hafiflik, düşük yoğunluk, kimyasal direnç gibi özellikleri ile geniş bir uygulama alanına sahiptirler [34]. Neredeyse her sektörde ve alanında kompozit malzeme uygulamalarına rastlamak mümkündür. Başlıca kullanım alanı olarak;

1. Havacılık ve uzay endüstrisinde, hafif olmaları ve yüksek mukavemet sağlamaları nedeniyle,
2. Otomotiv endüstrisinde, yakıt verimliliği ve performansı artırmak için,
3. Denizcilik endüstrisinde, gemi gövdeleri, yelkenler, denizaltı parçaları ve tekne gövdeleri gibi bileşenlerde,

4. Yapı ve inşaat endüstrisinde, betonarme yapılarda donatı, güçlendirme levhaları, kirişler ve köprüler gibi birçok bileşen için,
5. Enerji endüstrisinde ise, rüzgâr türbin kanatları, güneş panelleri, boru hatları ve depolama tankları için,
6. Spor malzemeleri üretiminde kompozit malzemeler tercih edilir.

2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki Tablo 2.1’de sunulmuştur.

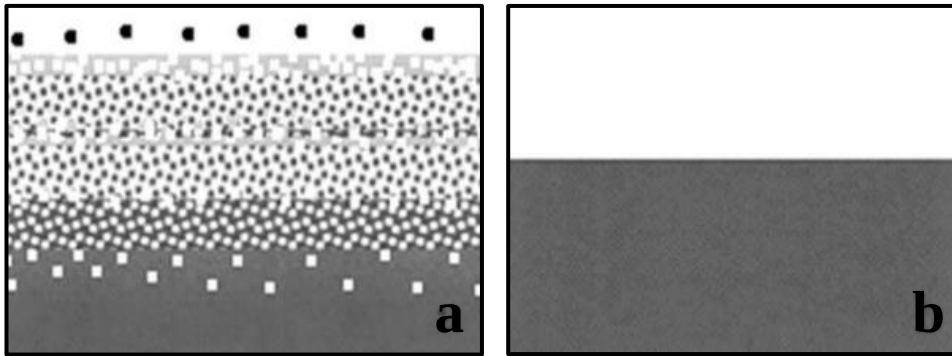
Tablo 2.1 Kompozitlerin avantaj ve dezavantajları

S.Nu	Avantajları	Dezavantajları
1	Hafif	Malzeme maliyetli
2	Yüksek özgül sertlik	Belirli tasarım yönergelerinin eksikliği
3	Yüksek özgül dayanım	Kompozit tasarımlarının nadiren değiştirilmesi mümkün
4	İstenilen özelliklere sahip	Uzun süreli geliştirme süreleri
5	Karmaşık (net) şekillerde üretilebilme kabiliyeti	Birleştirme elemanlarının (vida/civata gibi) maliyetli olması
6	Parçalı üretimle maliyet avantajı sağlama	Düşük esneklik
7	Dayanıklı kırılma direnci	Uygulanabileceği sıcaklık aralığı
8	Termal genleşmede azalma	Darbelere karşı duyarlılık
9	Elektrik iletkenliği düşük	Gizli hasar oluşması (iç çatlak v.b.)

2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

FDM'ler 1980'lerin ortalarında Japonya'da bir grup bilim insanı tarafından geliştirildi. Bu teknoloji sayesinde, yüksek dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi 1980'lerin ortalarından itibaren incelenmeye başlanmıştır. Malzemeler ilk olarak nükleer füzyon reaktörleri ve havacılık yapılarında termal yalıtım amacıyla tasarlanmıştır. Ancak günümüzde FDM teknolojisi, yapısal bileşenlerin genel üretimi için yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılmak üzere geliştirilmektedir [35].

FDM'ler, zorlu çalışma koşullarında özelliklerini koruyabilen ve işlevini bozmadan yerine getirebilen mühendislik malzemeleridir [36]. FDM'lerin yapısı ve bileşimi, derecelendirilmiş değişikliklere tabidir ve bu değişiklikler malzemenin özelliklerini çeşitlendirir [44]. FDM'ler, belirli özelliklere sahip tercih edilen yapılarla yüksek performanslı ve mikroskobik açıdan homojen olmayan bileşimlere sahip mühendislik malzemeleridir [37]. Sürekli FDM'lerde, malzemenin her bir bölgesinin özelliklerini belirlemek için belirgin herhangi bir bölge veya çizgi fark edilmez. Ancak, kademeli FDM'lerde, malzemenin yapı taşları katmanlar halinde ve/veya ayrılmış olarak gözlemlenebilir [38]. Şekil 2.3'de FDM'lerin sürekli ve kademeli olarak şemaya bağlı gösterimi sunulmuştur.

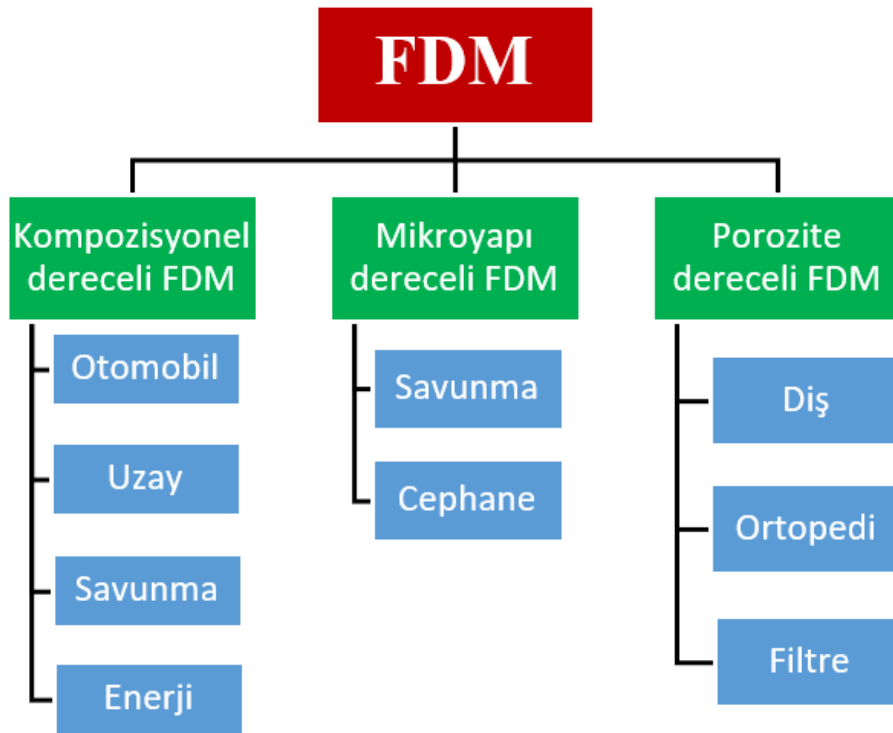


Şekil 2.3 FDM'lerin sürekli ve kademeli olarak şemaya bağlı gösterimi [36]

FDM teknolojisinin belirgin özelliklerinden biri, bileşiminin ve yapısının hacmine bağlı olarak aşamalı bir şekilde değişmesidir [39]. Kendisini oluşturan bileşenlerden farklı benzersiz özelliklere sahip olabilirler. FDM'lerde, takviye oranı bir yüzeyden diğerine değişebilir. Bu durum, malzemenin farklı yüzeylerinin farklı özelliklere sahip olmasına ve bu nedenle esnek bir davranış sergilemesine yol açar. Örneğin, bir yüzey daha yüksek termal direnç ve mekanik mukavemet gösterebilirken, diğer yüzey farklı özellikler sergileyebilir [40].

2.3.1 FDM'lerin Kullanım Alanları

FDM teknolojisinin önemli özellikleri nedeniyle, hemen hemen tüm endüstrilerde tercih edilmektedir. FDM'nin gelecekte başka alanlarda da kullanılma potansiyeli büyüktür, ancak günümüzde çeşitli endüstrilerde özel uygulamalarında kullanılmaktadır. [41]. FDM'nin geniş bir şekilde kullanıldığı alanlar arasında otomotiv, havacılık, savunma, biyomedikal, denizcilik, enerji, optoelektronik, termoelektronik, elektrik ve elektronik bulunmaktadır. Şekil 2.4'te farklı FDM türleri ve bunların kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 2.4 FDM türleri ve uygulama alanları

FDM'ler, metal-seramik bağlarda termo-mekanik uyumsuzlukları minimize etme konusunda son derece etkilidir ve bu özellikleri sayesinde bağ ayrışmasını önler. Gelecekte, FDM'lerin talep göreceği çalışma koşulları, olağanüstü termal, kimyasal ve mekanik özellikler gerektiren ve zorlu iş ortamlarında çalışacak uygulamaları içerecektir. FDM'nin bu potansiyeli, gelecekte tokluk ve sertlik gibi birbirine zıt özelliklerin aynı yapısal ve mühendislik uygulamalarında kullanılmasını kapsayacaktır. Üretim maliyetlerinin düşmesiyle birlikte, FDM'lerin mühendislik alanında önemli bir malzeme haline gelmesi ve gelecekte daha geniş bir uygulama alanına sahip olması beklenmektedir.

2.3.2 FDM'lerin Üretim Metotları

FDM'lerin denizcilik, havacılık, imalat, otomotiv, madencilik ve biyomedikal gibi mühendislik sektörleri gibi çok çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Farklı uygulamalar, FDM teknolojisinin gelişimi için gerçekleştirilen çeşitli projelerde derinlemesine araştırmaların önemli katkılar sağlamıştır. Ancak, dereceli malzeme yapılarından etkin bir şekilde faydalanabilmek için FDM üretimi gereklidir. Bu yüzden, yıllar içinde çeşitli FDM üretim yöntemleri geliştirilmiştir, bu da üstün özelliklere sahip bu malzemelerin ihtiyaçlarını karşılamaya yöneliktir.

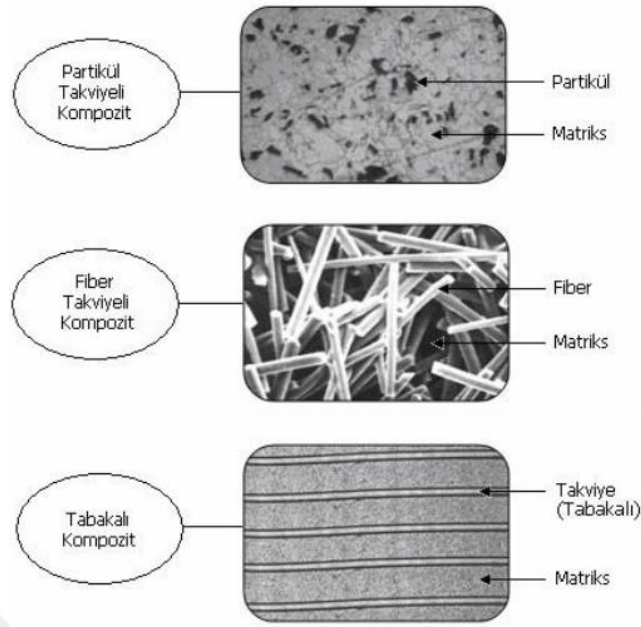
FDM üretim yöntemleri arasında kimyasal buhar biriktirme, toz metalürjisi, fiziksel buhar biriktirme ve santrifüj döküm gibi çeşitli yöntemler mevcuttur [42]. Bu üretim metotları aşağıda listelenmiştir.

- Gaz tabanlı yöntemler, arasında kimyasal buhar biriktirme/infiltrasyon, ısıl püskürtme ve yüzey reaksiyonu yöntemleri bulunmaktadır.
- Sıvı tabanlı yöntemler, santrifüj döküm, yanma tepkimeleri, şerit döküm, slip döküm, jel döküm, elektroforetik bırakıntı, yönlü katılaşma ve sedimentasyon yöntemleri bulunur.
- Katı tabanlı yöntemler ise plazma sinterleme ve toz metalürjisi yöntemleridir.

2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, takviye bileşeninin türüne göre;

- Partikül takviyeli,
- Fiber takviyeli
- Tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmış ve aşağıdaki Şekil 2.5'te sunulmuştur [43].



Şekil 2.5 Takviye bileşenlerine göre kompozit malzemeler [44]

Matris bileşenine göre kompozit malzemeler ise matris malzemesinin cinsine göre yapılan sınıflandırmadır. Matris bileşimine göre beş farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bunlar;

- Metal matrisli kompozitler (MMK)
- Seramik matrisli kompozitler (SMK)
- Polimer matrisli kompozitler (PMK)
- Karbon-karbon matrisli kompozitler (KKK)
- Cam matrisli kompozitler (CMK)

2.4.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

MMK'ler, geleneksel mühendislik malzemelerine göre gelişmiş özellikleri sayesinde birçok avantaj sunmakta ve piyasada tercih edilmektedir. Diğer metallerle karşılaştırıldığında (takviye kullanılmayan), yüksek ortam sıcaklıklarında kullanılabilir, yüksek özgül dayanıma sahip, kararlı, sertlik, rijitlik, sürtünme ve aşınma direnci gibi özelliklere sahip metal matrisli kompozit malzemeler vazgeçilmez hale gelmiştir.

Genellikle yaygın olarak Al, Ni, Mg gibi yüksek performanslı alaşımlar kullanılır. Takviye malzemeleri olarak ise genellikle whisker, parçacık, sürekli ve kısa fiberler şeklindedir. Bu malzemeler seramikler (örneğin B, C, SiC ve Al_2O_3 gibi) veya metaller (örneğin Tungsten (W), Çelik gibi) gibi malzemelerden üretilir.

MMK'ların özellikleri; kullanılan matris tipi ve takviye oranı, üretim koşulları, takviye oranı/matris tipi arayüzünün özellikleri ve yapısal özelliklerine bağlıdır. Metal matrisli kompozitlerin üretimindeki en önemli amaç yüksek özgül mukavemetli ve sertlikli hafif malzemeler elde etmektir [45].

2.4.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

SMK'ler, yüksek sıcaklık çalışması gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Bu malzemeler, sert ve kırılğan bir yapıya sahiptirler. Düşük kırılma ve tokluk özelliklerine sahip olmalarıyla birlikte, termal şoklara karşı dayanıklılık göstermezler. Ancak düşük yoğunlukları, yüksek çalışma sıcaklıkları ve elastik modülleri ile dikkat çekerler. Elektriksel olarak yalıtkan özellikler sergilerler.

MMK'larda olduğu gibi, SMK'larda da fiber ve parçacık takviyelerinden bahsedilebilir. SMK'de, SiO_2 , $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$, $\text{Li}_2\text{O}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ gibi seramikler matris bileşeni olarak tercih edilir. Takviye bileşeni olarak SiC , B_4C , Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , BN , AlN , gibi malzemeler tercih edilir.

2.4.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozitler (PMK), hafif olmaları, kolay üretilirlikleri ve iyi kimyasal dirençleri nedeniyle tercih edilirler. Bu kompozitlerde genellikle termoset ve termoplastikler kullanılır. Termoset malzemeler arasında epoksi ve polyester bulunurken, termoplastik malzemeler arasında polyester, poliamid, politetrafloretilen ve polietilen gibi malzemeler yer alır. PMK malzemeler, diğer kompozit malzemelere kıyasla daha ekonomiktir ve bu nedenle endüstride geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Örneğin, spor ve tarım ekipmanları ile uçak ve helikopter parçaları gibi üretiminde kullanılırlar.

2.4.4 Karbon- Karbon Kompozit Malzemeler

KKK'ler karbon fiber takviyeli, karbon matrisli malzemelerdir. Bu malzemeler, ileri teknoloji ve gelecekte daha çok kullanılacak mühendislik malzemeleri arasındadır [46]. Malzemeler 200°C üzeri sıcaklıklara karşı yüksek elastik modülüne, çekme dayanımına, sürtünme direncine, yüksek kırılma tokluğuna ve iyi tribolojik özelliklere sahip olması beklenilmektedir [47].

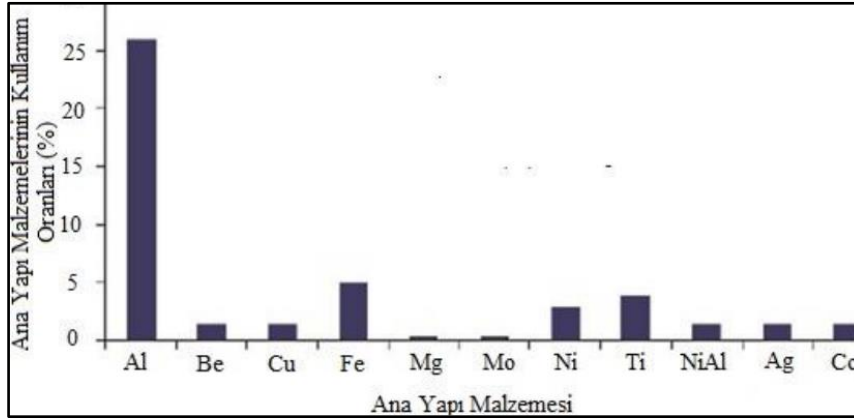
2.4.5 Cam Matrisli Kompozit Malzemeler

CMK'ler yüksek sıcaklıklarda sağlanan dayanıklılık, SMK ya da CMK'ların en belirgin özelliğidir. Camın kırılma dayanıklılığı, yüksek modül, süneklik ve/veya dayanım gibi özelliklere sahip bir bileşenle takviye edilip artırılabilir. Kompozitlerin mikro yapısını optimize ederek toplıştırma mekanizmalarını etkin hale getirmek, kırılma dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilir. Genellikle CMK egroz sistemlerinde, motor rezistans parçalarında kullanılır [48].

2.5 MMK'lerde Kullanılan Matris Malzemeleri

Metal esaslı kompozitlerde, çeşitli metaller ve bu metallerin alaşımları, ana yapı malzemesi olarak tercih edilir. Ana yapı malzemesinin seçiminde, yoğunluk, dayanıklılık, korozyon direnci, esneklik ve maliyet gibi faktörler kritiktir [49]. Metal esaslı kompozitler, kullanılan ana yapı malzemesine göre sınıflandırılır. Al, Ti, Mg, Cu gibi metaller ve bu metallerin alaşımları ile süper alaşımlar en yaygın kullanılan ana yapı malzemeleri olarak tercih edilir. Al ana yapısına sahip kompozitler, denizcilik, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, alüminyum içerisine Al_2O_3 , B_4C ve SiC , gibi yaygın kullanılan takviyelerin etkili bir şekilde karıştırılması ile kompozit malzeme elde edilmesi üzerinde yoğun bir araştırma yapılır. Magnezyum ana yapı kompozitlerin düşük yoğunluğu, uzay endüstrisi için geliştirilmiş olmalarına rağmen, düşük ısı iletkenliği ve imalatındaki sınırlamalar nedeniyle, alüminyum kadar yaygın olarak kullanılmazlar. Titanyum ve alaşımları, mükemmel korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda iyi dayanım sağladığından, metal matrisli kompozitlerde ana yapı malzemesi kullanılmaktadır. Özellikle çok yüksek hızlarda çalışan füze ve uçak sistemlerinde, yüksek sıcaklıklarda dayanıklılıklarını korudukları için tercih edilmektedir. Ancak, titanyum reaktif bir metal olduğundan işlem yapılırken havadaki metaller ile tepkimeye girme eğilimi dikkat edilmelidir. Bakır ana yapı kompozitler ise yüksek sıcaklık dayanımı ve ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklık özellikleriyle diğer metal esaslı kompozitlere göre daha üstün yapıya sahiptir. Süper alaşımlar genelde, gaz türbini kanatlarının üretiminde kullanılan malzemelerdir [50]. Şekil 2.6'da metal esaslı kompozitlerde kullanılan çeşitli ana yapı malzemeleri ve bunların kullanım oranlarına dair bilgiler yer almaktadır. Metal esaslı

kompozitlerde, en yaygın olarak kullanılan ana yapı malzemesinin alüminyum olduğu görülmektedir [51].



Şekil 2.6 MMK’lerde kullanılan ana yapı malzemeleri [51]

2.5.1 Alüminyum Matrisli Kompozitler

Alüminyum alaşımları, çeliğe kıyasla yüksek elektriksel, düşük yoğunluk, termal iletkenlik ve korozyon direncine sahiptirler. Ayrıca, süneklikleri sayesinde kolayca şekillendirilebilirler. Ancak, düşük ergime noktasına sahip olmaları alüminyum için dezavantaj olabilir. Alüminyumun çekme mukavemeti çeliğe göre daha düşük olabilir, ancak hafifliklerinden dolayı özgül mukavemetleri daha yüksektir.

Alüminyuma eklenen Mg, Zn, Cu gibi alaşım elementleri ile elde edilen alaşıma uygulanan ısıtma işlemleri dayanıklılığında ve sertliğinde artış elde edilebilir. Bu önemli ısıtma işlemlerinden biri çökelme sertleşmesi işlemi, çözeltiye alma ve çökelme (yaşlandırma) aşamalarından oluşmaktadır. İlk aşama olan çözeltiye alma işlemi, alaşımın genellikle 430°C ile 550°C arasındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulması ve ardından uygun bir sıvı içinde hızlıca soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Bu işlemin ardından, oluşan aşırı doymuş katı çözelti içindeki katı fazın, alaşımda dayanıklılığı artıracak çökelme fazına dönüşebileceği bir sıcaklıkta, yeterli bir süre boyunca bekletilerek ve daha sonra oda sıcaklığına soğutulularak çökelme işlemi tamamlanır. Bu işlem, belirli bir zaman diliminde gerçekleştiği için yaşlandırma sertleşmesi olarak da adlandırılır [52].

2.5.2 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanacak Isıtma İşlemleri

Isıtma işlemi tanımı olarak bir metal ürününün metalürjik yapısını değiştirmek, mekanik özelliklerini geliştirmek ve kalıntı gerilmelerini azaltmak için uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemi, çeliklere

yapılan işlemden farklıdır. Bu işlem, alaşım elementleri Mg ve Cu ile gerçekleştirilir. Bu elementler sayesinde alüminyum alaşımına ısıtma işlemi yapılabilme ve yaşlandırılabilme özelliği kazandırılır. Isıtma işlemleri için kullanılan kodlama (harfler, rakamlar) ve bunların tanımları Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2 Isıtma işlemleri için kullanılan kodlama ve bunların tanımları

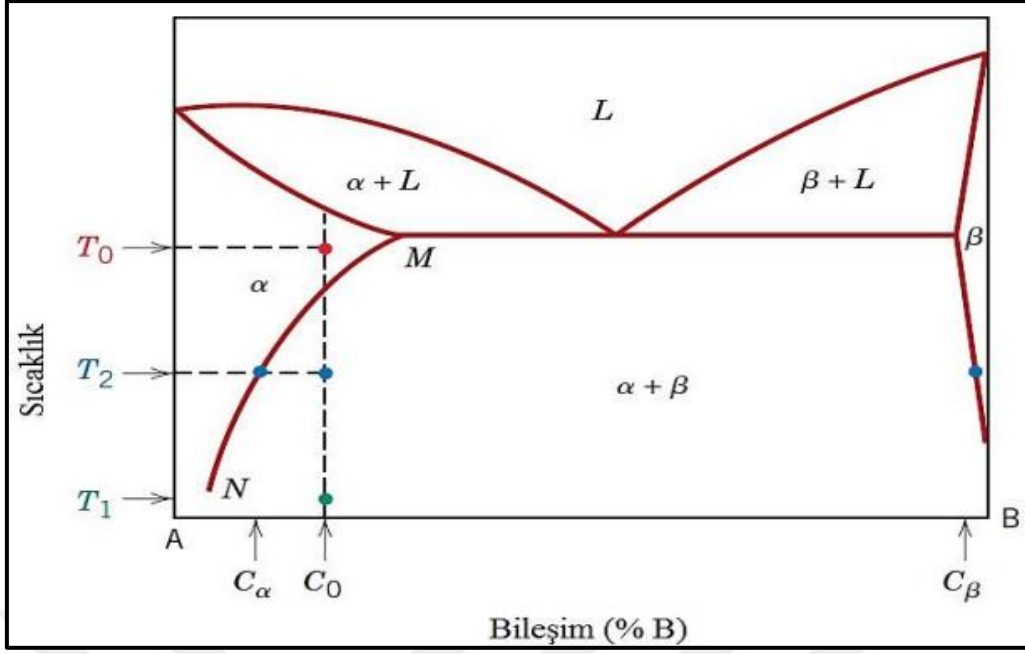
Isıtma İşlemi	Tanımlama
F	İmalat sonrası herhangi bir işlemten geçmemiştir.
O	Dövme alaşımların işlenebilirlik özelliklerini artırmak için yumuşatma tavlama uygulanmıştır.
H1	Sadece plastik bir şekil verilmiştir.
H2	Parçaya önce plastik şekil verme işlemi, ardından ek bir ısıtma işlemi uygulanmıştır.
H3	Düşük sıcaklıklarda normalizasyon için ısıtma işlemi veya imalat sıcaklığından yararlanılarak yapılan normalleştirme işlemidir.
H4	Plastik şekillendirilmiş ve boyanmıştır.
T1	Döküm ve ekstrüzyon esnasında oluşan sıcaklıktan soğutulmuş ve doğal yaşlanmaya bırakılmıştır.
T2	Yüksek sıcaklıktan sonra soğutulmuş, ardından soğukta plastik şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmıştır.
T3	Çökelme sertleştirme uygulanmış, ardından soğuk dövülerek ve doğal yaşlandırılmıştır.
T4	Çökelme sertleştirme uygulanmış ve doğal yaşlanma sürecine tabi tutulmuştur.

Tablo 2.2 Isıl işlemler için kullanılan kodlama ve bunların tanımları (devamı)

T5	Yüksek sıcaklıktan soğutulduktan sonra yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.
T6	Çökelme sertleşmesi işlemi gerçekleştirilmiş yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.
T7	Çökelme sertleşmesi işlemi gerçekleştirilmiş ve aşırı yaşlandırılmaya tabi tutulmuştur.
T8	Çökelme sertleşmesi işlemi gerçekleştirilmiş ardından soğuk dövülerek ve yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.
T9	Çökelme sertleşmesi işlemi gerçekleştirilmiş yapay yaşlandırmaya tabi tutulduktan sonra soğuk dövülme işlemi gerçekleştirilmiştir.
T10	İmalat sıcaklığından soğutulduktan sonra soğuk dövülerek yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.

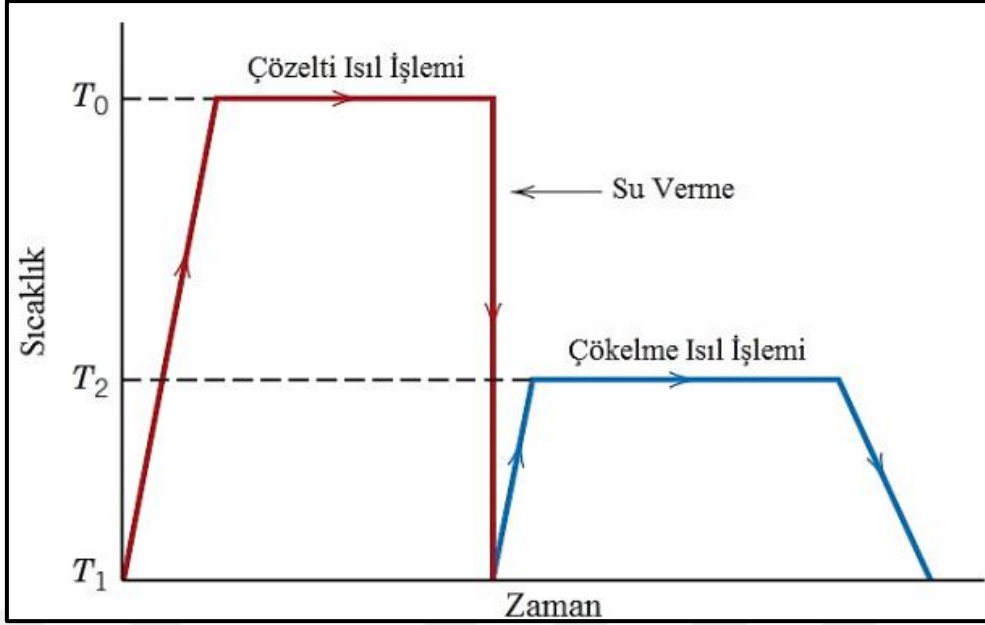
Alaşımın çözünürlük sınırları içinde belirli bir sıcaklıkta ısıtılması ve sonrasında belirli bir hızda soğutulmasıyla, ikincil fazın ana faz içinde homojen bir şekilde çökeltiler oluşturularak alaşımın sertlik ve mukavemetini artırmak için uygulanan işleme çökelme sertleşmesi denir. Bu ikincil faz partikülleri, çökelti oluşturur ve homojen bir şekilde dağılır. Bu partiküller, alaşımın mukavemetinin artmasını sağlayarak dislokasyon hareketlerini kısıtlayabilir veya durdurabilir [53].

Genellikle iki farklı ısıl işlemle çökelme sertleşmesi gerçekleştirilir. İlk olarak, Şekil 2.7’de bir alaşımın α fazında bulunan bir C_0 bileşimine sahip olduğu durumda, alaşımın T_0 sıcaklığına kadar ısıtılması ve mevcut olan tüm β fazının T_0 sıcaklığında tamamen çözünmesini sağlayan bir çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanır. Bu noktada, alaşım sadece C_0 bileşimindeki α fazından oluşur. Bu işlem, birçok alaşım için oda sıcaklığı olan T_1 sıcaklığına soğutma ile takip edilerek, herhangi bir β fazının oluşumunu engellemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu nedenle, T_1 sıcaklığında sadece aşırı doymuş bir α -fazı katı çözeltisi bulunur, bu da alaşımın nispeten yumuşak ve zayıf olduğu anlamına gelir [53].



Şekil 2.7 A-B ikili faz diyagramı ve çökelme ile sertleşebilen C_0 bileşimi [54]

Sonrasında, çökelme ısıl işlemi sırasında; aşırı doymuş katı çözelti, Şekil 2.8'deki T_2 sıcaklığındaki $\alpha+\beta$ iki fazlı bölgede ısınır. Yaşlandırma olarak adlandırdığımız süreç; β çökelti fazı, C_β bileşiminin ince dağılmış parçacıkları şeklinde oluşmasıyla başlar. T_2 sıcaklığında uygun yaşlanma süresinin ardından alaşım oda sıcaklığına soğutulmaya bırakılır. Bu aşamada soğutma hızının önemli yoktur. Şekil 2.8'de zaman-sıcaklık grafiğinde çözelti ve çökelme ısıl işlemleri gösterilmiştir. Oluşan β parçacıklarının özellikleri, işlem sonrası alaşımın mukavemeti ve sertliği açısından çökelme sıcaklığı ve yaşlandırma süresi ile bağlantılıdır. Bazı alaşımlar için ise oda sıcaklığında uzun bir süre boyunca kendiliğinden yaşlanma da mümkündür. Bu işleme doğal yaşlandırma (T4) işlemi adı verilir [54].



Şekil 2.8 A-B ikili alaşımındaki C_0 bileşiminin çökelme sertleşme işlemi [54]

2.6 MMK’larda Kullanılan Takviye Malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde, takviye malzemeleri seçilirken matris malzemesiyle uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, ısı kararlılık, yoğunluk, ısı genleşme katsayısı, ergime sıcaklığı, kristal yapı boyutu, kimyasal bileşim ve şekil gibi özellikler dikkate alınır. Bu malzemeler genellikle kimyasal yapılarına göre dört ana grupta incelenmektedir.

- Oksitler,
- Karbürler
- Nitrürler
- Diğer (paslanmaz çelik, karbon vb.)

MMK’lerin temel hedefi, yüksek dayanıklı ve düşük yoğunluklu dayanımlı malzemeler üretmektir. Bu özellikler, yapıya eklenen seramik fazlar aracılığıyla elde edilir.

2.6.1 Titanyum Dibörür (TiB_2)

Titanyum diborür (TiB_2), geçiş metali bir borür olup geçiş metali benzeri IV-VI grubundan refrakter boritlerin tipik bir örneğidir.

Geçiş metalleri tarafından oluşturulan diborürler, genellikle yüksek sertlik, mukavemet, yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek oksidasyon direnci gibi özellikleri

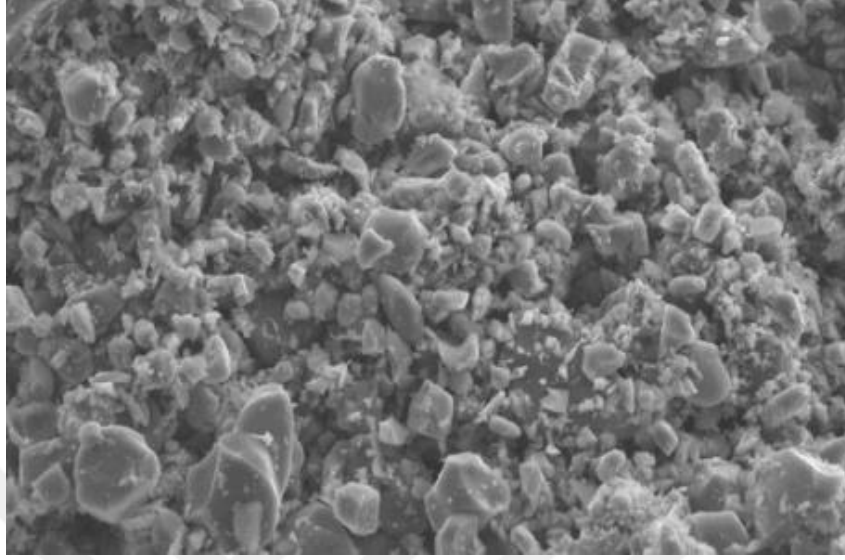
sergilerler. Örneğin, titanyum diborür, bu özelliklere ek olarak çok iyi bir ıslanabilirlik gösterir. Yüksek sıcaklıklarda daha da güçlü hale gelir, üstün kırılma dayanıklılığına ve daha yüksek bir sertliğe sahiptir. Aşağıda Tablo 2.3’de TiB_2 özellikleri sunulmuştur.

Tablo 2.3 Titanyum diborür özellikleri [55]

Özellikler	Değer
Kimyasal Formül	TiB_2
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Renk	Gri
Mol Ağırlığı	69.54 g/ mol
Yoğunluk	4.52 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	2920 °C
Sertlik	25 GPa
Vickers Sertliği	3370 HV
Termal İletkenliği	24 ~ 26.3 W/ m.K
Elektrik Direnci	$9 \cdot 10^{-8} \Omega.cm$
Çekme Mukavemeti	127 MPa

Titanyum diborür, yüksek sertlik, elastisite modülü ve yüksek sıcaklıkta güçlü mukavemetiyle öne çıkar ve aşınmaya dayanıklı parçaların ve kesici takım uçlarının imalatında sıklıkla kullanılır. Ayrıca, kumlama ve sert partiküllerin püskürtüldüğü nozulların kaplanması ve tane boyutlarının modifikasyonu gibi işlemlerde de tercih edilir. Şekil 2.9’da TiB_2 tozuna ait SEM görüntüsü yer almaktadır. TiB_2 askeri

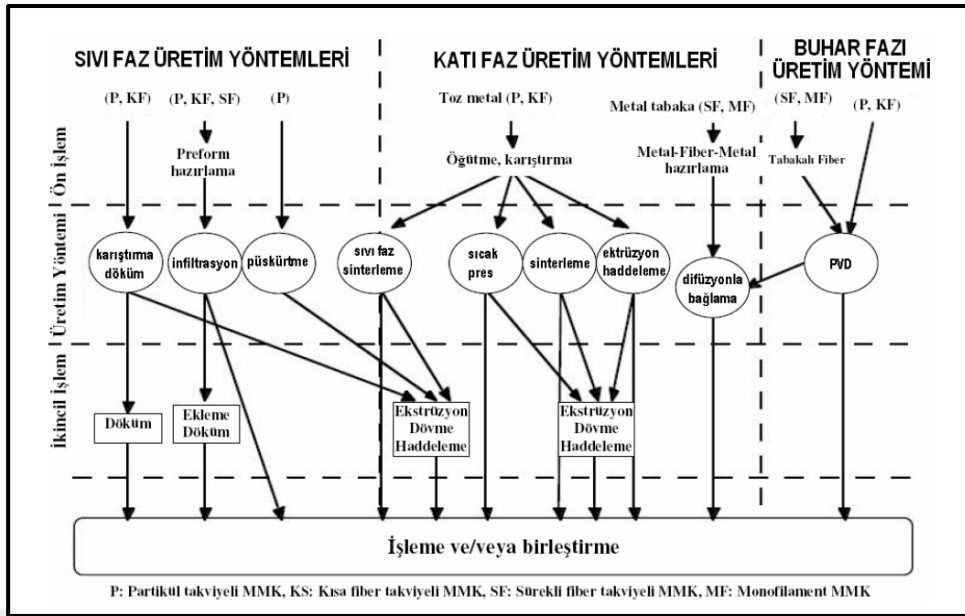
uygulamalarda seramik zırh olarak, metal ve seramik matrisli kompozitlerde dispersan olarak, fiber optik kabloların koruma altlığı ve refrakter malzeme olarak çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 TiB₂ tozuna ait SEM görüntüsü [56]

2.7 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi

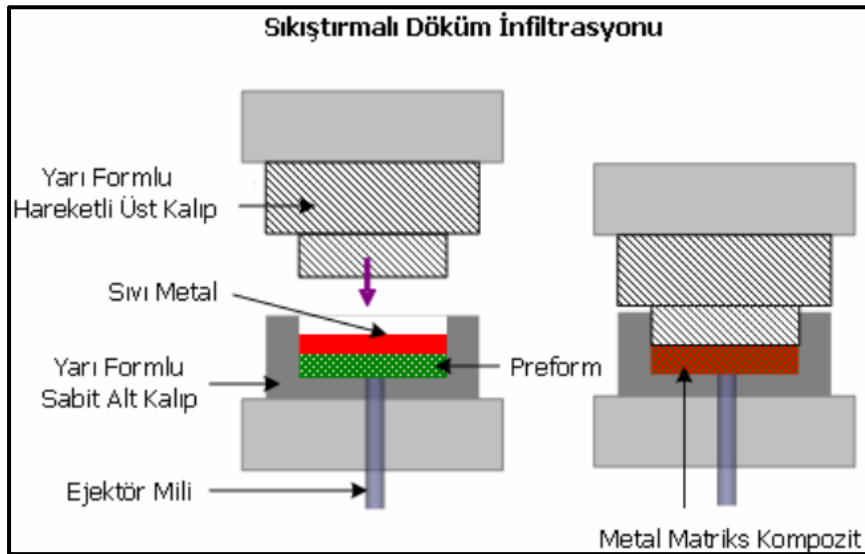
Metal matrisli kompozit malzemelerin çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır. Hangi yöntemin tercih edileceği, malzemeden beklenen özellikler, maliyet, ürün sayısı, takviye elemanlarının dağılımı (parçacık veya lif), matris alaşımı ve kullanım alanı gibi faktörler göz önünde bulundurularak belirlenir. Üretim yöntemi seçilirken işleme adımının da dikkate alınması gerekmektedir. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri genellikle sıvı faz, katı faz ve buhar fazı üretim teknikleri olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. MMK'ların üretim yöntemleri ile ilgili akış şeması Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 MMK'ların üretim yöntemleri akış şeması

2.7.1 Sıkıştırılmalı Döküm İnfiltrasyon Yöntemi

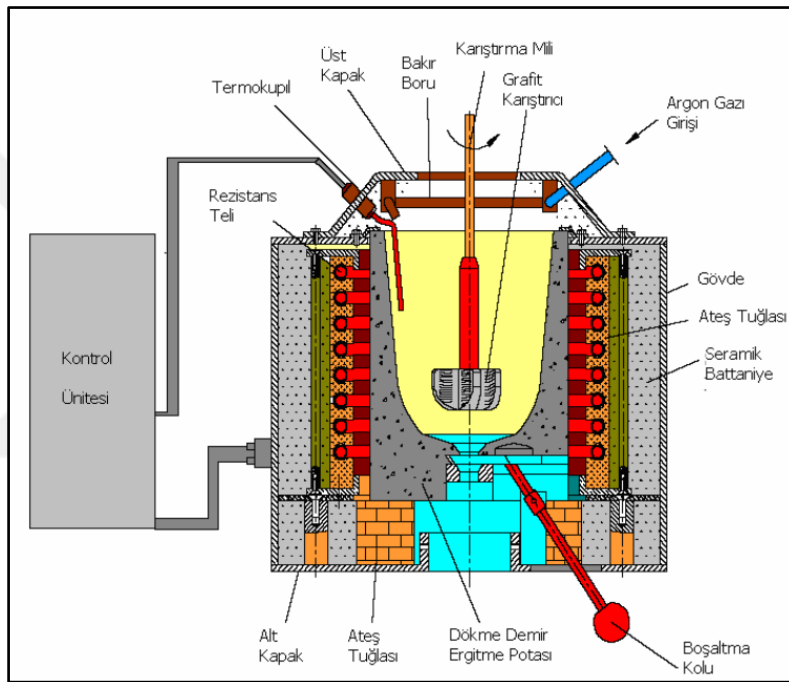
Sıkıştırılmalı döküm infiltrasyonunda, gözenekli seramik preform bir kalıba yerleştirilir. Alt kalıp ve hareketli üst kalıp, infiltrasyon sisteminin temel parçalarıdır. Üst kalıp, sıvı metalin gözenekli seramik preform içine doğru nüfuz etmesini sağlamak için mekanik basınç uygular. İnfiltrasyon işlemi tamamlandığında, numune soğutulur ve kalıptan çıkarılarak metal matrisli kompozit malzeme elde edilir. Şekil 2.11'de sıkıştırılmalı döküm yöntemi şematik gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Sıkıştırılmalı döküm infiltrasyon yöntemi şematik gösterimi

2.7.2 Karıştırılmalı (Vorteks) Döküm Yöntemi

Vorteks veya karıştırılmalı döküm yöntemi, matriks alaşımının sıvı-katı aralığında karıştırılmasını içerir. Belirli bir sistemde, partikül takviye elemanı, Şekil 2.12'deki görüldüğü gibi bir karıştırıcı kullanılarak sıvı metal matriks alaşımına eklenir. Bu karışım, matriks ve takviye fazları homojen hale gelene kadar devam eder ve ardından kalıba dökülür. Takviye fazının döküm sırasında yer çekimi etkisiyle çökmesini önlemek için, sıvı metal yerine yarı katı bir metal tercih edilir. Kalıpta soğuması için bırakılan numune, soğuma tamamlandıktan sonra çıkarılır ve metal matrisli kompozit malzeme elde edilmiş olur.

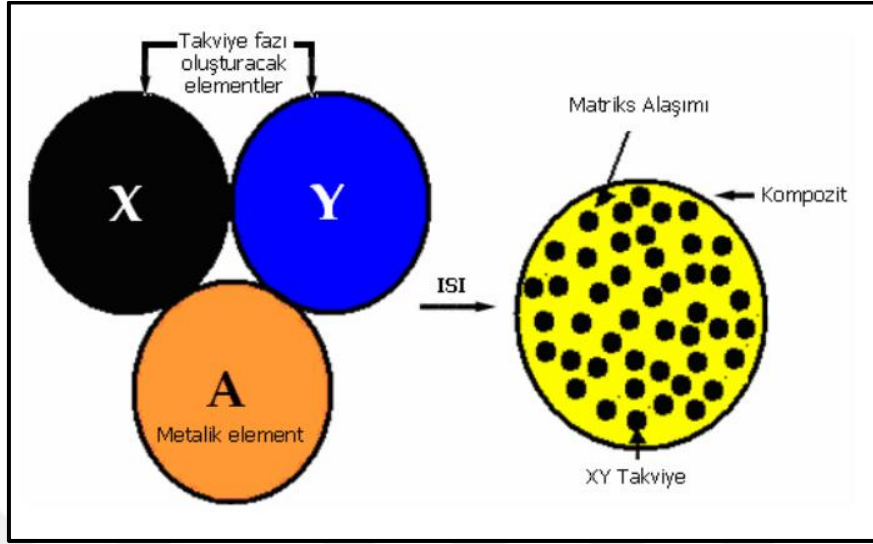


Şekil 2.12 Karıştırılmalı (vorteks) döküm yöntemi şematik gösterimi

2.7.3 İn-sute Yöntemi

Metal matrisli kompozitler, üretim yöntemleri bakımından in-situ (yerinde oluşan) ve ex-situ (dışarıdan ilave edilen) olarak iki gruba ayrılabilir. Ex-situ kompozitler, önceden hazırlanmış seramik güçlendiricilerin sıvı metale eklenmesi veya hazırlanmış seramik preformların sıvı metal tarafından emilmesi esasına dayanır. İn-situ yöntemiyle üretilen kompozitler, aşağıdaki Şekil 2.13'de gösterildiği gibi takviye fazının sıvı metal içinde elementlerin veya bileşiklerin ekzotermik reaksiyonları sonucunda doğal olarak oluşmasına dayanır. İn-sute yönteminin avantajları arasında takviye ile matriks arayüzeyinin temizliği, takviye fazının

homojen dağılımı, termodinamik olarak stabil olması ve maliyet açısından avantajlı olması gibi özellikler bulunmaktadır [57-58].



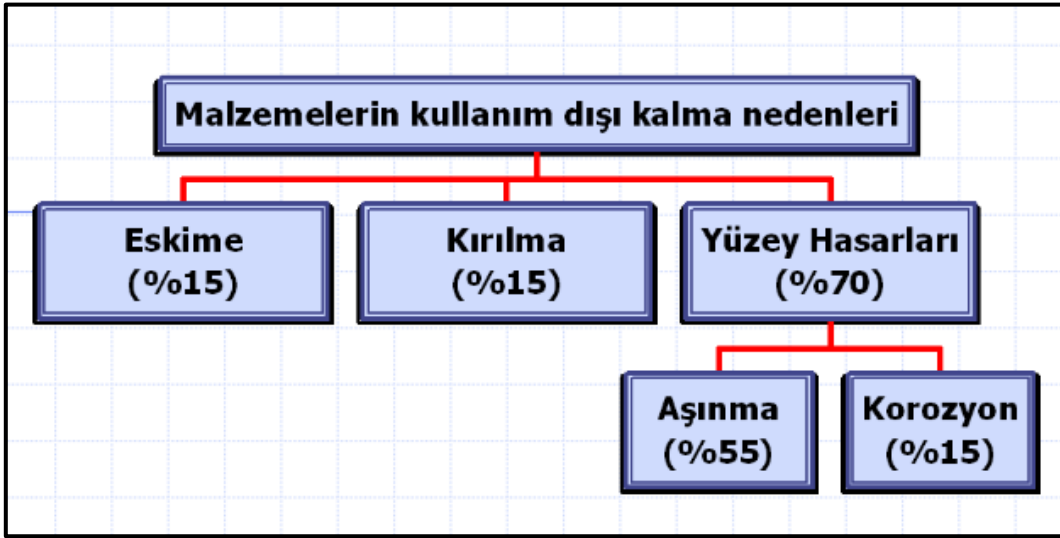
Şekil 2.13 İn-sute yöntemi şematik gösterimi [57-58]

MMK'lerin in situ yöntemiyle sentezlenmesi, kompozit içindeki partikül-matris ara yüzeyini kolaylaştırır ve daha küçük takviye partikül boyutları sağlayarak metal özelliklerinin daha iyi olmasını sağlar [58-59]. Alüminyum alaşımları ile TiB_2 ve TiC seramik takviyelerinin, SiC ve Al_2O_3 'e göre daha uyumlu olduğu gösterilmiştir [46]. Tjong ve ekibinin çalışmaları [60], in-situ TiB_2 partiküllerinin varlığının, termal döngü sırasında alüminyumun boyutsal kararlılığını daha iyi sağladığını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalarda in-situ yöntemiyle başarıyla TiB_2 FDM üretilmiştir. Başka bir çalışmada ise $Al-Al_3Ti$ FDM üretimi in-situ savurma dökümü ile gerçekleştirilmiştir [61]. Al_3Ti sistemi üretiminde ultrason destekli in-situ tekniğinden faydalanılmıştır [62]. $Al-7Si$ alaşımına in-situ yöntemiyle TiB_2 takviyelendirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir [59]. İn-situ kompozitler, yüksek sıcaklıklarda uygulamalar için iyi bir adaydır [59].

3

AŞINMA

Aşınmanın çok farklı şekilde tanımlamaları vardır. Genel itibariyle hareket halindeki yüzeylerin sürtünme etkisiyle malzemede meydana gelen kütle kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Malzemede enerji kayıplarına temas şartları, dış (mekanik gibi) ve iç faktörler (malzeme özellikleri gibi) neden olabilmektedir. Bu kayıplar, aşınma sonucunda yüzeyler arasında titreşim ve gürültü oluşturabilir, bu da malzemenin beklenen performansını etkileyebilmektedir. Aşağıda Şekil 3.1’de malzemelerin kullanım dışı kalma nedenlerinin yüzdelik dağılımları verilmiştir.



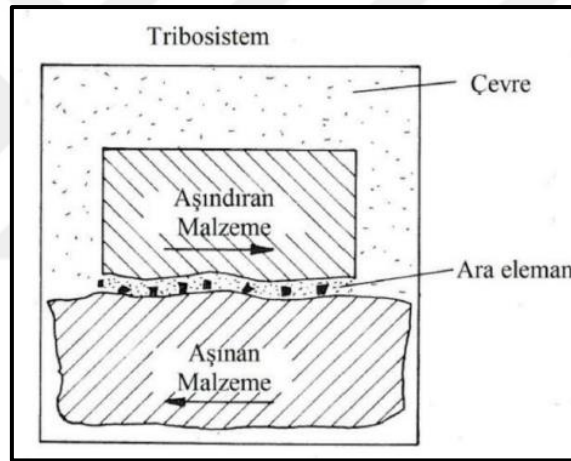
Şekil 3.1 Malzemelerin kullanım dışı kalma nedenleri

Metal matris kompozitler, yüksek aşınma dirençleri nedeniyle genellikle daha uzun ömürlüdür. Ancak, kompozit malzemelerin aşınma direnci, malzemelerin iç ve dış etkenler altındaki tepkilerinde nasıl davrandığına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. [58].

Kompozit malzemelerde aşınmayı etkileyen faktörler Tablo 3.1’de ve aşınma olayının oluşumu Şekil 3.2’de görsel olarak sunulmuştur.

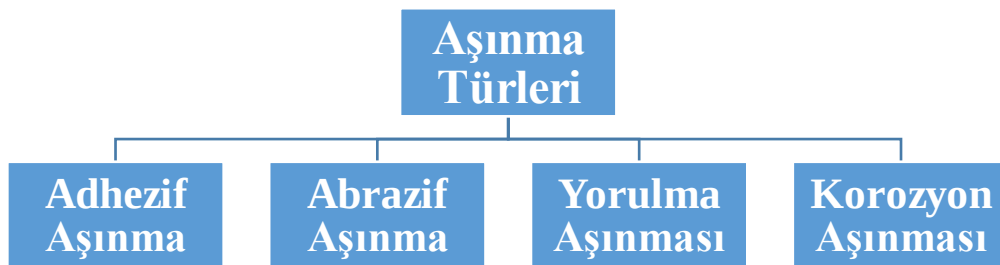
Tablo 3.1 Aşınmayı etki eden faktörler

S.Nu	İç Faktörler	Mekanik ve Fiziksel Faktörler
1	Takviyenin hacim oranı	Kayma hızı
2	Takviyenin boyutu	Sıcaklık
3	Takviyenin şekli	Yük
4	Takviyenin tipi	Kaymanın oluştuğu malzeme
5	Matris malzemesi	Karşı malzeme



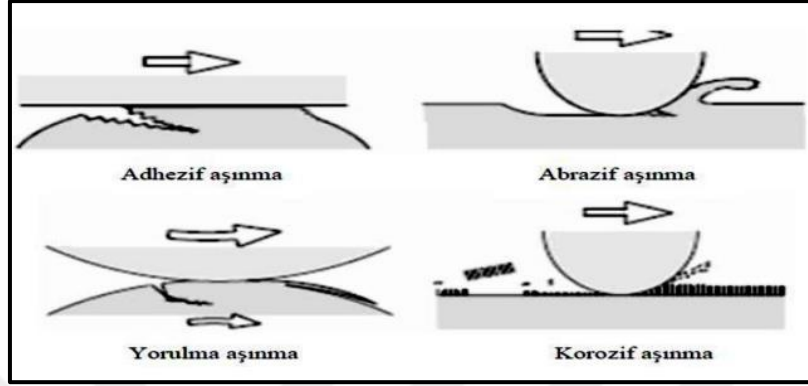
Şekil 3.2 Aşınmanın olayının oluşumu

3.1 Aşınma Türleri



Şekil 3.3 Aşınma türleri

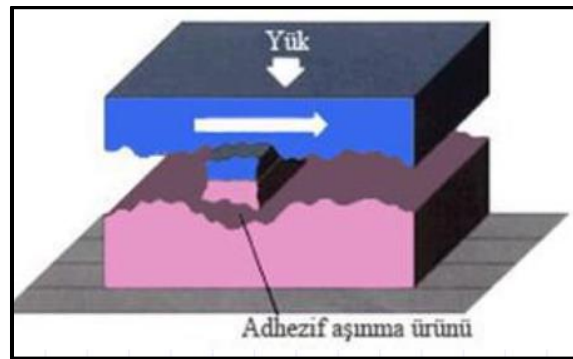
Bu sınıflandırma, aşınma sürecine etki eden faktörler arasında uygulanan kuvvet, aşındırıcı olarak kullanılan parçacığın türü, boyutu, temas geometrisi ve şekli gibi unsurları göz önünde bulundurarak yapılır. En yoğun aşınma genellikle abrazif aşınma türünde gözlemlenir [63]. Aşınma mekanizmaları Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Aşınma çeşitleri şematik gösterimi

3.1.1 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, kayma ve yapışma aşınması olarak da bilinir. Bu tür aşınma, kuru kayma yüzeylerinde temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan yüzeylerde sıklıkla görülür. İki düzgün katı cismin yağlamalı veya yağlamasız ortamda kayma temasıyla meydana gelir. Adhezyon, ara yüzeydeki pürüzlerin birbirine teması ile oluşur ve bu temas noktaları kayma sırasında kesilir. Bu süreçte, bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilir. Kayma devam ettiğinde, diğer yüzeye yapışmış parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki yüzeyden bağımsız aşınma parçacıkları olabilir. Şekil 3.5'de Adhezif aşınma ürünü gösterilmektedir.

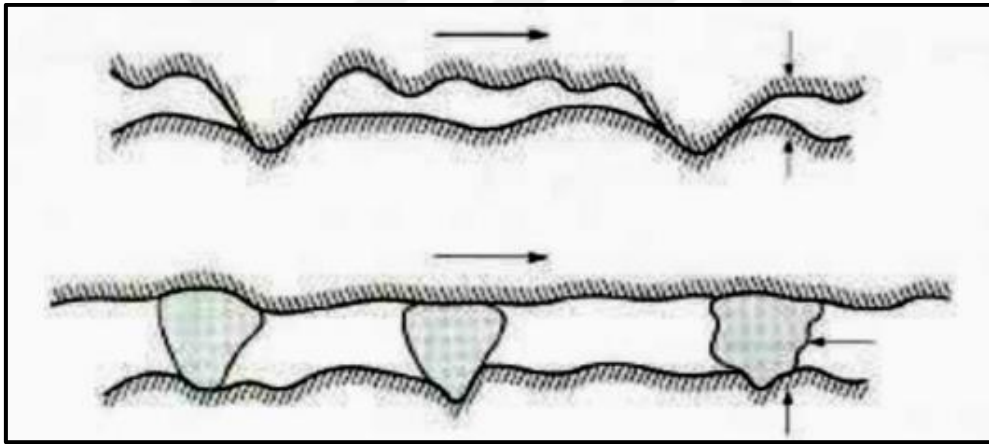


Şekil 3.5 Adhezif aşınma ürünü

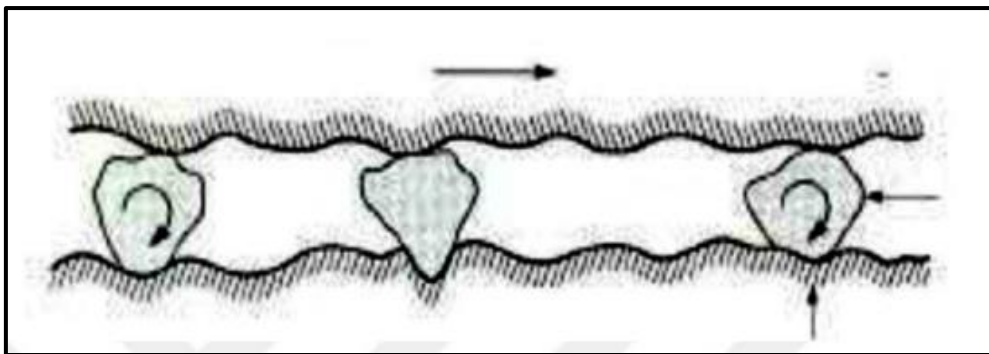
3.1.2 Abrazif Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da bilinen abrazif aşınma, adhezif aşınmaya göre az görülmesine karşın, sistemde hızlı bir şekilde hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Bu aşınma, birbirinden farklı sertlik ve pürüzlülükteki metal yüzeylerinin birbiriyle teması sonucunda ortaya çıkar. Sert parçacıkların, özellikle de yumuşak metale nüfus etmesi sonucunda abrazif aşınma meydana gelebilir. Bu mekanizma, dış kaynaklı toz parçacıkları veya bir motorun egzozundan çıkan yanma ürünleri gibi faktörler tarafından tetiklenebilir.

Sert yüzeyin, temas halindeki diğer yüzeyi kaydırmadan çizerek parçacıkları koparmasıyla meydana gelen aşınma türü, iki cisimli abrasif aşınma olarak adlandırılır. Şekil 3.6'da pürüzlü sert yüzey veya iki cisimli abrazif aşınma gösterilmiştir. Temas eden iki yüzey arasına daha sert parçacıklar eklenirse, aşınma bu kez iki yüzeyde de meydana gelebilir. Bu tür abrasif aşınmaya üç cisimli abrasif aşınma denir ve Şekil 3.7'de şematik gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Pürüzlü sert yüzey veya iki cisimli abrazif aşınma



Şekil 3.7 Üç cisimli abrazif aşınma

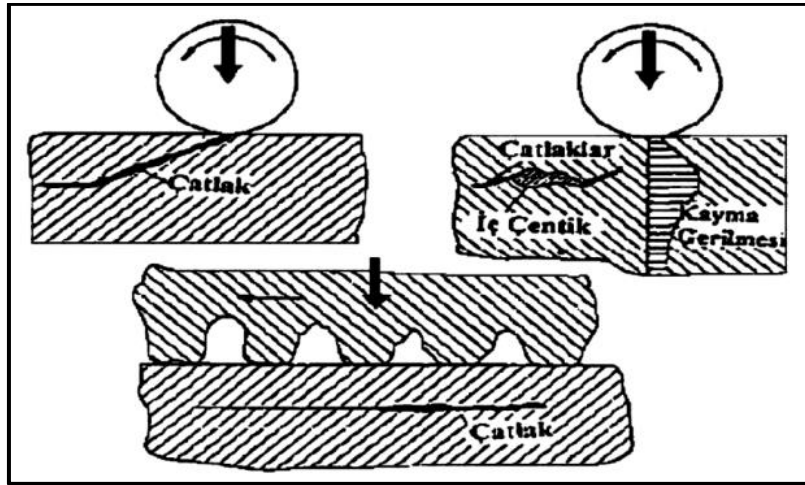
Abrasif aşınmada; genellikle sertlik artışı, yabancı partiküllerin sisteme ilave edilmesi ve deformasyon sertleşme hızının azalması gibi faktörler aşınma direncini artırır. Abrasif aşınmanın önlenmesi için uygun yüzey sertleştirme işlemlerinin uygulanması önerilmektedir.

3.1.3 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması genellikle değişken tekrarlı yüklerin etkisiyle ortaya çıkar. Tribolojik zorlamalar genelde yüzeyde görülen, zaman ve konuma bağlı olarak değişen mekanik gerilmeler sonucunda olduğundan, yorulma aşınması birçok aşınma sürecinde gözlenir. Sonuç olarak, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da parçacıkların yüzeyden ayrılmasına, çukurların ve oyukların oluşmasına neden olur.

Maksimum kayma gerilmelerinin olduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar oluşur. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerleyerek küçük çukurların oluşmasına yol açar. Bu tür aşınma genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma mekanizmalarının yüzeylerinde görülür [64].

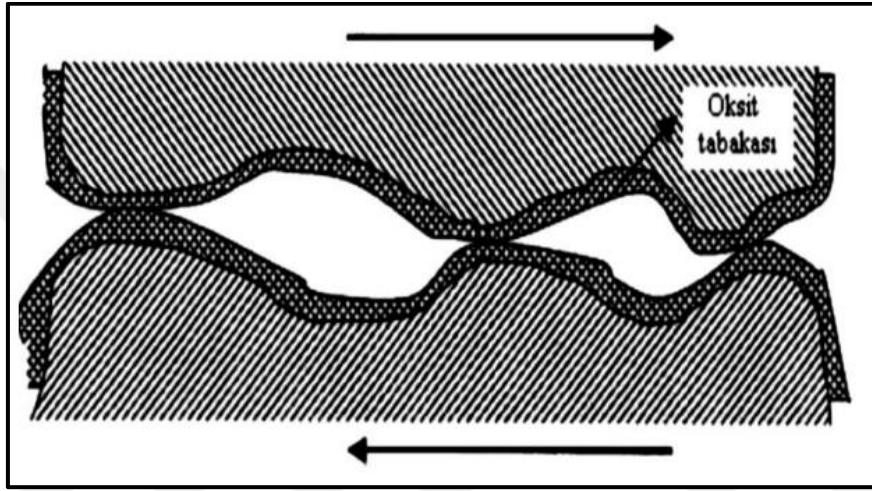
İyi bir yağlama genellikle bu tür aşınmanın oluşumunu engelleyemez. Pullanmayı başlatan çatlak bazen yüzeyde, bazen de yüzeyin altında olabilir. Şekil 3.8'de yüzey yorulması sırasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi görülebilir.



Şekil 3.8 Yüzey yorulma mekanizması

3.1.4 Korozi Aşınma

Eğer aşınan yüzeyler aynı zamanda korozyona maruz kalıyorsa, bunu korozi aşınma olarak adlandırırız. Kimyasal korozyon, tek başına meydana gelebileceği gibi diğer aşınma türleriyle birlikte de olabilir. Yüzeye sıkıca yapışan filmler oluşturan kimyasal reaksiyonlar, yüzey aşınmasını azaltabilir. Ancak, eğer film kırılabilir ve yüzeye zayıf bir şekilde bağlanıyorsa, aşınma hızı önemli ölçüde artabilir. Çünkü sürtünme sırasında filmler çatlayabilir ve kopabilir. Şekil 3.9'da korozyon aşınması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Korozi aşınma

4

TAGUCHİ YÖNTEMİ

Endüstriyel süreç geliştirme çalışmalarında deneylerin tasarımı için, en kısa sürede en fazla bilgiyi elde etmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Klasik olarak kabul edilebilecek bazı deney tasarım yöntemlerinin zorlukları, bu alanda yeni araştırmaların yapılmasına neden olmuştur. Taguchi yöntemi, 1980'lerden itibaren ürün geliştirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Genichi Taguchi, kaliteyi geliştirmek için deney tasarımına dayalı yöntem geliştirilmiştir. Bu metodoloji, robust tasarım, kısmi faktöriyel deney tasarımı ve ortogonal dizinler gibi kavramların bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. [65]. Hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmak Taguchi yönteminde temel amaçtır. Hedefe ulaşmak için, kontrol edilebilir faktörler belirlenmeli ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisi mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Bunun için bir ürün ve süreç geliştirme süreci planlanmalıdır. Taguchi yöntemi kullanılarak, çok sayıda deney yapılması gereken durumlarda, daha az deneyle sonuca ulaşılabilmektedir. Taguchi deneysel tasarımı sistem, parametre ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamadan (Şekil 4.1) oluşmaktadır.



Şekil 4.1 Taguchi tasarımının aşamaları [66]

4.1 Sistem Tasarımı

Metodun ilk adımı sistem tasarımıdır. Bu aşamada, mevcut materyallerin değerlendirilmesi yapılır ve aynı zamanda mevcut teknolojik yenilikler araştırılır ve sisteme entegrasyonunun fizibilitesi incelenir. Bu adımda amaç, en uygun maliyetle en iyi ürün tasarımını ve maksimum müşteri memnuniyetini sağlamaktır [67].

4.2 Parametre Tasarımı

Süreç yenileme ve iyileştirmenin en kritik adımı parametre tasarımıdır. Bu aşamada, üretilecek veya geliştirilecek ürünün özelliklerini en iyi seviyeye getirmek için üretimde kullanılan parametrelerin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Parametrelere en uygun seviyeler seçilir ve üretim sırasında ürün kalitesini olumsuz etkileyebilecek kontrol edilemeyen etkiler belirlenir. Bu etkilere kontrol edilemeyen parametreler denir ve etkileri minimize edilmeye çalışılır. Bu aşamada, Taguchi'nin geliştirdiği ortogonal dizileri kullanılıp sinyal gürültü oranı (S/N) analizi yapılmaktadır. Belirlenen parametrelerden sonra Taguchi'nin ortogonal dizilerinden bir dizi seçilmesi gerekmektedir.

4.2.1 S/N Oranları

S/N oranı Taguchi deney tasarımında analiz değişkeni veya performans kriteri olarak belirlenmiştir. Varyasyonu azaltmak amacıyla deney tasarımında kullanılan bu performans kriteri için Taguchi, S/N oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal-gürültü oranı tanımlamıştır.

- “En küçük en iyi” durumunda, y'nin hedef değeri sıfır olduğu durumda, sinyal/gürültü oranı aşağıdaki formülde tanımlanmaktadır:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(1/n \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

- “En büyük en iyi” durumunda, y'nin hedef değeri sonsuz olduğu durumda, sinyal/gürültü oranı aşağıdaki formülde tanımlanmaktadır:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(1/n \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right) \quad (4.2)$$

- “En iyi hedef değeri” durumunda, y için belli bir hedef verilir ve aşağıdaki formül ile tanımlanmaktadır:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{y^2}{s^2} \right) \quad (4.3)$$

Yukarıdaki S/N oranını denklemlerinde "y" karakteristiği değeri, "s²" ise varyansı temsil eder [18].

$$\bar{y} = 1/n \sum y_i \quad (4.4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.5)$$

4.2.2 Faktör ve Etkileşimlerin Seçilmesi

Taguchi’de, faktörler ikiye ayrılmaktadır. (Kontrol edilebilir/edilemez) Kontrol edilemeyen faktörlere gürültü olarak adlandırılır. Kontrol edilebilen faktör sayısına göre tasarım belirlenir ve deneyler yapılmaktadır.

Performans özelliğini etkileyen faktörler belirlenip sonrasında faktörlerin seviye sayısı belirlenir. Seviyeler iki, üç veya daha fazla olabilir. Serbestlik dereceleriyle ilişkili olan faktör seviyeleri bağımsız olarak hesaplanır.

4.2.3 Ortogonal Dizin Seçilmesi

Ortogonal diziler birçok deneysel durumu açıklamak amacıyla oluşturmuştur. Bu diziler oluşturulurken problemin niteliğine bağlı olarak farklı kademelerde belirlenmektedir. Tasarım matrisi olarak da adlandırılan ortogonal diziler, deney tasarımında kullanılır. Genel gösterimi;

- d : Toplam deney sayısı,
- a : Faktörlerin düzey sayısı
- k : Faktör sayısı
- L : Ortogonal dizi olmak üzere, L_d(a)^k şeklinde ifade edilmektedir.

Genellikle kullanılan diziler, 2 seviyeli için L₄, L₈, L₁₆ ve L₃₂, 3 seviyeli için ise L₉, L₁₈ ve L₂₇'dir. Dizilerin seçimi, düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılır [74]. L₉ (3⁴) tasarım matrisi örnek olarak Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 L₉ ortogonal dizisi

Deney Sayısı	Sütun sayısı & Faktör			
	Parametre-1	Parametre-2	Parametre-3	Parametre-4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tam faktöriyel tasarımın gerektirdiği (2^k veya 3^k) çok sayıda denemenin yapılmasını önemli ölçüde azaltır. Örneğin, tam faktöriyel tasarıma göre $3^4=81$ deneme yapılması gerektiğinde, ortogonal dizinlerle deneme sayısı 9'a kadar düşmektedir [68].

Yapılan deney çalışmasında ise 2 matris tipinde 3 farklı değişken kullanıldığı için L₁₈ ortogonal dizisi kullanılmıştır.

4.2.4 Varyans (ANOVA) Analizi

Varyans analizi (Analysis of Variance: ANOVA), istatistik temelli bir yöntem olup test edilen gruplar arasındaki ortalama performans farklılıklarını belirlemek için kullanılır. Deneysel tasarımın temeli genellikle varyans analizine dayanır. Bu metodun adı, 1930'larda Fisher tarafından geliştirilmesinden dolayı F testi olarak

da anılır. Testin amacı, problemi çözmeye yönelik kararlar almak için ürün veya süreç değişikliklerini kontrol etmek ve performansı etkileyen faktörleri belirlemektir. ANOVA, test edilen grupların performansları arasındaki farklılıkları ortaya koyar. Varyans analizine ait formüller aşağıdaki sunulmuştur.

GKT : Genel kareler toplamı

KT_A : A faktörüne ait kareler toplamı

KT_B : B faktörüne ait kareler toplamı

KT_{AXB} : A ve B faktörlerinin etkileşim faktörlerine ait kareler toplamı

$$GKT = KTA + KTB + KTAB + KTe \quad (4.6)$$

KT_e : Hata kareler toplamı

N : Toplam gözlem sayısı

Y_i : i. gözlem değeri

T : Tüm gözlemlerin toplamı

k_A : A faktörünün kademe sayısı

A_i : A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı

nA_i : A_i seviye altındaki gözlem sayısı

c : Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı

$(AXB)_i$: A ve B faktörlerinin i. koşulu altındaki verilerin toplamı

$$GKT = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{nA_i} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.7)$$

$$KT_A = \left[\sum_{i=1}^c \frac{(AXB)_i^2}{nAXB_i^2} \right] - \frac{T^2}{N} - KT_A - KT_B \quad (4.8)$$

$$KTe = KTT - KTA - KTB - KTAXB \quad (4.9)$$

Varyans analizi (ANOVA) yapabilmek için serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır.

- Serbestlik derecesini formülü;

$$SdT = SdA + SdB + Sd_{A \times B} + Sde \quad (4.10)$$

Sd_T : Toplam serbestlik derecesi

Sd_A : A faktörünün serbestlik derecesi

$Sd_{A \times B}$: AxB faktörünün serbestlik derecesi

Sd_e : Hata serbestlik derecesi

- Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğidir.

$$Sd_T = N - 1 \quad (4.11)$$

- Bir faktör veya sütunun serbestlik derecesi, seviye sayısının bir eksiğidir.

$$Sd_A = k_A - 1 \quad (4.12)$$

- Etkileşimin serbestlik derecesi, etkileşim faktörlerinin serbestlik dereceleri çarpımı ile bulunur [66].

$$Sd_{A \times B} = (Sd_A) \times (Sd_B) \quad (4.13)$$

- Hata serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesinin, tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinden çıkarılması ile bulunmaktadır.

$$Sd_e = SdT - SdA - SdB - Sd_{A \times B} \quad (4.14)$$

Varyans değerinin hesaplanması ise, varyans analizi tablolarıyla yapılmaktadır.

- Faktörlerin varyans hesaplamaları, faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesi ile elde edilir.

$$V_A = \frac{KT_A}{Sd_A} : A \text{ faktörü için örnek varyans hesaplama formülü} \quad (4.15)$$

- “Hata Varyansı” aşağıdaki denklemde gösterilen hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölümü ile bulunur.

$$V_e = \frac{KT_e}{Sd_e} \quad (4.16)$$

Oluşturulan VARYANS analizi tablosundaki F testi hangi faktörlerin anlamlı olduğunu belirler. F testinde hesaplanan değerler, F_{tablo} değerleri ile karşılaştırılır. Eğer hesaplanan tablodaki değerden büyükse F değeri, bu durumda $1-\alpha$ güven düzeyinde kabul edilir.

- ANOVA tablosunda elde edilen F değeri, faktör ya da etkileşim varyansının hata varyansına oranı ile elde edilir. (A değerine ait F değeri)

$$F_A = \frac{V_A}{V_E} \quad (4.17)$$

$F_{\text{tablo}} = F_{\alpha, v_1, v_2}$ burada;

α : anlamlılık düzeyini,

v_1 : faktörlerin serbestlik derecesini,

v_2 : hata serbestlik derecesini temsil etmektedir.

ANOVA analizinden sonra anlamı faktörler ve etkileşimler belirlenip sonuçlar hakkında yorumlar yapılır. Ortalamanın tahmin edilmesi ve bu tahminin güven aralığının belirlenmesi, sıkça kullanılan yöntemler arasındadır.

- Ortalamanın tahmin edilmesi, kombinasyondaki faktör seviyelerinin ortalama değerleri;

$$\mu_{A_1B_2} = A_1 + B_1 - (n - 1)\bar{T} \quad (4.18)$$

n : belirlenen faktör seviye kombinasyondaki faktör sayısı

$\bar{T}$: Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalaması

- Tahmin edilen güven aralığı;

$$G.A = \sqrt{F_{\alpha, sd_T, sd_e} * V_e \left[\left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \right]} \quad (4.19)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{N}{1 + c} \quad (4.20)$$

c : μ bulunurken kullanılır (tüm faktörlerin toplam serbestlik derecesini ifade eder)

r : yapılan doğrulama deney sayısı

sd_T : ortalamaya ait serbestlik derecesi olup daima 1'dir.

Sde : hata serbestlik derecesi

Ve : hata varyansı

N : Deney sayısı

G.A. : Güven aralığı

$$\mu - G.A. \leq \text{performans karakterisliđi değeri} \leq \mu + G.A. \quad (4.21)$$

4.2.5 Doğrulama Deneyleri

Deneyin sonuçlarına göre, en uygun koşullar yeniden uygulanır. Bu koşulların belirlenmesi ve tekrarlanması, doğrulama deneyi olarak adlandırılır. Eğer deney sonucunda elde edilen faktör-seviye kombinasyonu en iyi performansı sağlarsa, bu durum istenen sonucun gerçekleştiğini ve deneyin amacına ulaştığını gösterir.

4.3 Tolerans Tasarımı

Tolerans tasarımı, Taguchi metodunun son adımı olarak bilinir. Tasarımda hedeflenen parametrelerin belirlenmesi sonucunda istenildiği hedefe ulaşılmadığında yapılan ek çalışmalara denir. Bu ek çalışma, yapılan ürünün hedef değerden sapmasının neden olduğu kayıpların (sapmalar) belirlenmesi ve bu kayıpları azaltılmaya çalışılır.

5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Kompozitlerin Oluşturulması

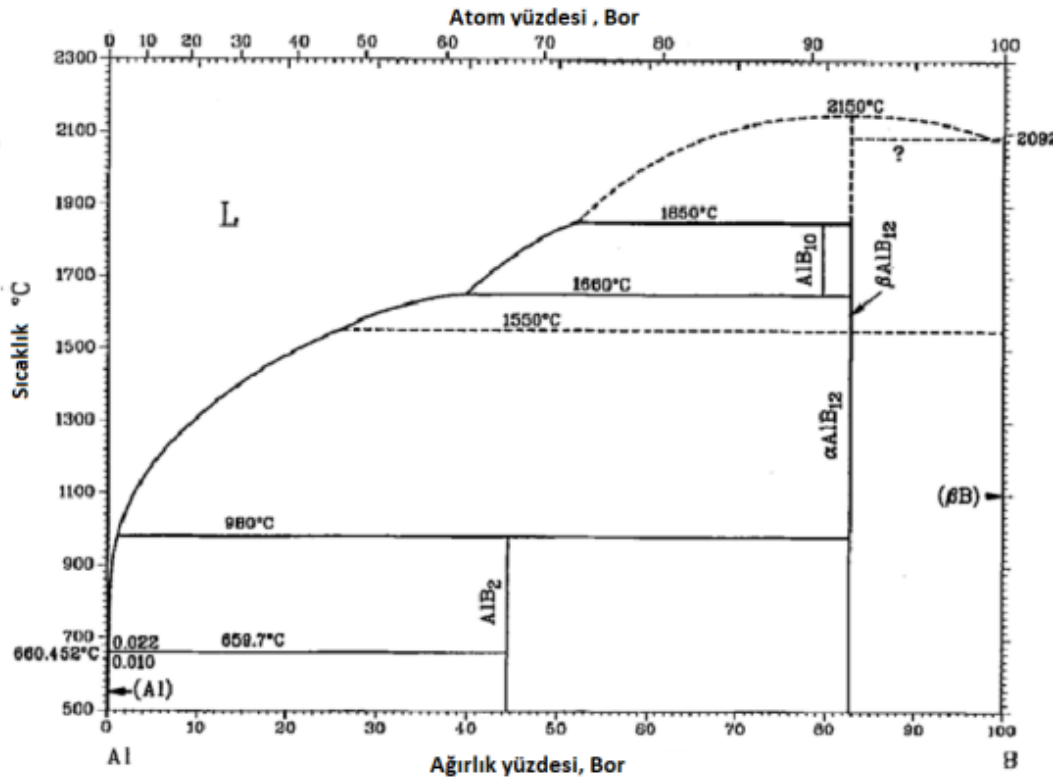
Etial 110 alüminyum alaşımı, geniş bir kullanım alanına sahip olup deniz donanımları, tarım aletleri ve ekipmanları, dizel motorların imalatı gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [2,3,69,70,71,72]. Bu çalışmada matris olarak Şekil 5.1’de gösterilen Etial 110 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Sertlik üzerine Si ve Cu oranlarının etkisini belirlemek amacıyla, standartlara uygun şekilde yüksek ve düşük Si ve Cu oranlarına sahip matris alaşımları seçilmiştir. Matris alaşımlarının kimyasal oranları Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Çalışmada, yüksek aşınma direncine sahip TiB_2 partikülleri takviye bileşeni olarak seçilmiştir. TiB_2 partikülleri, matris içinde in-situ tekniğiyle kendiliğinden oluşturulacaktır. Al-B faz diyagramı dikkate alındığında, teorik olarak 1200 °C’de en fazla ağırlıkça %3 TiB_2 partikülleri oluşturulabileceği bilinmektedir [72-73].



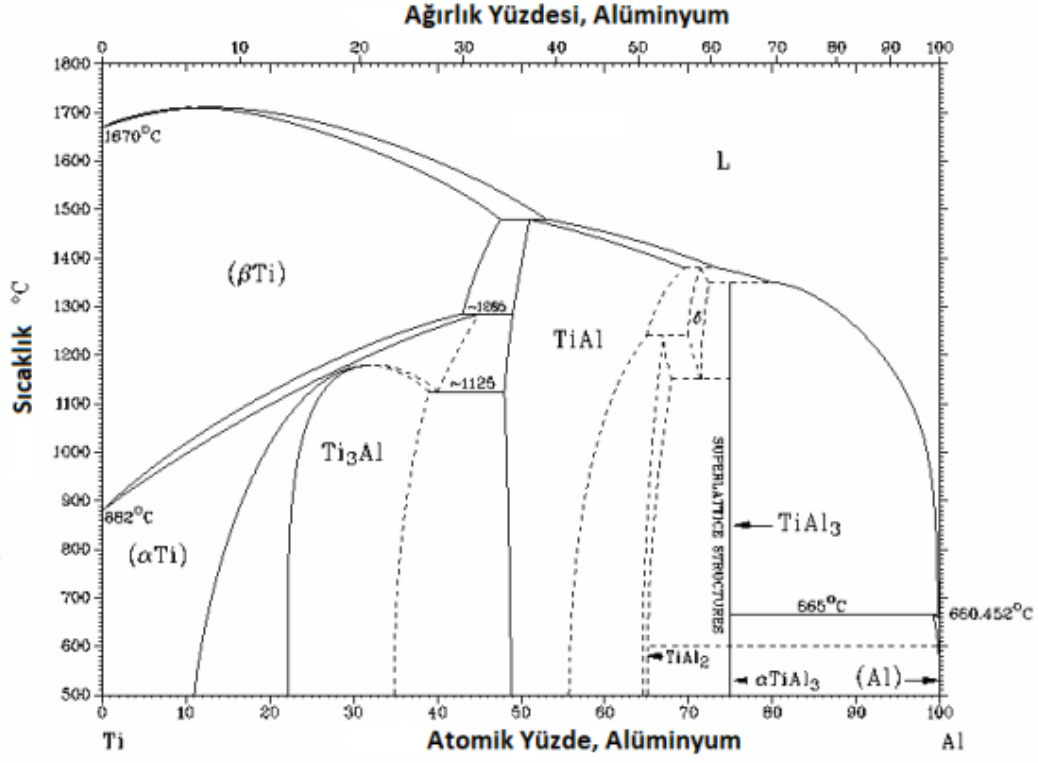
Şekil 5.1 Alüminyum alaşımı külçe Etial 110

Kompozit üretiminde, Etial 8 ve Etial 171 alaşımları ile Al-10Ti ve Al-3B matris alaşımları başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Başlangıç alaşımları, %3 oranında TiB_2 partikülleri oluşturacak şekilde belirli oranlarda, hassas terazi yardımı ile tartılarak istenilen oranda kesilmiştir, ayrıca Tablo 5.1’de verilen iki farklı kimyasal kompozizasyona sahip matrisler oluşturulmuştur. Toplamda 500 gram başlangıç alaşımları, ölçüleri Şekil 5.4’te belirtilen seramik pota içerisine konularak direnç ergitme fırınında 1200 °C’de ergitilmiştir. Şekil 5.5’te ergitme fırını içerisinde ergitilmiş Al-Cu-Si-Ti-B çözeltisi ve soğumasının beklendiği hali

görülmektedir. Eriyik, bu sıcaklıkta bir saat süreyle tutulmuş ve Şekil 5.2’de [73] verilen Al-B ve Şekil 5.3’te Al-Ti faz diyagramlarında görüldüğü gibi mastır alaşımları içerisinde bulunan tüm intermetalik bileşiklerin alüminyum tarafından çözünmesi sağlanmıştır. Şekil 5.4c’de çözelti içerisinde TiB_2 yapılarını sentezlemek için, çözelti sıcaklığı fırında $850^\circ C$ ’ye düşürülmüş ve bu sıcaklıkta iki saat süreyle tutulmuştur. Bu adım, Denklem 5.1-5.4’te [74-75], verilen reaksiyonların tamamlanmasını ve çözelti içinde Şekil 5.4d’de gösterildiği gibi TiB_2 partiküllerinin çökmesine olanak sağlamıştır. Yukarıda verilen döküm rotası dikkate alınarak aynı şartlarda, Tablo 5.1’de kimyasal kompozisyonu verilen iki farklı Etial 110 matrisli TiB_2 partikül takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üretilmiştir.



Şekil 5.2 Al-B faz diyagramı [73]



Şekil 5.3 Al-Ti faz diyagramı [76]

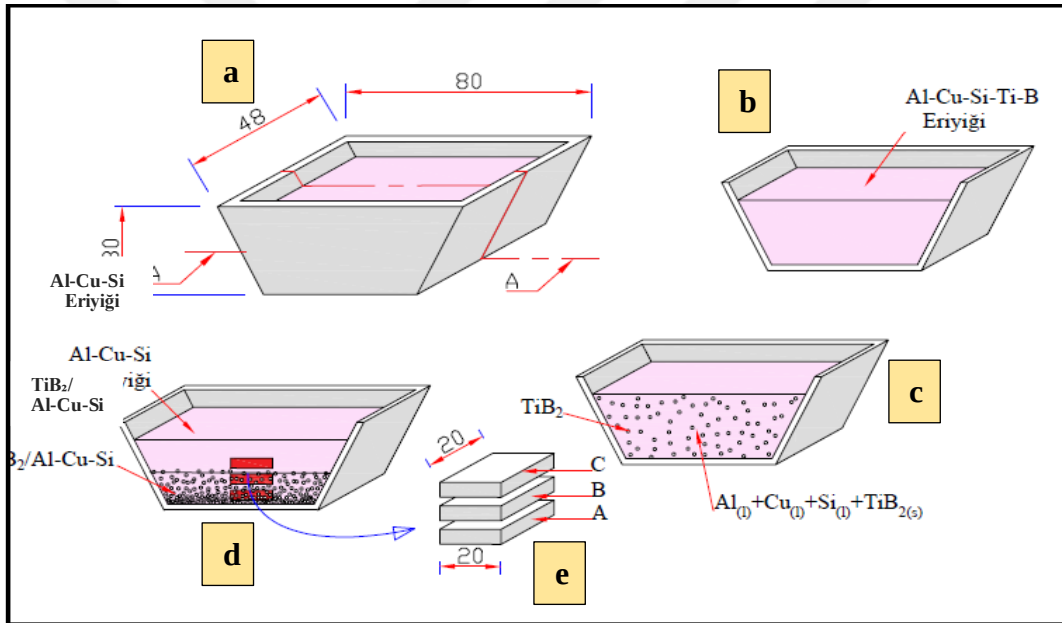


Tablo 5.1 Etial 110 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%)

Elementler	Yüksek Si+Cu Oranlı Matris	Düşük Si+Cu Oranlı Matris
Si	6,662	5,574
Fe	,167	,244
Cu	3,757	2,131
Mn	,330	,431
Mg	,172	,120

Tablo 5.1 Etial 110 alaşımlarının kimyasal kompozisyonu (%) (devamı)

Cr	,001	,002
Ni	,002	,003
Zn	,019	,017
Ti	,007	,002
Ag	,0001	<,0001



Şekil 5.4 Kompozit üretim adımlarının şematik gösterimi

- Seramik Pota Görüntüsü ve Boyutları,
- 1200 °C'de Al-Cu-Si-Ti-B Çözeltisi,
- 850 °C'de Sıvı Matris İçindeki TiB₂ Parçacıklarının Yerinde Yöntemle Sentezi,
- Fonksiyonel Derecelendirme 80°C'de 2 Saat Bekletildikten Sonra Yer Çekimi Etkisi ile TiB₂ Parçacıklarının İmhası
- Test Numunesinin Görünümü ve Boyutları



Şekil 5.5 Ergitme fırını

Üretilen kompozit malzemenin Şekil 5.4d'de belirtilen bölgelerinden 15x15x5 mm boyutlarında test numuneleri çıkartılmıştır. Kompozit özelliklerindeki fonksiyonel değişimi gözlemlemek amacıyla, dökümün alt kısmından tepe noktasına kadar 5 mm aralıklarla üç bölgeden test numuneleri alındı. Tüm numuneler önce 520°C'de 4 saat süreyle çözeltiye olma işlemine tabi tutuldu, ardından 80°C'de suya verildi. Isıl işlem koşullarının sertlik üzerindeki etkisini belirlemek için çözelti işlemine tabi tutulan test numuneleri üç gruba ayrıldı. Birinci grup numuneler oda sıcaklığında 72 saat (T4) doğal yaşlandırmaya tabi tutuldu. İkinci grup numunelere 520°C'de 7 saat süreyle yapay yaşlandırma uygulandı (T6). Üçüncü grup numuneler ise 520°C'de 15 saatlik (T7) aşırı yaşlandırma ısıl işleme tabi tutuldu.

Özetle bu çalışmada iki farklı Etial 110 matrisli kompozit malzeme üretilmiş, Şekil 5.4e'de verilen 3 bölgeden alınan numunelere, 3 farklı ısıl işleme uygulanmıştır. Bu bağlamda çalışmada belirlenen faktör ve seviyeleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablo 5.3'te faktörlerin ve seviyelerin kombinasyonlarına göre 18 farklı özelliğe sahip test numunesi elde edilmiştir.

5.2 Mikro Yapı İncelemeleri

Üretilen kompozitlerin ısıl işlemi sonrasında TiB_2 partiküllerinin yoğunluğunun sıvı Al çözeltisinin yoğunluğundan yüksek olmasından kaynaklı sedimentasyon etkisiyle döküm kabının alt bölgesinde koyu bir bölge oluşturup oluşturmadığını gözlemlemek için kalıptan çıkartılan döküm numunelerinin yüzeyleri zımparalandıktan sonra Hidroklorik Asit (HCl) çözeltisi ile dağlanmıştır. Şekil 5.6'da dağlama sonrasında elde edilen fiziksel görüntüsü görülmektedir.

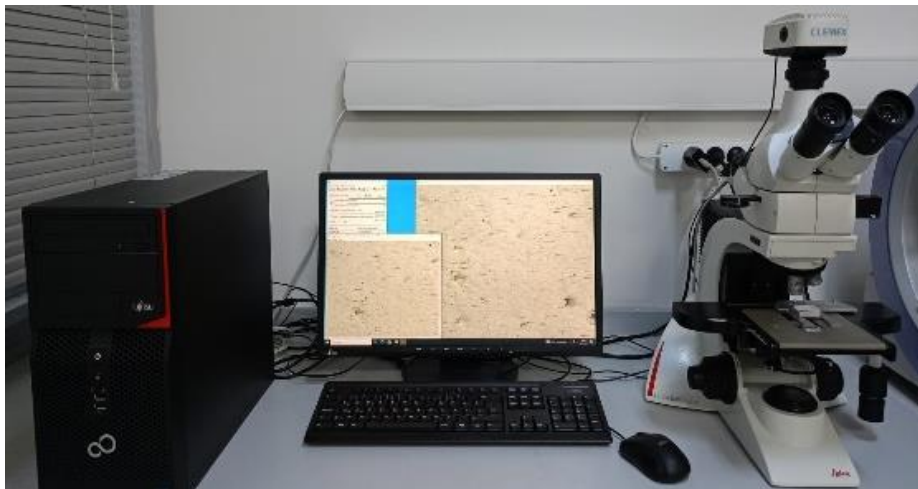


Şekil 5.6 Üretilen kompozit malzeme

Döküm numunesinin mikroyapı incelemeleri için hazırlanan test numuneleri sırasıyla 150, 400, 600,1000 ve 1200 gritlik zımparalardan geçirildikten sonra 0,5 µm elmas pasta süspansiyonu ile 30 dakika boyunca parlatılmış optik analizlere hazır hâle getirilmiştir. (Şekil 5.7)



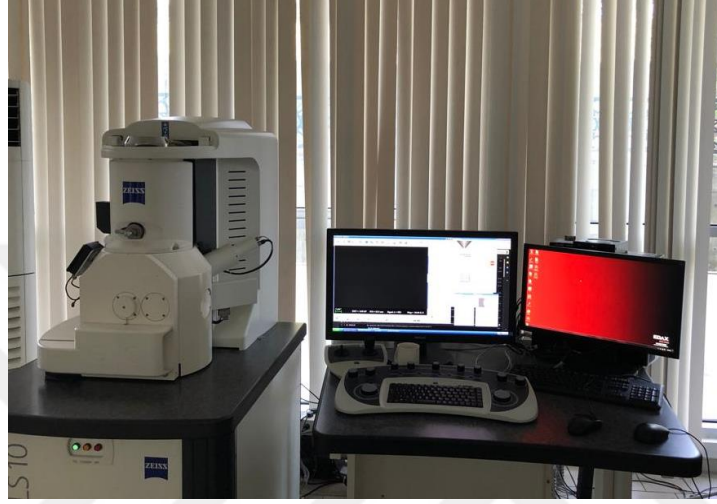
Şekil 5.7 Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler



Şekil 5.8 Optik mikroskop ile mikroyapı inceleme

Hazırlanan numunelerden, Clemex Vision görüntü analiz sistemi ile donatılmış bir LEİCA DM 1750M optik mikroskop kullanılarak Şekil 5.8’da görüldüğü gibi mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

Analizde, bileşimin fazları ve oranları, Şekilde 5.9’da gösterilen D/MAX 2200/PC model XRD cihazıyla belirlenmiştir. Elementel kompozisyon ise bir spektrometre cihazıyla tespit edilmiştir. Cihazın görüntüsü Şekil 5.10’da sunulmuştur.



Şekil 5.10 Spektrometre cihazı

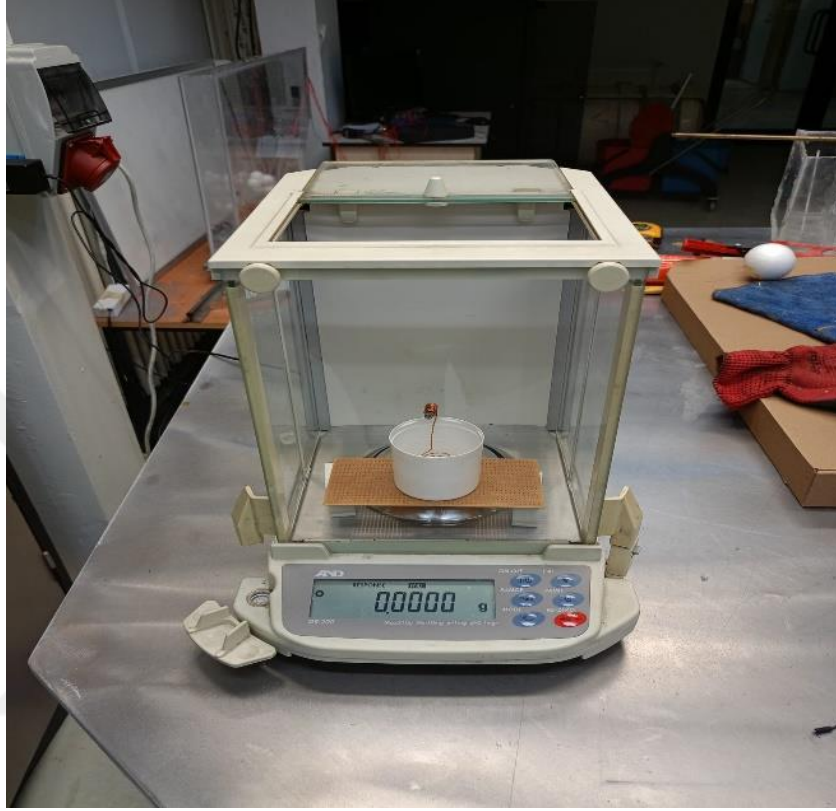
Kompozit malzemenin SEM analiz görüntüleri için Şekil 5.11’de gösterilen SEM analiz cihazı kullanılmıştır. Mikroyapı içindeki noktasal ve bölgesel elementel analiz ve dağılımları, SEM cihazıyla entegre IXRF Systems Inc. EDAX kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11 SEM analiz cihazı

5.3 Yoğunluk Ölçümleri

Üretilen numunelerin yoğunluklarının belirlenmesi için Şekil 5.12’de gösterilen Arşimet düzeneği kullanılmış hesaplamalar deneysel sonuçlar bölümünde anlatılmıştır.



Şekil 5.12 Arşimet düzeneği yoğunluk ölçüm cihazı

5.4 Sertlik Ölçümleri

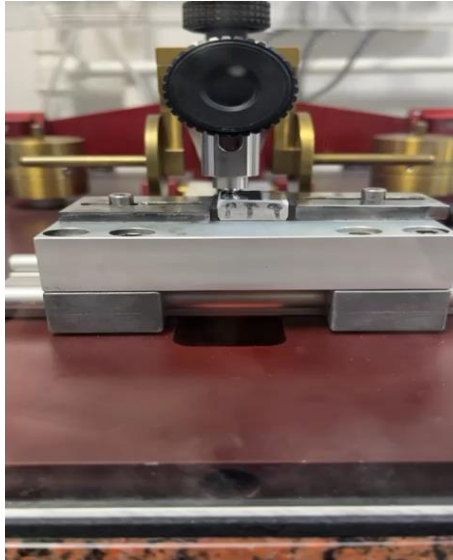
Brinell sertlik ölçüm yöntemine göre 62,5 kg yükte ve 2.5 mm çapında sertleştirilmiş çelik karbür bilyeler kullanılarak ölçülmüştür. Brinell sertlik ölçüm cihazı Şekil 5.13’te gösterimiştir.



Şekil 5.13 Sertlik ölçüm cihazı

5.5 Aşınma Deneyleri

Aşınma testleri kuru kayma aşınma tekniği kullanılarak git-gel (reciprocating) modunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi için kullanılan test cihazı Şekil 5.14’de sunulmuştur:



Şekil 5.14 Aşınma test cihazı

Aşınma deneyleri seçilen parametreler ile Taguchi deney reçetesi hazırlanmış olup seçilen parametreler ve seviyeleri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Deney parametreleri ve seviyeleri

Faktörler/Seviye	Kolan	Seviye 1	Seviye 1	Seviye 1
Matris Tipi	A	1.Tip (Yüksek Si+Cu oranlı matris)	2.Tip (Düşük Si+Cu oranlı matris)	-
Isıl işlem Türü	B	T4	T6	T7
Kompozit Bölge	C	A	B	C
Yük, N	D	2	4	6
Kayma Hızı, m/s	E	20	60	40
Kayma Mesafesi, m	F	400	600	800

Aşınma oranını değerlendirmek için, malzemenin aşındırıcı öncesi ve sonrası ağırlıkları hassas bir terazi kullanılarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Tablo 5.3'te, Taguchi deney tasarımına uygun, L_{18} ortogonal dizisi kullanılarak hazırlanan deney reçetesi sunulmuştur.

Taguchi yöntemi kullanılmasaydı $2 \times 3^4 = 162$ adet deney yapılması gerekecekti. Ancak Taguchi metodu sayesinde bu sayı 18 adet denemeye kadar düşürülmüştür.

Tablo 5.3 Taguchi L18 deney reçetesini

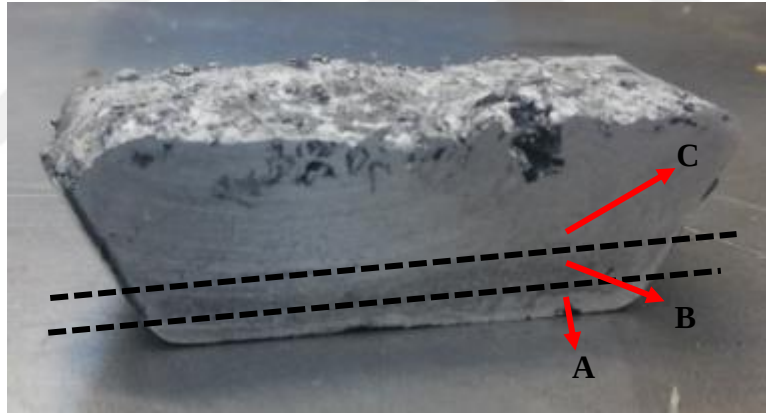
S.Nu	Matris Tipi (A)	Isıl İşlem Türü (B)	Kompozit Bölge (C)	Yük (D)	Kayma Hızı (E)	Kayma Mesafesi (F)
1	1.Tip	T4	A	2	20	400
2	1.Tip	T4	B	4	60	600
3	1.Tip	T4	C	6	40	800
4	1.Tip	T6	A	2	60	600
5	1.Tip	T6	B	4	40	800
6	1.Tip	T6	C	6	20	400
7	1.Tip	T7	A	4	20	800
8	1.Tip	T7	B	6	60	400
9	1.Tip	T7	C	2	40	600
10	2.Tip	T4	A	6	40	600
11	2.Tip	T4	B	2	20	800
12	2.Tip	T4	C	4	60	400
13	2.Tip	T6	A	4	40	400
14	2.Tip	T6	B	6	20	600
15	2.Tip	T6	C	2	60	800
16	2.Tip	T7	A	6	60	800
17	2.Tip	T7	B	2	40	400
18	2.Tip	T7	C	4	20	600

6

DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Makro Yapı Analizi

Üretilen kompozit malzemeye ait resim Şekil 6.1’de sunulmuştur. Kompozitin makro incelemesi için, döküm numunesi Şekil 5.4a’da belirtilen bölgeden boydan kesilmiştir. Kesilen yüzey 1500 grit zımpara kademesine kadar zımparalanmış ve ardından %37 HCl çözeltisiyle 5 dakika boyunca dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Kesit görüntüsünde, iki farklı bölgenin mevcut olduğu göze çarpmaktadır. Dökümün alt kısmında, yaklaşık 10 mm kalınlığında koyu renkli bir bölge bulunmaktadır. Şekil 5.4d’de belirtildiği gibi, döküm altından üstüne doğru 5mm aralıklarla numuneler alınmıştır. A ve B olarak adlandırılan bölgeler, koyu renkli alandan alınan numuneleri temsil ederken, C olarak adlandırılan bölge açık renkli bölgeden alınan numuneleri temsil etmektedir.

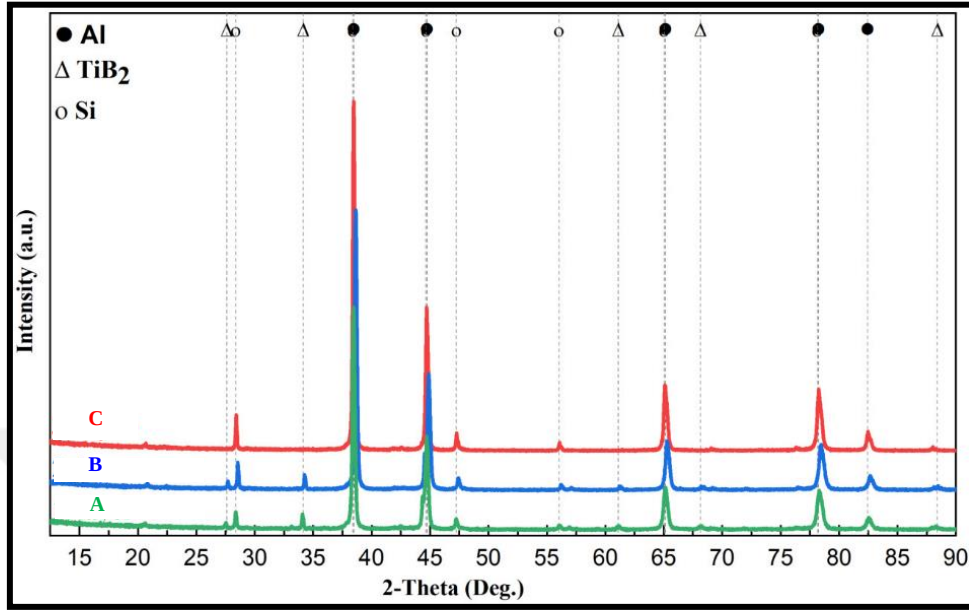


Şekil 6.1 Üretilen kompozit malzeme kesit görüntüsü

6.2 XRD Analizi

Üretilen kompozit malzemenin Şekil 6.2’de A, B ve C bölgelerinden alınan XRD patern örnekleri verilmiştir. A ve B bölgelerinde Al, Si ve TiB_2 pikleri gözlemlenirken, C bölgesinde yalnızca Al ve Si pikleri gözlemlenmiştir. Denklem 5.1-5.2’de verilen reaksiyonlar gerçekleşerek İn-suti tekniği ile TiB_2 partiküllerin sentezlendiğini göstermektedir. Ayrıca, A ve B bölgelerinde (koyu renkli alan) TiB_2 partikülleri belirlenirken, C bölgesinde (açık renkli alan) TiB_2 yapılarına rastlanmamıştır. 850°C’de 2 saat beklenildiğinde, yerçekimi etkisiyle TiB_2

partiküllerinin çökerek matris içerisinde fonksiyonel olarak yerleştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, TiB_2 partiküllerinin homojen dağılımının sağlandığını ve matris içerisinde işlevsel olarak entegre edildiğini göstermektedir.

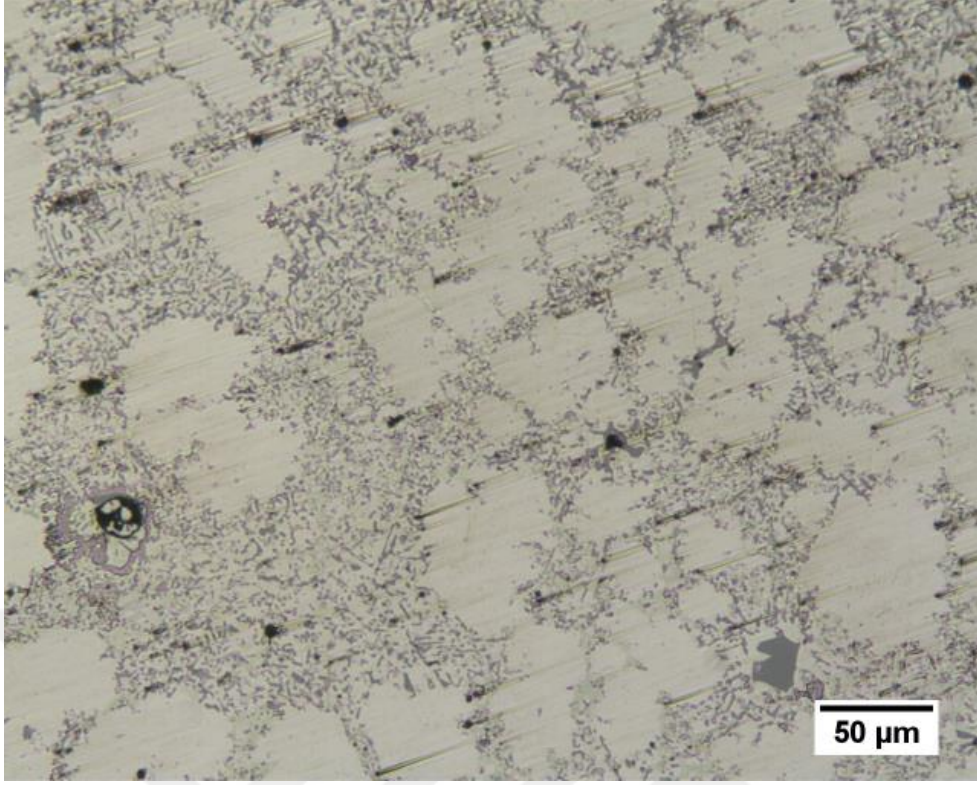


Şekil 6.2 A, B ve C bölgelerinden alınan XRD patern örnekleri

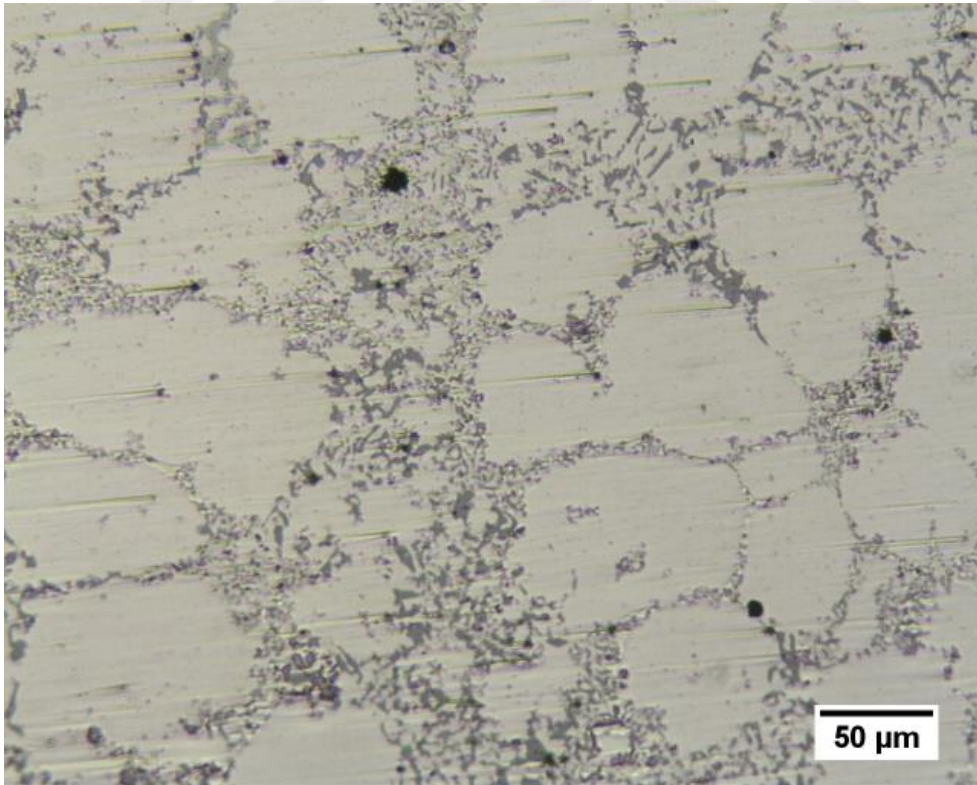
6.3 Mikro Yapı Analizi

Üretilen kompozit malzemeye T4 doğal yaşlandırma işlemi uygulanmış halinin aşağıdaki şekillerde A, B ve C bölgelerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.3'te TiB_2 'ce zengin(A), Şekil 6.5'de TiB_2 'ce fakir(C) ve Şekil 6.4'de TiB_2 'ce zengin ve fakir bölgelerin bulunduğu ara bölgeden (B) alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

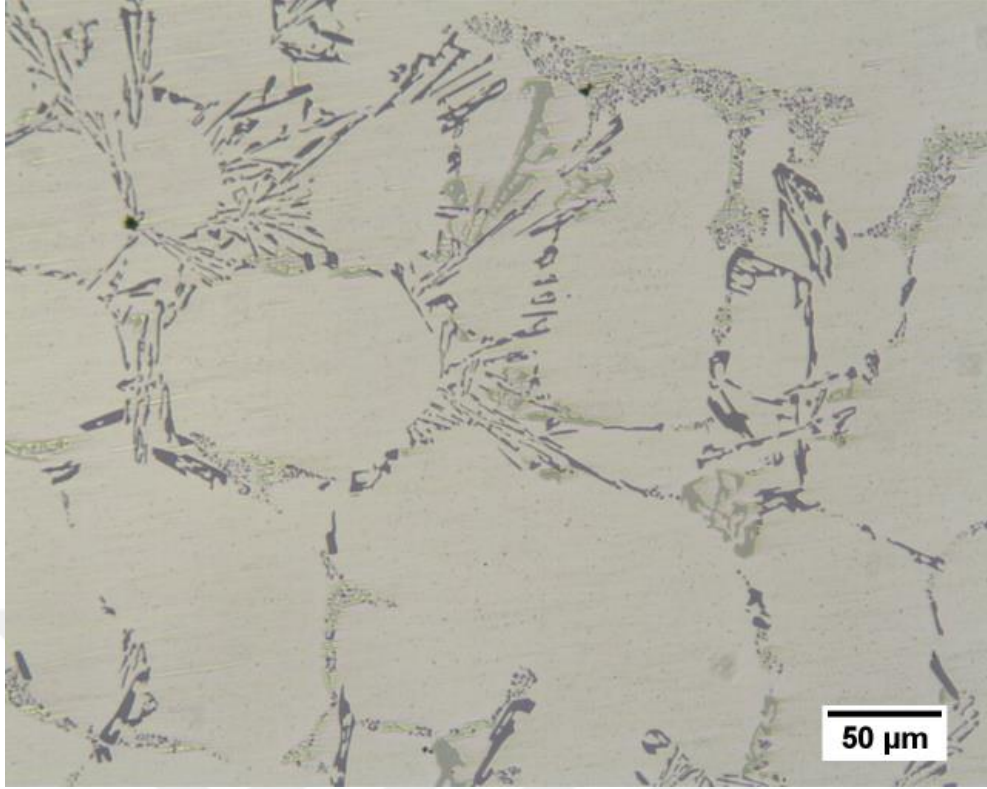
C bölgesinden alınan görüntüde, beyaz renkteki alüminyum matris içerisinde çubuk formunda silisyum kristalleri gözlemlenmektedir. A ve B bölgelerinde ise, alüminyum matris içerisinde silisyum kristallerinin yanı sıra TiB_2 partikülleri de gözlemlendiği görülmüştür. Daha önceki çalışmalarda da rapor edildiği gibi, mikroyapı görüntüleri matrise TiB_2 partiküllerinin eklenmesiyle dendritik yapıların eş eksene dönüştüğünü ve silisyum kristallerinin lamelli yapıdan fiberimsi yapıya dönüştüğünü göstermektedir [77-78].



Şekil 6.3 A bölgesi (TiB₂ zengin)

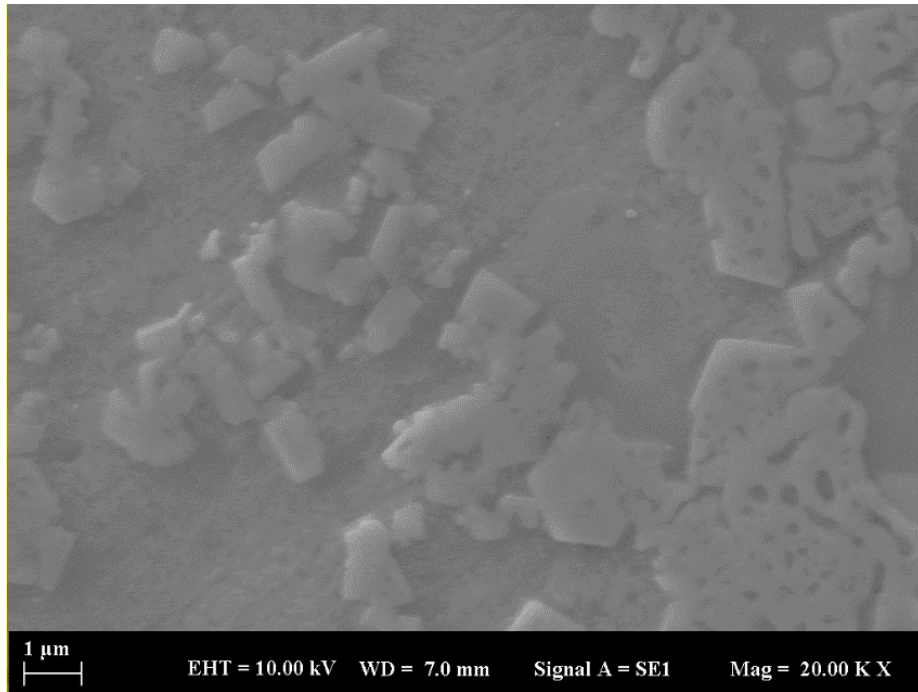


Şekil 6.4 B bölgesi (geçiş bölgesi)



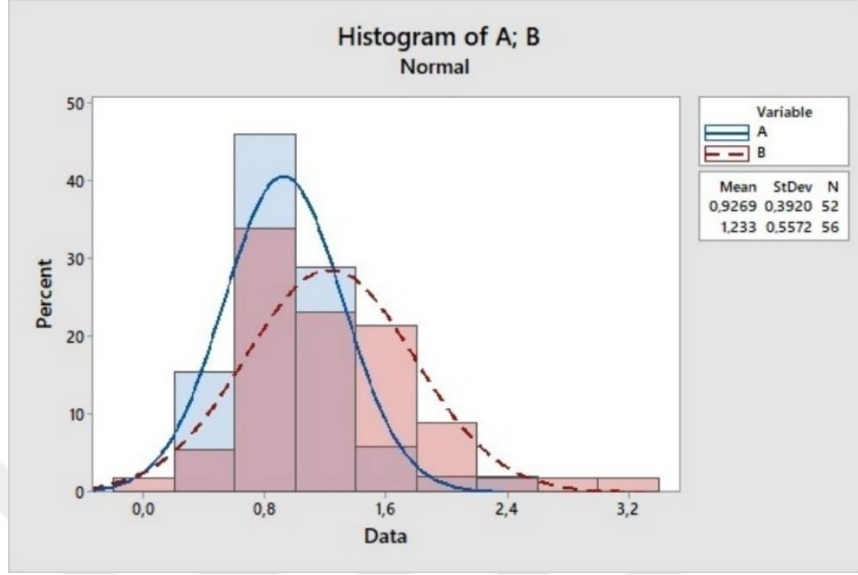
Şekil 6.5 C bölgesi (TiB_2 fakir)

6.4 SEM Analizi



Şekil 6.7 Kompozit SEM görüntüsü

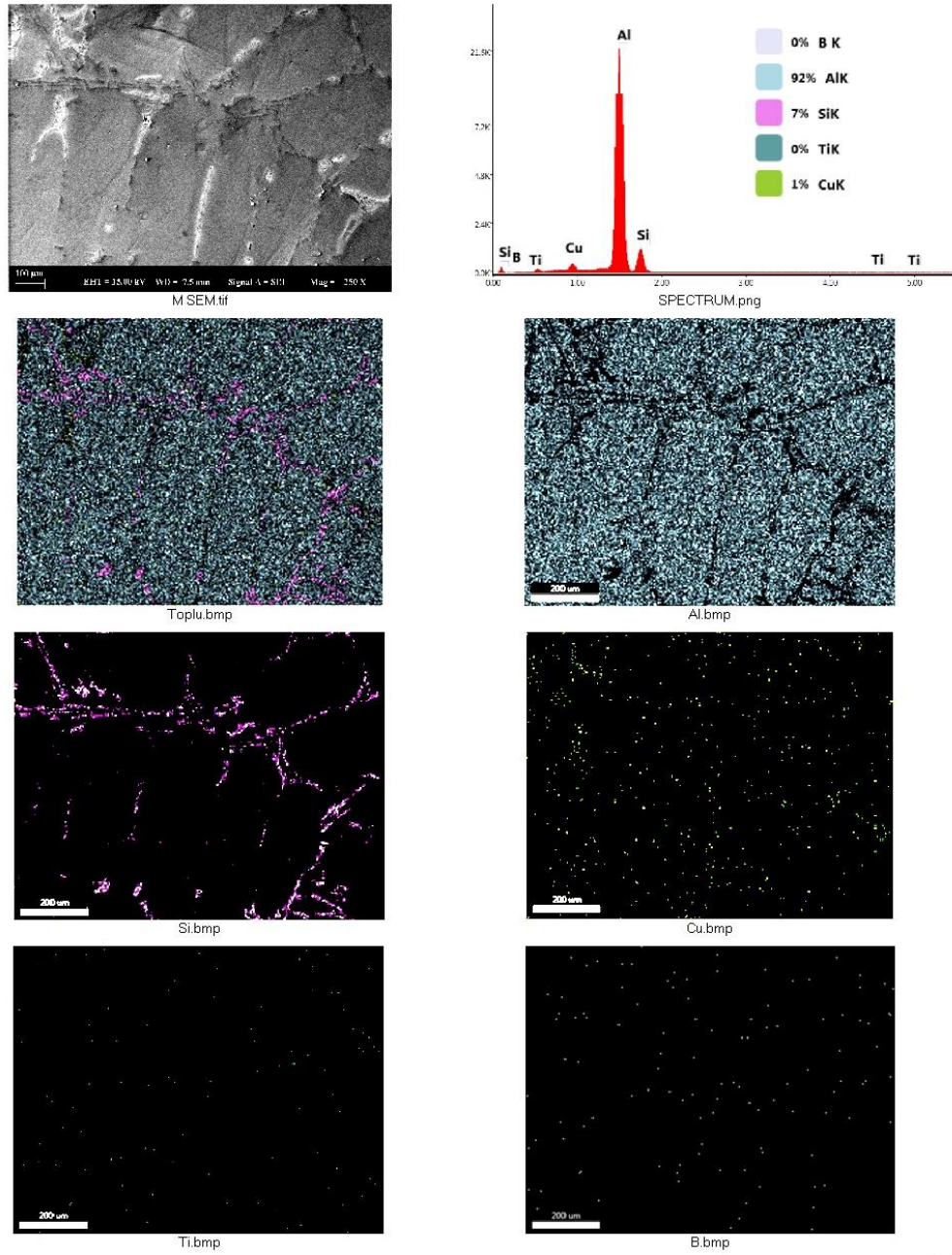
Üretilen kompozitin TiB₂ zengin bölgeden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.7'de sunulmuştur. Şekilde eş eksenli homojen dağılım gösteren TiB₂ partikülleri olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8 Partiküllerin boyutsal dağılımı grafiği

Şekil 6.8'de kompozitin A ve B bölgesine ait partiküllerin boyutsal dağılım grafiği verilmiştir. A matrisinin partiküllerin ortalama 0,9269 μm , standart sapmasının 0,3920 olduğu, B matrisinin ise partiküllerin ortalama 1.233 μm , standart sapmasının 0,55 olduğu tespit edilmiştir. Partiküllerin ortalama değerde A matrisinin %45, B matrisinin %35 olduğu dikkat çekmektedir.

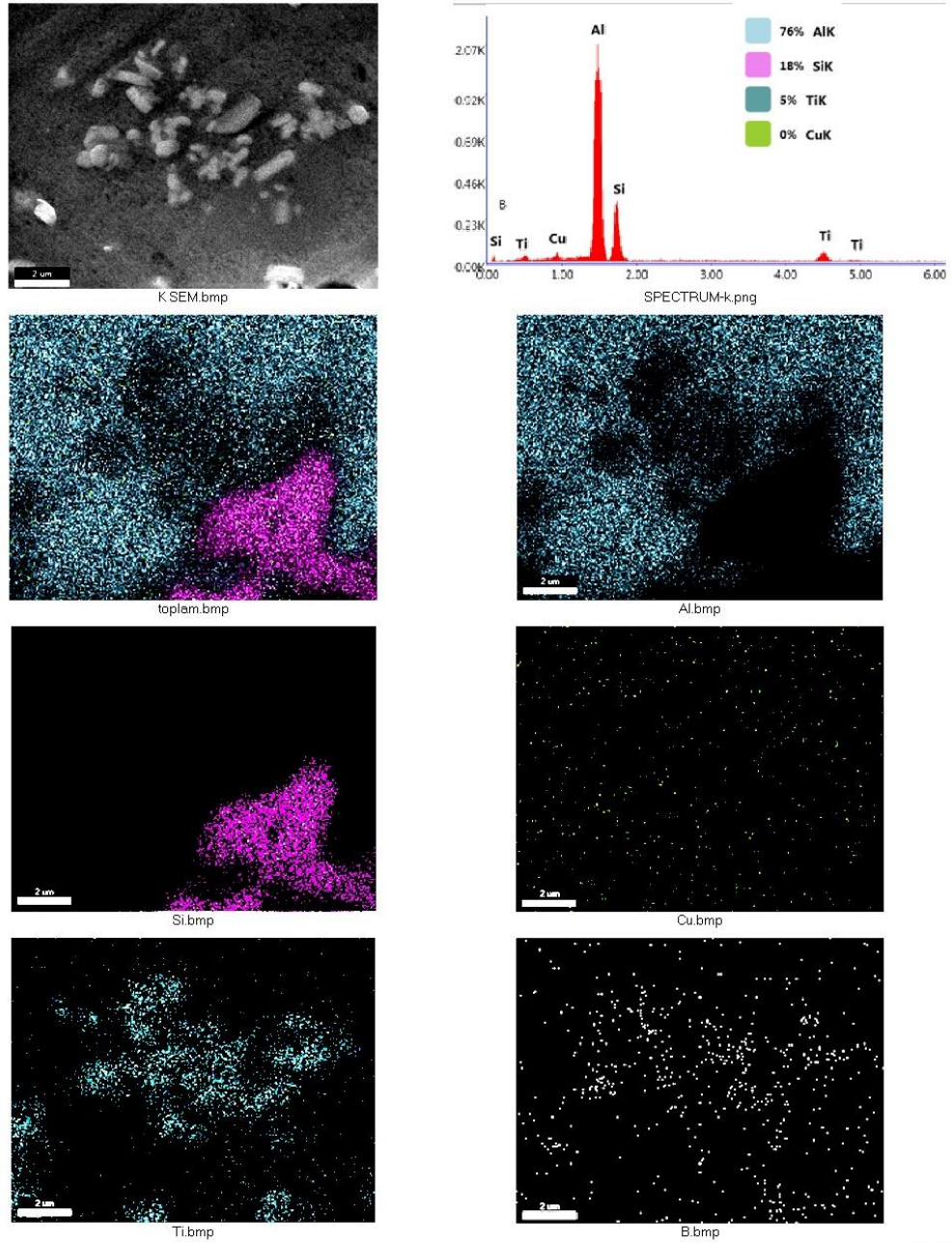
6.4.1 TiB₂'ce Fakir Bölgesinin EDAX Analizi



Şekil 6.9 Fakir bölgenin partikül dağılımları

Kompozit malzemenin TiB₂ ile fakir bölgesinin EDS görüntüsü ve elementlerin haritası Şekil 6.9'da sunulmuştur. Haritalar, yoğun bir şekilde alüminyum ve kısmen silisyum elementinin bulunduğu gözlenmektedir. Yapılan EDAX analizinde %92 alüminyum, %7 silisyum ve %1 bakır elementi olduğu görülmüştür. Element haritalarında Ti ve B elementleri gözlenmemiştir.

6.4.2 TiB₂'ce Zengin Bölgesinin EDAX Analizi



Pg. 1/1

Şekil 6.10 Zengin bölgenin partikül dağılımları

Kompozit malzemenin TiB₂ ile zengin bölgesinin EDS görüntüsü ve element haritası Şekil 6.10'da sunulmuştur. Haritalarda yoğun bir şekilde alüminyum, silisyum ve titanyum elementi gözlemlenmektedir. Yapılan EDAX analizinde %76 alüminyum, %18 silisyum ve %5 titanyum elementi olduğu görülmüştür. Bor elementinin gözlemlenmemesinin nedeni bor atom çapının küçük olması münasebetiyle ölçülememesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

6.5 Yoğunluk Ölçüm Analizi

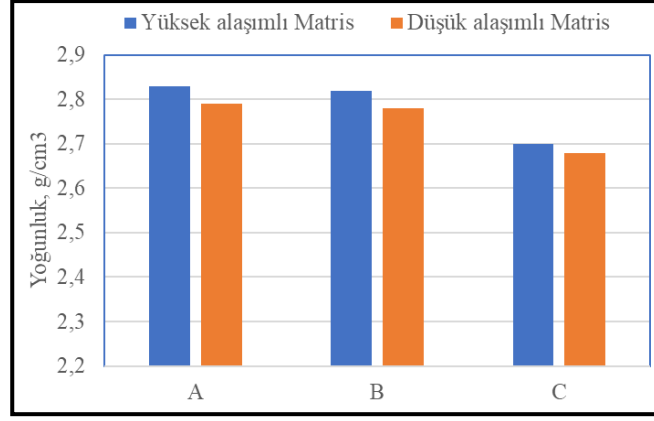
T4 ısıtıl işlemi sonrasında üretilen kompozitlerin Arşimet yöntemiyle ölçülen yoğunluk değerleri Şekil 6.11’de gösterilmektedir. Yoğunluk ölçümlerinin yapılabilmesi için 3 ayrı bölgeden numuneler alınmıştır. Yoğunluk ölçümleri numunelerin yaş ve kuru ağırlıkları ölçülerek aşağıdaki Denklem 6.1’de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır. Grafikten, A ve B bölgelerinin yoğunluklarının C bölgesinden daha yüksek olduğu görülmektedir. A ve B bölgelerindeki yoğunlukların C bölgesine göre daha yüksek olmasının nedeni, $4,51 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğundaki TiB_2 partiküllerinin A ve B bölgelerinde çökmesi olarak tahmin edilmektedir. Ayrıca, görselde yüksek alaşımlı matrisli kompozitlerin yoğunluk değerlerinin, düşük alaşım matrisli kompozitlere nazaran daha yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yüksek alaşım matris içerisindeki bakır oranının daha yüksek seviyelerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. (Tablo 5.1’de incelenebilir).

$$\text{Yoğunluk} = \text{Kuru Ağırlık} / (\text{Kuru Ağırlık} - \text{Islak Ağırlık}) \quad (6.1)$$

Not: Ölçümlerde saf su yoğunluğu $0,998 \text{ kg/mm}^3$ değerinde kullanılmıştır.

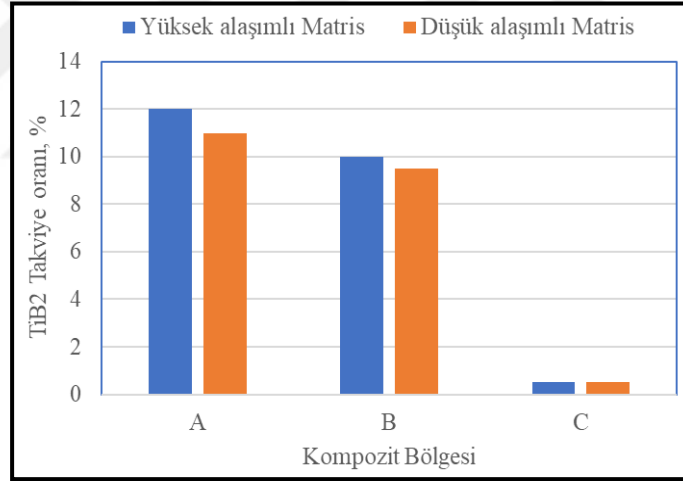
Tablo 6.1 Üç farklı bölgeye ait yoğunluk ölçüm sonuçları

	Kuru Ağırlık(g)	Islak Ağırlık (g)				
Bölge	Ölçüm	Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3	Ortalama	Yoğunluk (g/cm^3)
A	0,5331	0,3423	0,3421	0,3425	0,3223	2,7903
B	0,4338	0,2770	0,2776	0,2772	0,2776	2,7772
C	0,6276	0,3937	0,3939	0,3935	0,3937	2,6831



Şekil 6.11 Kompozitlerin bölgesel yoğunluk değişimi

Yoğunluk değerlerine dayalı olarak hesaplanan TiB_2 partikül oranlarını Şekil 6.12’de gösterilmektedir. Grafikten, her iki kompozitin A bölgelerinde TiB_2 takviye oranının ağırlıkça %12, B bölgelerinde ise %10 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, kompozitlerin sedimentasyon yöntemiyle 10 mm mesafede, %12 ile %10 arasında değişen TiB_2 takviye oranlarıyla fonksiyonel olarak derecelendirildiğini göstermektedir.



Şekil 6.12 Kompozit bölgelerinin % TiB_2 oranları

6.6 Sertlik Ölçüm Analizi

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin her biri üzerinden en az 5 sertlik ölçümü alınmıştır. Tablo 6.2’de sertlik ölçümleri, ortalamaları ve standart sapmaları ile birlikte numune özellikleri (faktörler) verilmiştir. Çizelgedeki genel olarak sertlik değerlerine bakıldığında, A bölgelerinin sertlik değerlerinin C bölgelerinden daha yüksek olduğu dikkat çekicidir. Ayrıca, Tablo 6.2’de T6 ısıtılmasına alınan numunelerde daha yüksek sertlik değerlerinin ölçüldüğü gösterilmektedir.

Tablo 6.2 Sertlik ölçümleri

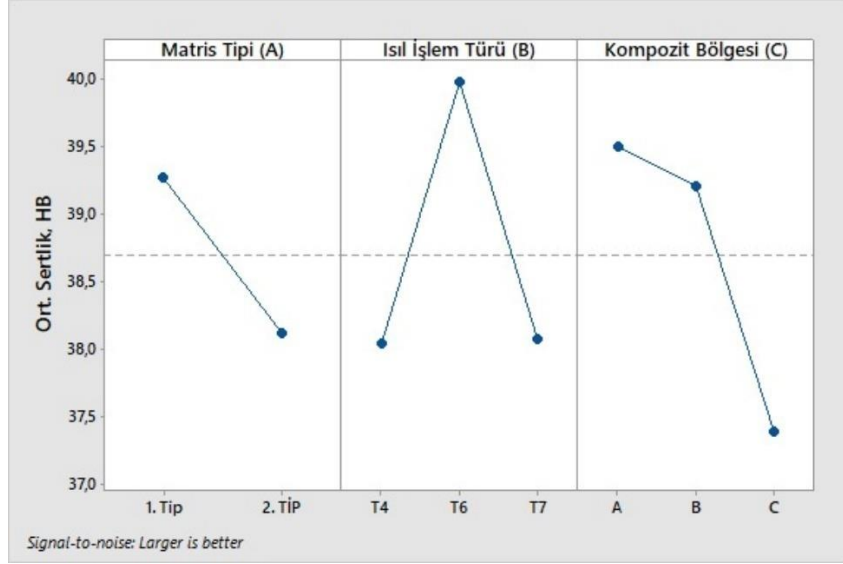
S. N.	Faktörler			Sertlik Ölçümleri (HB)						
	Matris Tipi	Isl İşlem	Bölge	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Ort.	SS
1	1.Tip	T4	A	71,8	61,3	69,3	84,2	57,5	68,8	10,4
2	1.Tip	T4	B	106,8	103,6	109,2	99,8	100,6	104,0	4,0
3	1.Tip	T4	C	68,9	78,2	83,0	77,1	76,2	76,7	5,1
4	1.Tip	T6	A	134,0	86,6	131	121	128	120,1	19,3
5	1.Tip	T6	B	119,0	117,2	114,8	113,2	114	115,6	2,4
6	1.Tip	T6	C	88,9	91,2	92,8	96	87,8	91,3	3,3
7	1.Tip	T7	A	110,8	107,6	106,8	107,6	97,8	106,1	4,9
8	1.Tip	T7	B	85,0	85,4	87,4	88,9	90,1	87,4	2,2
9	1.Tip	T7	C	78,6	79,8	75,4	81	80,6	79,1	2,3
10	2.Tip	T4	A	99,0	110,8	92,8	97,2	87,8	97,5	8,6
11	2.Tip	T4	B	84,2	67,4	83,4	87	82,6	80,9	7,7
12	2.Tip	T4	C	62,3	62,5	62,3	62,5	64,8	62,9	1,1
13	2.Tip	T6	A	106,0	114,8	93,9	112,4	118	109,0	9,5
14	2.Tip	T6	B	101,4	100,6	104,8	102,2	97,2	101,2	2,8
15	2.Tip	T6	C	75,4	80,2	74,2	69,9	73,4	74,6	3,7
16	2.Tip	T7	A	77,8	83,4	86,6	84,6	83,8	83,2	3,3
17	2.Tip	T7	B	65,1	60,9	70,6	76,6	71,8	69,0	6,1
18	2.Tip	T7	C	64,8	62,1	64,4	64,8	62,3	63,7	1,4

Tablo 6.2'ye bakıldığında, hangi faktörün sertlik üzerinde etkili olduğunu ve etkinin ne kadar olduğunu belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle, faktörlerin etkilerini daha net bir şekilde yorumlayabilmek için genelleştirilmiş bir t testi uygulaması olan varyans analizi veya ANOVA analiz yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 6.3 ANOVA tablosu (sertlik)

Faktörler	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	%Etki
Matris Tipi (A)	1	636,3	636,3	636,3	5,23	0,041	12
Isıl İşlem Türü (B)	2	1663,5	1663,5	831,7	6,83	0,010	30
Kompozit Bölgesi (C)	2	1746,9	1746,9	873,4	7,17	0,009	32
Ölçüm Hatası	12	1461,1	1461,1	121,8			27
Toplam	17	5507,7	636,3	636,3	5,23		100

Tablo 6.3'te faktörlerin etkilerini belirlemek için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını içermektedir. İstatistiksel olarak, bir faktörün etkisinin varlığı P değerine bakılarak değerlendirilir. P değeri 0.05'in altındaysa, faktör etkili olduğu kabul edilir. Tabloya göre, tüm faktörlerin P değeri 0.05'in altındadır, bu da tüm faktörlerin sertlik üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. F değerlerine bakıldığında, kompozit bölgesi faktörünün sertlik üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu, bunu sırasıyla ısıtma işlem türü ve matris türü faktörlerinin takip ettiği görülmektedir. Ayrıca, tablo matris türünün sertlik üzerindeki etkisinin %12, ısıtma işlem türünün %30, kompozit bölgesi faktörünün %32 ve diğer kontrol edilemeyen faktörler ile ölçüm hatalarının %27 olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.13 Sertlik oranları için faktörlere bağlı S/N grafiği

Bilgisayar programı aracılığı ile elde edilen faktör seviyelerinin ortalamaları kullanılarak oluşturulan faktör grafikleri Şekil 6.13'te sunulmuştur. Si ve Cu alaşım oranları yüksek olan Etial 110 matris kompozitindeki sertlik değerlerinin, matrisinde daha düşük alaşım içeriğine sahip kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu bulgu, matris içindeki alaşım elementlerinin oranının artırılmasının kompozitin sertliğini artırdığını göstermektedir. Şekil 6.13'de kompozitlere T6 ısıtma işlemlerinin uygulanmasıyla en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği, T4 ve T7 ısıtma işlemlerinde ise daha düşük sertlik değerlerinin görüldüğü belirtilmektedir. Bu sonuçlar, kompozitlerin sertliğinin 7 saatlik yapay yaşlandırma sonrasında en yüksek seviyeye ulaştığını ve daha sonra yapay yaşlandırma süresi arttıkça azaldığını göstermektedir. Bölgesel faktöre göre en yüksek sertlik değerlerinin A bölgesinde, ardından B bölgesinde, en düşük sertliğin ise C bölgesinde gözlemlendiği belirtilmiştir. A ve B bölgelerindeki yüksek sertlik değerlerinin, birçok araştırmacı tarafından rapor edildiği gibi [79-82] matris içindeki artan TiB_2 oranlarına bağlı olduğu ifade edilebilir.

6.7 Aşınma Deneyi Analizi

Aşınma deneylerinin sonuçları Taguchi deney tasarımı metoduna göre Tablo 5.3'te (yüksek ve düşük Si+Cu oranlı matris tiplerinde, ısıtma işlem türleri, kayma mesafeleri, uygulanan yükler ve kayma hızları) belirtilen parametreleri kullanılarak aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Deneyler öncesinde ve sonrasında numunelerin

ağırlıkları hassas bir terazi kullanılarak ölçülmüş ve aşınma oranları, bu ağırlıklar arasındaki farka dayanarak hesaplanmıştır. Her ölçüm en az üç kez tekrarlanmıştır, böylece sonuçlar güvenilirliği artırılmıştır.

Tablo 6.4'te Aşınma deneyleri sonrasında elde edilen aşınma oranları, onların ortalamaları ve en düşük en iyi kalite karakteristiğine göre hesaplanmış S/N oranları verilmiştir.

Tablo 6.4 Aşınma deneyi sonuçları

Deney Nu.	Aşınma Oranı (mm ³ /m)				S/N Oranı (dB)
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama	
1	0,0011832	0,0014315	0,0014892	0,000684	57,2393
2	0,0028392	0,0025995	0,0027877	0,000686	51,2321
3	0,0058657	0,0076671	0,0071177	0,001147	43,1920
4	0,0006059	0,0007138	0,0006152	0,000322	63,7844
5	0,0018492	0,0018492	0,0018096	0,000459	54,7220
6	0,0164944	0,0103794	0,0134367	0,002239	37,2867
7	0,0020498	0,0018958	0,0015523	0,000458	54,6829
8	0,0146982	0,0218584	0,0145021	0,002837	35,2089
9	0,0015154	0,0015335	0,0015821	0,000772	56,2284
10	0,0027231	0,0027279	0,0043278	0,000543	49,5096
11	0,0011173	0,0010224	0,0009771	0,000519	59,6555

Tablo 6.4 Aşınma deneyi sonuçları (devamı)

12	0,0078666	0,0141112	0,0078666	0,002487	39,6811
13	0,0016073	0,0019087	0,0020092	0,000462	54,6581
14	0,0043888	0,0040389	0,0038787	0,000684	47,7281
15	0,0016052	0,0013609	0,0016052	0,000762	56,3168
16	0,0127452	0,0112166	0,0110512	0,001943	38,6518
17	0,0018882	0,0020606	0,0018882	0,000973	54,2111
18	0,0162745	0,0158618	0,0097373	0,003483	36,9261

S/N oranlarına odaklandığımızda, daha yüksek bir S/N oranı (en küçük en iyidir karakteristiği), daha az aşınma anlamına gelir. Bu kapsamda; 8'inci deney S/N oranı 35,20 dB, en yüksek aşınma oranı 0,002837 mm³/m ile belirlenmiş ve en düşük aşınma oranı 4'üncü deneyde S/N oranı 63,78 dB ölçülmüş ve bu değer 0,000322 mm³/m olarak kaydedilmiştir. Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'da en yüksek ve en düşük aşınma oranlarına ilişkin parametreler sunulmuştur.

Tablo 6.5 En yüksek aşınma oranı parametreleri

Deney Nu.	Matris Tipi	Isıl İşlem Türü	Kompozit Bölge	Yük	Kayma Hızı	Kayma Mesafesi
8	1.Tip	T7	B	6	60	400

Tablo 6.6 En düşük aşınma oranı parametreleri

Deney Nu.	Matris Tipi	Isıl İşlem Türü	Kompozit Bölge	Yük	Kayma Hızı	Kayma Mesafesi
4	1.Tip	T6	A	2	60	600

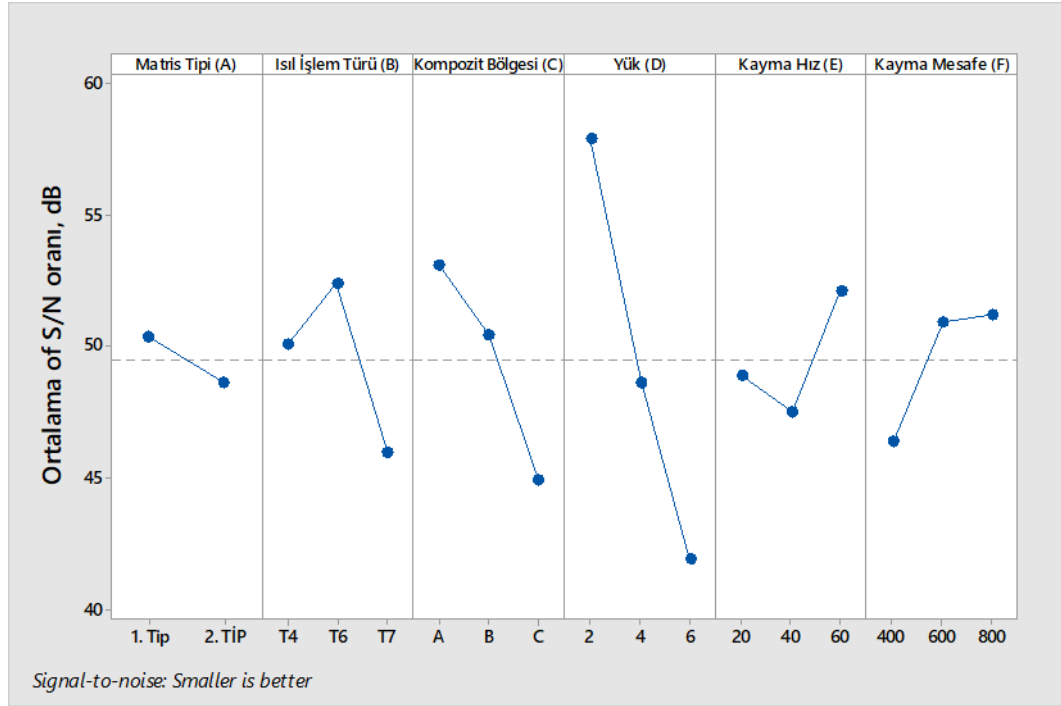
Taguchi yaklaşımına göre aşınma deneyleri için belirlenen faktörlerinin etkilerini ortaya koymak amacı ile ANOVA tablosu hazırlanmaktadır. ANOVA tablosu Tablo 6.7’de gösterilmiştir.

Tablo 6.7 ANOVA tablosu (aşınma)

Faktörler	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Matris Tipi (A)	1	14,65	14,65	14,650	1,53	0,262
Isıl İşlem Türü (B)	2	127,21	127,21	63,605	6,65	0,030
Kompozit Bölgesi (C)	2	207,60	207,60	103,798	10,85	0,010
Yük (D)	2	772,16	772,16	386,081	40,34	0,000
Kayma Hızı (E)	2	66,67	66,67	33,336	3,48	0,099
Kayma Mesafesi (F)	2	87,57	87,57	43,785	4,58	0,062
Ölçüm Hatası	6	57,42	57,42	9,570		
Toplam	17	1333,28				

Tabloya göre P değerleri, %95 güven düzeyi olarak belirlenen 0.05'e karşı incelenmiştir. Bu analizler sonucunda yük faktörü, ısıtım işlem türü ve kompozit bölgesi faktörlerinin aşınma üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. F değerlerine bakıldığında, yük faktörünün aşınma oranı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu, bunu sırasıyla bölge ve ısıtım işlem türü faktörlerinin takip ettiği görülmektedir.

Matris tipi ve kayma hızı faktörlerinin aşınma oranı üzerinde anlamlı etkiye sahip olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.14 Aşınma oranları için faktörlere bağlı S/N grafiği

Şekil 6.14'deki faktör seviyelerinin ortalamaları alınarak Matris tipi, ısıtma işlem türü, kompozit bölgesi, yük, Kayma hızı ve kayma mesafesi faktörlerinin grafiksel gösterimi sunulmuştur. Şekilde en yüksek etkiye sahip olan yük faktör grafiğine bakıldığında, S/N oranının en yüksek olduğu 2N yükte en düşük aşınma performansı sergilediğinin, en düşük S/N oranının ise 6N yükte ise en fazla aşınma performansı sergilediği görülmüştür. Bu, durumda uygulanan kuvvetin artmasıyla S/N oranının düştüğü yani aşınma oranının arttığı yorumlanabilir.

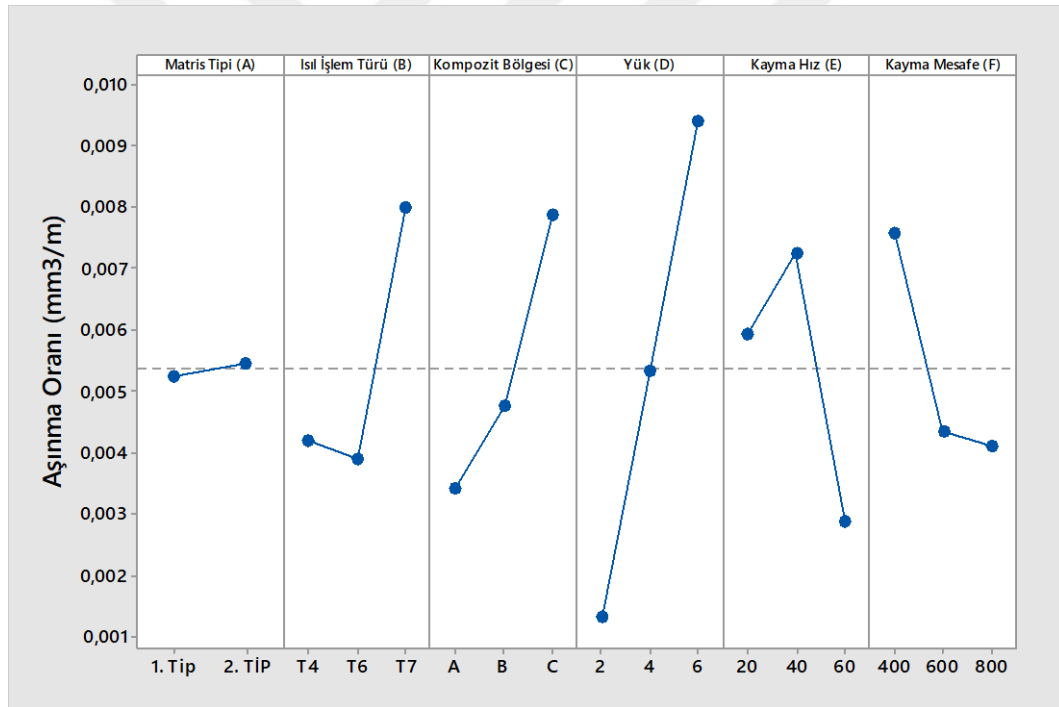
İkinci olarak anlamlı olarak kompozit bölge faktörü incelendiğinde, TiB₂ bakımından zengin bölgelerde (A bölgesi) S/N oranının daha yüksek bu yüzden aşınma oranı düşük, TiB₂ bakımından fakir bölgelerde (C bölgesi) ise S/N oranı daha düşük olduğu aşınma oranı yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, takviye oranının artmasıyla aşınma oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Isıl işlem türü faktör grafiğine bakıldığında, en yüksek S/N oranının T6 (doğal yaşlandırma) ısıtma işlem faktöründe olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda, en az aşınmanın T6 ısıtma işlem faktöründe ve en fazla aşınmanın T7 (aşırı yaşlandırma) ısıtma işlem faktöründe olduğu yorumlanabilir. Grafikte anlamlı bir etkiye sahip olmayan

faktör grafiklerine baktığımızda matris içerisinde alaşım elementi miktarının (matris tipi faktör), kayma hızının ve kayma mesafesinin artması ile arttığını göstermektedir.

Taguchi yaklaşımına göre elde edilen grafik faktörlerin yüksek olan seviyeleri en düşük aşınma oranını veren deney şartlarını göstermektedir. Şekildeki grafiğe göre en düşük aşınma oranı 1. Seri (A1) matris alaşımli kompozitin T6 ısıt işlemleri uygulanmış (B2), TiB₂ ile güçlendirilmiş (C1), 2 N yük altında (D1), 3 m/s kayma hızında (E3) ve 800 m kayma mesafesinde (F3) yapılan aşınma deney koşullarında elde edileceğini göstermektedir. “A₁B₂C₁D₁E₃F₃” deney şartları en düşük aşınma oranını veren optimum deney şartlarını göstermektedir.

Aşağıda Şekil 6.15'te, faktörlere bağlı aşınma oranlarını gösteren faktör grafikleri sunulmuştur.



Şekil 6.15 Faktörlere bağlı aşınma oranları

Grafikte 2N yükte 0,001 mm³/m ile aşınma oranının en düşük olduğu, 6N yükte ile 0,0092 mm³/m aşınma oranının ile en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. İkinci olarak, bölge faktörü incelendiğinde, en yüksek aşınmanın TiB₂ bakımından fakir olan C bölgesinde 0,008 mm³/m ve en düşük aşınmanın TiB₂ bakımından zengin olan A bölgesinde 0,0032 mm³/m seviyesinde olduğu görülmüştür. Takviye oranı arttıkça aşınma oranının düştüğü bunun nedeninin takviyenin yoğun olduğu

bölgelerde sertlik değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, ısıl işlem faktörü olarak da en az aşınma oranının T6 ısıl işleminde yaklaşık 0,004 mm³/m seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir.

S/N oranları dikkate alınarak Taguchi yaklaşımına göre lineer reglesyon denklemi verilmiştir. Denklem 6.2’de verilen denklem kullanılarak farklı aşınma şartlarında ortaya çıkacak aşınma oranı değerleri hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{SNRA1} = & 49,495 - 0,902 \text{ Matris Tipi_Düşük} + 0,902 \text{ Matris Tipi_Yüksek} + 0,59 \\ & \text{Isıl İşlem Türü_T4} + 2,92 \text{ Isıl İşlem Türü_T6} - 3,51 \text{ Isıl İşlem Türü_T7} + 3,59 \\ & \text{Kompozit Bölge_A} + 0,96 \text{ Kompozit Bölge_B} - 4,56 \text{ Kompozit Bölge_C} + 8,41 \\ & \text{Yük_2} - 0,84 \text{ Yük_4} - 7,57 \text{ Yük_6} - 0,58 \text{ Hız_20} - 2,02 \text{ Hız_60} + 2,59 \text{ Hız_40} - 3,11 \\ & \text{Mesafe_400} + 1,41 \text{ Mesafe_600} + 1,71 \text{ Mesafe_800}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Örneğin Denklem 6.2 kullanılarak en düşük aşınma oranını veren “A₁B₂C₁D₁E₃F₃” şartlarında ortaya çıkacak aşınma oranı hesaplanabilir. Aşağıda optimum deney şartlarında elde edilecek ortalama S/N oranı hesaplanmıştır. Buna benzer şekilde istenilen tüm aşınma şartlarının aşınma oranları hesaplanabilir.

Tablo 6.8’de optimum A₁B₂C₁D₁E₃F₃ deney şartlarında en düşük aşınma oranı için tahmini S/N oranı verilmiştir.

Tablo 6.8 A₁B₂C₁D₁E₃F₃ optimum parametreleri

Deney Reçetesi	Matris Tipi	Isıl İşlem	Kompozit Bölge	Yük	Kayma Hızı	Kayma Mesafesi	Tahmini S/N
A ₁ B ₂ C ₁ D ₁ E ₃ F ₃	1.Tip	T6	A	2	40	800	69,62

Bu çalışmada sedimantasyon yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş TiB_2 takviyeli Etial 110 matrisli kompozitlerin üretimi yapılmış, üretilen kompozitlerin mikroyapı özelliklerinin incelemesi gerçekleştirilmiş, sertlik ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar aşağıdaki maddeler halinde özetlenmiştir.

1. TiB_2 takviyeli alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler, sedimentasyon yöntemiyle başarılı bir şekilde üretildiği görülmüştür.
2. TiB_2 partikülleri, Al-Si-Cu (Etial 110) matris içerisinde in-situ tekniği kullanılarak sentezlendiği tespit edilmiştir. Sentezlenen TiB_2 partikülleri, 850 °C'de 2 saat bekletilerek sıvı alüminyum içinde fonksiyonel olarak derecelendiği tespit edilmiş, kompozitin alt kısmında, %12'den %10'a değişen bir TiB_2 gradyanına sahip olan olan 10 mm'lik bir bölge gözlemlenmiştir.
3. Yoğunluk hesaplamalarında kompozitin TiB_2 takviye oranının artması ile yoğunluğun arttığı gözlemlenmiştir.
4. Kompozitlerin sertliği üzerinde en belirgin etkiye sahip parametre “kompozit bölge” faktörü olduğu görüşmüştür. Sonrasında “ısıtılma işlem türü” ve “matris tipi” faktörleri izlenmektedir. Etial 110 alaşımında TiB_2 oranının artmasıyla sertlik değerinde belirgin bir değişim gözlemlenmiştir. Alüminyum matrise katılan TiB_2 partiküllerinin sertlik üzerinde %30 oranında bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
5. Matristeki Cu ve Si oranının artması, sertlik artışı üzerine etkili olduğu görülmüştür. Bu artışın sertlik üzerine etkisinin yaklaşık %12 olduğu tespit edilmiştir.
6. Kompozitlere uygulanan ısıtılma işleminin sertlik artışı üzerinde %32 oranında belirgin bir etkisi olduğu belirlenmiştir. T6 ısıtılma işlemi uygulanan kompozitlerde en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. %3,5 Si ve %2,5

Cu içeren alüminyum matrise %12 TiB₂ partikül eklenen ve T6 ısıt işleml uygulanayan bölgede, ortalama sertlik değeri 120 HB olarak ölçülmüştür.

7. Aşınma oranı üzerindeki etkileri değerlendirmek için uygulanan ANOVA sonuçlarına göre belirgin etkiye sahip parametreler “uygulanan kuvvet”, “ısıt işlem türü” ve “kompozit bölgesi” faktörleri olarak belirlenmiştir. Kompozite uygulanan kuvvetin artması ile aşınma oranının arttığı, takviye oranının artması ile ise aşınma oranının azaldığı görülmüştür. En az aşınma oranına ise T6 (yapay yaşlandırma) ısıt işleminde olduğu tespit edilmiştir.
8. Aşınma oranında en düşük değerin elde edilmesi için optimum parametrelerin yüksek Si+Cu matris tipinde, T6 (yapay yaşlandırma) ısıt işleminde, takviye bakımından zengin A bölgesinde, 2 N yükte, 60 m/s kayma hızında ve 600m kayma mesafesi oranında yapılacak deneyden elde edilebileceği tespit edilmiştir. Optimum deney reçetesi sonuçlarına göre en yüksek oranının 69,62 db olarak hesaplanmıştır.
9. Bu kapsamda; Taguchi deneysel yaklaşımı ile optimum deney reçetesi oluşturularak, en düşük aşınma oranını oluşturacak parametrelerin belirlenebildiği tespit edilmiştir.

- [1] S. L. Pramod, S. R. Bakshi, B. S. Murty, “Aluminum-Based Cast In Situ Composites: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 24, no. 6, pp. 2185–2207, 2015.
- [2] Alüminyum alaşımları-vikipedi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Alüminyum_alaşımları, 05.06.2024.
- [3] B. Stojanovic, M. Bukvic, M. Bukvic, I. Epler, “Application of Aluminum and Aluminum Alloys in Engineering,” 2018.
- [4] M. A. Taha, “Industrialization of Cast Aluminum Matrix Composites (Amccs),” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 5, pp. 619–641, Sep. 2001.
- [5] P. Sharma, D. Khanduja, S. Sharma, “Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 23, pp. 2192–2202, Nov. 2014.
- [6] S. V. Prasad, R. Asthana, “Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: Tribological considerations,” *Tribol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 445–453, Oct. 2004.
- [7] M. Toozandehjani, N. Kamarudin, Z. Dashtizadeh, E. Y. Lim, A. Gomes, C. Gomes, “Conventional and Advanced Composites in Aerospace Industry: Technologies Revisited,” *Am. J. Aerosp. Eng.* 2018, Vol. 5, Page 9, vol. 5, no. 1, pp. 9–15, Feb. 2018.
- [8] V. C. Kale, “Aluminium Based Metal Matrix Composites for Aerospace Application: A Literature Review,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng. e-ISSN*, vol. 12, no. 6, pp. 31–36, 2014.
- [9] G. Udupa, S. S. Rao, K. V. Gangadharan, “Functionally Graded Composite Materials: An Overview,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 1291–1299, Jan. 2014.
- [10] A. Toudehdeghan, J. W. Lim, K. E. Foo, M. I. N. Ma’arof, J. Mathews, “A brief review of functionally graded materials,” Jan. 2017.
- [11] N. B. Duque, Z. H. Melgarejo, O. M. Suárez, “Functionally graded aluminum matrix composites produced by centrifugal casting,” *Mater. Charact.*, vol. 55, no. 2, pp. 167–171, Aug. 2005.
- [12] S. Kumar, V. Subramaniya Sarma, B. S. Murty, “Functionally graded Al alloy matrix in-situ composites,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 1, pp. 242–254, Jan. 2010.
- [13] M. Naebe, K. Shirvanimoghaddam, “Functionally graded materials: A review of fabrication and properties,” *Appl. Mater. Today*, vol. 5, pp. 223–245, Dec. 2016.
- [14] R. Jojith, M. Sam, N. Radhika, “Recent advances in tribological behavior of functionally graded composites: A review,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 25, p. 100999, Jan. 2022.

- [15] M. Sam, R. Jojith, N. Radhika, "Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment—A critical review," *J. Manuf. Process.*, vol. 68, pp. 1339–1377, Aug. 2021.
- [16] G. S. Hanumanth, G. A. Irons, S. Lafreniere, "Particle sedimentation during processing of liquid metal-matrix composites," *Metall. Trans. B*, vol. 23, no. 6, pp. 753–763, Dec. 1992.
- [17] J. J. Sobczak, L. Drenchev, R. Asthana, J. J. Sobczak, L. Drenchev, "Nomograms for rapid assessment of particle sedimentation behaviour in liquid phase processing of particle reinforced metal composites," *Artic. Int. J. Cast Met. Res.*, 2013.
- [18] M. Pourmajidian, F. Akhlaghi, "Fabrication and Characterization of Functionally Graded Al/SiCp Composites Produced by Remelting and Sedimentation Process," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 2, pp. 444–450, Feb. 2014.
- [19] J. Simonet, G. Kapelski, D. Bouvard, "A sedimentation process for the fabrication of solid oxide fuel cell cathodes with graded composition," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 27, no. 10, pp. 3113–3116, 2007.
- [20] B. Wei, X. Yu, R. Chen, P. Chen, J. Cheng, "A novel approach to fabricate W–Cu functionally graded materials via sedimentation and infiltration method," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 816, Jun. 2021.
- [21] A. Ourdjini, K. C. Chew, B. T. Khoo, "Settling of silicon carbide particles in cast metal matrix composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 116, no. 1, pp. 72–76, Oct. 2001.
- [22] N. Kumar, G. Gautam, R. K. Gautam, A. Mohan, S. Mohan, "Synthesis and Characterization of TiB₂ Reinforced Aluminium Matrix Composites: A Review," *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 97, no. 2, pp. 233–253, Oct. 2016.
- [23] S. Suresh, N. S. V. Moorthi, "Aluminium-Titanium Diboride (Al–TiB₂) Metal Matrix Composites: Challenges and Opportunities," *Procedia Eng.*, vol. 38, pp. 89–97, Jan. 2012.
- [24] S. Rangrej, S. Pandya, J. Menghani, "Effects of TiB₂ reinforcement proportion on structure and properties of stir cast A713 composites," *Can. Metall. Q.*, vol. 62, no. 4, pp. 678–689, 2022.
- [25] M. T. Azhagan, M. Manoj, G. R. Jinu, V. Mugendiran, "Investigation of Mechanical Characterization, Thermal Behavior and Dielectric Properties on Al7075–TiB₂ MMC Fabricated Using Stir Casting Route," *Int. J. Met.*, vol. 17, no. 3, pp. 1569–1579, Jul. 2022.
- [26] V. S. Ayar, M. P. Sutaria, "Comparative Evaluation of Ex Situ and In Situ Method of Fabricating Aluminum/TiB₂ Composites," *Int. J. Met.*, vol. 15, no. 3, pp. 1047–1056, 2021.
- [27] S. Kumar, V. S. Sarma, B. S. Murty, "Influence of in situ formed TiB₂ particles on the abrasive wear behaviour of Al–4Cu alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 465, no. 1, pp. 160–164, 2007.
- [28] K. L. Tee, L. Lu, M. O. Lai, "In situ processing of Al–TiB₂ composite by the stir-casting technique," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 89–90, pp. 513–519, May 1999.

- [29] K. Krishnamurthy, M. Ashebre, J. Venkatesh, B. Suresha, "Dry Sliding Wear Behavior of Aluminum 6063 Composites Reinforced with TiB₂ Particles," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 5, pp. 74–89, 2017.
- [30] Ö. Savaş, "Application of Taguchi's method to evaluate abrasive wear behavior of functionally graded aluminum based composite," *Mater. Today Commun.*, vol. 23, p. 100920, 2020.
- [31] Ö. Savaş, "Fabrication and characterization of TiB₂-reinforced functionally graded aluminum matrix material," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 72, no. 10, pp. 1147–1152, Nov. 2020.
- [32] N. Sindhu, R. K. Goyal, V. M. Sreekumar, "Formation, Dispersion and Distribution of TiB₂ Particles in In-Situ Al-TiB₂ Functionally Graded Nanocomposites," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 5, pp. 1654–1672, May 2024.
- [33] Yastımoğlu, F., "Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı." *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), pp. 56–66. et al., 2017.
- [34] E. J. Barbero, "Introduction to Composite Materials Design, Second Edition," 1998.
- [35] H.-S. Shen, "Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells," *Funct. Graded Mater.*, Apr. 2016.
- [36] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, "Functionally graded materials," Jan. 2012.
- [37] A. Gupta, M. Talha, "Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 79, pp. 1–14, 2015.
- [38] I. M. El-Galy, B. I. Saleh, M. H. Ahmed, "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 11, Nov. 2019.
- [39] M. S. Surya, T. V. Nilesh, "Synthesis and mechanical behaviour of (al/sic) functionally graded material using powder metallurgy technique," *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 3501–3506, 2019.
- [40] M. S. Surya, G. Prasanthi, "Manufacturing and Micro structure study of Al-SiC Functionally graded material," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 621–627, 2017.
- [41] K. K. Kar, "Composite materials: Processing, applications, characterizations," *Compos. Mater. Process. Appl. Charact.*, pp. 1–686, Jan. 2016.
- [42] H.-S. Shen, "Functionally Graded Materials," *Funct. Graded Mater.*, Apr. 2016.
- [43] A. Kalemtaş, "Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış," 2014.
- [44] U. SOY, "SiC/B₄C takviyeli metal matriks kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," 2009.

- [45] D. Gültekin, “Metal matriksli kompozit fren diski, balatası üretimi ve karakterizasyonu,” 2007.
- [46] N. Benyam, “Materials Science by D. Callister,” 2010.
- [47] K. K. Chawla, “Composite materials: Science and engineering, third edition,” Compos. Mater. Sci. Eng. Third Ed., pp. 1–542, Jan. 2012.
- [48] M Kotoul, J. Pokluda, P. Sandera, Ī. Dlouhy, Z. Chlup, A. Boccaccini “Experimental and theoretical investigation of fracture in glass matrix composites reinforced by alumina platelets,” 2007.
- [49] M. D. Huda, M. S. J. Hashmi, M. A. El-Baradie, “MMCs: Materials, Manufacturing and Mechanical Properties,” Key Eng. Mater., vol. 104–107, no. Pt 1, pp. 37–64, 1995.
- [50] M. Haghshenas, “Metal–Matrix Composites,” Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng., 2016.
- [51] A. A. Adebisi, M. A. Maleque, M. M. Rahman, “Metal matrix composite brake rotors: Historical development and product life cycle analysis,” Int. J. Automot. Mech. Eng., vol. 4, no. 1, pp. 471–480, 2011.
- [52] K. K. Chawla, “Composite materials: Science and engineering, third edition,” Compos. Mater. Sci. Eng. Third Ed., pp. 1–542, Jan. 2012.
- [53] A. Mandal, M. Chakraborty, B. S. Murty, “Ageing behaviour of A356 alloy reinforced with in-situ formed TiB₂ particles,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 489, no. 1–2, pp. 220–226, Aug. 2008.
- [54] B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler, “Application of aluminum and aluminum alloys in engineering,” Appl. Eng. Lett., vol. 3, no. 2, pp. 52–62, 2018.
- [55] A. Farid, S. Guo, F. e. Cui, P. Feng, T. Lin, “TiB₂ and TiC stainless steel matrix composites,” Mater. Lett., vol. 61, no. 1, pp. 189–191, Jan. 2007.
- [56] V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S. I. Khondaker, S. Seal, “Graphene based materials: Past, present and future,” Prog. Mater. Sci., vol. 56, no. 8, pp. 1178–1271, Oct. 2011.
- [57] H. X. Peng, Z. Fan, D. S. Mudher, J. R. G. Evans, “Microstructures and mechanical properties of engineered short fibre reinforced aluminium matrix composites,” Mater. Sci. Eng. A, vol. 335, no. 1–2, pp. 207–216, Sep. 2002.
- [58] S. C. Tjong, Z. Y. Ma, “Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites,” Mater. Sci. Eng. R Reports, vol. 29, no. 3, pp. 49–113, Aug. 2000.
- [59] S. Kumar, V. Subramanya Sarma, B. S. Murty, “Effect of temperature on the wear behavior of Al-7Si-TiB₂ in-situ composites,” Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., vol. 40, no. 1, pp. 223–231, 2009.
- [60] S. C. Tjong, K. F. Tam, S. Q. Wu, “Thermal cycling characteristics of in-situ Al-based composites prepared by reactive hot pressing,” Compos. Sci. Technol., vol. 63, no. 1, pp. 89–97, Jan. 2003.

- [61] Y. Watanabe, Q. Zhou, H. Sato, T. Fujii, T. Inamura, "Microstructures of Al-Al₃Ti functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method and centrifugal in situ method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 1, Jan. 2017.
- [62] Z. Liu, Q. Han, J. Li, "Fabrication of in situ Al₃Ti/Al composites by using ultrasound assisted direct reaction between solid Ti powders and liquid Al," *Powder Technol.*, vol. 247, pp. 55–59, Oct. 2013.
- [63] N. Y. ÇOLAK, "Al-7Si%10B₄C kompozit malzeme üretiminde farklı sinterleme sıcaklıklarının mikroyapı ve sertlik üzerine etkisi, The effect of different sintering temperatures on microstructure and hardness in Al-7Si%10B₄C composite material production," *J. Boron*, Jan. 2019.
- [64] P. K. Chauhan, S. Khan, "Microstructural examination of aluminium-copper functionally graded material developed by powder metallurgy route," *Mater. Today Proc.*, vol. 25, pp. 833–837, 2019.
- [65] D. C. A. S. U. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments Ninth Edition," *Arizona State Univ.*, p. 640, 2017.
- [66] C. Hamzaçebi, "Taguchi Method as a Robust Design Tool," *Qual. Control-Intell. Manuf. Robust Des. Charts*, Mar. 2021.
- [67] R. M. Florea, "Metal-Ceramic composites via 'in situ' methods," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 227, no. 1, Aug. 2017.
- [68] E. Caniylmaz, F. Kutay, E. Mühendisliği Bölümü, M. Fakültesi, E. Üniversitesi, M. Mimarlık Fakültesi, "Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım," *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, vol. 18, no. 3, pp. 51–63, 2003.
- [69] A. Lombardi, C. Ravindran, R. MacKay, "Improvements in mechanical properties of 319 al alloy engine blocks through cost-effective solution heat treatment," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 8, pp. 2766–2771, May 2014.
- [70] D. Medlen, D. Bolibruchova, "Effect of Sb-Modification on the Microstructure and Mechanical Properties of Secondary Alloy 319," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, no. 2A, pp. 553–558, 2016.
- [71] H. Alipooramirabad, S. Kianfar, A. Paradowska, R. Ghomashchi, "Residual stress measurement in engine block—an overview," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 131, no. 1, pp. 1–27, Mar. 2024.
- [72] S. Alsowidy, B. Al-Asry, "Effects of Al₃Ni compound on localized plastic deformation and creep strain of Al/Si hypoeutectic material," *Sci. Reports* 2024 141, vol. 14, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2024.
- [73] O. N. Carlson, "The Al-B (Aluminum-Boron) system," *Bull. Alloy Phase Diagrams*, vol. 11, no. 6, pp. 560–566, Dec. 1990.
- [74] G. Gan, C. Zhang, D. Yang, M. Yang, X. Jiang, Y. L. Shi, "Effect of TiB₂ on microstructure of 7075 Al alloy semi-solid slurry at different solid fraction," *Mater. Trans.*, vol. 58, no. 5, pp. 734–738, 2017.

- [75] G. S. Gan, Q. Gao, B. Yang, S. De Gan, "Effect Sedimentation of TiB₂ Particles on the Microstructure of 7075 Al Alloy," *Adv. Mater. Res.*, vol. 904, pp. 50–53, 2014.
- [76] V. Raghavan, "Al-Ta-Ti (aluminum-tantalum-titanium)," *J. Phase Equilibria Diffus.*, vol. 26, no. 6, pp. 629–634, Dec. 2005.
- [77] R. Du, Q. Gao, S. Wu, S. Lü, X. Zhou, "Influence of TiB₂ particles on aging behavior of in-situ TiB₂/Al-4.5Cu composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 721, pp. 244–250, 2018.
- [78] J. Liu, X. Chen, W. Wang, Y. Zhao, N. He, "Effect of TiB₂ Nanoparticle Content on the Microstructure and Mechanical Properties of TiB₂/Mg-4Al-1.5Si Composites," *Materials*, vol. 16, no. 7. 2023.
- [79] Ö. Savaş, F. Demirok, "Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 17, pp. 972–981, Dec. 2019.
- [80] A. D. Vishwanatha, D. M. Shivanna, B. Panda, "Corrosion Behaviour of In Situ AlxNiy Reinforced AA6061 Composite," *Key Eng. Mater.*, vol. 882, pp. 96–103, 2021.
- [81] Y. Shen, X. Li, T. Hong, J. Geng, H. Wang, "Effects of TiB₂ particles on microstructure and mechanical properties of an in-situ TiB₂-Al-Cu-Li matrix composite," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 655, pp. 265–268, Feb. 2016.
- [82] M. T. Azhagan, M. Manoj, G. R. Jinu, V. Mugendiran, "Investigation of Mechanical Characterization, Thermal Behavior and Dielectric Properties on Al7075-TiB₂ MMC Fabricated Using Stir Casting Route," *Int. J. Met.*, vol. 17, no. 3, pp. 1569–1579, Jul. 2023.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] Akyol U. A., Kocaman E., Savaş Ö., “Sedimentasyon Yöntemi ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş $TiB_2/Al-Cu-Si$ Kompozitlerin Üretilebilirliğinin Araştırılması,” ICSAS 2nd International Conference on Applied Sciences, pp. 223-234, April 19 – 21 2024.

