

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİTANYUM Dİ-BORİD İLE FONKSİYONEL OLARAK
DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM ANA YAPILI
KOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ
TAGUCHİ YAKLAŞIMIYLA İNCELENMESİ**

Hasan KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

Danışman

Doç. Dr. Ömer SAVAŞ

Şubat, 2022

Danışmanım Doç. Dr. Ömer SAVAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Titanyum Di-Borid ile Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Alüminyum Ana Yapılı Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Taguchi Yaklaşımıyla İncelenmesi" 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.

Hasan KILIÇ

İmza



Bu alışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün FBA-2020-3985 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Destekleri için Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.



*Aileme
ve
biricik eşime*

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde her konuda yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer Danışman Hocam Doç. Dr. Ömer SAVAŞ'a, yüksek lisansa devam edebilmemin yolunu açan Gökhan ODUNCU'ya, yüksek lisans çalışmam boyunca her türlü desteği veren Cengiz BEŞİROĞLU, Yusuf ERKAN ve Arenka Makina çalışanlarına, savurma döküm makinesi ve kalıp yapımında yardımlarını esirgemeyen Necdet ÖZDEMİR'e ve Mehmet KORK'a, doğduğum günden beri hayatımın tüm aşamalarında yanımda olan ve her türlü imkânı sağlayan değerli aileme ve çalışmalarım boyunca yanımda olan değerli eşim Alkım KILIÇ'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Hasan KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	19
1.1 Literatür Özeti.....	19
1.2 Tezin Amacı	21
1.3 Hipotez	22
2 KOMPOZİT MALZEMELER	23
2.1 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri	23
2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	24
2.3 Metal Matrisli Kompozitler	25
2.3.1 Matrislerine göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	26
2.3.2 Matrislerine göre Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) sınıflandırılması.....	26
2.3.3 Alüminyum Matrisli Kompozitler.....	27
2.3.4 Takviyeler	28
2.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi.....	29
2.4.1 Sıvı Hal Yöntemleri	29
2.4.2 Katı Hal Yöntemleri.....	32
2.4.3 İn situ Prosesi.....	33
3 AŞINMA	35
3.1 Abrasif Aşınma	37
3.2 Adhesiv Aşınma	38
3.3 Titreşimli (Fretting) Aşınma	38

3.4	Yorulma Aşınması.....	39
3.5	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerde Abrasif Aşınma Testleri.....	39
3.5.1	Abrasif Ortam Etkisi.....	40
3.5.2	Matris Tipinin Etkisi.....	40
3.5.3	Uygulanan Yükün Etkisi	40
3.5.4	Kayma Hızının Etkisi.....	41
3.5.5	Kayma Mesafesinin Etkisi	41
4	TAGUCHİ METODU	42
4.1	Ortogonal Diziler.....	42
4.2	Sinyal/Gürültü Oranı.....	44
4.3	Etkileşimlerin Değerlendirilmesi	44
4.4	Varyans Analizi	45
4.5	Hesaplamalar	45
4.5.1	Kareler Toplamı	45
4.5.2	Hata Varyasyonu.....	46
4.5.3	Serbestlik Derecesi	46
4.5.4	Hata Varyansı	46
4.5.5	F Testi.....	46
4.5.6	Değişime katkının yüzdesi :.....	47
4.5.7	Doğrulama Deneyleri	47
5	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
5.1	Mastır Kompozitlerin Üretimi	49
5.2	Savurma Döküm.....	54
5.3	Mikroyapı İncelemeleri.....	57
5.4	Sertlik Ölçümleri	59
5.5	Aşınma Deneyleri	59
6	DENEYSEL SONUÇLAR	63
6.1	Makro Yapı.....	63
6.2	XRD Analizi	64
6.3	Mikro Yapı	65
6.4	SEM Analizi.....	67
6.5	Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	69
6.6	Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	69

6.7 Aşınma Deneyi Sonuçları.....	71
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKÇA	83
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	90



SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
Al-Cu	Alüminyum-Bakır
AlB	Alüminyum Bor
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Al-Si	Alüminyum-Silisyum
Al-Ti	Alüminyum-Titanyum
Cu	Bakır
B	Bor
B ₄ C	Bor Karbür
HB	Brinell Sertliği
dB	Desibel
GPa	Giga Pascal
g	Gram
g/cm ³	Gram/santimetreküp
HCl	Hidroklorik asit
kW	Kilo Watt
MPa	Mega Pascal
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
N	Newton
Nmm	Newton milimetre
K ₂ TiF ₆	Potasyumflorotitanat
KBF ₄	Potasyumtetrafloroborat
HRA	Rockwell A Sertliği

C°	Santigrat derece
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
Ti	Titanyum
TiB ₂	Titanyumdiborür
TiC	Titanyum Karbür
HV	Vickers Sertliği
ZrB ₂	Zirkonyumdiborür



KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Varyans Analizi
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
SN Oranı	Sinyal/Gürültü Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıklıkla Kullanılan Alaşımlardan Alüminyum, Çelik ve Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması [28]	24
Şekil 2.2 FDM’de Bulunan Farklı Fazların Şematik Gösterimi [30]	24
Şekil 2.3 Farklı Formlardaki Takviye Fazları [29]	29
Şekil 2.4 Farklı Malzemelerin Takviye Malzemeleri Olarak Kullanım Yüzdeleri [39]	29
Şekil 2.5 Duralcan Yönteminin Şematik Gösterimi [38]	30
Şekil 2.6 Ön Form Oluşturma Yöntemlerinin Şematik Gösterimi [38]	31
Şekil 2.7 Sıkıştırma Dökümü [38]	31
Şekil 2.8 Difüzyon Bağlama İşleminin Şematik Gösterimi [38]	32
Şekil 3.1 Aşınma Modlarının ve Aşınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması ve Gösterimi [52]	36
Şekil 3.2 Farklı Abrasif Aşınma Testlerinin Şematik Gösterimi [52]	40
Şekil 5.1 Kompozit Üretimin Adımlarının Şematik Gösterimi	49
Şekil 5.2 Ergitmede Kullanılan Kalıplar	50
Şekil 5.3 Al – B faz diyagramı [81]	51
Şekil 5.4 Al – Ti faz diyagramı [82]	52
Şekil 5.5 Ergitme Fırını	53
Şekil 5.6 %5 Oranında TiB ₂ İçeren Saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu Matrisli Mastır Kompozitlerin Görüntüsü	54
Şekil 5.7 Savurma Döküm Mekanizmasının Tasarım Görüntüsü	54
Şekil 5.8 Savurma Döküm Mekanizması (Gerçek)	55
Şekil 5.9 Döküm Kalıbının Teknik Resim Görüntüsü	55
Şekil 5.10 Kalıba Yerleştirilmiş Mastır Kompozit	56
Şekil 5.11 Savurma İşlemi	56
Şekil 5.12 Kompozit Numuneleri	57
Şekil 5.13 Döküm Numunesi Dağlama Sonrası	57
Şekil 5.14 Mikroyapı İncelemeleri için Hazırlanan Numune	58
Şekil 5.15 Optik Mikroskop ile Mikroyapı İnceleme	58

Şekil 5.16 THL 500 Sertlik Ölçüm Cihazı Kullanılarak Numunlerden Sertlik Ölçümü Alınması	59
Şekil 5.17 Abrasif Aşınma Tezgahı Temsili Görüntüsü	60
Şekil 6.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Titanyümdiborür Takviyeli Alüminyum Kompozit	
Numunesi.....	63
Şekil 6.2 Numunelerden Alınan XRD Sonuçları	64
Şekil 6.5 TiB ₂ 'ce Zengin ve Fakir Bölgeyi İçeren Geçiş Bölgesi	66
Şekil 6.6 Al-%4Cu Matrisli Kompozit Numuneden Alınan SEM Görüntüsü 1	68
Şekil 6.7 Al-%4Cu Matrisli Kompozit Numuneden Alınan SEM Görüntüsü 2	68
Şekil 6.8 Al ₃ Cu İntermetalik Bileşikleri SEM Görüntüsü.....	68
Şekil 6.9 Sertlik Ölçümü için Alınan Kesitin Şematik Gösterimi.....	70
Şekil 6.10 Faktör ve Seviyelerinin Grafik Gösterimi.....	75
Şekil 6.11 Saf Alüminyum Matrisli Kompozitin %15 TiB ₂ Partikül Oranındaki Bölgelerinden	
Alınan Aşınma İzlerinin Mikroskobik Görüntüsü.....	76
Şekil 6.12 Saf Alüminyum Matrisli Kompozitin %0 TiB ₂ Partikül Oranındaki Bölgelerinden	
Alınan Aşınma İzlerinin Mikroskobik Görüntüsü.....	76

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Tablo L18 Ortogonal Dizisi[74]	43
Tablo 5.1 Al-Ti-B Sistemlerini Oluşturmada Kullanılan Alaşım Kompozisyonları	50
Tablo 5.2 DeneySEL Çalışmaların Seviyeleri.....	60
Tablo 5.3 Taguchi L18 Deney Reçetesi.....	61
Tablo 6.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	69
Tablo 6.2 Numunelerden Alınan Sertlik Ölçümlerinin Sonuçlarının Ortalama Değerleri.....	70
Tablo 6.3 Aşınma Deney Sonuçları	71
Tablo 6.4 Deney 1 Parametreleri (En yüksek ağırlık kaybı)	72
Tablo 6.5 Deney 17 Parametreleri (En düşük ağırlık kaybı)	72
Tablo 6.6 ANOVA Tablosu	73
Tablo 6.7 Optimum Deney Şartları	79
Tablo 6.8 Doğrulama Deneyi Sonuçları.....	79
Tablo 6.9 Doğrulama Deneyi Hesaplamaları ve Karşılaştırması	80

Titanyum-Diborid ile Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Alüminyum Ana Yapılı Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Taguchi Yaklaşımıyla İncelenmesi

Hasan KILIÇ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ömer SAVAŞ

Bu çalışmada Fonksiyonel Derecelendirilmiş in situ TiB_2/Al , $TiB_2/Al-4Si$ ve $TiB_2/Al-4Cu$ Kompozitlerinin savurma döküm yöntemiyle üretilmesi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi hedeflenmektedir. Sıvı matris içerisinde Titanyum Diborür (TiB_2) partikülleri oluşturmak için in situ tekniği kullanılmıştır. 1200 C°'da hazırlanan Al-Ti çözeltisi 800 C°'ye indirilerek $Al_{(sıvı)} + TiB_{2(katı)}$ çözeltisi elde edilmiştir. Ardından çözelti 1500 rpm'de savurma kuvveti altında savrulurak kompozitler üretilmiştir. Üretilen Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin özellikleri incelenirken yoğunluk testleri, abrasif aşınma analizleri, sertlik incelemeleri ve mikro yapı incelemeleri dikkate alınmıştır. Kompoziterin aşınma özelliklerinin belirlenmesinde ağırlık kayıpları gr cinsinden dikkate alınmıştır. Pin-on-disk aşınma sistemi kullanılmış, aşınma testlerinin yapılmasında Taguchi yaklaşımından faydalanılmıştır. Aşınma parametreleri olarak;

TiB₂ partikül oranı, matris tipi, aşındırıcı partikül boyutu, kayma hızı, uygulanan yük ve kayma mesafesi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Üretilen kompozitlerin 2 bölgeden oluştuğu görülmüştür. Bu bölgelerin TiB₂'ce zengin bölgeler ve TiB₂'ce fakir bölgeler olduğu tespit edilmiştir. TiB₂'ce zengin bölgelerde TiB₂ oranının ağırlıkça %15 olduğu, fakir bölgelerde ise TiB₂ oranının ağırlıkça %0 olduğu belirlenmiştir. Üretilen tüm kompozitlerde TiB₂'ce zengin bölgelerin yoğunluk değerlerinin ve sertlik değerlerinin TiB₂'ce fakir bölgelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Abrasif aşınma deneylerinde, TiB₂ partikül oranının ve kayma hızının artırılması ile aşınma kayıplarının azaldığı görülmüştür. Aşındırıcı partikül boyutunun artması, kayma mesafesinin artması ve uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma kayıplarının arttığı görülmüştür. Kompozit malzemelerde saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matris tiplerinin de aşınma miktarına etki ettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Titanyum-diborid, TiB₂, in-situ, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, Taguchi metodu, abrasif aşınma.

Investigation of Wear Behavior of Aluminum Based Composites Functionally Graded with Titanium-Diboride by Taguchi Approach

Hasan KILIÇ

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Associate Prof. Dr. Ömer SAVAS

In this study, it is aimed to produce functionally graded in situ TiB_2/Al , $\text{TiB}_2/\text{Al-4\%Si}$ and $\text{TiB}_2/\text{Al-4\%Cu}$ composites by centrifugal casting method and investigate the abrasive wear properties of the produced composites. In situ technique has been used to form Titanium-diboride (TiB_2) particles in the liquid matrix. Al-Ti molten prepared at 1200°C has been reduced to 800°C and $\text{Al}_{(\text{liquid})} + \text{TiB}_{2(\text{solid})}$ solution has been obtained. Then, composites have been produced by centrifuging the solution at 1500 rpm under centrifugal force. Density tests, abrasive wear analyzes, hardness examinations and microstructure investigations have been taken into consideration while examining the properties of the produced Functionally Graded Composites. Weight losses in grams have been taken into account in determining the wear properties of the composite. Pin-on-disc wear system has been used and Taguchi approach has been used in the wear tests. As wear parameters; factors such as TiB_2 particle ratio, matrix type, abrasive particle size, sliding speed, applied load and sliding distance were taken into account. It has been observed that the produced composites consisted of 2 regions and that these regions were TiB_2 rich regions and TiB_2 poor regions. It has been determined that the TiB_2 ratio is 15% by weight in TiB_2 -rich regions, while the TiB_2 ratio is 0% by weight in

poor regions. It has been determined that the density values and hardness values of the TiB_2 -rich regions in all produced composites were higher than the TiB_2 -poor regions. It has been seen that abrasive wear losses decrease with increasing TiB_2 particle ratio and sliding speed. It has been observed that wear losses increase with increasing abrasive particle size, increasing sliding distance and increasing applied load. It has been observed that pure Al, Al-4%Si and Al-4%Cu matrix types in composite materials also affect the amount of wear.

Keywords: Titanium-diboride, TiB_2 , in-situ, functionally graded materials, Taguchi's method, abrasive wear



1.1 Literatür Özeti

Kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılan malzemelerden biri Alüminyumdur[1]. Alüminyum yapı malzemesi olabilecek kadar dayanıklıdır. 6061-T6 alaşımı neredeyse A36 çeliği ile eşdeğer akma mukavemetine sahiptir ve yaklaşık olarak üçte bir hafifliğinde olması avantajlı bir malzeme olmasına katkıda bulunur. Yüksek dayanım/ağırlık oranı Alüminyumun çeşitli alanlarda kullanılmasına katkıda bulunmuştur. Alüminyumun korozyona dayanıklı olması da bir diğer avantajıdır. Yapı malzemeleri, gemi asma merdivenleri ve köprülere kadar kullanım alanı bulmuştur [1].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) olarak bilinen yeni bir kompozit malzeme türü bulunmaktadır. FDM'ler farklı fazlarda malzeme içeriklerinden oluşmaktadır [2]. FDM'ler içerisinde farklı mikro yapısal fazlar farklı işlevlere sahiptirler [2]. Oluşturan malzemelerin hacimsel oranlarının gradyan olarak değişmesi, malzeme özelliklerinin bir yüzeyden diğerine pürüzsüz ve devamlı geçişine olanak sağlar. Böylece; ara bölgede yaşanan problemlerin önüne geçilmiş olunur [2]. İçeriğindeki metal bileşenleri, yüksek mekanik performans sağlayıp olası bir kırılmanın önüne geçerken; kalan seramik bileşenleri de termal dayanım karakteristikleri nedeniyle yüksek sıcaklıklı ortamlara dayanabilmektedirler [2].

Alüminyumun yapısal özelliklerinin artırılması için kullanılan yöntemlerden biri Metal Matrisli Kompozit (MMK) oluşturulmasıdır. Görece yeni bir kompozit türü olan Metal Matrisli Kompozitlerde, Alüminyum matris içerisine karbon, metal veya seramik takviyesi eklenmektedir [1]. MMK'lar düşük yoğunluğa sahip olan alüminyum ile dayanım, sertlik, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklere sahip olan seramikleri birleştirmektedir. MMK'ların dezavantajları arasında sünekliğin azalması ve yüksek maliyeti -geleneksel alüminyum alaşımlarından yaklaşık 3 kat fazla göze çarpmaktadır. Hala üzerinde çalışmalar yapılan MMK'lar otomobil dizel motorlarında piston, silindir gömleği, fren elemanlarında kullanım alanı bulmuştur [1].

Alüminyum matrise TiB_2 , SiC , Al_2O_3 , B_4C gibi takviyelerin ilavesinin malzemenin yoğunluğunu değiştirmezken, kompozitin modülüsünü ve özgül mukavemetini arttırdığı görülmüştür [3]. Bu sonuç ağırlığın azaltılması istenilen yerlerde Alüminyum Matrisli

Kompozitlerin kullanımının önünü açmıştır. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde kullanılan takviye elemanlarından biri de TiB_2 'dir [4]–[6]. TiB_2 takviye kullanımı için uygun özelliklere sahiptir. 2790 C° erime noktası, 86 HRA veya 960 HV sertliği, 530×10^3 GPa elastik modülü ve termal stabilitesi bu özelliklerdendir [3]. Ayrıca TiB_2 partiküllerinin eriyik alüminyum ile reaksiyona girmemesi, takviye-matris ara fazında kırılğan reaksiyon ürünlerinin oluşmasını önlemektedir.

TiB_2 ile yapılan çalışmalarda TiB_2 takviyesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Tjong ve arkadaşları Al-Ti-B sistemini kullanarak TiB_2 oluşturmayı başarmışlardır [7]. Al-Ti-B sistemi oluşturmada KBF_4 ve K_2TiF_6 tuzları, AlB ve Al-Ti mastır alaşımları yaygın olarak kullanılmıştır [8]–[15].

Bu çalışmada kompozitlerin üretiminde in situ metodu tercih edilmiştir. Ex situ metodu kullanılarak üretilen kompozitlerde matris ve takviye fazı arasındaki termodinamik kararsızlık, yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri ve çalışma ortamını kısıtlamaktadır. Ex situ metotlarındaki temel zorluk, matris ve takviye fazı arasındaki ıslatma problemlerinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında kümeleşme ve mikro yapıdaki heterojenlik de Ex situ metodunun dezavantajlarındandır. İn situ kompozitlerin üretimi, takviye fazının doğrudan matris içerisinde sentezlenmesiyle yapılmaktadır. Bu yaklaşım, takviyenin önceden sentezlenip sonradan eritme, infiltrasyon, toz işleme gibi ikincil bir işlemlerle matrise eklendiği ex situ yönteminin zıttıdır [16]. Ex situ yönteminde karşılaşılan termodinamik kararsızlık problemi, takviyenin matris içerisinde sentezlenmesi ile İn-situ yönteminde çözülür. Bunun yanında termodinamik stabilite, reaksiyonun kinetik kontrolü, düşük takviye boyutları, üniform dağılıma, ara yüz bağının iyi oluşu ve diğer metoda oranla ekonomik olması in situ metodunun avantajları olarak sayılabilir [17], [18].

Takviyesiz 6061'in, takviyeli 6061'e göre daha fazla aşındığını ve 6061 alaşımına TiB_2 'nin %15 ilavesinin aşınma hızını azalttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır [19]. %15 TiB_2 ilavesinin elastik modülünü %21,5, çekme gerilmesini %56,5, akma gerilmesini %65,7 arttırdığı rapor edilmiştir [11]. Sasikumar [20] ve arkadaşlarının çalışmalarında 180 HRA sertlik değerindeki malzeme %3 TiB_2 ilavesi ile 210 HRA'ya yükselmiştir. Kumar [21] ve arkadaşları TiB_2 takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretirken savurma döküm yöntemi kullanmıştır. Ömer Savaş [15] ve arkadaşları alüminyuma TiB_2 ilavesi ile ortalama aşınma kayıplarının 0,08 gr'dan 0,03 gr'a kadar düştüğünü, Cu ve TiB_2 ilavesi ile ise 0,001 gr'a kadar düştüğünü tespit etmişlerdir.

Radhika [22] ve ark. savurma döküm ile fonksiyonel derecelendirilmiş LM13 Al/ağırlıkça% 10 TiB₂ kompozit üretmiştir ve mikroyapı incelemeleri yapmışlardır. Sindhu [23] ve arkadaşları 6061 alaşımına ağırlıkça %5TiB₂ takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit üretmiş ve karakterizasyon incelemesi yapmıştır. Ömer Savaş [24] fonksiyonel derecelendirilmiş TiB₂/Al ve TiB₂/Al-%4Cu fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitleri üretmiştir. Her iki kompozitin TiB₂'ce zengin ve fakir iki bölgeden oluştuğunu rapor etmiştir.

Radhika [22] ve ark. TiB₂ takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitte kuru abrazyon testi ile aşınma davranışlarını; uygulanan yük, kayma hızı ve mesafesi gibi parametreler kullanarak incelemiştir. Sindhu [23] ve arkadaşları TiB₂ takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitte dış bölgelerinde daha yüksek aşınma dayanımı gördüklerini rapor etmiştir.

Malzemenin aşınma davranışları incelenirken yapılan deneylerde Taguchi deney tasarımından faydalanılmıştır. Taguchi deney tasarımı ile deney sayısı düşürülmektedir ve daha az deney ile sonuca daha hızlı ulaşılabilir. Bu metot bir çok araştırmada başarıyla uygulanmıştır [25][26][27]. Ömer Savaş [24] fonksiyonel derecelendirilmiş TiB₂/Al ve TiB₂/Al-%4Cu kompozitlerinin aşınma davranışlarını Taguchi deney tasarımını kullanarak; matris tipi, kompozitin bölgesi, abrasif partikül boyutu, kayma hızı ve uygulanan yük parametreleri yönünden incelemiş ve hacimsel kayıpların uygulanan yükün, kayma hızının ve partikül boyutlarının artmasıyla arttığını, TiB₂ takviye oranının artmasıyla azaldığını rapor etmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Yapılan tez çalışmasının amacı :

- Dış tarafı ve iç tarafı farklı aşınma özelliklerine sahip malzemeler üretmek ve aşınma özelliklerini belirlemek
- Al, Al-Si, Al-Cu matrisli in situ TiB₂ takviyelendirilmiş metal matrisli kompozitleri üretmek
- Savurma döküm makinesi yaparak üretilen kompozitlerin savurma yönünde takviye miktarını arttırmak
- Üretilen kompozitlere Taguchi deney reçetesi uygun olarak aşınma deneylerinin yapılması

1.3 Hipotez

Metal matrisli kompozitler hala üzerinde araştırmaların yapıldığı, çok farklı üretim tekniğinin olduğı görece yeni bir tür malzemedir. Bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşması için maliyetlerinin düşürölmesi, üretiminin yaygınlaşması gerekmektedir. Bunun için de üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerektiğı öngöröllebilir. Bu çalışmalara katkıda bulunmak amacıyla Al , Al-Si, ve Al-Cu matrisli in situ TiB₂ takviyeli kompozitleri üretmek ve savurma döküm yöntemiyle takviyenin savurma kuvveti yönünde artttığı kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özelliklerinin (sertlik ve aşınma) artan takviye oranı ile iyileştirileceğı öngörölmemektedir.

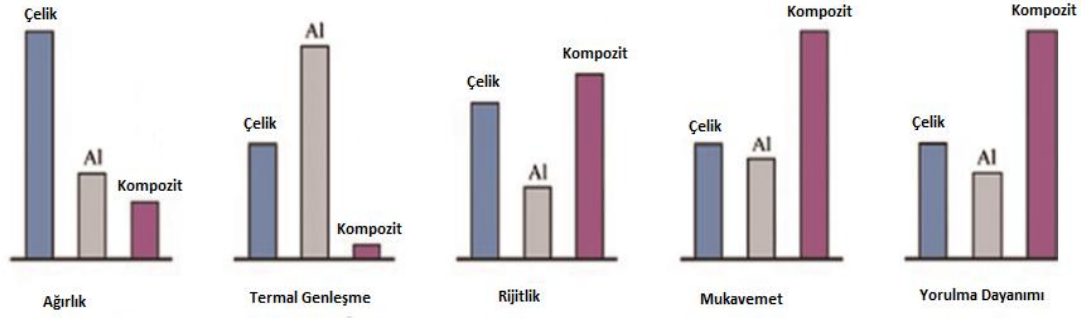


Teknolojik gelişmenin sınırlarını belirleyen konulardan biri malzemenin gelişmesi olmuştur. Geçmişten günümüze, medeniyetlerin yüksek teknolojik ürünlerle gelişmesinde malzemeler önemli rol oynamıştır. Malzemelerin birlikte kullanılmasının saf haliyle kullanımlarına kıyasla niteliklerini arttırdığının görülmesi çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzemeler, amacı başlangıç malzemelerinin faydalı özelliklerinin birleştirilmesi olan, fiziksel ve/veya kimyasal olarak farklı materyallerin makro fiziksel birleşimidir. Nihai ürün, başlangıç ürünlerinin sahip olduğundan daha üstün özelliklere sahip olan benzersiz bir malzemedir. Ortaya çıkan malzemenin özellikleri temel olarak malzemeyi oluşturan her bir bileşenin özelliklerine bağlıdır[28]. İki veya daha fazla malzemeden üretilen kompozit malzemelerin özellikleri veya karakteristikleri tek bir malzemeden elde edilemez. Alaşımların veya polimerlerin özellikleri ise ana bileşenlerin özelliklerine çok yakındır; bu nedenle kompozit malzeme olarak görülmezler[28].

2.1 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzemelerin en önemli avantajı hafif oldukları kadar güçlü olmalarıdır. Uygun matris ve takviye kombinasyonu ile bir kompozit özel bir uygulama için gereken ihtiyacı karşılayabilir. Kompozitlerin çoğuna karmaşık şekiller verilebilmesi tasarım esnekliği sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin üstünlük sağlayan özellikleri şunları içerir[29] :

- Yüksek rijitlik ve yüksek dayanım
- Yüksek Young modülü
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Yüksek korozyon dayanımı
- Düşük yoğunluk
- Yüksek termal ve elektrik iletkenliği
- Yüksek aşınma dayanımı

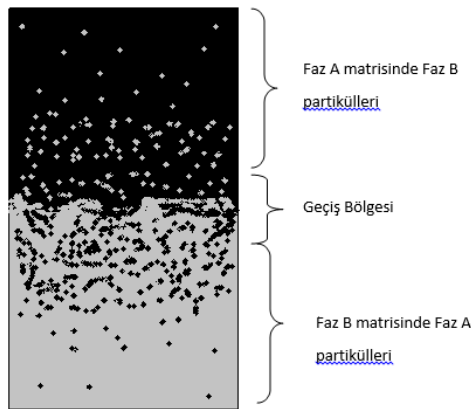


Şekil 2.1 Sıklıkla kullanılan alaşımlardan Alüminyum, Çelik ve kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [28]

2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Havacılık ve diğer mühendislik alanlarında düşük ağırlıklı kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır[2]. Buna rağmen; geleneksel kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklı ortamlarda kullanıma elverişli olmadığı durumlar bulunmaktadır[2]. Mühendislik alanında uzun yıllardır dayanım ve sertlik özelliklerinden dolayı metaller kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık durumlarında, metallerin dayanımı azalmaktadır. Seramik malzemeler ısı dayanımı yüksek malzemelerdir, buna rağmen; düşük tokluğu sebebiyle kullanımları kısıtlıdır[2].

Son dönemde, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) olarak bilinen yeni bir kompozit malzeme türü ilgileri üzerinde toplamıştır. Yüksek esneme-bükülme dayanımlı tipik bir FDM farklı fazlarda malzeme içeriklerinden (genellikle seramik ve metal) oluşmaktadır[2]. Buna bir örnek Şekil 2.2’de[30] gösterilmektedir.



Şekil 2.2 FDM’de bulunan farklı fazların şematik gösterimi [30]

FDM'ler içerisinde farklı mikro yapısal fazlar, farklı işlevlere sahiptirler ve FDM'ler çoklu yapı statüsünü özellik gradyanı ile elde ederler[2]. Oluşturan malzemelerin hacimsel oranlarının gradyan olarak değişmesi, malzeme özelliklerinin bir yüzeyden diğerine pürüzsüz ve devamlı geçişine olanak sağlar. Böylece; geleneksel kompozit malzemelerde yaşana ara bölge problemleri ve termal gerilme konsantrasyonlarının önüne geçilmiş olur[2]. FDM'lerin metal bileşenleri, yüksek mekanik performans sağlayıp olası bir kırılmanın önüne geçerken; seramik bileşenleri ise termal dayanım karakteristikleri nedeniyle yüksek sıcaklıklı ortamlara dayanabilmektedirler[2].

FDM terimi 1980'lerin ortalarında Japonya'dan bir grup bilim adamının çalışmalarına dayanmaktadır[2], [31], [32]. O zamanlardan beri FDM'ler kullanılarak yüksek dirençli malzeme geliştirme çalışmaları devam etmektedir. FDM'ler ilk olarak uzay araçları ve füzyon reaktörlerinde [28], [29] termal bariyer malzemeleri olarak tasarlanmışlardır. Günümüzde yüksek sıcaklık gerektiren ortamlarda genel kullanım için geliştirilmektedirler[2]. FDM'lerin potansiyel kullanım alanları çok geniştir. Literatürde sensörlerde [33], aktüatörlerde[34], metal-seramik zırh yapımında, [35] dental implantlarda [36] bulunmaktadır[2].

2.3 Metal Matrisli Kompozitler

Bir metal matris fazına takviye ürünü eklenerek oluşturulan kompozit malzemeler Metal Matrisli Kompozitlerdir. Matris ve takviye kompozit malzeme terminolojisinde kullanılan terimlerdenidir. Matris, süneklik, şekil verilebilirlik ve termal iletkenlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip görece olarak daha yumuşak olan fazdır. Matrise sert, yüksek dayanımlı, yüksek rijitlikli ve düşük termal genleşme özelliği olan takviye (güçlendirme) eklenir. Takviye fazı genellikle matristen daha mukavemetli ve rijit olan ve kompozite etkiyebilecek yükün büyük kısmını taşıyan ikincil fazdır[28].

Matrisin amacı, takviye fazını, yapısındaki özellikleri sebebiyle bir arada tutabilmesi ve takviyeyi çevresel etkenlerden koruyarak, yükü takviye arasında dağıtmasıdır[28]. Kompozitin son kullanımı için işlem görebilmesini sağlayacak katı form oluşturmasını da matris sağlar. Takviye fazı genellikle matristen daha mukavemetli ve rijit olduğundan, matris fazı kompozitteki yapısal olarak daha zayıf kısımdır. Buna rağmen; takviyeye dışsal kuvvetlerden kaynaklanan yüklerin transferini yaparak takviyenin tüm potansiyelini kullanabilmesine olanak sağlar.

2.3.1 Matrislerine göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kullanılan matrise göre kompozitler; Polimer Matrisli, Seramik Matrisli ve Metal Matrisli Kompozitler olarak sınıflandırılır[28].

- Polimer Matrisli Kompozitler (PMK) : PMK'lar termoset veya termoplastik matris gömülü dağınık takviye fazlarından oluşur. Örneğin karbon, cam, kevlar elyafı vb.

- Seramik Matrisli Kompozitler (SMK) : SMK'lar bir seramik matristen ve seramik malzemelere gömülü liflerden oluşur.

- Metal Matrisli Kompozitler (MMK) : MMK'lar endüstriyel ölçekte en çok kullanılan kompozitlerdir. MMK'ların PMK ve SMK'lara göre avantajları[28]:

- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık
- Daha iyi aşınma direnci
- Daha yüksek enine rijitlik ve mukavemet
- Daha az nem soğurma
- Yüksek termal ve ısı iletkenlik
- Daha iyi işlenebilirlik
- Yüksek yanma direnci

Bütün bunlara rağmen MMK'ların dezavantajları[28] :

- Yüksek maliyet
- Görece olarak oturmamış teknoloji
- Karmaşık üretim metotları

MMK'ların temel faydası matris ve takviyeye bağlı olarak düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve rijitlik, yüksek sıcaklıklarda performans gösterebilmesi ve aşınma direncinin artmasıdır. Matrisin seçimi deneysel olmakla birlikte temel kıstas takviye fazının doğasıdır[28]. MMK'lar için malzeme seçiminde, her bir malzemeye özgü karakteristik özellikleri ve şekillendirme sırasındaki etkileşimlerini gözde almak çok önemlidir. Takviye malzemesi ve matris arasındaki etkileşimler, MMK üretimi sırasında kısıtlamalara sebep olmaktadır[28].

2.3.2 Matrislerine göre Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) sınıflandırılması

MMK'lar matris malzemelerine göre farklı sınıflara ayrılır. En sık kullanılan metal matris yapılandırmaları şu şekildedir:

- Alüminyum Matrisli kompozitler
- Magnezyum Matrisli Kompozitler

- Titanyum Matrisli Kompozitler
- Bakır Matrisli Kompozitler
- Süper alaşım Matrisli Kompozitler

Alüminyum Matrisli Kompozitler, otomotiv ve havacılık sektöründe kullanıldığı için üzerinde çok fazla çalışma yapılan MMK türüdür. Magnezyum matrisli kompozitler benzer avantajlara sahip olmasına rağmen; üretimdeki kısıtlamalar ve düşük termal iletkenlik özellikleri sebebiyle Alüminyum Matrisli Kompozitlere kıyasla daha az kullanılırlar. Titanyum, yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti ve olağanüstü korozyon dayanımı sebebiyle matris malzemesi olarak kullanılır. Çok yüksek hızlara gereksinim duyan uçak ve füze yapılarında Alüminyuma kıyasla Titanyum yüksek sıcaklıklarda dayanımı koruyabilse de; Titanyum Matrisli Kompozitlerde karşılaşılan temel sorun Titanyumun aşırı reaktif olması ve takviyenin işlenmesinin zorluğunda yatmaktadır. Termal iletkenlik ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri Bakır Matrisli Kompozitleri diğer Metal Matrisli Kompozitlere göre daha üstün kılar. Süper Alaşım Matrisli Kompozitler çok yüksek sıcaklık ve hızlarda çalışan gaz türbin kanatlarında kullanılmaya aday malzemeler olarak gösterilmektedir[28].

2.3.3 Alüminyum Matrisli Kompozitler

Alüminyum Matrisli Kompozitler en yaygın olarak otomotiv ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi Alüminyum Matrisli Kompozitlerin sahip olduğu yüksek mukavemeti, rijitliği, düşük özgül ağırlığı, geliştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri, kontrol edilebilir termal genleşmesi ve arttırılmış aşınma dayanımıdır. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde, takviyesinin türü ve hacimsel miktarı değiştirilerek malzemenin özellikleri istenilen şekilde değiştirilebilir[28].

Bazı uygulamalarda, alüminyum alaşımları, demir alaşımları, titanyum alaşımlarını da içeren monolitik malzemelerin yerine Alüminyum Matrisli Kompozitlerin kullanılması hedeflenmiştir[28]. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin takviye yapılmamış malzemelere göre avantajları şöyledir[28] :

Daha iyi mukavemet

Geliştirilmiş rijitlik

Düşük özgül ağırlık

Geliştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri

Kontrol edilebilir termal genleşme katsayısı

Termal/Isı yönetimi

İleri seviyede aşınma direnci

Geliştirilmiş sönümleme yeteneği

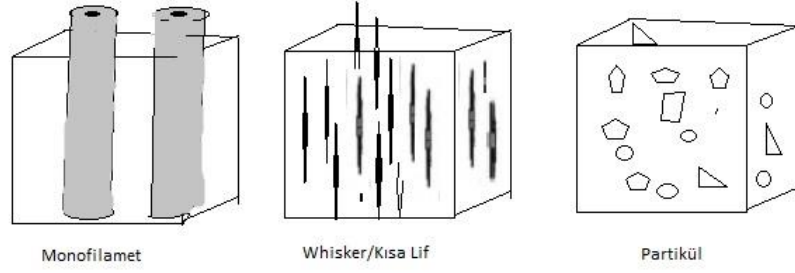
Geçtiğimiz yıllar içerisinde Alüminyum Matrisli Kompozitler, farklı mühendislik sektörlerinde yapısal eleman, iç eleman, fonksiyonel uygulamalar gibi birçok şekilde kullanılmıştır. Bu sektörlerde kullanılması için etken sebepler Alüminyum Matrisli Kompozitlerin yüksek performansı, ekonomik oluşu ve çevresel faydalarıdır. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin taşımacılık sektöründe kullanılmasının temel sebebi düşük yakıt tüketimine olan katkısı, gürültüyü düşürücü etkisi ve emisyonu azaltıcı etkisidir[28]. Artan çevre regülasyonlarını karşılayabilme gerekliliği, daha iyi yakıt ekonomisinin çekiciliği ile birleşince Alüminyum Matrisli Kompozitlerin taşımacılık sektöründe kullanımının sıklaşması beklenebilir[37]. Alüminyum Matrisli Kompozitler izotropik mekanik özellikler gösterebilmesi ve görece düşük maliyette olması sebebiyle Metal Matrisli Kompozitler arasında dikkat çekenlerindendir.

2.3.4 Takviyeler

Takviye fazının matristen daha güçlü faz olması sebebiyle takviye olarak adlandırılır. Takviyelerin genellikle aşağıdaki karakteristik özelliklere sahip olması beklenir[38] :

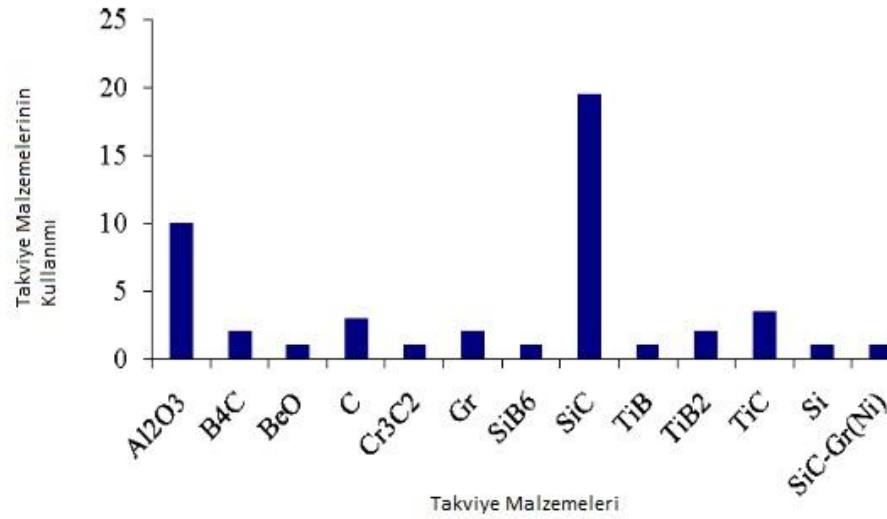
- Düşük yoğunluk
- Mekanik ve kimyasal uyumluluk
- Termal stabilite ve Yüksek Young Modülü
- Yüksek kompresyon ve çekme dayanımı
- Yüksek işlenebilirlik kabiliyeti
- Ekonomik verimlilik

Genellikle metal olmayan inorganik bileşenler yukarıda belirtilen özellikleri kabul edilebilir derecede sağlamaktadır. Partikül, fleyk, kısa lifler,uzun lifler, whisker, sürekli lifler olarak farklı formlarda görülebilir. Farklı formlarda olabilen takviye fazı, yaygın olarak uzun lif şeklinde görülür.



Şekil 2.3 Farklı formlardaki takviye fazları [29]

Aşağıdaki şekilde en çok kullanılan takviyeler ve hacimsel yüzdeleri bulunmaktadır[39]:



Şekil 2.4 Farklı malzemelerin takviye malzemeleri olarak kullanım yüzdeleri [39]

2.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi

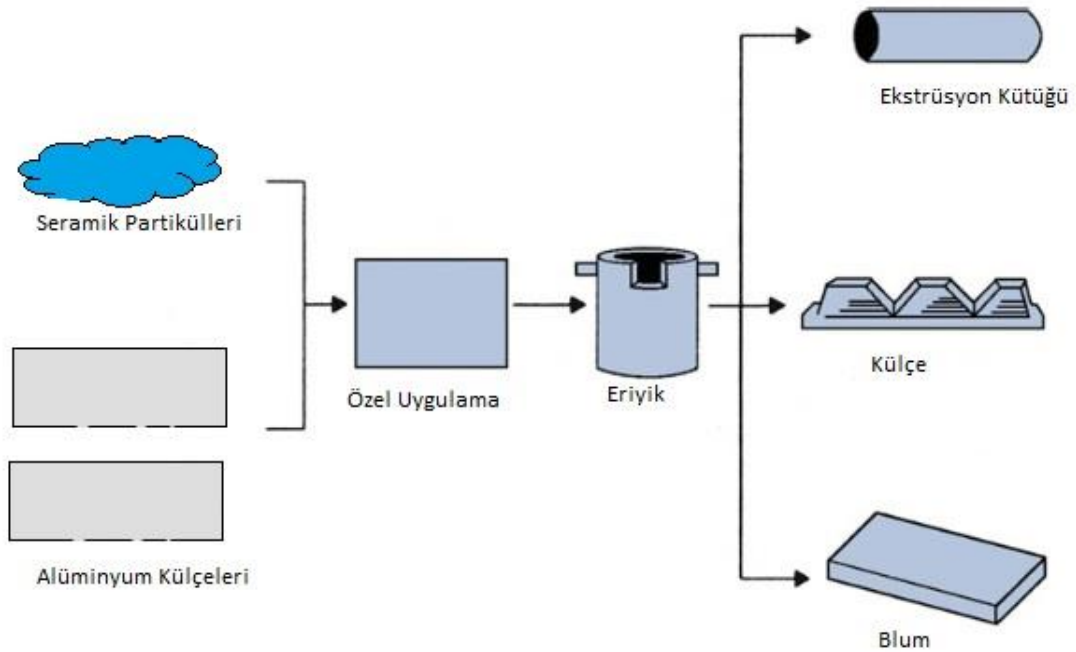
Metal Matrisli Kompozitlerin üretimlerinde birçok yöntem mevcuttur. Bunların büyük çoğunluğu sıvı ve katı halde üretimi içerir. Bazı takviyelendirme yöntemleri farklı tortulaşma teknikleri veya in situ yöntemleri içerir[38].

2.4.1 Sıvı Hal Yöntemleri

Alüminyum gibi metallerin erime sıcaklıkları çok yüksek değildir ve sıvı halde kolayca matris olarak kullanılabilir. Sıvı hal yöntemlerinde döküm ya da sıvı metal infiltrasyonu, sıkıştırılmalı döküm ya da basınç infiltrasyonu ve savurma döküm yöntemi başlıca yöntemlerdendir[38].

2.4.1.1 Sıvı İnfiltrasyonu

Döküm veya sıvı infiltrasyonu, sıvı metal bir lif demetinin infiltrasyonu ile gerçekleştirilir[40]. Seramik takviyenin eriyik metal ile ıslanma zorluklarından dolayı sıvı faz infiltrasyonu ile MMK üretimi kolay değildir. Lifin infiltrasyonu başladığında, lif ve eriyik metal arasındaki reaksiyonlar lifin özelliklerini düşürür. İnfiltrasyon öncesi kaplanan lifler, ıslanma problemini ve kontrol reaksiyonlarını azaltarak üretimde gelişmeler sağlayabilir. Bununla birlikte, infiltrasyon öncesi lif kaplamanın havasız ortamda yapılması gerekliliği bir dezavantajdır. Havasız ortam sağlanamaması durumunda oluşacak yüzey oksidasyonu, kaplamanın pozitif etkilerini giderir[41]. Ticari olarak başarılı bir sıvı infiltrasyon yöntemi Duralcan yöntemidir. Aşağıdaki şekilde şematik olarak gösterilmiştir[38]. Seramik partikülleri ve alüminyum külçesi karıştırılır ve eritilir. Seramik partiküllerine işlem öncesi özel bir uygulama olan ve detayları verilmeyen Duralcan işlemi yapılır. Eriyik sıvı sıcaklığının genelde 600 ve 700 C° arasında hemen üzerinde karıştırılır. Eriyik daha sonra şu dört formdan birine çevrilir; ekstrüzyon kütüğü, döküm külçesi, yuvarlak külçe[38].



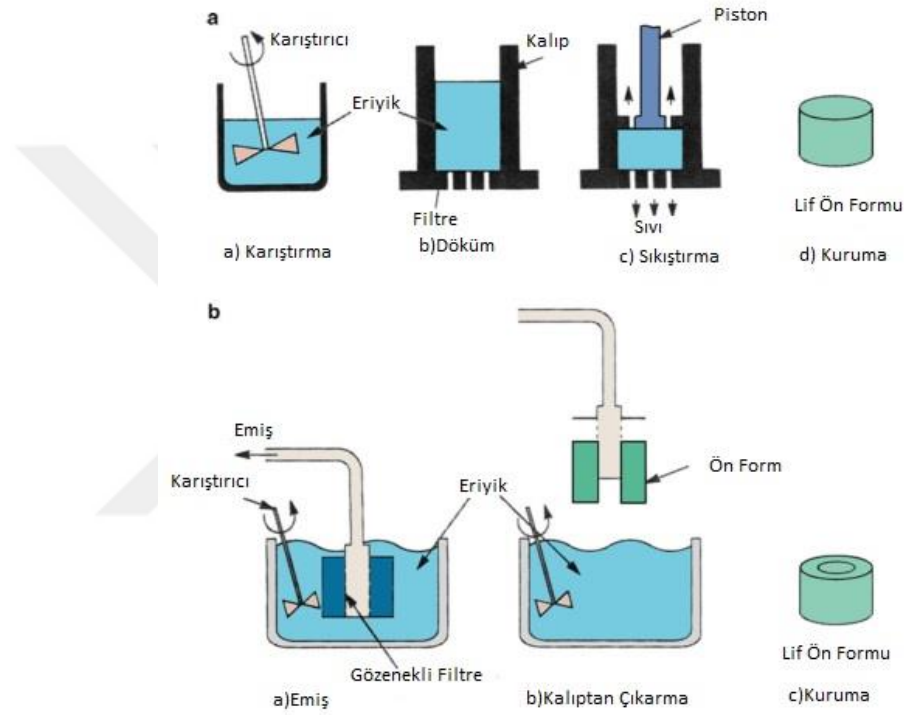
Şekil 2.5 Duralcan Yönteminin Şematik Gösterimi [38]

2.4.1.2 Sıkıştırılmalı Döküm (Basınç İnfiltrasyonu)

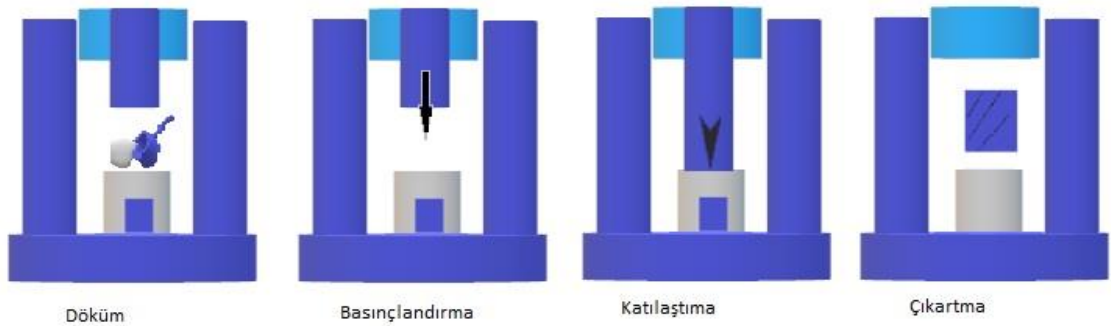
Sıkıştırılmalı döküm ya da basınç infiltrasyonu, sıvı metali, lifli ön form oluşturmaya zorlama ile gerçekleştirilir. Şekil 2.6 [38] lifli ön form oluşturma için iki yolu gösterir. Sıkıştırılmalı yöntemde, eriyik iyice karıştırılır ve daha sonra sıvı lif bulamacına sıkıştırma

uygulanarak çıkan kalıplar kurutulur (Şekil 2.6a). Diğer yöntemde ise iyice karıştırılmış eriyiğe emiş yaptırılır. Gözenekli bir yapıdan yapılan bu emiş sonucunda ön form bulamaçtan çıkartılarak kurumaya bırakılır (Şekil 2.6b)[38].

Sıkıştırma dökümü Şekil 2.7’de [38] gösterilmektedir. Gözenekli lif ön formu kalıba yerleştirilir. Eriyik metal önceden ısıtılmış hidrolik pres yatağındaki kalıba dökülür. 70-100 MPa arasında uygulanan basınç eriyik metalin lif ön formunda bulunan gözeneklere nüfus etmesini sağlar. Lif infiltrasyonunun diğer bir metodu da basınçlı inert gaz kullanımıdır. Bu teknik ile karmaşık şekilli lifli yapılar elde etmek mümkündür[42][43].



Şekil 2.6 Ön form oluşturma yöntemlerinin şematik gösterimi [38]



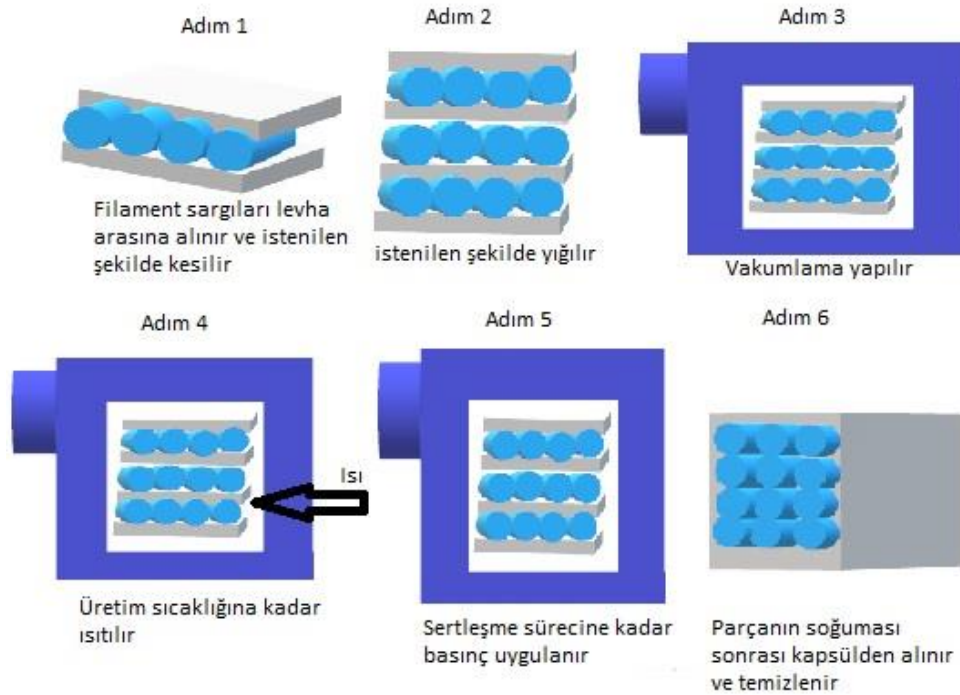
Şekil 2.7 Sıkıştırma Dökümü [38]

2.4.1.3 Savurma Döküm

Seramik takviyeli MMK'ların dezavantajlarından biri takviyelendirilmemiş alaşımlara göre daha zor işlenebilir olmasıdır. Savurma dökümde, takviyenin konumlandırılması için döküm sırasında oluşan savurma kuvvetinden yararlanılmaktadır. Savurma kuvveti, takviyenin dış kısımlarda yoğunlaşmasına olanak sağlar. Böylece takviye bulunması gerektirmeyen alanların işlenmesi daha kolay olur. Örneğin fren rotorlarında aşınma dayanımı rotor yüzeyinde istenirken göbek bölgesinde bu özelliğin olması avantaj değildir[38].

2.4.2 Katı Hal Yöntemleri

Bir çok katı hal üretim yöntemi bulunmaktadır[44]. Bu çalışmada birkaç önemli yöntemle değinilmiştir. Difüzyon bağlama tekniği yaygın olarak iki metali bağlamak için kullanılan katı hal üretim tekniğidir. Atomların birbirine temas halindeki temiz metal yüzeylerinden interdifüzyonu kaynamaya sebep olur[38]. Difüzyon bağlama işleminin birçok yöntemi bulunmasına rağmen, tüm metotlar yüksek sıcaklık ve yüksek basınç uygulaması gerektirir. Şekil 2.8'de bu tarz bir difüzyon prosesinin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.8 Difüzyon Bağlama işleminin şematik gösterimi [38]

Vakum altında yüksek sıcaklık uygulanması difüzyon bağlama uygulamasının en önemli adımıdır. Bu tekniğin en önemli avantajı çok çeşitli metal matrisinin oluşturulabilmesi ile lif oryantasyonunun ve hacimsel miktarının kontrol edilebilmesidir. Dezavantajları arasında ise; birkaç saati aşan işleme süreleri, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç uygulaması gerekliliği, bütün bunların maliyeti önemli oranda arttırması ve sınırlı boyutlardaki malzemelerin üretilebilmesidir [38].

Bozunum yöntemleri metal/metal kompozitleri dövme, haddeleme, çekme, yuvarlama gibi mekanik işlemleri içerir. İki fazın da deforme olmasıyla, minör faz uzamakta ve matris içerisinde doğal olarak lifli yapı oluşturmaktadır. Deformasyon işlemi gören kompozitlerin özellikleri, büyük ölçüde başlangıç metallerinin özelliklerine bağlıdır. Haddeli bağlama, tabakalı kompozitleri üretmede kullanılan yaygın bir tekniktir. Bu şekilde üretilen kompozitler Plaka Tabakalı Metal Matris Kompozitleri olarak da adlandırılır [38].

2.4.3 İn situ Prosesi

Kompozitlerin geleneksel üretimlerinde, takviye fazı matrise sonradan eklenmektedir. Takviye fazının sonradan eklendiği yöntemlere ex situ kompozit denir [45]. Ex situ olarak eklenen sert partiküllere SiC, TiC, TiB₂, ZrB₂ ve Al₂O₃ örnek olarak verilebilir [45]. Tane küçültme için çekirdeklenme yerleri olmalarının yanı sıra; dayanım, sertlik ve aşınma dayanımını arttırmakta kullanılırlar [45]. Sıvı haldeki ex situ üretimlerde ise alaşım fırınlarında ısıtılır ve takviye partikülleri eriyiğin içerisine atıldıktan sonra karıştırılır. Bu yöntemde partiküllerde ıslatma problemleri yaşanmaktadır [45]. Bu durumda partiküller eriyikle iyi karışmamakta veya dağılımları üniform olmamaktadır [45]. Bu problemlerden kaçınmak için in situ yöntemi yaygınlaşmıştır [45].

İn situ yönteminde malzemeler üretim sırasında reaksiyona girerler. Mastır malzemeler metal veya alaşım tozları olabileceği gibi toz halindeki malzemeler de olabilir. Malzemeler arasındaki reaksiyon, tozları karıştırırken veya izleyen adımlarda gerçekleşir. Reaksiyonun başlaması için başlangıçta aktivasyon enerjisi verilmesi gereklidir. Reaksiyonlar genelde ekzotermik reaksiyonlardır ve enerji aktivasyonu sonrası bağımsız olarak ilerlerler. Malzemeler birbirleriyle matristeki hacimsel oranlarına göre tamamen etkileşime girer. Yüksek oranlı matris görevindeki hacimde takviye görevi yapacak olan yeni bir faz gelişir [29].

İn situ yönteminde kompozit malzeme başlangıç malzemesi ile tek adımda üretilir. Böylece diğer yöntemlere kıyasla farklı malzemeleri birleştirmenin zorluğundan kaçınılmış olur. Ötektik bir alaşımın kontrollü tek yönlü katılaşması, in situ prosesin

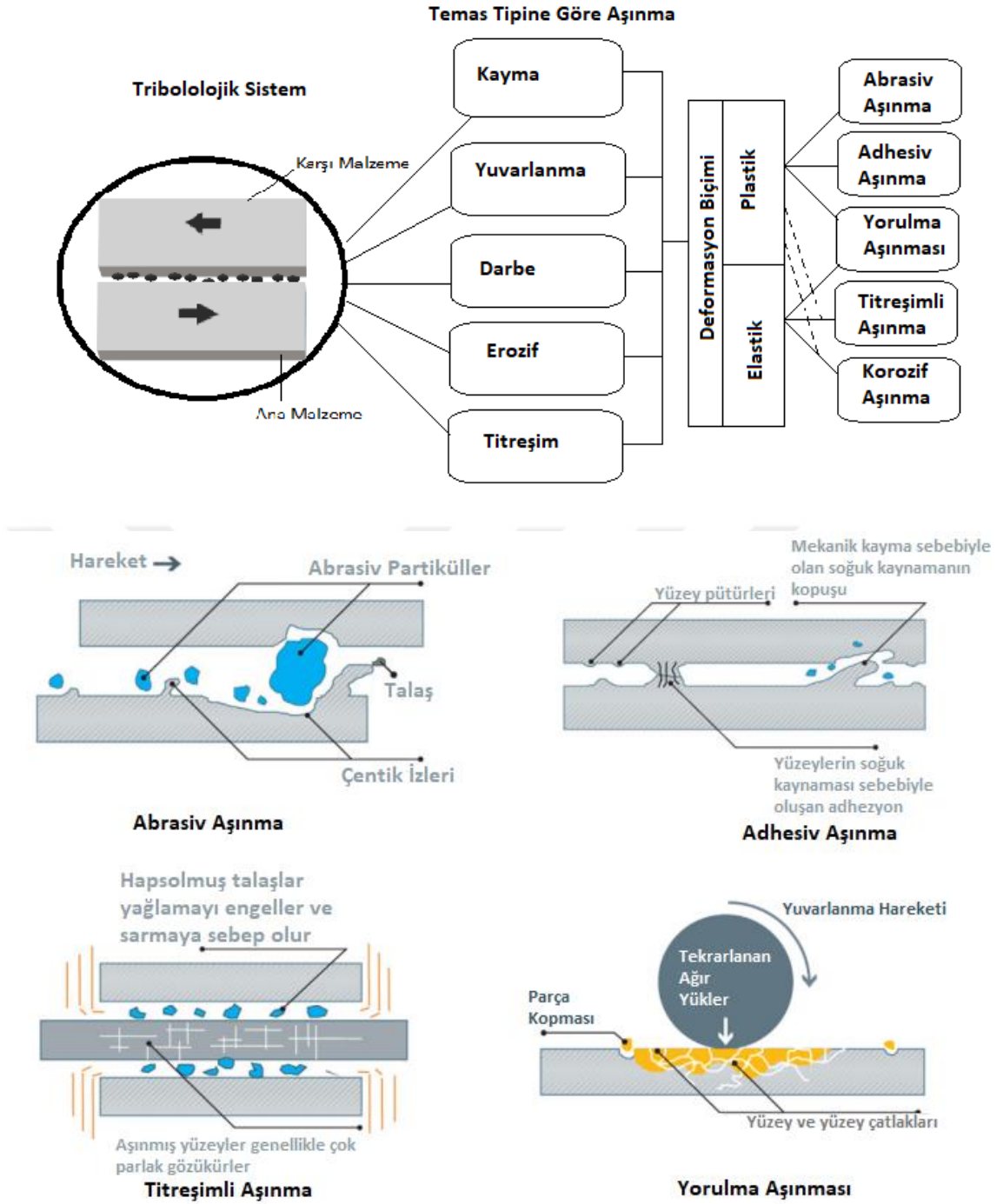
klasik bir örneğidir. Bir ötektiğin diğer bir alaşımda tek yönlü katılaşması bir fazın diğerinde lif veya şerit formu almasına sebep olur. Takviye dağılımının saflık derecesi katılaşma oranı ile kontrol edilebilir. Katılaşma oranı uygulamada 1-5 cm/saat aralığında sınırlıdır. Genel olarak yüksek hacimsel miktarlarda takviye içeren master alaşımı reaksiyon sentezi ile üretilir. Başlangıç alaşımı istenilen miktarda takviye partikülü üretebilmesi için karıştırılır ve yeniden üretilir. Bu yöntemle alüminyum, nikel veya intermetalik matriste kullanılan tipik takviyeler SiC, TiB₂ olarak sayılabilir [4].

MMK'lerin in situ yöntemi ile sentezlenmesi, kompozitteki partikül matris ara fazının sağlanmasını kolaylaştırır ve daha küçük takviye partikül boyutları sağlayarak metal özelliklerinin daha iyi olmasını sağlar [7][46]. Alüminyum alaşımları ile TiB₂ ve TiC seramik takviyelerinin, SiC ve Al₂O₃'e göre daha uyumlu olduğu gösterilmiştir [46]. Tjong ve arkadaşları[47] in situ TiB₂ partiküllerinin varlığının, termal döngü sırasında Alüminyumun boyutsal kararlılığını daha iyi sağlaması ile sonuçlandığını göstermiştir. Yapılan çalışmalarda in-situ yöntemi ile başarıyla TiB₂ FDM üretilmiştir[48]. Başka bir çalışmada ise Al-Al₃Ti FDM üretimi in-situ savurma dökümü ile gerçekleştirilmiştir [49]. Al₃Ti sistemi üretimin ultrason destekli in situ tekniğinden faydalanılmıştır [50]. Al-7Si alaşımına in situ yöntemiyle TiB₂ takviyelendirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir [46]. İn situ kompozitleri yüksek sıcaklıklarda uygulamalar için iyi bir adaydır [46].

Aşınmanın tanımlarından biri; katı bir yüzeyden başka bir yüzeyin hareketi sebebiyle malzeme erozyonu olmasıdır [51]. Aşınma, başka bir yüzey ile göreceli hareket içerisindeki diğer bir yüzeyde olan mekanik veya kimyasal prosesler yoluyla kademeli olarak malzeme kaybını içerir [52]. Bu tanımlara, kayma hareketi olmayan darbe aşınması, aşınmayı yapan malzemenin su olduğu kavitasyon, kimyasal etki nedeniyle oluşan korozyon dahil değildir [53], [54]. Aşınma, bir katının yüzeylerinin veya sınır bölgelerinin, çalışma koşulları ile etkileşimi nedeniyle, malzeme kaybı olsun veya olmasın katının boyut kaybına neden olduğu bir süreç olarak da tanımlanabilir [51]. Burada çalışma koşulları yük, hız, sıcaklık, etkileşen yüzeylerin türleri (katı, sıvı, gaz) ve temas türü (tek fazlı veya çok fazlı) olarak belirlenmiştir [51].

Aşınma otomobil frenleri, dişliler, yataklar, tarım ekipmanları, buldozerler gibi endüstriyel uygulamaların yanı sıra bıçaklar, mobilyalar, günlük kullanım araç gereçleri gibi günlük yaşamda ve dirsek, diz ve kalça eklemlerinde kemik aşınması olarak insanlarda dahi görülmektedir [52][55][56].

Sürekli değişen farklı işlem parametreleri altındaki bir yüzey birden fazla aşınma mekanizmasına maruz kalmaktadır. Kompozitler üzerinde yapılan çalışmalarda farklı parametrelere göre kompozitler farklı aşınma davranışları sergilemektedirler[52]. Aşınma süreçleri, sistemin kinematiğine bağlı olarak, aşınma mekanizmalarına göre adheziv, abrasif, yorulma ve tribo-kimyasal aşınma olarak sınıflandırılır [52]. Araştırmacılar ayrıca yukarıda belirtilen sınıflandırmaların varyasyonlarını darbe, erozif, korozif, kavitasyon, salınım ve yumuşama olarak tanımlamaktadır. Şekil 3.1'de FDM'lerin maruz kaldığı farklı aşınma modları ve aşınma mekanizmaları görülmektedir [52].



Şekil 3.1 Aşınma modlarının ve aşınma mekanizmalarının sınıflandırılması ve gösterimi [52]

Abrasif aşınma birbiri ile hareket halindeki iki yüzey arasındaki sert pütürlerin hareketi sebebiyle oluşur. Bu hareketler, daha yumuşak olan yüzeyin ara yüzüne, kırılma ya da plastik deformasyon ile zarar verir [52]. Adhesiv aşınma ise birbiriyle kayma temasında olan, aralarında yağlanma olsun yada olmasın, iki yüzeyin ara yüzünde meydana gelen adhesiv bağ formasyonu ve kopmaları sebebiyle olur [52]. Bu mekanizma için aşınma,

temas halinde kalan yüzey alanlarında birbirini izleyen yapışmalar ve soyulmalar ile oluşur[52][57].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemelerin aşınma performansları, mekanik ve fiziksel faktörler (dışsal) ile malzeme faktörleri (içsel) olarak iki kategoriye ayrılan çeşitli tribolojik parametrelerden etkilenmektedir. Dışsal parametreler uygulanan yük, kayma hızı, kayma mesafesi gibi mekanik faktörleri ve takviye partiküllerinin oryantasyonu, ortam koşulları, numune örneğinin ve karşı malzemenin yüzeyinin pürüzlülüğü gibi fiziksel faktörleri içermektedir. İçsel faktörler ise takviyenin şekli, tipi, boyutu, hacimsel oranı, partiküllerin dağılımı gibi malzeme parametrelerini içermektedir [52].

Metal matrisli kompozit malzemelerin çeşitli içsel ve dışsal faktörler altında abresif ve adhesiv test koşullarında aşınma davranışlarının incelendiği araştırmalar bulunmaktadır [58], [59]. Santrifüj döküm ile üretilmiş Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin, çeşitli malzeme ve işlem parametreleri altındaki metalografik, mekanik ve kayma aşınması davranışlarının incelendiği araştırmalar bulunmaktadır[60][61] .

3.1 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin daha yumuşak bir yüzeyde kaymasıyla meydana gelir[62]. Amerikan Malzeme ve Test Derneği tarafından, katı yüzey boyunca hareket eden ve tersine kuvvet uygulayan sert parçacıklar veya sert çıkıntılar nedeniyle malzeme kaybı olarak tanımlamaktadır [51].

Temasın tipi abrasif aşınmanın modunu belirlemektedir. 2 cisimli ve 3 cisimli abrasif aşınma olarak ikiye ayrılmaktadır [51]. 2 cisimli abrasif aşınma, sert partiküllerin veya taneciklerin, bir yüzeye yapışması veya takılması ile yüzeyden malzeme kopartmasıyla gerçekleşmektedir. Zımpara kağıdı bu aşınma türünün tipik örneğidir. Yüzey pürüzlülüğü azaldıkça abrasif aşınma da azalacaktır. 3 cisimli abrasif aşınmada ise partiküller sınırlı değildir ve yüzey boyunca kayma ve yuvarlanma yapabilmektedirler [51].

Temas ortamı ise aşınmanın açık veya kapalı olarak sınıflandırılmasını belirlemektedir [51]. Açık temas ortamı, yüzeyler birbirinden bağımsız olarak yeterince yer değiştirebildiklerinde gerçekleşmektedir. Abrasif aşınmayı ve dolayısıyla malzeme kaybını etkileyen üç faktör kazıma, kesme ve parçalanmadır. Kazıma, malzemenin aşındırıcı partiküllerden uzağa, genellikle yana doğru yer değiştirmesiyle oluk oluşumunu içerir; doğrudan malzeme sökümünü içermemektedir. Yer değiştiren

malzeme oluklara bitişik sırtlar oluşturmaktadır. Bu sırtlar aşındırıcı partiküllerin bir sonraki geçişinde kaybolabilmektedir [51].

Kesme, yüzeyden mikroçip veya talaş şeklinde, çok az malzemenin kenarlarda oluk oluşturduğu veya herhangi bir malzemenin kenarlarda oluk oluşturmadığı malzeme ayrılmasını içermektedir. Parçalanma ise malzeme bir kesme işlemi ile yüzeyden ayrıldığında meydana gelir. Girintili aşındırıcı, aşınma malzemesinin lokal olarak kırılmasına neden olur. Bu çatlaklar daha sonra aşınma oluşu çevresinde serbestçe yayılır ve parçalanarak ek malzeme kaybına neden olur [51].

3.2 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, mikroskobik pürüzlülük gibi yüzey özelliklerinin bir yük altında temas etmesiyle meydana gelir. İki yüzey birbirine doğru kaydıığında, yüzey tabakası içindeki küçük parçaların plastik deformasyonu olarak tanımlanabilir. Etkileşen yüzeylerde bulunan pürüzler (yani mikroskobik yüksek noktalar) karşıt yüzeye nüfuz edecektir ve nüfuz eden pürüz çevresinde plastik bir bölge oluşturacaktır. Adhesiv aşınma yüzey pürüzlülüğü arttıkça artar. İlk temas sırasında, atomlar arasındaki güçlü yapışma kuvvetleri nedeniyle bir yüzeyin parçaları çekilir ve diğerine yapışır [62]. Plastik deformasyon ve hareket sırasında emilen enerji, malzeme transferi ve aşınmanın ana nedenidir. Yüzeylerdeki mikroskobik tepelerde stres oluşur. Oluşan bu stresler deforme olarak birbirine kaynama eğilimi gösterirler. Bu mikroskobik kaynaklar sonucunda parçacıklar bir yüzeyden kesilir ve onları diğer yüzeye, genellikle daha yumuşak malzemeden daha sert malzemeye aktarır. Daha fazla sürtünme olursa, daha yumuşak malzeme parçacıkları oluşacak ve yüzeylerde bulaşma, soyulma veya sarma meydana gelecektir [51].

3.3 Titreşimli (Fretting) Aşınma

Titreşimli aşınma, iki yüzeyin döngüsel olarak sürtünmesi ile oluşur. Bu döngüsel sürtünmeler sonucunda, yüzeylerden birinden veya her ikisinden de malzeme eksilir. Bu tip aşınmalar, rulman yatakları gibi yuvarlak, silindirik veya küresel yüzeylerde meydana gelir. Titreşimli aşınma sonucunda yorulma meydana gelir. Titreşimli aşınma yorgunluğu sonucu her iki temas yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu süreç partiküllerin temas nedeniyle dışarı atılması halinde hızlanır. Bu partiküller oksitlenebilir ve yüzeylerin daha fazla aşınmasına sebep olabilir. Titreşimli aşınmalar, sistemde vibrasyon olduğu zaman meydana gelirler [51]. Tipik olarak makinelerde, cıvatalı ekipmanlarda ve rulmanlarda görülen çukurlar veya oluklar ve oksit döküntüleri bu tür

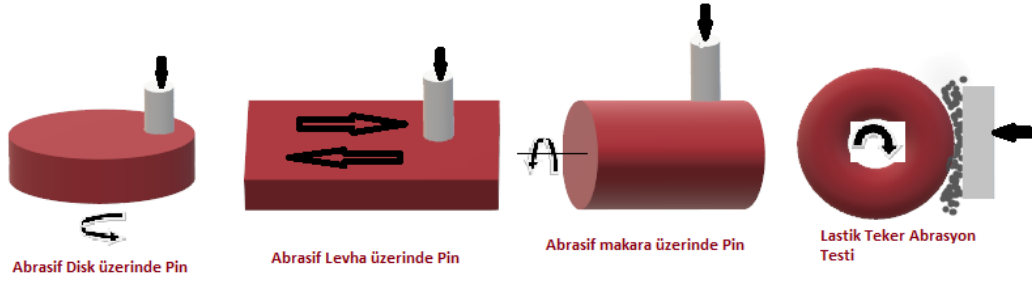
hasarların tipik örnekleridir. Çalışmaları sırasında titreşime maruz kalan temas yüzeyleri, titreşimli aşınma riski altındadırlar.

3.4 Yorulma Aşınması

Malzemelerde meydana gelen bir diğer aşınma da yorulma aşınmasıdır. Yorulma aşınması tekrarlı yükler altında zamana bağlı olarak meydana gelmektedir. Temas bölgesinde zorlanma nedeniyle malzeme yüzeyinin alt bölgelerinde mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Oluşan bu mikro çatlaklar ilerleyen zamanla birlikte yüzeye doğru ilerlemeye başlar. Yüzeye ulaşan çatlak, yüzeyde parçacıkların ayrılmasına, çukur ve oyukların oluşumuna sebep olur. Tekrarlı yükler genelde elastik deformasyon bölgesinde olduğu için bu aşınmanın oluşumu uzun sürmektedir. Birçok makine elemanında bu tarz aşınmaya rastlamak mümkündür [63].

3.5 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerde Abrasif Aşınma Testleri

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarının incelenmesinde bir çok metot mevcuttur. Bu metotlardan birinde, sabitlenmiş abrasif örtü (zımparalar) veya dönen bir teker veya bir levha üzerinde numune örneklerinin kaydırılması ile abrasif aşınma oluşturulur. Başka bir yöntem levha şeklinde bir numunede kayma yüzeyleri arasına sürekli olarak aşındırıcı partiküllerin beslenmesi ile abrasif aşınma incelenmektedir [52]. Bu yöntemler numunede iki cisimli abrasif aşınmaya neden olan sabit aşındırıcı parçacıkları içerir. Aşındırıcı yüzey olarak, grit parçacıklarına sahip aşındırıcı kağıt veya bez (Silisyum karbür veya Alümina) kullanılır. Lastik tekerlek aşınma testinde, toz veya bir bulamaç şeklinde oluşturulmuş bir karışım serbest aşındırıcı parçacıkları (Kuvars veya Silika kumu) içerir. Plaka veya blok şeklindeki numune, sabit yük altında dönen lastik tekerleğe bastırılması sırasında bu karışım kullanılarak numunenin aşınma testi yapılır. Tekerlek aşınmasına maruz kalan numunelerin aşınma izlerinde, yuvarlanma ve kayma hareketinin bir kombinasyonunu görülür. Sabit aşındırıcı levha üzerinde kayan numune pimi, iki cisimli kayma aşınması özellikleri gösterir [52],[64],[65]. Şekil 3.2'de farklı abrasif test örnekleri görülmektedir[52].



Şekil 3.2 Farklı Abrasif Aşınma Testlerinin şematik gösterimi [52]

3.5.1 Abrasif Ortam Etkisi

Aşındırıcı ortam sertliği, boyutu ve şekli, çeşitli aşınma mekanizmaları yoluyla numune aşınma oranını önemli ölçüde etkilemektedir[52]. Sert aşındırıcı partiküller daha yumuşak fazları sürerek daha büyük fazlar oluştururken, yumuşak aşındırıcı partiküller ise küçük fazlar ya da daha büyük oluklar oluştururlar. Bu kırılmış partiküller, aşınmayı daha da artıran aşındırıcı parçacıklar gibi davranır[66]. Abrasif aşınma hızı abrasif partiküllerin şekillerinden etkilenmektedir. Keskin ve köşeli kenarlı aşındırıcı partiküller, pürüzsüz ve yuvarlak köşeli partiküllere göre daha fazla aşınma üretir [52]. Abrasif partikül boyutları da aşınma miktarına etki etmektedir [52].

3.5.2 Matris Tipinin Etkisi

Abrasif aşınma oranı, büyük ölçüde matris alaşımına ve ayrıca matriste bulunan sert ikincil faz parçacıklarına ve bunların boyut, şekil, sertlik, hacim oranı ve parçacık yönü gibi karşılık gelen fiziksel parametrelerine bağlıdır. Aynı zamanda alaşım özelliklerine ve ikincil faz parçacıkları ile matris arasında geliştirilen ara yüzey bağına da bağlıdır [52]. Alaşım elementleri matris viskozitesini etkiler ve kompozitteki takviye partikül dağılımını etkiler[67]. Parçacık şekli ve boyutu gibi ikincil faz özellikleri, yüzey kesme ve penetrasyona etkili bir şekilde direnen iri boyutlu parçacıklar ile aşınma hacmi kaybına etki etmiştir[68].

3.5.3 Uygulanan Yükün Etkisi

Savurma döküm ile üretilen Al ve Cu FDM'lerin değişen uygulanan yük koşulları altında abrasif aşınma analizi, artan yük koşullarıyla birlikte lineer olarak artan aşınma hızı ve üç spesifik aşınma rejimi ortaya çıkarmıştır[69],[70][22]. Savurma döküm ile üretilen Al-Si kompozitleri, düşük yük altında ince çizikler ve sık oluklar ile karakterize edilen hafif aşınma göstermiştir. Bir çok çalışmada uygulanan yük ile birlikte aşınma miktarı,

aşınma modu (abrasif, adhesiv), aşınma izi gibi bir çok parametrenin uygulanan yük ile birlikte değiştiği saptanmıştır[69],[70][22].

3.5.4 Kayma Hızının Etkisi

Laboratuvar ortamında yürütülen abrasif aşınma çalışmalarında, aşındırıcı kağıtlar kullanılan pin on disk kurulumları ya da kuvars kumu gibi aşındırıcı ortamların kullanıldığı kuru tekerlek aşınma test cihazları kullanılmaktadır[52]. Pin on disk kurulumu için kayma hızı 1 ile 20 m/s arasında değişirken, kuru tekerlek aşınma test cihazı için tekerlek dönüş hızı endüstriyel uygulamaya bağlı olarak 10 ile 200 RPM arasında değişmektedir[69],[71]. Kayma hızındaki ve tekerlek dönüş hızındaki bu değişiklikler, seramik parçacıklarla güçlendirilmiş FDM'ler için zıt aşındırıcı aşınma tepkileri üretmiştir, dolayısıyla; abrasif aşınma oranının hıza bağlı olduğu doğrulanmıştır [69],[71].

3.5.5 Kayma Mesafesinin Etkisi

Savurma döküm yoluyla üretilen TiB_2 ve Al_3Ti takviyeli Al-Si ve Al-Cu FDM'ler üzerinde gerçekleştirilen abrasif aşınma çalışmasında, aşınma kaybının artan kayma mesafesi (30-120 m) ile orantılı olduğu sonucuna varılmıştır[27]. TiB_2 takviyeli Al ve Al-5Cu kompozitlerde, iki cisimli aşınma oranının değişen kayma mesafesine ve ayrıca aşındırıcı ortam boyutuna bağlı olduğu gösterilmiştir[72]. Aşınmaya etki eden faktörlerden bir diğerinin kayma mesafesi olduğu birçok çalışma ile doğrulanmıştır.

Birden fazla faktörün etkilediği sistemlerin deneylerini yapmak için her faktörün ayrı ayrı değiştirilerek deneylerin tekrarlanması gerekmektedir. Bu durum hem harcanan zamanı hem de maliyeti arttırmaktadır. Deney tasarımlarında kullanılan metotlardan biri Taguchi Metodudur. Taguchi Metodu bir prosesi etkileyen farklı seviyelerdeki faktörlerin sisteme etkilerini belirlemekte kullanılan metotlardan biridir [73]. Taguchi metodu tüm seviyelerin değiştirilerek yapıldığı deneyle elde edilen sonuçlara daha az deneyle ulaşmaya olanak sağlar. Aynı sonuçlara daha az zaman ve deney sayısı ile ulaşmayı mümkün kılar [73]. Örneğin; 4 seviyeli bir deney, Taguchi L16(4⁵) ortogonal dizileri kullanılarak tüm seviyelerin değiştirilerek yapılan deney sayısını dörtte birine kadar düşürebilmektedir. Parametrik analiz çalışmalarına bir alternatif olan bu yöntem sayesinde sonuçlara daha az zaman ve daha az maliyetle ulaşılabilir. Parametrelerin sonuçlara etki seviyesi daha kolay ve daha hızlı tespit edilebilmektedir [73]. Taguchi metodu ile sistem optimizasyonu yapılırken kayıp fonksiyonları kullanılır. Ortogonal diziler, parametrelerin değerlerine ve sayılarına göre kullanılan kontrol faktörlerinin optimal değerlerini belirlemek için geliştirilmiştir. Ortogonal diziler gerekli deney sayısının düşürülmesinde önemli rol oynar [73].

Taguchi Metodunda istenilen değerler ve deneyden elde edilen sonucun farkını göstermek için kayıp fonksiyonları kullanılır. Deneylerle elde edilen değerler Sinyal/Gürültü oranına çevrilir. Hangi faktörün önemli hangi faktörün daha az önemli olduğunu saptamak için varyans analizi (ANOVA) yapılır.

4.1 Ortogonal Diziler

Ortogonal diziler metodunda birden fazla faktör eş zamanlı olarak incelenmektedir. Başarılı bir deneyde, deneyi yapanlar değişkenleri birçok kez değiştirirler. Bu değerlerin nasıl değiştirilmesi gerektiğini belirlemek için uygun bir ortogonal dizi kullanılır. Böylece çalışmanın sonunda her bir değişkenin etkisi diğerleri ile kıyaslanabilir. Taguchi metodu deneyleri ortadan kaldırmaz; sadece süreç değişken ayarlarının ve üretim toleranslarının seçimini çok daha verimli hale getirerek zamandan ve maliyetten tasarruf sağlar [74]. Deneysel çalışmalarda en çok L4, L8, L16, L9, L18 ve L27 ortogonal dizileri kullanılmaktadır [75].

Tablo 4.1 Tablo L18 Ortogonal Dizisi[74]

Deney Numarası	Sütun sayısı & Faktör							
	1 A	2 BD	3 C	4 E	5 F	6 G	7 H	8 I
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Uygun bir ortogonal dizi seçimi için deneyin toplam serbestlik derecesi bilinmelidir. Ortogonal dizinin serbestlik derecesi, deney parametrelerinin serbestlik derecesine eşit ya da fazla sayıda olması gerekir [76]. L18 ortogonal dizisinin serbestlik derecesi 17'dir [77].

4.2 Sinyal/Gürültü Oranı

Taguchi metodunda performans karakteristiği olarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranı kullanılmaktadır [74]. Sonuçların incelenmesinde sıklıkla standart sapma kullanılırken Taguchi metodunda S/N oranı kullanılmaktadır. Bunun nedeni; ortalama azalırken standart sapma da azalmakta ya da artarken artmaktadır. S/N oranları gerçekten de, ortalamayı hedefte tutarken standart sapmanın minimum olduğu parametre düzeyi kombinasyonunu verir [74]. 3 adet S/N oranı hesaplaması vardır [75] :

Bu çalışmada da kullanılan hesaplama yöntemi olan en düşüğün en iyi olduğu durumlarda [75]:

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

En yüksek en iyi olduğu durumlarda [75]:

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

Spesifik hedef durumlarda [73] :

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

Burada :

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

ve

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

4.3 Etkileşimlerin Değerlendirilmesi

Deneyleri tasarlamak için ortogonal bir dizi kullanmanın bir diğer amacı, çıktı yanıtının hedefi karşılaması veya hedefi aşması için en iyi kontrol faktörü ayarlarını bulmaktır. Taguchi Yöntemlerinden elde edilen çoğu ortogonal dizi, etkileşimler yerine ana etkilere odaklanır [78].

Taguchi Yöntemlerinde, kontrol faktörleri arasındaki etkileşimler, rastgele hatanın temel nedeni olarak ele alınır. Mühendisler, ürünleri ve süreçleri geliştirmek için ortogonal dizileri kullanarak kontrol faktörleri arasındaki etkileşimlerle başa çıkmak için deneysel planlar geliştirirler [78].

Taguchi Yöntemlerinden elde edilen deneysel çıktının analizi, etkileşimleri değerlendirmeye odaklanmaz, bunun yerine hedef ürünün veya sürecin performansını maliyet ve zaman açısından verimli bir şekilde optimize etmek için en uygun kontrol faktörü ayarlarını bulmaya odaklanır [78]. Taguchi deney tasarımı etkileşimlerin değerlendirilmesi için ortogonal dizi üzerinde karşılıklı etkileşim sütunu tanımlanarak hesaplara dâhil edilebilir [79].

4.4 Varyans Analizi

Deney sonuçlarına etki eden faktörlerin hangisinin etkili hangisinin etkisiz olduğunu belirleyebilmek için varyans analizi (ANOVA) yapılır. ANOVA verilerin incelenmesine ve sonuçlara etki eden en önemli etkenlerin belirlenebilmesine olanak sağlar [73]. ANOVA, test edilen öge gruplarının ortalama performansındaki herhangi bir farkı tespit etmek için istatistiksel temelli, nesnel bir karar verme aracıdır. ANOVA, belirli güven seviyelerinde deneysel hataların tahmini ile ortalama kareyi karşılaştırarak tüm ana faktörlerin önemini ve etkileşimlerini test etmeye yardımcı olur [80]. Bunlar kareler toplamı, serbestlik derecesi, kareler ortalaması gibi hesaplamalar yardımıyla yapılır [75].

4.5 Hesaplamalar

4.5.1 Kareler Toplamı

A ve B faktörleri için A ve B etkileşimlerini dâhil edilen toplam varyasyon denklemi [75]:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_e \quad (4.6)$$

$$SS_T = [\sum_{i=1}^N y_i^2] - \frac{T^2}{N} \quad (4.7)$$

Burada T toplam sinyal/gürültü (S/N) oranıdır. N deney sayısını ifade etmektedir. "y_i" her deneyin S/N oranını temsil etmektedir.

A faktörü için varyans hesabı [75] :

$$SS_A = [\sum_{i=1}^{K_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}}] - \frac{T^2}{N} \quad (4.8)$$

4.5.2 Hata Varyasyonu

Hata varyasyonu hesabı [75] :

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AXB} \quad (4.9)$$

4.5.3 Serbestlik Derecesi

Serbestlik Derecesi :

Her faktör için deneydeki seviyelerinin 1 eksiği serbestlik derecesini verir [75][80].

A faktörü için serbestlik seviyesi [75] :

$$\nu_A = k_A - 1 \quad (4.10)$$

Toplam serbestlik derecesi ise deney sayısının bir eksiğidir [75] :

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

Etkileşimlerin serbestlik derecesi ise [75] :

$$\nu_{AXB} = \nu_A \nu_B \quad (4.12)$$

Hatanın serbestlik derecesi hesaplanırken, toplam serbestlik derecesinden faktörlerin serbestlik dereceleri çıkartılır [75]:

$$\nu_e = \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_{AXB} \quad (4.13)$$

4.5.4 Hata Varyansı

Değişkenlerin analizi yapılırken hata varyansının hesaplanması gereklidir. Hata varyansı hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılır [75] :

$$\nu_e = \frac{SS_e}{\nu_e} \quad (4.14)$$

Her bir faktörün varyansı, o faktörün kareler toplamının aynı faktörün serbestlik derecesine bölünmesi ile hesaplanır [75]:

$$\nu_A = \frac{SS_A}{\nu_A} \quad (4.15)$$

4.5.5 F Testi

İstatiksel olarak kullanılan araçlardan biri Ronald Fisher tarafından bulunan F testidir [39]. Her parametrenin kalite üzerindeki etkisini görmek için kullanılır [80]. F değeri, hata varyansının faktörün varyansına oranlanmasıyla bulunur [75].

$$F_A = \frac{\nu_A}{\nu_e} \quad (4.16)$$

Hesaplan F değerleri ile F tablo değerleri kıyaslama yapılır. Hesaplanan F değeri tabloda bulunan F tablo değerinden büyük olması, ilgili faktörün proses ve çıktı üzerinde etkiye sahip olduğu, küçük olması ise proses ve çıktı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı yorumu yapılabilir [75]. F tablosundan değer okuma, hatanın serbestlik derecesi ile faktörün serbestlik derecesinin kesişim noktasından yapılır [75][79].

4.5.6 Değişime katkının yüzdesi :

Faktörlerin değişime olan katkısının hesaplanması için aşağıdaki formüller kullanılır. Böylece; her faktörün sisteme etki yüzdeleri görülmektedir [75].

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (4.17)$$

$$\text{A faktörü için :} \quad SS'_A = SS_A - (V_A)(V_e) \quad (4.18)$$

4.5.7 Doğrulama Deneyleri

Doğrulama deneyleri Taguchi deney tasarımının son adımıdır. Önemli faktörler için optimal koşullar belirlenir (önemsiz faktörler ekonomik seviyelerde belirlenir) ve belirli koşullar altında seçilen sayıda deney yapılır [75]. Doğrulama deneyinden elde edilen sonuçların ortalaması, test edilen parametrelere ve seviyelere dayalı olarak tahmin edilen ortalama ile karşılaştırılır. Doğrulama deneyi çok önemli bir adımdır ve Taguchi tarafından deney sonuçlarını doğrulamak için şiddetle tavsiye edilir. Doğrulama deneyleri sonrasında hesaplanan değerlerin tahminlere göre belirlenen güven aralığında olup olmadığına bakılır. İstenen aralıkta olan değerler deneyin doğruluğunu, bu aralıkta olmayan değerler ise deneysel tasarımda hata yapıldığını ve tekrarlanması gerektiğini göstermektedir [75].

Deney parametrelerinin optimal seviyeleri belirlendikten sonra son basamak deney parametrelerinin optimal seviyesini kullanarak kalite karakteristiklerinin geliştirilmesini tahmin etmek ve doğrulamaktır [76]. Deney parametrelerinin optimal seviyesi kullanılarak hesaplanan S/N oranı η aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir [76]:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^0 \hat{\eta}_i - \eta_m \quad (4.19)$$

Burada η_m S/N oranının toplamının ortalaması, η_i optimal seviyenin ortalama S/N oranı ve o kalite karakteristiklerini etkileyen ana dizayn parametresinin sayısıdır [76]. Bir diğer çalışmada A, B, C, D, E parametreleri için bulunan en iyi durumdaki A1B1C1D2E2 reçetesi için aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır [24].

$$\check{\mu} = \overline{A_1} + \overline{B_1} + \overline{C_1} + \overline{D_2} + \overline{E_2} - 4\overline{T} \quad (4.20)$$

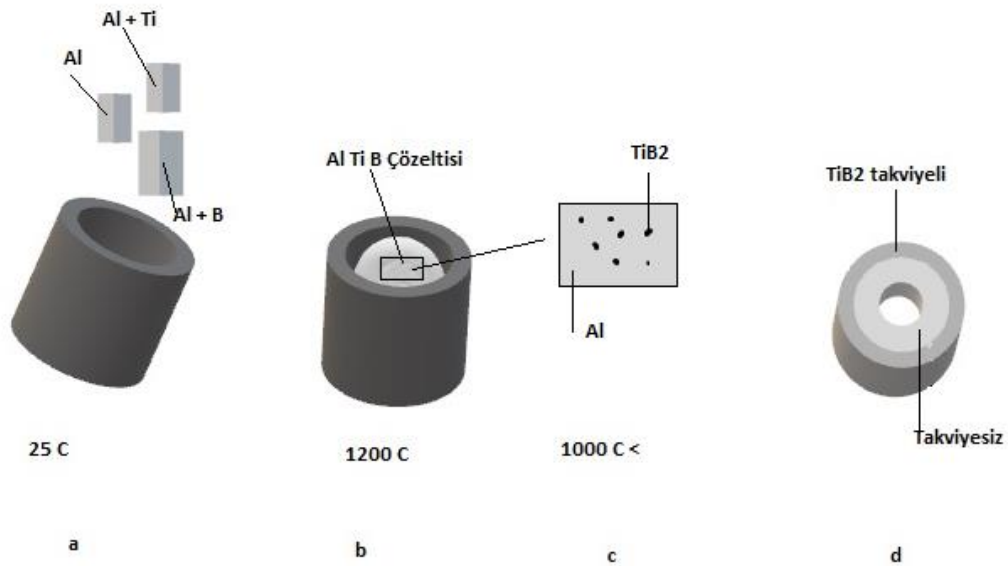
$$IC = \sqrt{\frac{F_{(f)}V_e}{n}} \quad (4.21)$$

$$\check{\mu} - IC \leq \mu \leq IC + \check{\mu} \quad (4.22)$$

Burada $\check{\mu}$ hesaplanan ortalama S/N değeri, μ doğrulama testi ortalama S/N değerini, $F_{(f)}$ F oranını, V_e hata varyansını ve n verilen koşullar için deney sayısını belirtmektedir [24].

5.1 Mastır Kompozitlerin Üretimi

Kompozitlerin üretimi için ilk adım olarak Al-Ti-B sistemlerinin oluşturulması (Şekil 5.1 a ve b) gerekmektedir. İkinci adımda, oluşturulan sistemler kullanılarak sıvı alüminyum içerisinde katı TiB_2 partiküllerini sentezlenmesi in sitü olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1 c). Son adımda ise savurma döküm tekniği kullanılarak TiB_2 partiküllerinin savurma yönünde fonksiyonel olarak derecelendirilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.1 d).



Şekil 5.1 Kompozit üretimin adımlarının şematik gösterimi

a)Pota içerisine külçelerin yüklenmesi, b) 1200 C'de Al Ti B eriyiğinin oluşturulması, c) 1000 C'nin altına inilerek sıvı alüminyum içerisinde katı TiB_2 partiküllerinin sentezlenmesi ve d) Savurma döküm tekniği ile fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme

Al-Ti-B çözeltisi oluşturmak için Titanyum verici olarak Al-%10Ti, Bor verici olarak Al-3B master alaşımları kullanılmıştır. Teorik olarak istenilen oranda TiB_2 yapılarını elde etmek için %99,8 safiyete sahip saf Alüminyum kullanılmıştır. Tablo 5.1'de Al-Ti-B sistemlerini oluşturmak için kullanılan alaşımlar ve bu alaşımların kimyasal kompozisyonları görülmektedir.

Tablo 5.1 Al-Ti-B sistemlerini oluşturmada kullanılan alaşım kompozisyonları

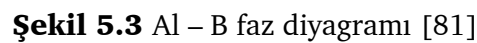
Alaşım	%Ağırlıkça element								
	Si	Fe	Mg	Cu	Cr	Ti	B	Mn	Al.
Saf Al	0.14	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	Kalan
Al-Ti	0.17	0.22	0.00	0.01	0.03	10.13	0.00	0.19	Kalan
Al-B	0.12	0.17	0.00	0.00	0.01	0.00	3.01	0.18	Kalan

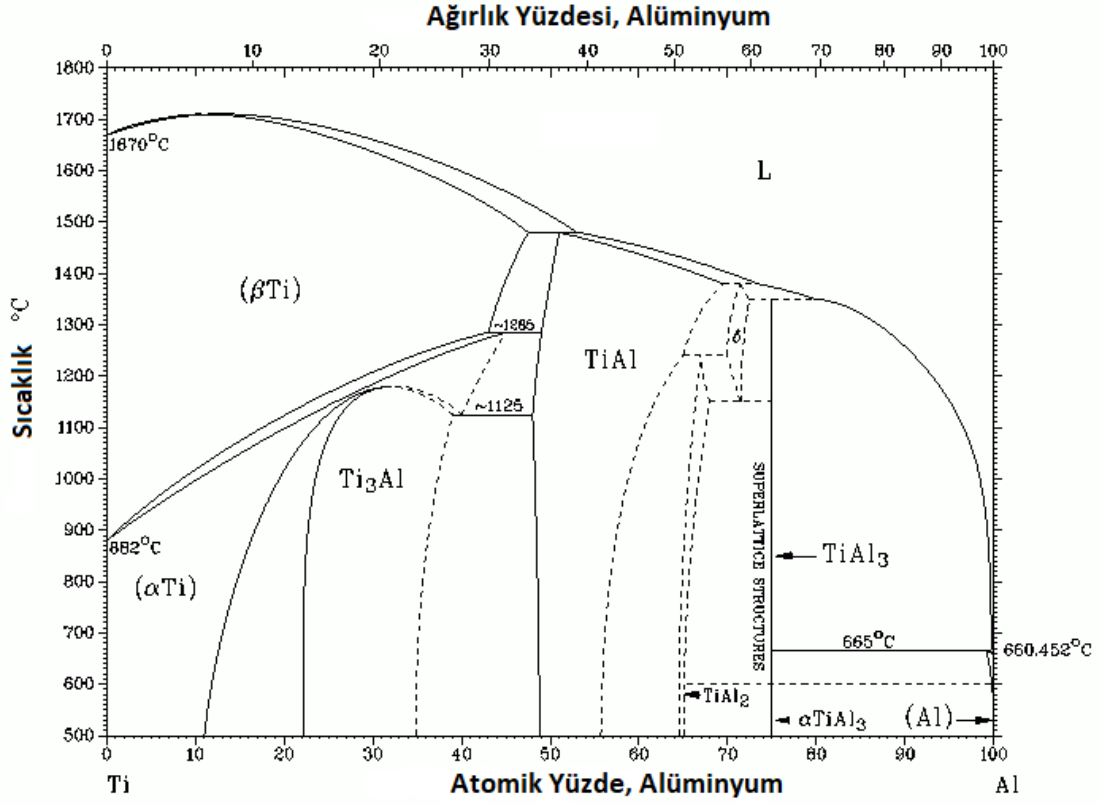
Al-Ti-B sistemini oluşturmak için alaşımlar, %5 TiB₂ içerecek şekilde, hassas terazi yardımı ile, istenilen oranda tartılarak ayarlanmıştır. İstenilen oranlarda ayarlanan Al-Ti ve Al-B alaşımları elik potalar içerisine konulmuştur. Ardından nceden 700° C’de ergitilmiş saf alüminyum, elik pota içerisindeki Al-Ti ve Al-B alaşımlarının üzerine dökülmüştür. Bu sayede elik pota içerisine alaşımların hepsi konulabilmiştir. elik potaların sıvı Alüminyum ile reaksiyona girmesini önlemek amacı ile, kalıbın i yüzeyleri şamot çamuru ile kaplanmıştır ve ardından bor nitrür boya ile boyanmıştır. şekil 5.2a’da ergitme için kullanılan kalıpların şamot ile kaplanması, şekil 5.2b’de malzemelerin kalıba doldurulması, şekil 5.2c’de sıvı alüminyumun kalıp içerisine dökümü ve şekil 5.2d’de döküm sonrası kalıp grntş görülmektedir.



şekil 5.2 Ergitmede kullanılan kalıplar

Şekil 5.2’de pota içerisinde hazırlanan alaşımlar Al-Ti-B çözeltisi elde etmek için ergitme fırınına alınarak ergitme işlemine alınmıştır. Şekil 5.3’de [81] verilen Al-B ve Şekil 5.4’de [82] verilen Al-Ti faz diyagramlarında görüldüğü gibi Al-B alaşımı içerisinde Bor elementi AlB_{12} ve AlB_2 bileşikleri şeklinde, Al-Ti alaşımında ise titanyum elementi Al_3Ti bileşiği şeklinde bulunmaktadır.





Şekil 5.4 Al – Ti faz diyagramı [82]

Alaşımelerde bulunan bu bileşiklerinin sıvı Alüminyum tarafından tamamıyla çözünmesi için 1200° C'de 1 saat ergitme işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.5'te ergitme fırını içerisinde ergitilmiş Al-Ti-B çözeltisi görülmektedir. 1200° C'deki çözelti hızlı bir şekilde 800° C'e indirilmiş ve aşağıdaki reaksiyonların [24], [83]–[85] gerçekleşmesi için 30 dakika beklenmiştir.



Şekil 5.5 Ergitme fırını



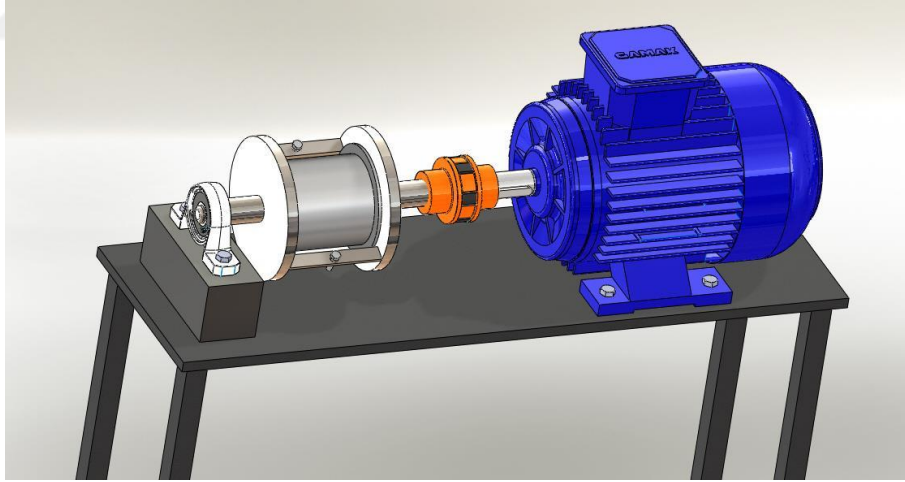
Kompozit üretiminde matris çeşitliliğini sağlamak için aynı şatlarda üç tane 800°C'de "Al (sıvı) + TiB₂ (katı)" yarı çözeltisi hazırlanmıştır. Bunlardan ilki saf Alüminyum matrisli kompozit üretmek için hiçbir işlem uygulanmadan katılaşmaya bırakılmıştır. İkinci çözelti Al-%4Cu matrisli kompozit üretmek için %4 oranında bakır ilave edilerek alaşımlandırılmış ve ardından katılaşmaya bırakılmıştır. Üçüncü çözelti ise Al-%4Si matrisli kompozit üretmek için %4 oranında Si elementi ile alaşımlandırılarak katılaştırılmıştır. Bu sayede 1 kilogram ağırlığında yaklaşık %5 oranında in situ TiB₂ takviyeli TiB₂/Al, TiB₂/Al-%4Cu ve TiB₂/Al-%4Si mastır kompozitler üretilmiştir. Şekil 5.6'da %5 oranında in-situ TiB₂ partikül içeren Saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matrisli mastır kompozitlere ait fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 5.6 %5 oranında TiB₂ içeren saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matrisli mastır kompozitlerin görüntüsü

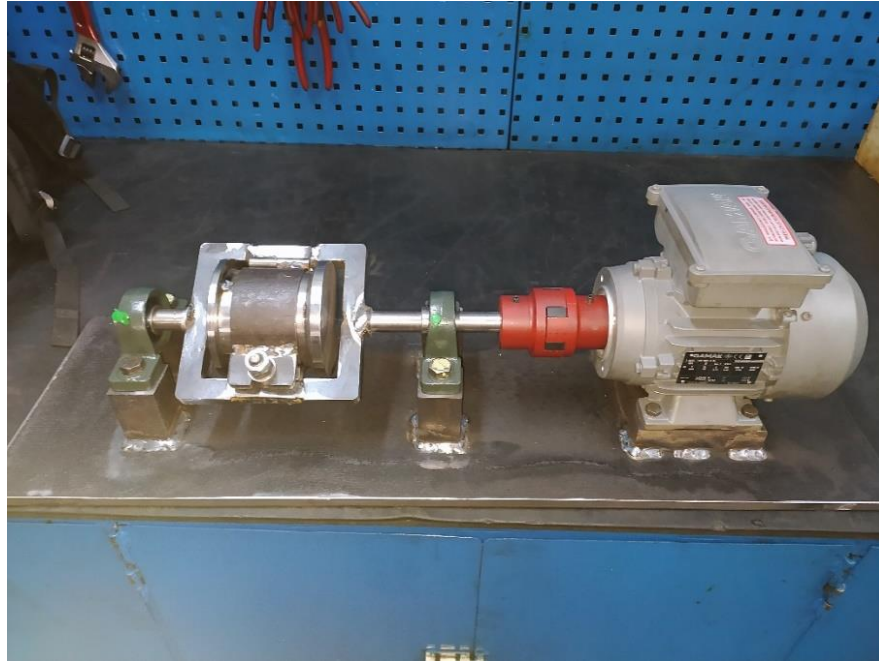
5.2 Savurma Döküm

Üretilen mastır kompozitlerin fonksiyonel olarak derecelendirilmesi amacı ile katı modelleme programı kullanılarak basit fakat amacına uygun bir savurma makinesi ve bağlantı elemanları tasarlanmış, montaj resmi oluşturulmuştur. Şekil 5.7’de savurma döküm mekanizmasının tasarım görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5.7 Savurma döküm mekanizmasının tasarım görüntüsü

Savurma esnasında aksenal kaçıklık olmaması için iki adet rulman yataklama yapılmıştır. 15 kW bir elektrik motoru savurma kalıbının kaynaklı olduğu mile bir kaplin yardımıyla bağlanmıştır. Şekil 5.8’de tasarımlar dikkate alınarak imal edilmiş geçek savurma döküm mekanizması görülmektedir.



Fonksiyonel olarak üretilmiş TiB_2 takviyeli saf Al, Al-%4Cu ve Al-%4Si matrisli kompozit malzemeler üretmek için savurma döküm metodu kullanılmıştır. Pota içerisinde yaklaşık olarak %5 oranında TiB_2 partiküllerini içeren mastır kompozit malzemeler soğuduktan sonra savurma işlemi için tasarlanan çelik kalıp içerisine yerleştirilmiş ve kalıbın kapağı kaynatılarak kalıp kapatılmıştır. Şekil 5.10'da savurma kalıbı ve mastır kompozitlerin savurma kalıbı içerisine yerleştirilmiş hali görülmektedir. Çelik kalıba yerleştirilen numuneler daha önceden 800 °C çıkarılmış fırın içerisinde 45 dakika bekletilmiştir. Bu sıcaklıkta “Al(sıvı)+ TiB_2 (katı)” çözeltisi oluşturulmuştur. Sonrasında fırından çıkartılarak 10 saniye içerisinde savurma tezgâhına yerleştirilip savurma dökümüne başlanmıştır. 1500 rpm devir hızında 800 °C de yaklaşık 2 dakika savurmaya tabi tutulmuştur. Şekil 5.11'de kalıp içerisinde “Al(sıvı) + TiB_2 (katı)” çözeltisinin savurma döküm mekanizmasına yerleştirilmesi ve savurma işlemi görülmektedir.

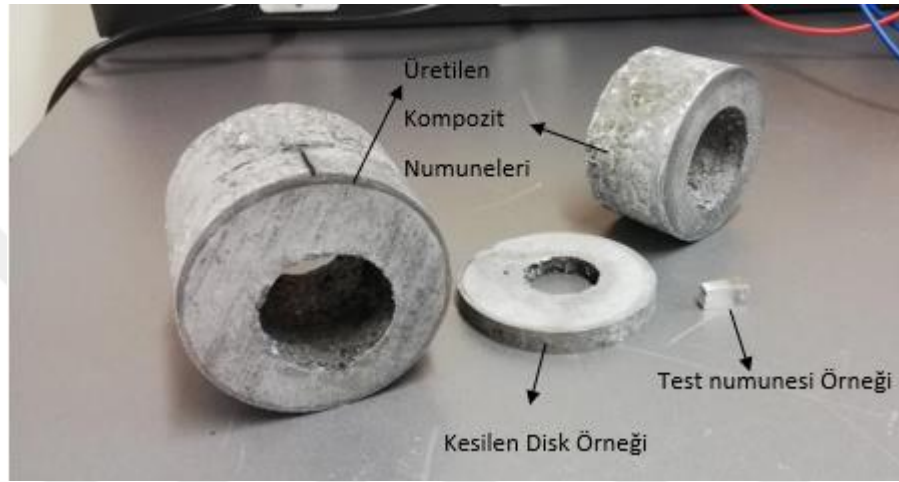


Şekil 5.10 Kalıba yerleştirilmiş mastır kompozit



Şekil 5.11 Savurma işlemi

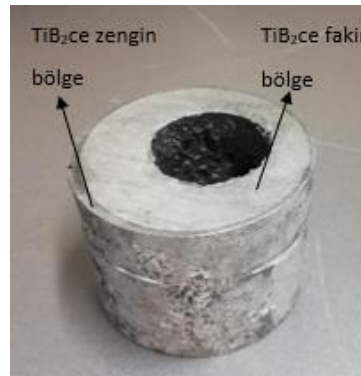
Savurma işlemi sonrasında fonksiyonel derecelendirilmiş TiB_2 /Saf Al, TiB_2 /Al-%4Si ve TiB_2 /Al-%4Cu kompozit malzemeleri üretilmiştir. Üretilen kompozitler kalıplardan çıkartıldıktan sonra elektrikli testere yardımı ile disk şeklinde kesilmiştir. Kesilen diskler üzerinden yoğunluk, sertlik, optik mikroskop, Scanning Electron Mikroskop incelemesi (SEM), X-Ray Diffraction (XRD) testi ve aşınma testleri için test numuneleri alınmıştır. Şekil 5.12’de fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler, onlardan kesilerek oluşturulmuş disk örneği ve kompozitlerin karakterizasyonunda kullanılmak üzere hazırlanmış test numunesi örneği görülmektedir.



Şekil 5.12 Kompozit numuneleri

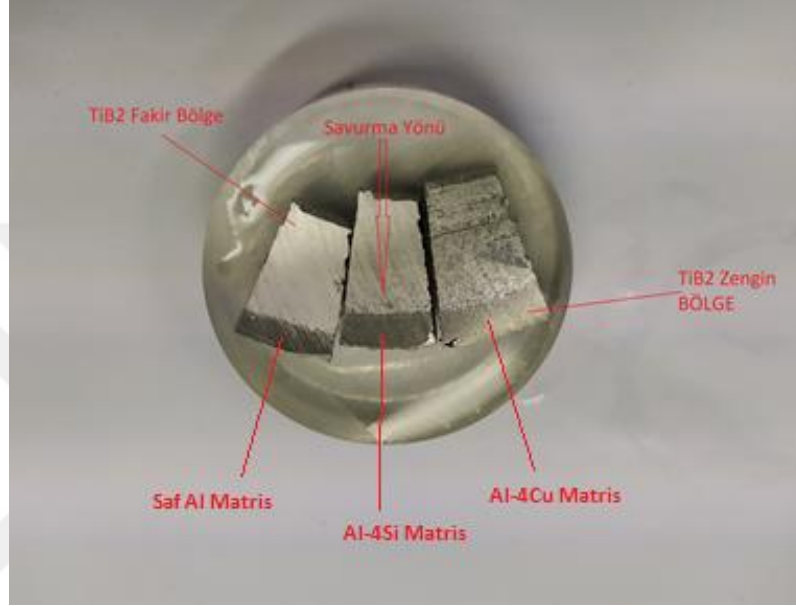
5.3 Mikroyapı İncelemeleri

Savurma işlemi sonrasında TiB_2 partiküllerinin savurma yönünde itilip itilmediğini kontrol etmek amacı ile kalıptan çıkartılan döküm numunelerinin üst yüzeyleri zımparalandıktan sonra Hidroklorik Asit (HCl) çözeltisi ile dağlanmıştır. Şekil 5.13’de dağlama sonrasında elde edilen fiziksel görüntüsü görülmektedir.

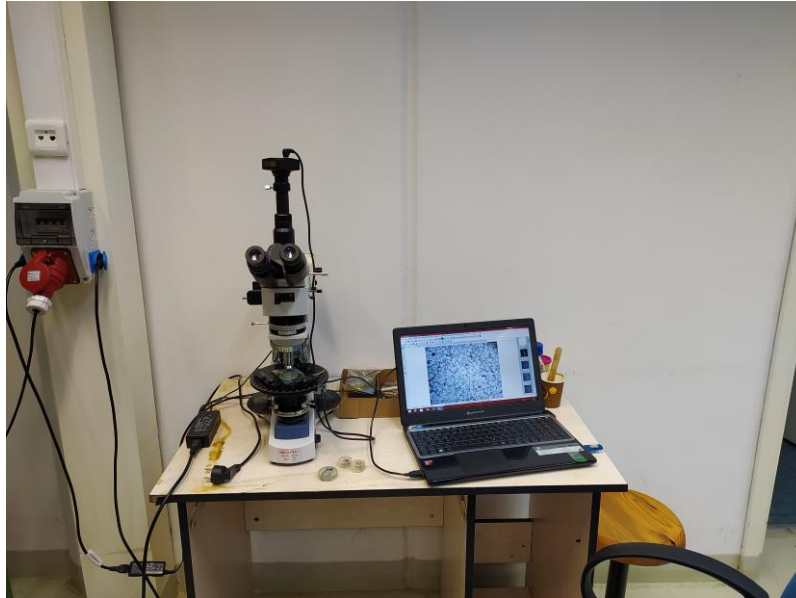


Şekil 5.13 Döküm numunesi dağlama sonrası

Döküm numunesinin mikroyapı incelemeleri için hazırlanan test numuneleri sırası ile 320, 600 ve 1000 gritlik SiC ile zımparalama işlemi sonrasında $0.2\ \mu\text{m}$ 'lik elmas pasta süspansiyonu ile 15 dakika parlatılmıştır. Mikro yapısal analiz için numuneler hazırlanmıştır. Alınan numuneler 3 farklı matris tipi ve TiB_2 'ce zengin ve fakir bölgeleri içerek şekilde reçine ile kaplanmıştır. (Şekil-5.14). Clemex Vision görüntü analiz sistemi ile donatılmış bir Olympus optik mikroskop kullanılarak Şekil 5.15'de görüldüğü gibi mikro yapı görüntüleri alınmıştır.



Şekil 5.14 Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numune



Şekil 5.15 Optik Mikroskop ile mikroyapı inceleme

5.4 Sertlik Ölçümleri

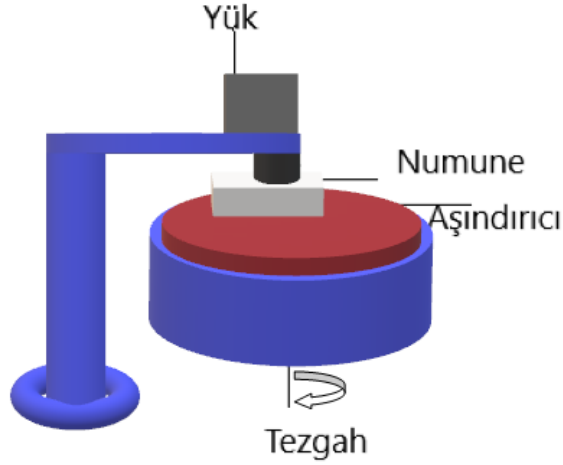
Sertlik deneyleri yapılırken taşınabilir THL 500 Sertlik Ölçüm cihazı kullanılmıştır. 5.5 g kütlesi olan etki ucu 11 Nmm etki enerjisi vermektedir. Özalit kaplanmış ve daha sonra zımpara ile yüzeyi parlatılmış numuneden en içten dışa doğru sertlik ölçümleri D tipi sertlik ölçüm probu kullanılarak alınmıştır.



Şekil 5.16 THL 500 Sertlik Ölçüm Cihazı Kullanılarak Numunlerden Sertlik Ölçümü Alınması

5.5 Aşınma Deneyleri

Üretilen kompozitlerin aşınma testleri yapılırken Pin on Disk abrasif aşınma yöntemi kullanılmıştır. Temsili görüntüsü Şekil 5.17'de verilmiştir. Aşındırıcı ortam tezgâh çapına uygun kesilerek yerleştirilmiştir. Test numunesi aşındırıcı ortam üzerine uygulanan yükün sabit kalacağı kısımda ve kayma hızı ve mesafesine göre farklı konumlara alınarak testler yapılmıştır. Uygulanan yük tam numunenin merkezinden uygulanacak şekilde yerleştirilmiştir. Aşındırıcı ortam, numune ve yük konulduktan sonra tezgah çalıştırılmış ve belirlenen süre içerisinde durdurulmuştur.



Şekil 5.17 Abrasif aşınma tezgahı temsili görüntüsü

Aşınma deneyleri; %0 ve %15 oranında TiB_2 partikülü içeren bölgelerinde, Saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matris tipinde, $46,2 \mu m$, $25,8 \mu m$ ve $18,3 \mu m$ aşındırıcı partikül boyutlarında, 7,00 m/s, 3,00 m/s, 1,1 m/s kayma hızında, 1N, 2N ve 3N uygulanan yük altında, 100m, 200m ve 300m kayma mesafesinde Taguchi deney tasarımı metoduna göre L18 ortogonal dizisi kullanılarak yapılmıştır. Deney parametreleri ve seviyeleri aşağıdaki tabloda görülmektedir. Optimum parametrelerin belirlenmesinde kullanılması için parametreler A, B, C, D, E, F olarak etiketlenmiştir.

Tablo 5.2 Deneysel çalışmaların seviyeleri

Parametreler	Kolon	Seviyeler		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Partikül Oranı	A	%0 TiB_2	%15 TiB_2	
Matris Tipi	B	Saf Al	Al-%4Si	Al-%4Cu
Aşındırıcı Partikül Boyutu	C	$46,2 \mu m$	$25,8 \mu m$	$18,3 \mu m$
Kayma Hızı	D	7,00 m/s	3,00 m/s	1,1 m/s
Uygulanan Yük	E	1N	2N	3N
Kayma Mesafesi	F	100m	200m	300m

Aşınma direncini belirlemek için malzemenin aşındırıcı öncesi ve sonrası ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Aşağıdaki tabloda (Tablo 5.3) Taguchi deney tasarımı göre hazırlanan deney reçetesi görülmektedir.

Tablo 5.3 Taguchi L18 Deney reçetesi

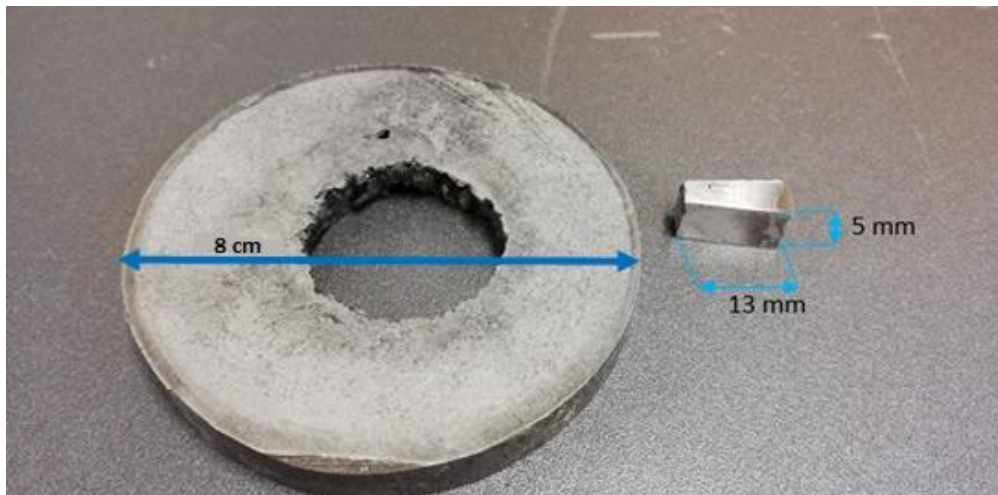
	Partikül Oranı	Matris Tipi	Aşındırıcı Partikül Boyutu	Kayma Hızı	Uygulanan Yük	Kayma Mesafesi
1	%0 TiB ₂	Saf Al	46,2 µm	7,00 m/s	3 N	100 m
2	%0 TiB ₂	Al-%4Si	46,2 µm	3.00 m/s	2 N	200 m
3	%0 TiB ₂	Al-%4Cu	46,2 µm	1,1 m/s	1 N	300 m
4	%0 TiB ₂	Saf Al	25,8 µm	7,00 m/s	2 N	300 m
5	%0 TiB ₂	Al-%4Si	25,8 µm	3.00 m/s	1 N	100 m
6	%0 TiB ₂	Al-%4Cu	25,8 µm	1,1 m/s	3 N	200 m
7	%0 TiB ₂	Saf Al	18,3 µm	3.00 m/s	3 N	300 m
8	%0 TiB ₂	Al-%4Si	18,3 µm	1,1 m/s	2 N	100 m
9	%0 TiB ₂	Al-%4Cu	18,3 µm	7,00 m/s	1 N	200 m
10	%15 TiB ₂	Saf Al	46,2 µm	1,1 m/s	1 N	100 m
11	%15 TiB ₂	Al-%4Si	46,2 µm	7,00 m/s	3 N	200 m
12	%15 TiB ₂	Al-%4Cu	46,2 µm	3.00 m/s	2 N	300 m
13	%15 TiB ₂	Saf Al	25,8 µm	3.00 m/s	1 N	200 m
14	%15 TiB ₂	Al-%4Si	25,8 µm	1,1 m/s	3 N	300 m
15	%15 TiB ₂	Al-%4Cu	25,8 µm	7,00 m/s	2 N	100 m
16	%15 TiB ₂	Saf Al	18,3 µm	1,1 m/s	2 N	200 m
17	%15 TiB ₂	Al-%4Si	18,3 µm	7,00 m/s	1 N	300 m
18	%15 TiB ₂	Al-%4Cu	18,3 µm	3.00 m/s	3 N	100 m

46,2 μm aşındırıcı partikül boyutu için 320 grit zımpara aşındırıcı ortam, 25,8 μm aşındırıcı partikül boyutu için 600 grit zımpara aşındırıcı ortam, 18,3 μm aşındırıcı partikül boyutu için 1000 grit zımpara aşındırıcı ortam kullanılmıştır [86]. Eğer Taguchi yöntemi uygulanmasaydı $2 \times 3^5 = 486$ adet deney yapılması gerekecekti. Taguchi metodu uygulanması ile bu sayı 18 adet deneye kadar düşürülmüştür.



6.1 Makro Yapı

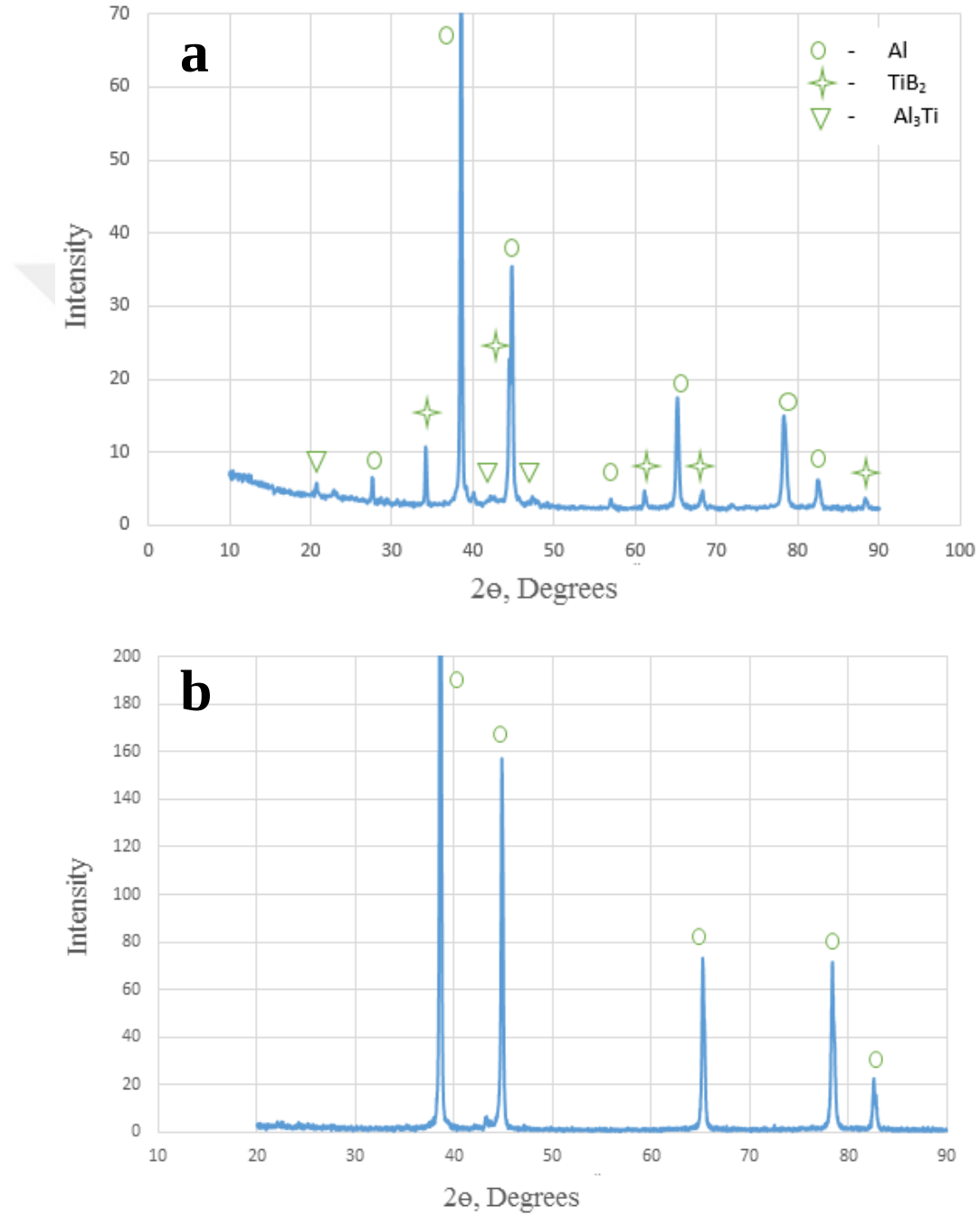
Mastır kompozit malzemelerin üretimi sonrasında üretilen mastır kompozitler, kalıba yerleştirildikten sonra fırınlanmıştır ve daha sonra savurmaya tabi tutularak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TiB_2 takviyeli saf Al, Al-%4Cu ve Al-%4Si matrisli kompozit malzemeler savurma döküm metodu ile üretilmiştir. Üretilen kompozitler kalıplardan çıkarıldıktan sonra elektrikli testere yardımı ile disk şeklinde kesilmiştir. Üretilen kompozite ait makro yapı görüntüsü Şekil 6.1’de görülmektedir. Disk şeklindeki kompozitlerin açık ve koyu renkli iki farklı bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Açık renkteki kompozitlerin dış cidarlarının yaklaşık 3 mm kalınlığında koyu renkli bir bölge ile kuşatılmış olduğu dikkat çekmektedir. Kompozitlerin bu koyu renkli bölge tarafından kuşatılmasının nedeninin, TiB_2 partiküllerinin yoğunluğunun (4.5 ± 0.1 g/cm³) [87] sıvı alüminyumdan (2.7 g/cm³) [88] daha yüksek olmasından dolayı TiB_2 partiküllerinin savurma kuvvetinin etkisi ile kalıp dış cidarına doğru sürüklenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Katılma sırasında uygulanan savurma kuvveti, TiB_2 partiküllerini kalıp iç cidarından dış cidarına doğru sürükleyerek, kalıp dış cidarında birikmesine neden olmuştur. Bu nedenle TiB_2 partiküllerinin bulunmadığı iç bölgelerin açık renkte bir görünüm almasına neden olmuştur.



Şekil 6.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Titanyümdiborür Takviyeli Alüminyum Kompozit Numunesi

6.2 XRD Analizi

Üretilen kompozit malzemelerde gözlemlenen bu açık ve koyu renkli bölgelerde hangi fazların oluştuğunu tespit etmek amacıyla saf Al matrisli kompozitin açık ve koyu renkli bölgelerinin X Işını Kırınım (XRD) analizleri yapılmıştır. Şekil 6.2’de koyu ve açık renkli bölgeye ait XRD analiz sonuçları verilmiştir.



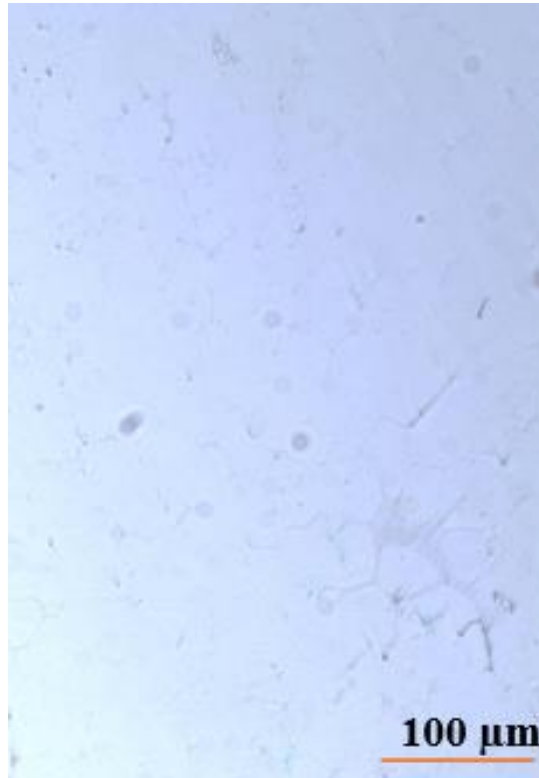
Şekil 6.2 Numunelerden alınan XRD Sonuçları a) TiB_2 'ce zengin bölge b) TiB_2 'ce fakir bölge

XRD sonuçlarına göre kompozit malzemede yoğun olarak Alüminyum pikine rastlanmıştır ve bunu sırasıyla TiB_2 ve Al_3Ti izlemektedir. Analiz sonucunda dökümlerin dış cidarında ortaya çıkan koyu renkli bölgelerin (Şekil 6.2a) TiB_2 , Al_3Ti ve Al fazlarını barındırdığı; açık renkli bölgelerin (Şekil 6.2b) ise yalnızca Al fazını içerdiği görülmektedir. Bu nedenle TiB_2 partiküllerini içeren bölgeler TiB_2 'ce zengin ve TiB_2 partiküllerini içermeyen açık renkli bölgeler TiB_2 'ce fakir bölgeler olarak tanımlanmıştır. XRD analizlerine göre TiB_2 'ce zengin bölgede TiB_2 fazının oranı %15, Al_3Ti fazının oranı %1,5 ve alüminyum fazının oranı %82 olarak tespit edilmiştir.

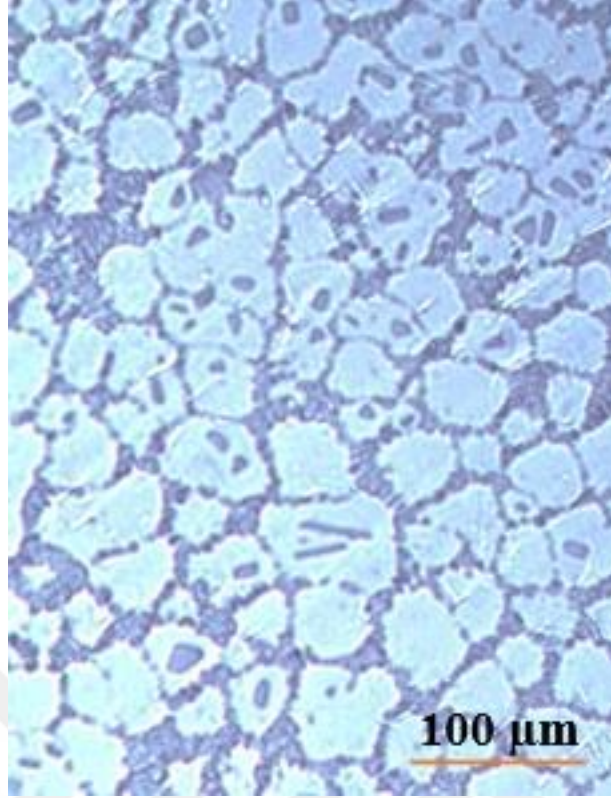
Analiz sonuçlarına göre Alüminyum Matrisli Kompozitte TiB_2 ve Al_3Ti partiküllerine rastlanmış olması ve AlB_{12} ile AlB_2 gibi başka intermetalik bileşenlere rastlanmamış olması (5.1), (5.2), (5.3)'de verilen denklemlere uygun olarak TiB_2 partiküllerinin sentezlendiğini göstermektedir. Bu sonuçlar önceki sonuçlara paralellik göstermektedir [24], [83]–[85].

6.3 Mikro Yapı

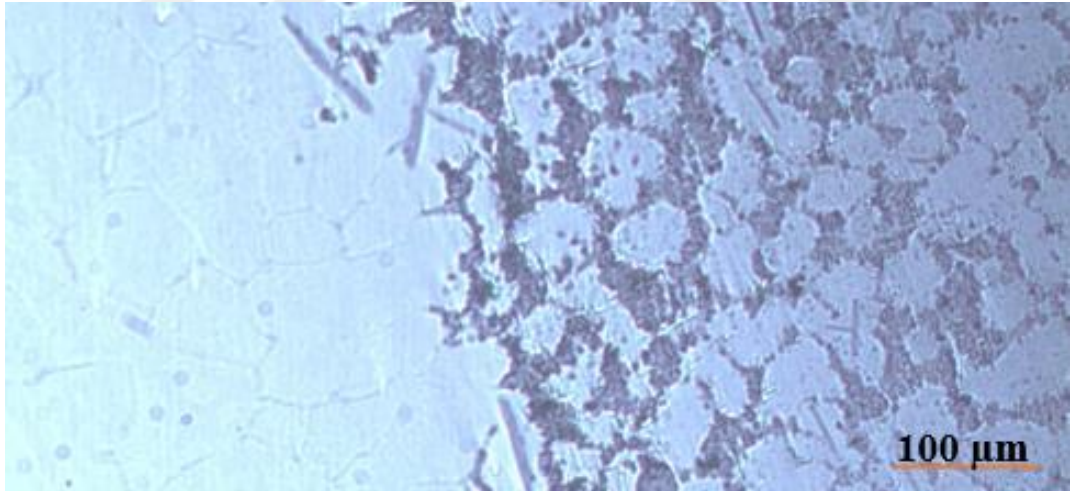
Üretilen tüm kompozitlerde TiB_2 partikül oranı %15 olan (TiB_2 'ce zengin) ve TiB_2 partikül oranı %0 olan (TiB_2 'ce fakir) iki bölgenin mevcut olduğu görülmüştür. Şekil 6.3'de TiB_2 'ce fakir, Şekil 6.4'de TiB_2 'ce zengin ve Şekil 6.5'de TiB_2 'ce zengin ve fakir bölgelerin bulunduğu ara bölgeden alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.3 TiB_2 'ce fakir bölgenin görüntüsü



Şekil 6.4 TiB₂'ce zengin bölgenin görüntüsü



Şekil 6.5 TiB₂'ce zengin ve fakir bölgeyi içeren geçiş bölgesi

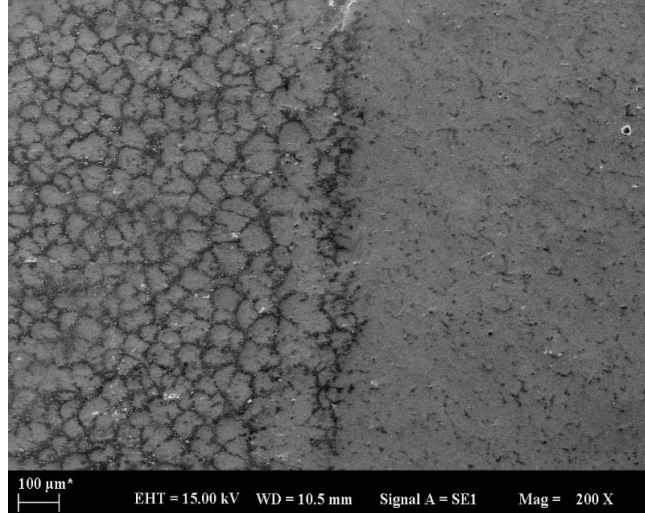
Şekil 6.3'de Alüminyum matrisin iç bölgesinde TiB₂ partiküllerinin hiç yer almadığı ve yalnız α -Al'un yer aldığı görülmektedir. Buna karşın Şekil 6.4'de TiB₂ takviyeli bölgede açık renkli Alüminyum matris içerisinde TiB₂ ve Al₃Ti yapılarının mevcut olduğu görülmektedir. TiB₂ partiküllerinin Alüminyum matris içerisinde tane sınırları boyunca ağ şeklinde dağılım sergilediği görülmektedir. Bunun muhtemel nedeninin; ilk önce çekirdeklenen ve büyümeye devam eden α -Al'ün, boyutu çok küçük olan TiB₂ partiküllerini tane sınırına doğru itmesinden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.3'de az miktarda da olsa α -Al'un merkezinde yaklaşık 30 mikron çapında Al_3Ti partiküllerinin yer aldığı görülmektedir. Al_3Ti partiküllerinin yapıda bulunmasının muhtemel nedeni, Bor oranının gereken miktardan daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'e göre TiB_2 partiküllerinin sentezlenmesi sırasında mevcut Bor elementinin tamamı Ti ile reaksiyona girerek TiB_2 partiküllerini oluşturmuş ve geriye kalan Ti elementleri daha fazla Bor bulamadığı için Alüminyum ile reaksiyona girerek Al_3Ti partiküllerini oluşturmuş olduğunun sonucuna varılmıştır.

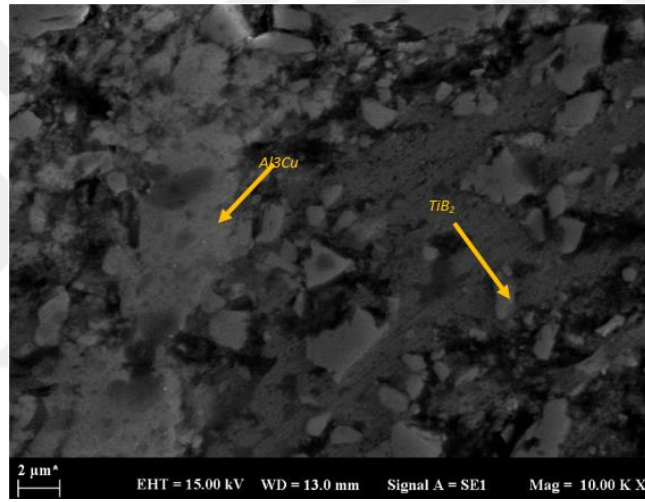
Mikro yapı incelemeleri bize savurma kuvvetinin etkisi ile TiB_2 partiküllerinin savurma yönünde sürüklendiğini göstermektedir. Şekil 6.5'de TiB_2 'ce zengin ve fakir bölgelerden alınan mikro yapı görüntüsünde zengin ve fakir bölgenin birbirinden keskin bir şekilde ayrıldığı görülmektedir. TiB_2 'ce zengin bölgelerde yoğun miktarda TiB_2 partikülleri mevcutken; fakir bölgelerde hiç TiB_2 partikülü bulunmamaktadır. Bunun muhtemelen nedeni, savurma kuvveti yardımı ile sürüklenen TiB_2 partiküllerinin kalıp dış cidarlarında birikerek viskoziteyi arttırmasından dolayı TiB_2 yapılarının yoğunluğunun belirli bir oranda ve belirli bir alanda kalmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır ve bu durum diğer çalışmalarla örtüşmektedir [48][24].

6.4 SEM Analizi

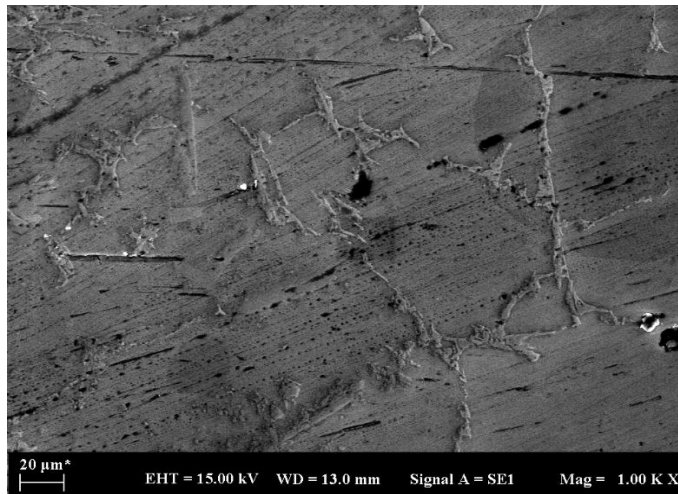
Üretilen Al-%4Cu Matrisli Kompozitin TiB_2 'ce zengin ve fakir bölgesinden alınan bir SEM görüntüsü Şekil 6.6'de verilmiştir. Şekil 6.7'de Alüminyum matris içerisinde küçük boyutta TiB_2 partikülleri ve Al_3Cu intermetalik bileşiği görülmektedir. TiB_2 partiküllerinin altıgen yapıda ve boyutlarının 0.2 mikron ile 1.5 mikron aralığında olduğu görülmektedir. SEM yapı görüntüsü daha önceki çalışmalara benzerlik göstermektedir [9], [24], [89], [90]. Şekil 6.8'de TiB_2 partikülleri içermeyen Al-%4Cu matris yapısı görülmektedir. Matris içerisinde hiç TiB_2 partiküllerinin olmadığı ve yalnız Al_3Cu intermetalik bileşikler olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6 Al-%4Cu matrisli kompozit numuneden alınan SEM görüntüsü 1



Şekil 6.7 Al-%4Cu matrisli kompozit numuneden alınan SEM görüntüsü 2



Şekil 6.8 Al_3Cu intermetalik bileşikler SEM görüntüsü

6.5 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

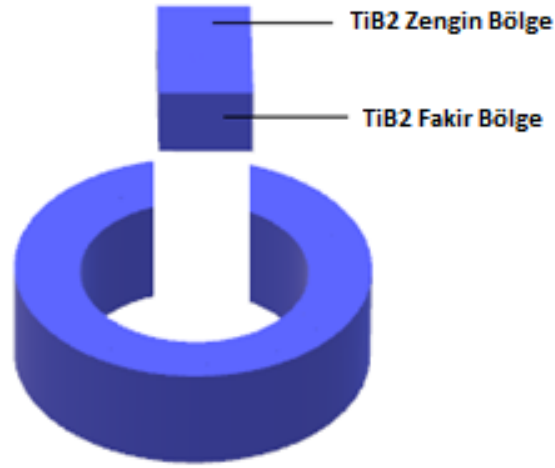
TiB₂ takviyeli saf Al, Al-%4Cu ve Al-%4Si Matrisli Kompozitlerinden ölçülen yoğunluk değeri Tablo 6.1’de görülmektedir. Tabloda TiB₂’ce zengin bölgelerin yoğunluğunun TiB₂’ce fakir bölgelere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tabloda en düşük yoğunluk değerinin Al-%4Si Matrisli Kompozitin TiB₂’ce fakir bölgesinde 2,68 g/cm³ olduğu ve en yüksek yoğunluk değerinin Al-%4Cu matrisli kompozitin TiB₂’ce zengin bölgesinde 2,95 g/cm³ seviyesinde olduğu görülmektedir. Takviyeli bölgelerin takviyesiz bölgelere göre yoğunluk değerlerinin daha yüksek olmasının nedeninin, yoğunluğu matris alaşımlarına göre daha yüksek olan TiB₂ (4,52 g/cm³) partiküllerinin ilavesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6.1 Yoğunluk ölçüm sonuçları

	TiB₂ Partikül Oranı	Yoğunluk(g/cm3)
TiB₂/Al	%15	2,9
	%0	2,7
TiB₂/Al%4Cu	%15	2,95
	%0	2,76
TiB₂/Al%4Si	%15	2,88
	%0	2,68
TiB₂ Partikül		4,52

6.6 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Şekil 6.9’da görüldüğü gibi sertlik ölçümleri için üretilen kompozitlerden TiB₂’ce zengin ve fakir bölgeleri içerecek şekilde numuneler alınmıştır. Hem TiB₂’ce fakir hem de TiB₂’ce zengin bölgelerden en az 10 adet Brinell (HB) ölçümü yapılmıştır. Saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matrisli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Kompozitlerin TiB₂’ce zengin ve fakir bölgelerinden alınan ortalama sertlik ölçüm sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.9 Sertlik ölçümü için alınan kesitin şematik gösterimi

Tablo 6.2 Numunelerden Alınan Sertlik Ölçümlerinin Sonuçlarının Ortalama Değerleri

	TiB₂ Partikül Oranı	Sertlik (HB)
TiB₂/Al	%15	51±6
	%0	34,3±8
TiB₂/Al%4Cu	%15	103,4±13
	%0	80,2±15
TiB₂/Al%4Si	%15	115,3±15
	%0	70,2 ±12

Matrislere TiB₂ takviyesi yapıldığında sertliklerinin arttığı görülmüştür. En sert malzemeye 115,3 HB ile Al-%4Si matrisli TiB₂ takviyeli kompozitin %15 TiB₂ partikül oranındaki bölgesinde rastlanırken, en yumuşak malzemenin ise 34,3 HB ile saf Al matrisli kompozitin %0 TiB₂ partikül oranındaki bölgesinde rastlanmıştır. Tüm kompozitlerde, TiB₂ takviyesi ile kompozitin sertliği artmıştır. Saf Alüminyum içerisine %15 oranında TiB₂ partikülleri ilave edildiğinde sertlik değeri 34,3 HB'den 51,00 HB'ye yükselmiş, Al-%4Si matrisi içerisine %15 oranında TiB₂ ilave edildiğinde sertlik değeri

70,2 HB'den 115,3 HB'ye, Al-%4Cu matrisi içerisine %15 oranında TiB₂ ilave edildiğinde ise sertlik değeri 80,2 HB'den 103,4 HB'ye yükselmiştir.

6.7 Aşınma Deneyi Sonuçları

Taguchi deney tasarımı metoduna göre, L18 ortogonal dizisi kullanılarak, %0 ve %15 oranında TiB₂ partikülü içeren bölgelerinde, Saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matris tipinde, 46,2 μ m, 25,8 μ m ve 18,3 μ m aşındırıcı partikül boyutlarında, 7,00 m/s, 3,00 m/s, 1,1 m/s kayma hızında, 1N, 2N ve 3N uygulanan yük altında, 100m, 200m ve 300m kayma mesafesinde Tablo 5.3 reçetesine göre uygulanmış abrasif aşınma deneylerinin sonuçları aşağıdadır. Deney öncesinde ve sonrasında numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür ve aşınma miktarı ölçülen ağırlıklar arasındaki farka göre belirlenmiştir. Her bir ölçüm en az üçer kere tekrarlanmıştır.

Tablo 6.3 Aşınma deney sonuçları

Deney Numarası	1. Ölçüm (gr)	2. Ölçüm (gr)	3. Ölçüm (gr)	Ortalama (gr)	SN (dB)
1	0,0678	0,0678	0,0682	0,0679	23,36
2	0,1410	0,0648	0,0660	0,0906	20,23
3	0,1624	0,0270	0,0703	0,0866	19,71
4	0,1477	0,1365	0,1535	0,1459	16,71
5	0,0239	0,0114	0,0047	0,0133	36,19
6	0,1802	0,0453	0,0346	0,0867	19,24
7	0,0990	0,0682	0,0580	0,0751	22,26
8	0,0196	0,0033	0,0044	0,0091	38,61
9	0,0105	0,0159	0,0105	0,0123	38,03
10	0,0205	0,0051	0,0051	0,0102	38,04
11	0,0259	0,0227	0,0223	0,0237	32,50
12	0,0423	0,0263	0,0246	0,0311	29,88

Tablo 6.3 Aşınma deney sonuçları (devamı)

13	0,0227	0,0146	0,0125	0,0166	35,30
14	0,0341	0,0034	0,0034	0,0136	34,02
15	0,0068	0,0051	0,0045	0,0055	45,06
16	0,0300	0,0059	0,0048	0,0136	34,95
17	0,0017	0,0010	0,0017	0,0015	56,40
18	0,0077	0,0040	0,0034	0,0050	45,36

Tablodan görülebileceği üzere en yüksek ağırlık kaybı ortalama 0,1459 gr ile 4. deneyde ve en düşük ağırlık kaybının ise ortalama 0,0015 gr ile 17. deneyde ölçülmüştür. Ağırlık kayıplarının 0,0015 ile 0,1459 gr arasında değiştiği görülmektedir. En düşük ve en yüksek ağırlıklara ait parametreler Tablo 6.4 ve 6.5’de görülebilir.

Tablo 6.4 Deney 4 Parametreleri (En yüksek ağırlık kaybı)

	Partikül Oranı	Matris Tipi	Aşındırıcı Partikül Boyutu	Kayma Hızı	Uygulanan Yük	Kayma Mesafesi
1	%0 TiB ₂	Saf Al	25,8 μ m	7,00 m/s	2 N	300 m

Tablo 6.4’de görülebileceği üzere en yüksek ağırlık kaybı, 0,1459 gr ile %0 TiB₂ partikül oranındaki, Saf Al matris tipindeki kompozit malzemede, 25,8 μ m aşındırıcı partikül boyutunda, 7,00 m/s kayma hızında, 2 N uygulanan yük altında, 300 m kayma mesafesinde olmuştur.

Tablo 6.5 Deney 17 Parametreleri (En düşük ağırlık kaybı)

	Partikül Oranı	Matris Tipi	Aşındırıcı Partikül Boyutu	Kayma Hızı	Uygulanan Yük	Kayma Mesafesi
17	%15 TiB ₂	Al-%4Si	18,3 μ m	7,00 m/s	1 N	300 m

Tablo 6.5’de ise en düşük ağırlık kaybının %15 TiB₂ partikül oranındaki, Al-%4Si matris tipindeki kompozit malzemede, 18,3 μm aşındırıcı partikül boyutunda, 7,00 m/s kayma hızında, 1 N uygulanan yük altında, 300 m kayma mesafesinde olduğu görülmektedir.

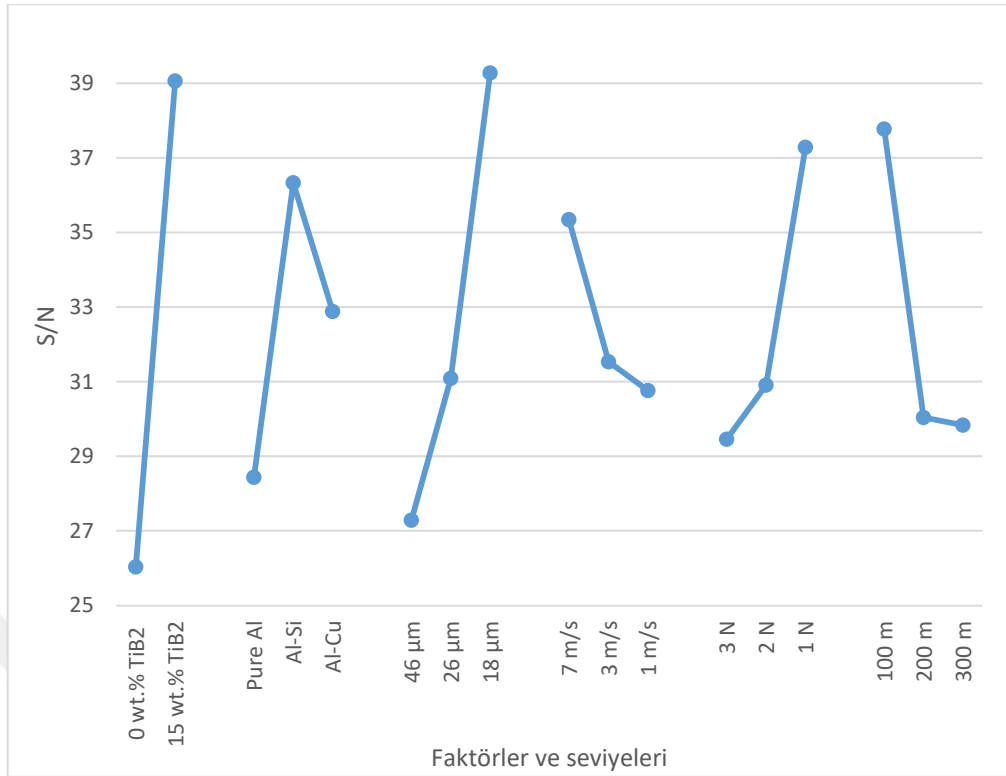
Tablo 6.6 ANOVA Tablosu

Değişim Kaynağı	Kolon	Kareler Toplamı S	ANOVA TABLOSU		Teorik $F_{(hesap)}$	İstatistiksel $F F_{(tablo)} - \%95$	İstatistiksel $F F_{(tablo)} - \%99$
			Serbeslik Derecesi f	Karalar Ortalaması			
Partikül Oranı	A	762,79	1,00	762,79	145,62	5,98	13,75
Matris Tipi	B	187,78	2,00	93,89	17,92	5,14	10,92
Aşındırıcı Partikül Boyutu	C	449,93	2,00	224,96	42,95	5,14	10,92
Kayma Hızı	D	72,13	2,00	36,06	6,88	5,14	10,92
Uygulanan Yük	E	207,62	2,00	103,81	19,82	5,14	10,92
Kayma Mesafesi	F	245,53	2,00	122,76	23,44	5,14	10,92
						P=0,05	P=0,01
Toplam		1925,77	11,00	175,07			
e		31,43	6,00	5,24			
ep							
*pooling, ep							

Taguchi yaklaşımına göre bir sistem üzerine etki eden faktörlerin etkinlik derecesini belirlemek amacı ile ANOVA tablosu hazırlanmaktadır. Bu çalışmada Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin aşınmaları üzerine etki ettiği düşünülen TiB₂ partikül oranı, matris tipi, aşındırıcı partikül boyutu, kayma hızı, uygulanan yük ve kayma mesafesi parametreleri ele alınmıştır. Taguchi yaklaşımına göre bu faktörlerin aşınma üzerine etkilerini belirlemek amacı ile hazırlanmış ANOVA tablosu Tablo 6.6’da verilmiştir. Anova tablosunun hazırlanmasında (4.1)-(4.18) arasındaki denklemler kullanılmıştır. Kareler toplamı için (4.7)’de verilen denklemden faydalanılmıştır.

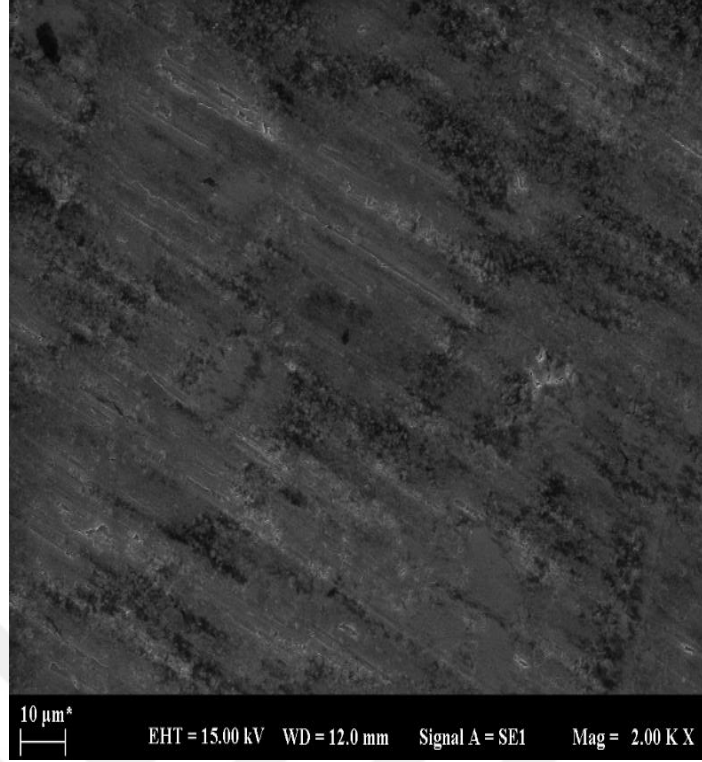
Denklem (4.15) ile kareler ortalaması (varyans) hesabı yapılmıştır. Denklem (4.16) yardımıyla F(hesap) değerleri bulunmuştur. Hesaplanan F değerinin tabloda okunan F değerinden büyük olması durumunun o faktörün aşınma üzerine etkisinin olduğunu göstermektedir. Altında olması durumunda ise anlamlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte F(hesap) değeri yükseldikçe etkinlik derecesi de o oranda artmaktadır. Buna göre kayma hızı faktörü haricindeki tüm faktörlerin F(hesap) değerlerinin F(tablo) değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç tüm faktörlerin aşınma üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Kayma hızı faktörünün her ne kadar %99 anlamlılık düzeyi için etkin olmasa da %95 anlamlılık düzeyi için etkin bir faktör olduğu görülmektedir. Aşınma üzerine en etkili faktörün F(tablo) değeri en yüksek olan partikül oranı faktörü olduğu görülmüştür ve onu sırasıyla aşındırıcı partikül boyutu, kayma mesafesi, uygulanan yük, matris tipi ve kayma hızı faktörleri izlemektedir.

Taguchi yaklaşımının deneysel çalışmalarda kullanılmasının bir diğer nedeni optimum deney reçetesinin belirlenmesidir. Bu çalışmada optimum deney reçetesi, en düşük ağırlık kaybını veren deney şartlarıdır. Bu şartları belirlemek için her bir deney parametresinin seviyelerinin ortalama S/N oranları kullanılarak “Faktörler ve seviyeleri” hazırlanmıştır. Faktörler ve seviyelerinin grafiği Şekil 6.10’da verilmiştir. Grafikte en yüksek S/N oranını veren faktör seviyeleri optimum deney reçetesini göstermektedir. Buna göre; optimum deney reçetesi A2B2C3D1E3F1 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç en düşük ağırlık kaybının, %15 TiB₂ partikül oranında (A2), Al-%4Si matris tipinde (B2), 18 µm aşındırıcı partikül boyutunda (C3), 7m/s kayma hızında (D1), 1N uygulanan yük altında (E3), 100 m kayma mesafesinde (F1) aşındırılması neticesinde elde edilebileceğini göstermektedir. Faktörlerin ortalama S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış grafikte, en yüksek S/N oranı değişiminin partikül oranı faktöründe olduğu görülmektedir. %0 partikül oranı bölgesinin S/N oranı yaklaşık 26 dB iken %15 partikül oranı bölgesinin S/N oranı yaklaşık 39 dB değerine kadar yükselmiştir. Onu izleyen faktör, 46 µm aşındırıcı partikül boyutunda yaklaşık 27 dB’den, 18 µm aşındırıcı partikül boyutunda yaklaşık 39 dB seviyesine yükselen aşındırıcı partikül boyutu faktörüdür. Faktörler ve seviyeleri arasındaki değişim kayma mesafesi faktöründe yaklaşık 29 ile 37 dB, uygulanan yük faktöründe yaklaşık 29 ile 37 dB, matris tipi faktöründe yaklaşık 28 ile 36 dB ve kayma hızı faktöründe yaklaşık 30 ile 35 dB değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

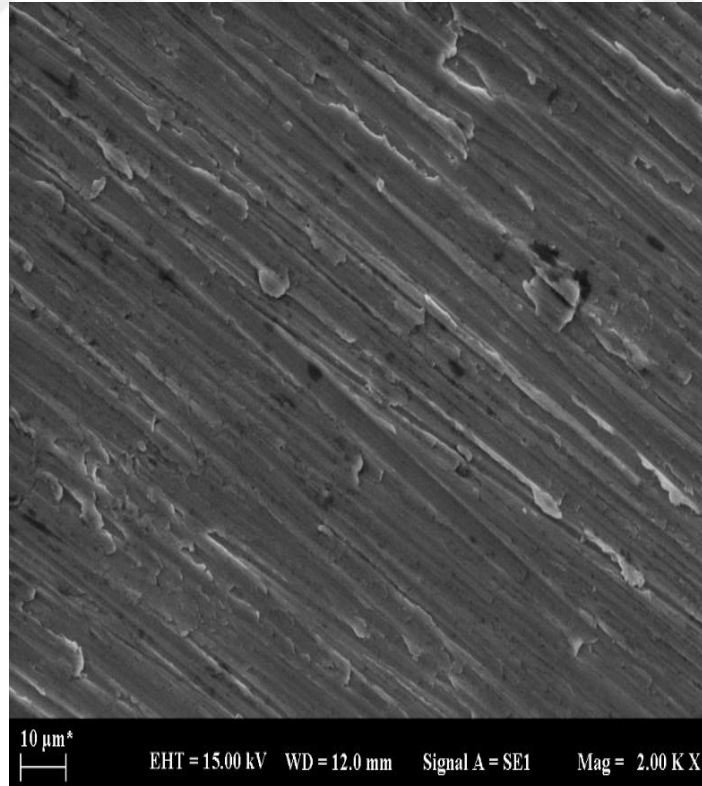


Şekil 6.10 Faktör ve seviyelerinin grafik gösterimi

Şekil 6.10'da partikül oranı faktörü incelendiğinde, %0 Partikül Oranında S/N oranının 26 dB seviyelerindeyken, %15 Partikül Oranında S/N oranının 39 dB seviyelerine çıktığı görülmektedir. Şekil 6.11'de %15 Partikül Oranında ve Şekil 6.12'de ise %0 Partikül Oranında olan bölgelere ait aşınma izleri bulunmaktadır. Tüm kompozitlerdeki %15 Partikül oranındaki bölgedeki ağırlık kaybı ortalama 0,0653 gr; %0 partikül oranındaki bölgedeki kayıp olan 0,1208 gr'ın yaklaşık 2 katıdır. Aşınma miktarının partikül oranına bağlı olarak azalması literatürdeki çalışmalarla paraleldir[24]. Abrasif aşınma üzerine yapılan çalışmalarda; abrasif aşınmaya maruz kalan malzemelerin aşınma yüzeyine aşındırıcı partikülün penetre olduğu, penetre olan bu partiküllerin, penetrasyon miktarı kadar malzemeyi kayma yönünde kazıyarak aşındırdığı belirtilmektedir[51][91][92]. Yapılan çalışmaların çoğunda yüzeylerin sertlik değerinin abrasif aşınma miktarında etkili olduğu görülmektedir[93][24][17]. Artan yüzey sertliği ile aşındırıcı partiküllerinin metal yüzeyine penetrasyonunun azaldığı ve bunun neticesinde; aşınma miktarının da azaldığı belirtilmektedir[93][24][91][92]. Şekil 6.11'de bulunan %15 partikül oranındaki bölgelerin abrasif aşınma miktarlarının %0 partikül oranındaki bölgelere göre daha düşük olmasının nedeni; partikül oranı %15 olan bölgelerin sertlik değerinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 6.2'de üretilen tüm kompozit malzemelerin partikül oranı %15 olan bölgelerinin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11 Saf Alüminyum matrisli kompozitin %15 TiB₂ Partikül oranındaki bölgelerinden alınan aşınma izlerinin mikroskopik görüntüsü



Şekil 6.12 Saf Alüminyum matrisli kompozitin %0 TiB₂ Partikül oranındaki bölgelerinden alınan aşınma izlerinin mikroskopik görüntüsü

Şekil 6.11 ve 6.12’de Saf Alüminyum matrisli TiB_2 ile güçlendirilmiş kompozitlerin %0 ve %15 TiB_2 partikül oranındaki bölgelerine ait aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Aşınma izlerinin daha doğru şekilde görüntülenmesi amacı ile her iki yüzeyde aynı aşınma şartlarında aşındırılmıştır. %0 partikül oranındaki bölgelerde yoğun miktarda ve derin aşınma izleri mevcutken, %15 partikül oranındaki bölgelerde daha az ve yüzeysel aşınma izleri gözlemlenmektedir. %15 partikül oranındaki bölgelerdeki aşınma izlerinin daha sık olmasının nedeni, Alüminyum içerisine ilave edilen %15 oranındaki TiB_2 partiküllerinin aşınan yüzeyin sertliğini artırarak, aşındırıcı partiküllerin aşınma yüzeyine penetrasyonunu zorlaştırmasından kaynaklanmıştır. Buna karşın %0 partikül oranındaki bölgelerde sertlik değerinin daha düşük olmasından dolayı, aşındırıcı partiküllerin aşınma yüzeyine daha fazla penetre olduğu görülmektedir. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin %0 ve %15 TiB_2 partikül oranındaki ortalama sertlik değerleri Tablo 6.2’de görülebilir.

Şekil 6.10’da matris tipinin de aşınma kayıplarını etkilediği görülmektedir. En fazla ağırlık kaybının Saf Alüminyum Matrisli Kompozitlerde, en düşük ağırlık kaybının ise Al-%4Si Matrisli Kompozitlerde olduğu ve onu Al-%4Cu Matrisli Kompozit malzemelerin izlediği görülmektedir. Bu sonuç saf Alüminyumun, Cu ve Si ile alaşımlandırılmasının aşınma miktarını önemli oranda düşürdüğünü göstermektedir. Tablo 6.2’de verilen sertlik değerleri matris tipi ele alındığında en yüksek sertlik değerinin Al-%4Si Matrisli Kompozitte olduğu ve onu Al-%4Cu Matrisli Kompozitlerin izlediği görülmektedir. En düşük sertlik değerinin ise Saf Alüminyum Matrisli Kompozitte olduğu görülmektedir. Buna paralel olarak Şekil 6.10’da en yüksek ağırlık kaybının saf Al Matrisli Kompozitlerde olduğu ve en düşük ağırlık kaybının Al-%4Si Matrisli Kompozitlerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç birçok araştırmacının da rapor ettiği gibi artan sertlik değeriyle aşınma miktarının azaldığını göstermektedir[51][91][92]. Sertlik ile aşınma miktarı arasında gözlemlenen ters orantının muhtemel nedeni, sertliğin artması ile aşındırıcı partiküllerin aşınma yüzeyine penetrasyonunun zorlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aşındırıcı partikül boyutu ağırlık kaybına en fazla etki eden faktörlerden biridir. Bu çalışmada $46,2 \mu m$ partikül boyutu, $25,8 \mu m$ partikül boyutu, $18,3 \mu m$ partikül boyutu içeren aşındırıcı ortamlar kullanılmıştır. Şekil 6.10’da görüldüğü gibi artan aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarının arttığı görülmektedir. En az ağırlık kaybı $18,3 \mu m$ aşındırıcı partikül boyutlarında olduğu, en yüksek ağırlık kayıplarının ise $46,2 \mu m$ aşındırıcı partikül boyutunda olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan önceki çalışmalar da, büyük boyutlu partiküllerin aşınma yüzeyine daha fazla penetre olarak aşınma

kayıplarının daha fazla olmasına neden olduğu rapor edilmiştir[24] [91][92]. Bu sonuçlara benzer şekilde bu çalışmada da artan aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarı artmıştır.

Uygulanan yük faktörü incelendiğinde ağırlık kaybına etki eden faktörlerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Görece olarak daha az etki ettiği görülen yük faktöründe, bunun nedeninin seçilen ağırlık (1N, 2N ve 3N) değerlerinin birbirine yakın olmasıdır. Bu nedenle aşınma üzerine yükün etkisi görece daha az olmasına rağmen; aşınma üzerine etki ettiği görülmektedir. Yük arttıkça ağırlık kaybı da artmıştır. Bu artışın nedeni aşındırıcı partiküllerin artan yükün etkisiyle aşınma yüzeyine penetrasyonunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir[24].

Şekil 6.10'da artan kayma mesafesi ile aşınma miktarının arttığı görülmektedir. En yüksek aşınma miktarı 300 m kayma mesafesinde, en düşük aşınma miktarı 100 m kayma mesafesinde olmaktadır. Artan kayma mesafesi ile aşınma miktarının artması birçok araştırmacının da rapor ettiği gibi kayma mesafesinin artması ile aşınan yüzeylerin daha fazla aşınmaya maruz kalmasından kaynaklanmaktadır[94][95]. Bu durum abrasif aşınma mekanizmasının doğal bir sonucudur[51][94].

Artan kayma hızı ile malzeme kaybının ters orantılı olduğu görülmüştür. Hız artışı ağırlık kaybını azaltıcı etki göstermiştir. Bunun nedeni artan hızla birlikte aşındırıcı partiküllerinin aşınma yüzeyine penetre olmak için yeterli vakit bulamamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir ifadeyle yavaş kayma hızlarında yapılan aşınma deneylerinde aşındırıcı partiküller daha fazla aşınma yüzeyine penetre olurken, daha hızlı kayma mesafelerinde yapılan aşınma deneylerinde partiküller aşınma yüzeyine penetre olma süresi bulamamıştır. Bu nedenle yüksek hızlarda yapılan aşınma deneylerinde aşınma miktarının daha az olduğu görülmüştür.[19]

Taguchi metodu ile yapılan deneylerde, deneylerin doğruluğunun ortaya konulması için bir doğrulama deneyinin yapılması gerekmektedir. Yapılacak doğrulama deneyi en az ağırlık kaybını veren deney reçetesi dikkate alınarak yapılması ön görülmektedir (Şekil 6.10'da görülen en yüksek faktör seviyeleri). Doğrulama deneyleri iki aşamada yapılmaktadır. Birinci aşamada, optimum deney parametrelerine göre tahmini ortalama S/N oranları ve tahmini S/N oranı güven aralığı belirlenir. İkinci aşamada ise optimum deney şartları baz alınarak yeni bir doğrulama deneyi yapılmalı ve ortalama S/N oranı belirlenmelidir. Yapılan deneylerin doğru olması için doğrulama deneyi sonrasında elde edilen S/N oranının, hesaplanan tahmini güven aralığı içerisinde kalması gerekmektedir.

Tablo 6.7 Optimum deney şartları

Parametreler	
Partikül Oranı	%15 TiB ₂
Matris Tipi	Al-%4Si
Aşındırıcı Partikül Boyutu	18,3 μ m
Kayma Hızı	7,00 m/s
Uygulanan Yük	1N
Kayma Mesafesi	100 m

Bu çalışmaya ait optimum deney şartları (A2B2C3D1E3F1) (Tablo 6.7) dikkate alınarak yapılan doğrulama deney sonuçları Tablo 6.8’de verilmiştir. Doğrulama deneyi sonrasında ortalama ağırlık kaybının 0,00093 gr olduğu ve S/N oranının ise 60,56 dB olduğu görülmektedir. Tablo 6.9’da optimum şartlar dikkate alınarak hesaplanmış tahmini güven aralığı ve ortalama aşınma değerleri, S/N oranı ve aşınma miktarı cinsinden verilmiştir.

Tablo 6.8 Doğrulama deneyi sonuçları

1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama	S/N
0,0010	0,0010	0,0008	0,00093	60,56

Tablo 6.9’da tahmini olarak optimum şartlarda yapılacak aşınma deneyinin ağırlık kaybı miktarının 0,0005-0,0012 g arasında, S/N oranı ise 57,95 ile 66,68 dB değerleri arasında olması gerektiğini göstermektedir. Hesaplanan değerlere ve doğrulama deneyleri ile alınan sonuçlara bakıldığında, doğrulama deneyi neticesinde alınan ortalama S/N ve ağırlık kaybı değerlerinin hesaplanan tahmini güven aralığı değerleri içinde kaldığı görülmektedir. Bu sonuç bize aşınma testleri için yapılan deneylerin doğru olarak yapıldığını ve kontrol altına alınmayan faktör ve/veya değişkenin olmadığını göstermektedir.

Tablo 6.9 Doğrulama deneyi hesaplamaları ve karşılaştırması

		Üst değer	Ortalama	Alt değer
Tahmini değerler	Ortalama aşınma miktarı, g	0,0012	0,0007	0,0005
	Ortalama S/N oranı	57,95	62,31	66,68
Doğrulama deneyi	Ortalama aşınma miktarı, g	0,0010	0,0009	0,0008
	Ortalama S/N oranı		60,56	

Bu çalışmada in-situ TiB_2/Al , $TiB_2/Al-4Si$ ve $TiB_2/Al-4Cu$ Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerinin savurma döküm metodu kullanılarak üretimleri yapılmış, üretilen kompozitlerin mikroyapı özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiş ve abrasif aşınma özellikleri araştırılmıştır. Abrasif aşınma testleri Taguchi deney tasarımına göre, partikül oranı, matris tipi, aşındırıcı partikül boyutu, kayma hızı, uygulanan yük ve kayma mesafesi dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir :

1. TiB_2 partikülleri saf Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matrisleri içerisinde in sitü olarak oluşturulmuştur. TiB_2 partiküllerinin altıgen yapıda olduğu ve boyutlarının 0.2-1.5 mikron arasında olduğu görülmüştür.
2. Fonksiyonel derecelendirilmiş in sitü TiB_2 takviyeli Al, Al-%4Si ve Al-%4Cu matrisli kompozit malzemeler 1500 devir ve $800^\circ C$ 'de savurma döküm yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen tüm kompozitlerde TiB_2 partikül oranının ağırlıkça %0 ve %15 olan bölgeler olduğu görülmüştür. TiB_2 partiküllerinin savurma yönünde sürüklendiği tespit edilmiştir.
3. TiB_2 takviye edilen tüm kompozitlerde yoğunluğun arttığı görülmüştür. En yüksek ölçüm 2.95 g/cm^3 ile Al-%4Cu matrisli kompozitin TiB_2 'ce zengin bölgesindedir.
4. TiB_2 takviye edilen tüm kompozitlerde sertliğin arttığı gözlemlenmiştir. En sert bölgeye 114 HB ile Al-%4Si matrisli TiB_2 takviyeli kompozit malzemenin %15 TiB_2 partikül oranında olan bölgesinde rastlanmıştır. En yumuşak bölgeye ise 30,8 HB ile saf Al matrisli kompozitin %0 TiB_2 partikül oranında olan bölgesinde rastlanmıştır.
5. ANOVA sonuçlarına göre, aşınma kayıplarını en çok etkileyen faktörün partikül oranı olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla; aşındırıcı partikül boyutu, kayma mesafesi, matris tipi, uygulanan yük ve kayma hızı faktörleri izlemektedir. Kayma hızı faktörü hariç tüm faktörler %99 güven aralığında iken; kayma hızı faktörü %95 güven aralığındadır.
6. Aşınma miktarının, TiB_2 takviyesi ve kayma hızının arttırılması ile azaldığı görülürken; abrasif partikül boyutları, kayma mesafesi ve uygulanan yük artması

ile aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Matris tipinin de aşınmaya etki ettiği tespit edilmiştir.

7. En yüksek aşınma miktarı olan 0.1459 g ağırlık kaybı, saf Alüminyum matrisli kompozitte, %0 TiB₂ partikül oranında, 25,8 μ m aşındırıcı partikül boyutunda, 7,0 m/s kayma hızında, 2 N uygulanan yük altında ve 300 m kayma mesafesinde görülmüştür. En düşük aşınma miktarı olan 0,015 g ağırlık kaybı ise, Al-%4Si matrisli kompozitin %15 TiB₂ partikül oranında, 18,3 μ m aşındırıcı partikül boyutunda, 7,0 m/s kayma hızında, 1 N uygulanan yük altında ve 300 m kayma mesafesinde olduğu görülmüştür.
8. Optimum deney reçetesi %15 TiB₂ partikül oranında, Al-%4Si matris tipinde, 18,3 μ m aşındırıcı partikül boyutunda, 7,0 m/s kayma hızında, 1 N uygulanan yük altında ve 100 m kayma mesafesinde olduğu görülmüştür. Bu şartlar altında ağırlık kayıpları ortalama 0,0009 g ölçülmüştür.

- [1] J. R. Kissell and R. L. Ferry, *Aluminum structures: a guide to their specifications and design*. John Wiley & Sons, 2002.
- [2] H.-S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*. CRC press, 2016.
- [3] S. Suresh, N. Shenbag, and V. Moorthi, "Aluminium-titanium diboride (Al-TiB₂) metal matrix composites: challenges and opportunities," *Procedia Eng.*, vol. 38, pp. 89–97, 2012.
- [4] L. Christodoulou *et al.*, "High temperature, high performance composites," in *MRS Symposium Proceedings*, 1988.
- [5] O. F. Demirok, "Aluminyum esaslı titanyum diborur takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin üretimi ve asınma özelliklerinin incelenmesi," Yıldız Technical University, 2019.
- [6] A. A. Kisasoz, "Aluminyum Matrisli Titanyumdiborur in situ takviyeli Kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu," Yıldız Technical University, 2018.
- [7] S. C. Tjong and Z. Y. Ma, "Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 29, no. 3–4, pp. 49–113, 2000.
- [8] K. Tee, L. Lu, and M. O. Lai, "In situ processing of Al-TiB₂ composite by the stir-casting technique," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 89, pp. 513–519, 1999.
- [9] L. Lu, M. O. Lai, and F. L. Chen, "Al-4 wt% Cu composite reinforced with in-situ TiB₂ particles," *Acta Mater.*, vol. 45, no. 10, pp. 4297–4309, 1997.
- [10] L. Lü, M. O. Lai, Y. Su, H. L. Teo, and C. F. Feng, "In situ TiB₂ reinforced Al alloy composites," *Scr. Mater.*, vol. 45, no. 9, pp. 1017–1023, 2001.
- [11] K. L. Tee, L. Lu, and M. O. Lai, "In situ stir cast Al-TiB₂ composite: processing and mechanical properties," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 201–206, 2001.
- [12] H. Zhang *et al.*, "The micro-arc oxidation (MAO) behaviors of in-situ TiB₂/A201 composite," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 422, pp. 359–371, 2017.
- [13] Q. Gao, S. Wu, S. Lü, X. Xiong, R. Du, and P. An, "Improvement of particles distribution of in-situ 5 vol% TiB₂ particulates reinforced Al-4.5 Cu alloy matrix composites with ultrasonic vibration treatment," *J. Alloys Compd.*, vol. 692, pp. 1–9, 2017.
- [14] V. Auradi and S. A. Kori, "Influence of reaction temperature for the manufacturing of Al-3Ti and Al-3B master alloys," *J. Alloys Compd.*, vol. 453, no. 1–2, pp. 147–156, 2008.
- [15] Ö. SAVAŞ and Ö. DEMİROK, "Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB₂/Al

- Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma,” *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.*, no. 17, pp. 972–981, 2019.
- [16] C. S. Ramesh, A. Ahamed, B. H. Channabasappa, and R. Keshavamurthy, “Development of Al 6063–TiB₂ in situ composites,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 4, pp. 2230–2236, 2010.
- [17] A. Mandal, M. Chakraborty, and B. S. Murty, “Effect of TiB₂ particles on sliding wear behaviour of Al–4Cu alloy,” *Wear*, vol. 262, no. 1–2, pp. 160–166, 2007.
- [18] C. A. Lawrance and P. S. Prabhu, “Al 6061-TiB₂ metal matrix composite synthesized with different reaction holding times by in-situ method,” *Int. J. Compos. Mater.*, vol. 5, no. 5, pp. 97–101, 2015.
- [19] A. Sreenivasan, S. Paul Vizhian, N. D. Shivakumar, M. Muniraju, and M. Raguraman, “A study of microstructure and wear behaviour of TiB₂/Al metal matrix composites,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2011.
- [20] S. Sasikumar, K. R. Ramkumar, S. Iniyan, M. Gowthaman, and S. Sivasankaran, “Study of mechanical and machining behavior of AA7075-3% TiB₂ in situ composite,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, pp. 1229–1233, 2014.
- [21] S. Kumar, V. S. Sarma, and B. S. Murty, “Functionally graded Al alloy matrix in-situ composites,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 41, no. 1, pp. 242–254, 2010.
- [22] N. Radhika and R. Raghu, “Study on three-body abrasive wear behavior of functionally graded Al/TiB₂ composite using response surface methodology,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 7, pp. 816–823, Oct. 2018.
- [23] N. Sindhu *et al.*, “Study on Al/TiB₂ functionally graded metal matrix composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 2945–2951, 2021.
- [24] Ö. Savaş, “Investigation of Production and Abrasive Wear Behavior of Functionally Graded TiB₂/Al and TiB₂/Al–4Cu Composites,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 73, no. 3, pp. 543–553, 2020.
- [25] Ö. Savaş, R. Kayikci, and S. Köksal, “Application of taguchi method to investigate the effect of some factors on in-situ formed flake structures of Al/AlB₂ composite,” *Adv. Compos. Lett.*, vol. 21, no. 2, p. 096369351202100202, 2012.
- [26] S. Koksall, F. Ficici, R. Kayikci, and O. Savas, “Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB₂/Al composite based on Taguchi’s method,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 124–130, 2012.
- [27] 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.
- [28] M. Haghshenas, “Metal–matrix composites,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 35, pp. 3950–3953, 2016.

- [29] K. U. Kainer, "Basics of metal matrix composites," *Met. Matrix Compos.*, pp. 1–54, 2006.
- [30] H. M. Yin, L. Z. Sun, and G. H. Paulino, "Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions," *Acta Mater.*, vol. 52, no. 12, pp. 3535–3543, 2004.
- [31] T. Hirai and L. Chen, "Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan," in *Materials Science Forum*, 1999, vol. 308, pp. 509–514.
- [32] M. Koizumi, "The concept of FGM, ceramic transaction, functionally graded materials 34," 1993.
- [33] E. Mueller, Č. Drašar, J. Schilz, and W. A. Kaysser, "Functionally graded materials for sensor and energy applications," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 362, no. 1–2, pp. 17–39, 2003.
- [34] J. Qiu, J. Tani, T. Ueno, T. Morita, H. Takahashi, and H. Du, "Fabrication and high durability of functionally graded piezoelectric bending actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 12, no. 1, p. 115, 2003.
- [35] L. S. Liu, Q. J. Zhang, and P. C. Zhai, "The optimization design on metal/ceramic FGM armor with neural net and conjugate gradient method," in *Materials Science Forum*, 2003, vol. 423, pp. 791–796.
- [36] F. Watari *et al.*, "Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 893–908, 2004.
- [37] H. Capel, S. J. Harris, P. Schulz, and H. Kaufmann, "Correlation between manufacturing conditions and properties of carbon fibre reinforced Mg," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 7–8, pp. 765–768, 2000.
- [38] K. K. Chawla, *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [39] A. A. Adebisi, M. A. Maleque, and M. M. Rahman, "Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 471–480, 2011.
- [40] A. P. Divecha, S. G. Fishman, and S. D. Karmarkar, "Silicon carbide reinforced aluminum—a formable composite," *Jom*, vol. 33, no. 9, pp. 12–17, 1981.
- [41] H. A. Katzman, "Fibre coatings for the fabrication of graphite-reinforced magnesium composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 144–148, 1987.
- [42] A. Mortensen, J. A. Cornie, and M. C. Flemings, "Solidification processing of metal-matrix composites," *JOM*, vol. 40, no. 2, pp. 12–19, 1988.
- [43] A. J. Cook and P. S. Werner, "Pressure infiltration casting of metal matrix composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 144, no. 1–2, pp. 189–206, 1991.
- [44] A. K. Ghosh, "Metal Matrix Composites." Butterworth-Heinemann, Boston, MA, 1993.

- [45] S. L. Pramod, S. R. Bakshi, and B. S. Murty, "Aluminum-based cast in situ composites: a review," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 24, no. 6, pp. 2185–2207, 2015.
- [46] S. Kumar, V. S. Sarma, and B. S. Murty, "Effect of temperature on the wear behavior of Al-7Si-TiB 2 in-situ composites," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 40, no. 1, pp. 223–231, 2009.
- [47] S. C. Tjong, K. F. Tam, and 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, 2003.
- [48] Ö. Savaş, "Fabrication and characterization of TiB₂-reinforced functionally graded aluminum matrix material," *Ind. Lubr. Tribol.*, 2020.
- [49] Y. Watanabe, Q. Zhou, H. Sato, T. Fujii, and 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. 1S, p. 01AG01, 2016.
- [50] Z. Liu, Q. Han, and 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, 2013.
- [51] P. Martin, *Introduction to surface engineering and functionally engineered materials*, vol. 74. John Wiley & Sons, 2011.
- [52] R. Jojith, M. Sam, and N. Radhika, "Recent advances in tribological behavior of functionally graded composites: A review," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 2021.
- [53] E. Rabinowicz and R. I. Tanner, "Friction and wear of materials," *J. Appl. Mech.*, vol. 33, no. 2, p. 479, 1966.
- [54] J. A. Williams, "Wear and wear particles—some fundamentals," *Tribol. Int.*, vol. 38, no. 10, pp. 863–870, 2005.
- [55] G. B. V. Kumar, C. S. P. Rao, and N. Selvaraj, "Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites—a review," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 10, no. 01, p. 59, 2011.
- [56] M. Binder, F. Klocke, and B. Doebbele, "Abrasive wear behavior under metal cutting conditions," *Wear*, vol. 376, pp. 165–171, 2017.
- [57] B. Bhushan and P. L. Ko, "Introduction to tribology," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 56, no. 1, pp. B6–B7, 2003.
- [58] A. P. Sannino and H. J. Rack, "Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion," *Wear*, vol. 189, no. 1–2, pp. 1–19, 1995.
- [59] R. L. Deuis, C. Subramanian, and J. M. Yellup, "Abrasive wear of aluminium composites—a review," *Wear*, vol. 201, no. 1, pp. 132–144, 1996.
- [60] B. Saleh, J. Jiang, A. Ma, D. Song, D. Yang, and Q. Xu, "Review on the Influence of Different Reinforcements on the Microstructure and Wear

- Behavior of Functionally Graded Aluminum Matrix Composites by Centrifugal Casting,” *Met. Mater. Int.*, vol. 26, no. 7, pp. 933–960, 2020.
- [61] B. Saleh, J. Jiang, A. Ma, D. Song, and D. Yang, “Effect of Main Parameters on the Mechanical and Wear Behaviour of Functionally Graded Materials by Centrifugal Casting: A Review,” *Met. Mater. Int.*, vol. 25, no. 6, pp. 1395–1409, 2019.
- [62] E. Rabinowicz, “Friction and Wear of Material. Singapore: John Willey & Sons.” Inc, 1995.
- [63] F. Kılıç, “Alüminyum Üzerine Uygulanan Kompozit Kaplamaların Aşınma Davranışının İncelenmesi.” Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [64] A. W. J. de Gee and G. W. Rowe, “Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication—Tribology,” *Organ. Econ. Co-operation Dev. Paris*, 1969.
- [65] N. C. Kaushik and R. N. Rao, “Effect of applied load and grit size on wear coefficients of Al 6082–SiC–Gr hybrid composites under two body abrasion,” *Tribol. Int.*, vol. 103, pp. 298–308, 2016.
- [66] S. Manoharan, B. Suresha, P. B. Bharath, and G. Ramadoss, “Investigations on three-body abrasive wear behaviour of composite brake pad material,” *Plast. Polym. Technol.*, vol. 3, pp. 10–18, 2014.
- [67] N. Radhika, R. Reghunath, and M. Sam, “Improvement of mechanical and tribological properties of centrifugally cast functionally graded copper for bearing applications,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 233, no. 9, pp. 3208–3219, 2019.
- [68] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, “Particle distribution in cast metal matrix composites—Part I,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 123, no. 2, pp. 251–257, 2002.
- [69] N. RADHIKA and R. RAGHU, “Development of functionally graded aluminium composites using centrifugal casting and influence of reinforcements on mechanical and wear properties,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 26, no. 4, pp. 905–916, 2016.
- [70] N. Radhika, “Mechanical Properties and Abrasive Wear Behaviour of Functionally Graded Al-Si12Cu/Al2O3 Metal Matrix Composite,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 70, no. 1, pp. 145–157, 2017.
- [71] N. Radhika and R. Raghu, “Abrasive wear behavior of monolithic alloy, homogeneous and functionally graded aluminum (LM25/AlN and LM25/SiO2) composites,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 1, pp. 10–20, Jan. 2019.
- [72] Ö. Savaş, “Investigation of Production and Abrasive Wear Behavior of Functionally Graded TiB2/Al and TiB2/Al–4Cu Composites,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 73, no. 3, pp. 543–553, 2020.
- [73] M. Yılmaz and M. E. Keskin, “Determination of Optimal Reading Conditions by Taguchi Method,” *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 24–32.

- [74] K. Dehnad, *Quality control, robust design, and the Taguchi method*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [75] Ö. Savaş, "Alüminyum esaslı in-situ borür takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi," 2010.
- [76] W. H. P. Yang and Y. S. Tarn, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [77] E. PC, "Optimisation of Machining Responses for Drilling of Al-Si Alloy on CNC Vertical Machining Centre Under Dry Drilling Conditions," *Int. J. Eng. Tech. Res.*, Dec. 2013.
- [78] T. Mori, *Taguchi methods: benefits, impacts, mathematics, statistics, and applications*. ASME Press, 2011.
- [79] P. J. Ross and T. Techniques, "for Quality Engineering." New York: McGraw-Hill, 1988.
- [80] S. R. Rao and G. Padmanabhan, "Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5% SiC composites," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 2, no. 3, pp. 192–197, 2012.
- [81] O. N. Carlson, "The Al-B (aluminum-boron) system," *Bull. Alloy Phase Diagrams*, vol. 11, no. 6, pp. 560–566, 1990.
- [82] J. L. Murray, "Al-Ti (Aluminum-Titanium)," *Bin. Alloy Phase Diagrams*, 2nd edn. ASM Int. Columbus, pp. 225–227, 1990.
- [83] M. Emamy, M. Mahta, and J. Rasizadeh, "Formation of TiB₂ particles during dissolution of TiAl₃ in Al–TiB₂ metal matrix composite using an in situ technique," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 7–8, pp. 1063–1066, 2006.
- [84] C. S. Ramesh, S. Pramod, and R. Keshavamurthy, "A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061–TiB₂ in-situ composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 12, pp. 4125–4132, 2011.
- [85] S. Lakshmi, L. Lu, and M. Gupta, "In situ preparation of TiB₂ reinforced Al based composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 73, no. 1–3, pp. 160–166, 1998.
- [86] K. H. Orvis and H. D. Grissino-Mayer, "Standardizing the reporting of abrasive papers used to surface tree-ring samples," 2002.
- [87] R. G. Munro, "Material properties of titanium diboride," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 105, no. 5, p. 709, 2000.
- [88] R. S. Rana, R. Purohit, and S. Das, "Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 6, pp. 1–7, 2012.
- [89] A. C. Reddy, "Prediction of CTE of Al/TiB₂ Metal Matrix Composites," in *3rd International Conference on Composite Materials and Characterization*,

Chennai, India, 2001, pp. 270–275.

- [90] K. L. Tee, L. Lu, and M. O. Lai, “Synthesis of in situ Al–TiB₂ composites using stir cast route,” *Compos. Struct.*, vol. 47, no. 1–4, pp. 589–593, 1999.
- [91] S. Kumar, V. S. Sarma, and 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. 1–2, pp. 160–164, 2007.
- [92] N. Radhika and R. Raghu, “Effect of centrifugal speed in abrasive wear behavior of Al–Si₅Cu₃/SiC functionally graded composite fabricated by centrifugal casting,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 71, no. 3, pp. 715–726, 2018.
- [93] C. Tijun, L. Jian, and H. Yuan, “Casting fabrication of in situ Al₃Ti–Al composites and their wear behaviors,” *Res. Dev.*, vol. 6, 2009.
- [94] J. S. S. Babu, C. G. and Kang, and H. H. Kim, “Dry sliding wear behavior of aluminum based hybrid composites with graphite nanofiber–alumina fiber,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 7, pp. 3920–3925, 2011.
- [95] T. Tsukizoe and N. Ohmae, “Friction and wear performance of unidirectionally oriented glass, carbon, aramid and stainless steel fiber-reinforced plastics,” in *Composite materials series*, vol. 1, Elsevier, 1986, pp. 205–231.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. H. Kılıç, M.S. Başer, Ö. Savaş, "Production of TiB₂/Al composite material for ship machinery parts," 4th Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportaion (GMC'21), 2021

