

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VAKUM İNFİLTRASYON YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM
MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT ÜRETİMİ

Dilara BİRSEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VAKUM İNFİLTASYON YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM
MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT ÜRETİMİ**

Dilara BİRSEN tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN, Üye
İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan GECÜ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER ve eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Vakum İnfiltrasyon Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozit Üretimi 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.

Dilara BİRSEN

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda hiçbir bilgiyi ve tecrübeyi benden esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER'e; karakterizasyon çalışmalarını yürüttüğüm Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nden eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER'e imkanlarını ve değerli deneyimlerini benimle paylaştığı için,

Deneyisel çalışmalarımda benden hiçbir yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Alptekin KISASÖZ'e, Arş. Gör. Kubilay ÖZTÜRK'e, Arş. Gör. Serhat ACAR'a, Dr. Öğr. Üyesi Burçin Özbay KISASÖZ'e, Dr. Öğr. Üyesi M. Safa YILMAZ'a, Teknisyen Mehmet ÇALIŞKAN'a, Makine Yüksek Mühendisi Serdar EFE'ye

Aşınma testi için Kırklareli Üniversitesine ve yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Sencer KARABEYOĞLU'na,

YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Döküm Laboratuvarımızda birlikte çalışma mutluluğunu yaşadığım ve destekleri için lisansüstü öğrencisi İbrahim TÜTÜK'e,

Her anımda yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen Serdar MISIRLIOĞLU'na

Son olarak maddi ve manevi desteğini hep hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Dilara BİRSEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Amacı	4
1.3. Hipotez	4
2 KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1. Kompozit Malzeme Tanımı	5
2.1.1 Matris Elemanları	6
2.1.1.1 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	6
2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)	9
2.1.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	9
2.1.2 Takviye Elemanları	10
2.1.2.1 Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozitler	13
2.1.2.2 Fiber Takviyeli Kompozitler	14
2.1.2.3 Tabakalı Kompozitler	16
2.1.2.4 Karma Takviyeli Kompozitler (Hibrit)	17
2.2. Matris-Takviye Ara yüzeyi	17
2.2.1 Islatılabilirlik	17
2.2.2 Ara yüzey Bağı	19
2.2.3 Matris-Takviye Ara yüzeyinde Oluşan Reaksiyonlar	19
2.3. Üretim Yöntemleri	20
2.3.1 Sıvı Faz Yöntemi	21
2.3.1.1 Karıştırılmalı Döküm	21
2.3.1.2 Sıkıştırılmalı Döküm	23

2.3.1.3	Sıvı Metal İnfiltrasyonu	23
2.3.1.4	Insitu Prosesi (Yerinde Çekirdeklenme)	27
2.3.2	Katı Hal	28
2.3.2.1	Toz Metalurjisi	28
2.3.2.2	Difüzyonla Bağlama Yöntemi.....	30
2.3.3	Çift Faz.....	31
2.3.3.1	Yarı Katı Döküm.....	31
2.3.3.2	Sprey Yöntemi.....	33
2.4.	Uygulama Alanları.....	34
3	HİBRİT (MELEZ) KOMPOZİTLER	36
4	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
4.1.	Malzeme Seçimi.....	38
4.2.	Kompozit Üretimi	39
4.2.1.	Preform Üretimi	39
4.2.2.	Kalıp Üretimi	40
4.2.3	Vakum İnfiltrasyon Döküm	42
4.3.	Karakterizasyon	45
4.3.1	Mikroyapı İncelemeleri.....	45
4.3.2	Brinell Sertlik Ölçümü	45
4.3.3	Aşınma Testi	46
5	DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	47
5.1.	Mikroyapıların İncelenmesi	47
5.2.	Sertlik Değerlerinin İncelenmesi	54
5.3.	Aşınma Davranışının İncelenmesi	55
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	66
	KAYNAKÇA	68
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	79

SİMGE LİSTESİ

r	Aşındırıcı bilye çapı
R	Aşınma izi yarıçapı
d	Aşınma iz genişliği
W_R	Aşınma oranı
D	Çap
V	Hacimsel kayıp
θ	Islatma açısı
γ_{sv}	Katı-buhar ara yüzey enerjisi
L	Kayma mesafesi
m	Metre
μm	Mikrometre
Pa	Pascal
$^{\circ}C$	Santigrat derece
γ_{LV}	Sıvı-buhar ara yüzey enerjisi
γ_{LS}	Sıvı-katı ara yüzey enerjisi
P	Yük
YEA	Yüksek entropili alaşım
A	Yüzey alanı

KISALTMA LİSTESİ

AMMK	Alüminyum Metal Matrisli Kompozit
AMHK	Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozit
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi analizi
HB	Brinell Sertliği
KS	Kolloidal Silika
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MMHK	Metal Matrisli Hibrit Kompozit
OM	Optik Mikroskop
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
PVA	Polivinil Alkol
SEM	Tarama elektron mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozit

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Kompozit malzeme oluşan mikroyapıdaki ara yüzeyin konumu	5
Şekil 2. 2 Takviye Elemanlarının Sınıflandırılması [34].....	10
Şekil 2. 3 Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması [41]....	12
Şekil 2. 4 Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre mikroyapı görüntüleri a) fiber, b) whisker, c) partikül [42]	12
Şekil 2. 5 Partikül takviyeli kompozitin mikroyapı görüntüsü [43]	13
Şekil 2. 6 Sürekli (uzun) ve süreksiz (kısa) fiberler [48].....	14
Şekil 2. 7 Kısa fiber takviyeli kompozit mikroyapı görüntüsü [49].....	15
Şekil 2. 8 Alümina fiber takviyeli metal matrisli kompozit mikroyapı görüntüsü [20] .	15
Şekil 2. 9 Alüminyum matrisli aramid takviyeli tabakalı kompozitler [50].....	16
Şekil 2. 10 ARALL'ın mikroyapı görüntüsü [50]	16
Şekil 2. 11 Temas açısı [10], [40].....	18
Şekil 2. 12 SiC seramik partikül-matris ara yüzeyinde oluşan Al_4C_3 fazı [3].....	20
Şekil 2. 13 Üretim yöntemlerinin sınıflandırılması [18] [34] [37]	21
Şekil 2. 14 Karıştırılmalı döküm yöntemi [3].....	22
Şekil 2. 15 Vakum infiltrasyon a) preformda sıkışan havayı çıkarmak için vakumla gerçekleştirilen sızma işlemi b) ergiyik için itici güç olarak basınçlı gaz uygulamak c) kompozit üretimi [70].....	25
Şekil 2. 16 a) Kalıbın yerleştirilmesi vakumun uygulanması b) preformun kalıba yerleştirilmesi c) ergiyik metalin kalıba dökülmesi d) vakum destekli infiltrasyon sisteminin şematik görünümü [71]	25
Şekil 2. 17 Basıncsız İnfiltrasyon yöntemi [66]	26
Şekil 2. 18 İnsitu Magnezyum alaşım takviyesi ile mikroyapıda oluşan primer Mg_2Si , Mg_2Si ötektik fazı ve Si ötektiği [80].....	28
Şekil 2. 19 Üretim aşamaları [36].....	29
Şekil 2. 20 Difüzyonla bağlama yöntemi [23].....	30
Şekil 2. 21 Dendrit kollarının kırılması sonucu küresel mikroyapı eldesi [79].....	31
Şekil 2. 22 Faz diyagramında yarı katı şekillendirme bölgesi [94]	32
Şekil 2. 23 Yarı katı işlemleri [95]	32
Şekil 2. 24 Sprey yöntemi [23]	34
Şekil 4. 1 Silikon kalıp ve preform.....	40
Şekil 4. 2 Alçı kalıp	41
Şekil 4. 3 Alçı kalıp pişirme rejimi [3]	42
Şekil 4. 4 Alçı kalıp pişirme	42

Şekil 4. 5 Al-Mg-Si üçlü faz diyagramının silisyum oranı %9,4 sabit kalacak şekilde ikili faz diyagramına dönüşümü [80]	43
Şekil 4. 6 Vakum infiltrasyon yöntemi ile hassas döküm	44
Şekil 4. 7 Sıvı metalin infiltrasyon mekanizması	44
Şekil 4. 8 Vakum infiltrasyon cihazının şematik görünümü [3].....	45
Şekil 5. 1 356-15 kodlu numunenin OM görüntüsü	47
Şekil 5. 2 356-15 kodlu numunenin SEM görüntüsü	47
Şekil 5. 3 Üretilmiş hibrit kompozitlere ait mikroyapı görüntüleri (a) 356-R (b) 356-5 (c) 356-10 (d) 356-15 (e) 380-R (f) 380-5 (g) 380-10 (h) 380-15 (ı) 413-R (j) 413-5 (k) 413-10 (l) 413-15	48
Şekil 5. 4 413-5 kodlu numunenin OM'da görülen Mg_2Si polihedron fazı	49
Şekil 5. 5 413-15 kodlu numunenin OM'da görülen Mg_2Si polihedronu ve ötektik fazları.....	50
Şekil 5. 6 380-15 kodlu numunenin OM'da görülen Mg_2Si polihedron fazı	50
Şekil 5. 7 356-10 kodlu numunenin mikroyapısında oluşan Mg_2Si ötektik fazı.....	50
Şekil 5. 8 380-10 kodlu numune yapısında bulunan SiC takviyelerinde meydana gelen çatlaklar	51
Şekil 5. 9 413-10 kodlu numunede infiltrasyon sonrası matris tarafından ısıtılmayan bölgeler.....	52
Şekil 5. 10 380-15 kodlu numuneye yapılan çizgisel EDS analizi.....	52
Şekil 5. 11 413-5 kodlu numuneye ait SEM-EDS haritalama analiz sonuçları.....	53
Şekil 5. 12 Numunelere ait Brinell Sertlik Değerleri	54
Şekil 5. 13 Kompozit numunesine aşınma testi sonucu makroyapı görüntüsü	55
Şekil 5. 14 Üretilen tüm numunelerin aşınma analizi sonucu SEM mikroyapı görüntüleri	56
Şekil 5. 15 Üretilen tüm numunelerin aşınma analizi sonucu mikroyapı görüntüleri....	57
Şekil 5. 16 Takviye ağırlık oranlarına göre değişen aşınma oranları	58
Şekil 5. 17 356-5 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü	59
Şekil 5. 18 413-5 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü	59
Şekil 5. 19 356-10 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü	60
Şekil 5. 20 356-R, 356-5, 356-10 ve 356-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları	61
Şekil 5. 21 380-R, 380-5, 380-10 ve 380-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları	61
Şekil 5. 22 413-R, 413-5, 413-10 ve 413-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları	62
Şekil 5. 23 356 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri	63

Şekil 5. 24 380 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri	64
Şekil 5. 25 413 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri	65

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Alüminyum alaşımlarının üretim yöntemine göre sınıflandırması [16]	7
Tablo 2. 2 Seramik takviyeli AMMK'lerin mekanik özellikleri [3]	8
Tablo 2. 3 Yaygın kullanılan takviye elemanlarının uygulama alanları [35]	13
Tablo 2. 4 Seramik partiküllerin fiziksel özellikleri [36], [45]	14
Tablo 2. 5 Seramik partiküllerinin mekanik özellikleri [31].....	14
Tablo 2. 6 Sıvı Alüminyum ve seramik partikül elemanları arasındaki temas açısı [10]	19
Tablo 2. 7 Ara yüzeyde oluşan fazlar [54]	20
Tablo 2. 8 Karıştırmalı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]	22
Tablo 2. 9 Sıkıştırılmalı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]	23
Tablo 2. 10 Sıvı metal infiltrasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [56]	24
Tablo 2. 11 Toz metalürjisi yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]	30
Tablo 2. 12 Yarı katı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [99], [100]	33
Tablo 2. 13 Sprey yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]	34
Tablo 2. 14 Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzemeler [1]	35
Tablo 2. 15 Havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemeler [1]	35
Tablo 3. 1 Literatürdeki hibrit takviyeli Al matrisli kompozitler [105]	37
Tablo 4. 1 Üretilen Hibrit Kompozitlerin Numune Kodları	38
Tablo 4. 2 Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal analizi	39
Tablo 4. 3 Takviye malzemesi olarak kullanılan magnezyum AM50 alaşımının kimyasal analizi	39
Tablo 4. 4 Aşınma analizi deney parametreleri	46
Tablo 5. 1 356-15 kodlu numunenin noktasal EDS verileri (%ağ)	48
Tablo 5. 2 Şekil 5.18'de belirtilen noktasal EDS verileri (%ağ)	60

Vakum İnfiltrasyon Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozit Üretimi

Dilara BİRSEN

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER

Alüminyum matrisli hibrit kompozit malzemelerinin yaygın kullanılma sebebi yüksek özgül dayanımı ve aşınma direnci özelliklerine sahip olmasıdır. Bu çalışmada, hibrit kompozit üretimi için hem insitu hem de exsitu yöntemler kullanılmıştır. Başta insitu kompozit üretimini gerçekleştirmek ve ara yüzeyde ıslanabilirlik özelliğinin geliştirilmesi için, ergiyik malzemeye AM50 magnezyum alaşımı ilave edilmiştir. Bu yöntem ile insitu takviye malzemesi üretildiği gibi infiltrasyon da iyileştirilmektedir. Insitu yöntemde, AM50 alaşım ilavesi sonucu gerçekleşen reaksiyonlar yardımıyla ergimiş metalde takviye elemanı olan Mg_2Si fazı oluşturulur. Exsitu yönteminde ergimiş metal, kalıba yerleştirilmiş SiC preformlara vakum desteği ile infiltre edilmektedir. Sonuç olarak, mikroyapıda alüminyum matris içinde SiC ve Mg_2Si takviyeleri bulunmaktadır. Matris malzemesi olarak A356, A380 ve 413 alaşımları, seçilmiştir. Bu çalışmada %5-%10 ve %15 ağırlık oranlarına sahip AM50 magnezyum alaşımı, vakum infiltrasyon sürecinde hibrit kompozit üretmek için kullanılmış ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Diğer parametreler ise sabit tutularak üretim gerçekleştirilmiştir. Vakum infiltrasyon işlemi alçı bağlı dereceli hassas döküm kalıplarında yapılmıştır.

Üretilen her bir numunenin özelliklerin belirlenebilmesi için OM, SEM-EDS, aşınma test analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerde infiltrasyon sorunu yaşanmamış SiC ve Mg_2Si takviyeleri homojen bir şekilde yapı içerisinde dağılmıştır. Katılma sırasında

oluşan primer Mg_2Si , ötektik Mg_2Si , exsitu yöntemiyle ilave edilen SiC ve $\alpha-Al$ taneleri mikroyapıda görülmektedir. AM50 ağırlık oranı arttıkça primer Mg_2Si tanesi büyümekte ve polihedron forma sahiptir. En büyük primer Mg_2Si tanesi A356 matrisli %15 AM50 numunesinde görülmektedir. A356 alaşım yapısında magnezyum içeriği A380 ve 413 alaşımına göre yüksek olduğu için gözlemlenmiştir.

Yapı içerisine ilave edilen AM50 alaşımının ağırlık oranı arttıkça kompozit numunelerinde sertlik ve aşınma dayanımı belirgin bir yönde iyileşmemektedir. Yalnız A380 matrisli üretilen numunelerde AM50 ağırlık oranının artması ile sertlikte artış gözlemlenmektedir. A380 matrisli %15 ağırlık oranına sahip numunenin sertlik değeri 181 HB'dir. 413 matrisli %5 AM50 ağırlık oranına sahip numune 183,5 HB sertlik değerinde üretilmiştir.

A356 ve 413 matrisli numunelerde en iyi aşınma dayanımı gösteren numuneler %5 AM50 ağırlık oranına sahiptir. A356 matrisli %5 AM50 ağırlık oranına sahip numunenin aşınma oran değeri $0,031 (mm^3/N.m) \times 10^3$ 'tür, 413 matrisli %5 AM50 ağırlık oranına sahip numunede ise değer $0,059 (mm^3/N.m) \times 10^3$ 'tür.

Preform ve matris elemanı üzerindeki aşınma izleri incelendiğinde, takviye elemanın aşınma dayanımına olumlu yönde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma izi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsitu, exsitu, alüminyum matris, SiC, Mg_2Si .

Aluminum Matrix Hybrid Composite Production By Vacuum Infiltration Method

Dilara BİRSEN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Co-supervisor: Asst. Prof. Gökhan ÖZER

The reason for the widespread use of aluminum matrix hybrid composite materials is their high specific strength and wear resistance properties. In this study, both insitu and exsitu methods were used for hybrid composite production. AM50 magnesium alloy was added to the molten material in order to realize the in situ composite production and to improve the wettability at the interface. With this method, insitu reinforcement material is produced, and infiltration is also improved. In the insitu method, the Mg_2Si phase, which is a reinforcing element in the molten metal, is formed with the help of the reactions that occur as a result of the addition of AM50 alloy. In the Exsitu method, molten metal is infiltrated into SiC preforms placed in the mold with vacuum support. As a result, there are SiC and Mg_2Si reinforcements in the aluminum matrix in the microstructure. A356, A380 and 413 alloys were chosen as matrix material. In this study, AM50 magnesium alloy with 5%-10% and 15% weight ratios was used to produce hybrid composites in vacuum infiltration process and its effects on mechanical properties were investigated. Production was carried out by keeping other parameters constant. Vacuum infiltration was performed in gypsum bonded flask investment casting molds. OM, SEM-EDS, wear test analyzes were carried out in order to determine the properties of each produced sample.

SiC and Mg_2Si reinforcements, which did not experience infiltration problems in the produced samples (except for 413-15 sample), were homogeneously dispersed in the

structure. Primary Mg_2Si , eutectic Mg_2Si , added by ex situ method SiC and $\alpha\text{-Al}$ grains are seen in the microstructure. As the AM50 weight ratio increases, the primary Mg_2Si grain grows and has a polyhedron form. The largest primary Mg_2Si grain is seen in 15% AM50 A356 matrix sample. It has been observed that the magnesium content in the A356 alloy structure is higher than that of the A380 and 413 alloy. As the weight ratio of the AM50 alloy added to the structure increases, the hardness and wear resistance of the composite samples do not significantly improve.

An increase in hardness is observed with the increase of AM50 weight ratio in samples produced only with A380 matrix. The hardness value of the A380 matrix sample with a weight ratio of 15% is 181 HB. The sample with 413 matrix and 5% AM50 weight ratio was produced with a hardness value of 183.5 HB.

The samples showing the best wear resistance in A356, and 413 matrix samples had 5% AM50 weight fraction. The wear rate value for the sample with 5% AM50 weight ratio with A356 matrix is $0.031 \text{ (mm}^3/\text{N.m)} \times 10^3$. On the other hand, the value for the sample with 5% AM50 weight ratio with 413 matrix is $0.059 \text{ (mm}^3/\text{N.m)} \times 10^3$.

When the wear marks on the preform and matrix element were examined, it was observed that the reinforcement element had a positive effect on the wear resistance. The wear mark is thinned on the preform zone.

Keywords: Insitu, exsitu, aluminum matrix, SiC , Mg_2Si .

1.1. Literatür Özeti

Metal matrisli kompozitler (MMK); yüksek özgül dayanımı, aşınma direnci, yüksek sertlik ve hafiflik gibi üstün özelliklerinden dolayı 1950 yılından itibaren revaçta olan bir konudur. Akademide ve sanayide de araştırması artan bir malzeme grubu olan MMK malzemelere, farklı matris ve takviye malzemeleri ile çeşitli mekanik özellikler kazandırılmaktadır. Kompozit malzemelerin bu özelliğinden dolayı da son yıllarda bu malzemelere ilgi ve talep oldukça artmıştır. Kompozit malzeme üretebilmek için en önemli kriter ise; belirgin bir ara yüzey elde edilebilmesidir. Aksi takdirde kompozit malzeme oluşmamaktadır. MMK'lerde takviye malzemesinin ağırlık oranı, hangi türe ait olduğu ve yapı içerisine nasıl ilave edileceği ara yüzeyi etkileyen parametrelerdir. Bu parametreler malzemenin mekanik özelliklerini de etkilemektedir.

MMK'lerin üretim yöntemleri üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar; katı faz, sıvı faz ve katı-sıvı (çift) faz üretim teknikleridir. Sıvı fazda üretim teknikleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi, üretilebilirlik parametrelerinin optimizasyona uygunluğu ve maliyettir. Başarılı bir kompozit elde edilmesi için takviyelerin matris malzemesi içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve matris malzemesinin ıslatılabilirlik özelliğinin yüksek olması gerekmektedir. Islatılabilirlik durumu optimum koşulu sağladığında belirgin bir ara yüzey oluşacaktır.

Matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan alaşım grubu alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımları hafiflikleri ve yüksek şekil alma kabiliyetinden dolayı yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, dayanım ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri yeteri kadar iyi olmadığından kullanım alanları sınırlanmaktadır.

Takviye malzemesi olarak en yaygın kullanılanlar ise sert seramik partiküllerdir. Bunlar SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, SiO₂, WC ve TiB₂'dür. Seramik partiküllü takviyeli malzemeleri alüminyum alaşımına ilave edilmesi ile alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Belirtilen seramik partiküllerin tek başına kullanılması durumunda malzeme içerisinde istenmeyen durumlar yaşanmaktadır. İstenmeyen durumlara örnek olarak; takviye elemanı olarak kullanılan SiC seramik partikülü ile matris elemanı arasında reaksiyonlar gerçekleşmektedir.

Al_2O_3 seramik partikülü yüksek yoğunluğa sahip olması sebebi ile MMK'de ağırlık artışına sebep olmaktadır.

B_4C seramik partikülünün kullanılması ile matris malzemesinin takviye elemanını başarılı bir şekilde ıslatamaması sebebi ile malzemede infiltrasyon sorunları yaşanmaktadır.

Malzemede yaşanan tüm bu olumsuzluklar sonucundan sayıca üç ve üzeri farklı malzemeler takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Metal matrisli hibrit kompozitler (MMHK) üretimi konusu burada önem kazanmaktadır. Ancak bu çalışmalar henüz başlangıç aşamasındadır.

El Kaddy ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, istenilen tüm özellikleri karşılayacak bir malzeme olmadığı için mühendislik ihtiyaçlarının karşılanamadığını belirtmişlerdir. Mühendislik ihtiyaçlarının karşılanması için metal matrisli kompozitler önerilmektedir [1]

Artırılabilen mekanik özellikleri ve hafifliği sebebi ile alüminyum alaşımları otomotiv sektöründe oldukça tercih edilen bir malzeme grubudur. Ancak alüminyum alaşımlarının aşınma direnci düşüktür ve bu özelliğinden dolayı da her uygulamada kullanılamamaktadır. Alüminyum alaşımının bu eksik özelliğini elimine etmek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir ve aşınma direnci iyi özellik gösteren SiC seramik partikülü ilavesi edilerek alüminyum alaşımlarında gözle görülür seviyede aşınma dayanımı artmaktadır. SiC seramik partikülü yüksek aşınma direncine sahip olduğu için düşük ağırlık oranında alüminyum alaşımına ilavesi ile, alüminyum alaşımındaki görülen bu eksik özellik iyileştirilmektedir [1], [2].

Tek takviye elemanına sahip kompozit malzemelerde istenilen özelliklerin sağlanamama riski söz konusu olmaktadır. Bu sorunu çözmek için yapılan araştırmalar ile ekstra bir takviye elemanı daha eklenerek, yapıda istenilen özellikler sağlanabilmektedir. Hibrit kompozitlerde toplam takviye elemanlarının oranı malzeme içerisinde sabittir. Eklenmiş olan iki takviye elemanından, sertliği iyi olan takviye elemanının oranı arttırılır diğer takviye elemanının ağırlık oranı ya sabit tutulur ya da düşürülür. Sonuç olarak malzemede sertlik artışı meydana gelir [3]–[7].

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda,

Kumar ve arkadaşları B_4C ve Gr takviyeli Alüminyum matrisli kompozitlerin üretimini incelemiş ve üretilen bu kompozitler tek takviyeli kompozit numuneleri ile

karşılaştırmıştır. Kumar'ın bu çalışmasında yüksek sertlik değeri ve düşük yoğunluğa sahip hibrit kompozitler elde edilmiştir. [8]

Shorowordi ve arkadaşları SiC, Al₂O₃ ve B₄C partikülleri alüminyum matrisine ayrı ayrı olarak eklenerek etkileşimleri incelenmiştir. Bu çalışmada matris yapısına SiC seramik partikülleri eklendiğinde Al-SiC (matris-takviye) ara yüzünde Al₄C₃ fazı; matris yapısına B₄C seramik partikülleri eklendiğinde Al-B₄C (matris-takviye) ara yüzünde Al₃BC fazı oluşmaktadır. Her üç takviye edici seramik partikülünün, malzemenin mukavemeti üzerindeki etkisi göz önüne alındığında kompozit malzemesine en faydalı etki B₄C seramik partikülünde gözlemlenmiştir, mukavemete minimum katkı Al₂O₃ seramik partikülleri tarafından elde edilmiştir [9].

Haşim ve arkadaşları alüminyum matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemesi olarak SiC, Al₂O₃ ve B₄C seramik partiküllerinin ıslatılabilirlik açısı incelenmiş ve ıslatılabilirlik açısını değiştiren parametreler incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; sıcaklıktaki artış ve dış kuvvet etkisi ile Al₂O₃ ve B₄C partiküllerinin ıslatılabilirlik açılarında belirgin bir değişikliğe neden olmazken, SiC seramik partikülünün ıslatılabilirlik açısında bir azalma sağlanmıştır [10], [11].

Alüminyum matrisli hibrit kompozitler sayesinde mekanik özellikler iyileşmektedir. Yanamandala ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada SiC ve grafitli AMHK'lere çekme testi uygulamışlar ve sonuçları incelemişlerdir. %6 hacim oranında grafit ve %5 hacim oranında SiC takviye elemanları uygulanması ile 270 MPa çekme dayanımına ulaşılmıştır [12].

James ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada TiB₂ ve SiC takviye elemanları kullanılmıştır. SiC hacim oranı değişmezken TiB₂ farklı hacim oranlarında numuneler üretilmiştir. TiB₂ takviye elemanın hacim oranı arttıkça sertlik düşmektedir. Sertliğin düşmesi, mikroyapıda SiC takviye elemanının TiB₂ etrafında kümeleşmesi sebep olarak gösterilmektedir. Matris ve takviye elemanı arasında arayüzey bağı oluşmamaktadır.

Mishra ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise takviye elemanı olarak uçucu kül ve SiC tercih edilmiştir. SiC hacim oranı sabit tutulup uçucu kül hacim oranı parametresi değiştirilmiştir. Uçucu kül hacim oranı arttıkça sertlik de artış gözlemlenmiştir [13].

Monikandan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada takviye elemanı olarak B₄C ve MoS₂ kullanılmıştır. MoS₂ takviye oranı arttıkça sertlikte düşme gözlemlenmiştir. Arayüzeyde

olan MoS₂ takviye elemanları sayesinde aşınma oranının da azaldığı gözlemlenmiştir [14].

1.2. Tezin Amacı

Tez, MMK malzemelerinin mekanik özellikleri ve üretimi sırasında yaşanan sorunların elimine edilmesi ile yaygınlaşmaya başlayan metal matrisli hibrit kompozitlerin üretimini ele almaktadır. Çalışmanın amacını genel hatlarıyla ifade etmek gerekirse;

- Biri içeriden (insitu) diğeri dışarıdan (exsitu) gelen iki farklı takviye malzemesi ile vakum infiltrasyon yöntemi kullanılarak MMHK üretiminin gerçekleştirilmesi, uygun takviye ağırlık oranlarının ve uygun matris alüminyum alaşım malzemesinin belirlenmesi ve,
- Üretilmiş olan hibrit kompozit malzemelerinin aşınma direnci, mikroyapı ve sertlik değerlerinin tespit edilmesidir.

1.3. Hipotez

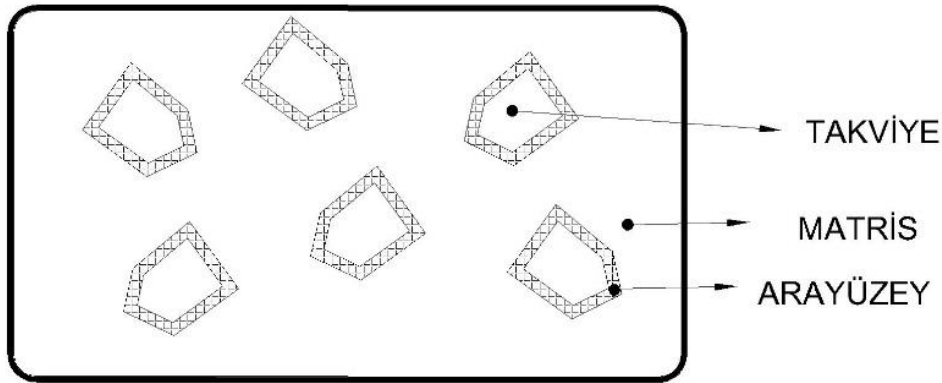
Tek takviyeye sahip kompozit malzemelerinin eksik ve yetersiz kalan özellikleri hibrit kompozitlerle elimine edilebilmektedir. Kompozitlerin bu eksik ve yetersiz özellikleri takviye matris kombinasyonu üzerine çalışılarak geliştirilebilecek bir konudur.

Çalışma kapsamında matris elemanları olarak çeşitli alüminyum döküm alaşımları (A356, A380, 413) ve iki farklı takviye malzemesinin matris yapısına ilave edilmesi ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak preform yapımında SiC partiküller ve reaksiyon ile matris içinde Mg₂Si üretmek için AM50 magnezyum alaşımı kullanılmıştır. AM50 alaşımı çeşitli ağırlık oranlarında matris elemanına ilave edilerek magnezyum alaşımının Mg₂Si oluşumuna, ıslanabilirliğe ve aşınma dayanımına etkisi incelenmiştir. En iyi sertlik ve aşınma dayanımına sahip magnezyum ağırlık oranı parametresi belirlenerek SiC ve AM50takviyeli kompozit malzemesinin üretim reçetesi çıkarılmıştır.

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı

Modern kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı 1950’li yıllarda başlamıştır. Üstün mekanik özellikleri sayesinde kullanımı yıllar geçtikçe artmaya devam etmektedir. Ralph ve arkadaşları 1997 yılında yaptıkları çalışmada 20. Yüzyılın ikinci yarısını “Kompozit Çağı” olarak adlandırmaktadırlar [15].

En az iki malzemenin kimyasal bağ oluşturmada, diğer bir ifade ile iki malzemenin birbiri içerisinde çözünmeden, belirgin bir ara yüzey oluşturmak şartıyla üretilen malzemelere kompozit malzemeler denmektedir. Kompozit malzemeler, takviye ve matris elemanları olarak iki temel bileşene sahiptir. Mikroyapı içerisinde matris, takviye elemanları ve ara yüzey bağının şematik görseli Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2. 1 Kompozit malzeme oluşun mikroyapıdaki ara yüzeyin konumu

Matris ve takviye elemanları makro düzeyde birleştirilmektedir. Böylelikle, takviye ve matris elemanları birbiri içerisinde çözünmediğinden her bir özelliklerini kompozit malzeme yapısında bulundurmaktadırlar. Takviye elemanının ağırlık oranı ve boyut parametresinin değiştirilmesi ile istenilen mühendislik uygulamasında kompozit malzemeler yer alabilmektedir [3], [5], [16].

Kompozit malzeme yapısında belirgin bir ara yüzey elde edilebilmesi için takviyenin matris tarafından yeteri kadar ıslatılması gerekmektedir. Söz konusu ıslatılabilirlik

sayesinde matris elemanından takviye elemanına yük transferi gerçekleşmektedir. Bu sayede malzemeye gelecek yükü takviye elemanı taşımaktadır.

Kompozit malzemeler yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluk gibi üstün özelliklere sahiptir. Havacılık ve otomotiv sektöründe üstün özellikleri sayesinde oldukça tercih edilmektedir.

Kompozit malzemelerin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Bunlar; yüksek üretim maliyeti, üretilebilirlik ve işleme zorluğu sektörün elimine etmek istediği konular arasındadır [9], [10], [16], [17].

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırılmaktadır.

2.1.1 Matris Elemanları

Matris elemanının en temel görevleri; takviye elemanını bir arada tutmak ve gelen yükü takviye elemanına aktarmaktır. Yük transferi sayesinde, çatlak ilerlemesi matris elemanı tarafından engellenmektedir.

Kompozit malzemeler matris elemanına göre üç ana gruba ayrılmaktadır;

- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler ve
- Polimer matrisli kompozitler [3], [16], [18].

2.1.1.1 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

MMK üzerine araştırmalar 1960lı yıllarda başlamıştır. 1980li yılların başında MMK ile ilgili araştırma geliştirme çalışmaları başlanmış ve geleneksel monolitik alaşımlara göre potansiyel avantajları artmıştır [19], [20].

MMK'lerin ana yapısını metal malzemesi oluşturmaktadır. MMK'ler iki farklı fazdan oluşmaktadır. Bunlardan biri matris diğeri ise takviyedir. Matris elemanı olarak genellikle metal veya alaşım tercih edilirken, takviye elemanı olarak genellikle seramik veya metal seçilmektedir. İki farklı malzeme ile homojen bir mikroyapıda elde edilmesi için uygun tekniklerle karıştırılmaktadır.

Metal matrise, seramik takviye elemanlarının ilave edilmesi ile yüksek elastiklik modülü ve plastik şekil değiştirme özellikleri elde edilmektedir. Yüksek elastiklik modülü seramik takviye elemanından, plastik şekil değiştirme özelliği metal matris yapısından gelmektedir.

MMK'ler polimer matrisli kompozitlere göre birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar; daha yüksek elastiklik modülü, daha iyi aşınma direnci olarak belirtilmektedir. Belirtilen avantajlara sahip olması ile de uzay, otomotiv ve havacılık sanayisinde kullanılmaktadır [5], [17], [21].

2.1.1.1.1 Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler (AMMK)

Yeryüzünde en çok bulunan elementler sıralamasında, metal grubunda ikinci sırada alüminyum elementi bulunmaktadır. Alüminyum geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Birincil (primer) üretiminde harcanan enerjinin sadece %5'i kadar bir enerji ile malzemenin geri dönüşümü sağlanabilmektedir. Son yıllarda artan karbon ayak izi ile enerji tasarrufu konulu çalışmalar artmakta ve alüminyum alaşımları hem hafif hem de geri dönüştürülebilir olduğu için enerji tasarrufu konusunda tercih edilmektedir [22].

Alüminyumun yoğunluk değeri $2,7 \text{ g/cm}^3$ ve ergime derecesi 660°C 'dir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları hafif, sünek, güçlü ve uzun ömürlüdür. Yüksek korozyon direncine sahiptir, ısı ve elektriği iyi iletir ve %100 geri dönüştürülebilir. Tüm bu iyi niteliklere rağmen, düşük aşınma direncine sahiptir. Ancak bazı uygulamalar, iyi tribolojik özelliklere sahip geleneksel alüminyum alaşımından daha yüksek sertlik ve çekme mukavemeti, yüksek elastiklik modülü gerektirir. Ağırlığın azaltılmasıyla mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi göz önünde bulundurularak, alüminyum alaşımı sert ve kırılğan ikinci bir faz ile güçlendirilir ve yeni oluşturulan malzeme daha iyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptir [22]–[24].

Alüminyum alaşımları üretim yöntemine göre iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar dövme ve döküm alaşımlarıdır. Tablo 2.1'de döküm ve dövme alaşımlarının sınıflandırması gösterilmektedir.

Tablo 2. 1 Alüminyum alaşımlarının üretim yöntemine göre sınıflandırması [16]

Alüminyum Alaşımları	Dövme Alaşımları	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	
		Saf Al	Al- Cu- Mg	Al- Mn	Al-Si	Al-Mg	Al-Mg-Si	Al-Zn	
	Döküm Alaşımları	1xx.x	2xx.x	3xx.x	4xx.x	5xx.x	6xx.x	7xx.x	8xx.x
		Saf Al	Al-Cu	Al- Mg- Si-Cu	Al-Si	Al-Mg	Kullanılmı yor	Al-Zn	Al-Sn

Özellikle çökeltme sertleşmesi gösteren Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımları çok fazla tercih edilen Al alaşımlarıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üstün mekanik özelliklere sahip olması ile MMK'ler içerisinde en fazla kullanılan matris malzemesi haline gelmiştir. AMMK'lerin bileşenlerinden birisi alüminyum matrisi diğer bir bileşeni ise takviye elemanıdır. Yaygın olarak Al_2O_3 , SiC, B_4C seramik esaslı takviye elemanları kullanılmaktadır. Bu seramik esaslı takviye malzemeleri, takviye elemanının boyutuna ve şekline göre parçacık/karma/fiber/tabakalı adında dört ana gruba ayrılmaktadır [20], [21]. Takviye elemanının matris yapısına ilave edilmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Üretim yöntemleri 2.3 bölümünde detaylı olarak anlatılmaktadır.

Seramik takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, üstün tribolojik özellikleri ve korozyon direnci davranışları ile tanınırlar ve bunun için otomobil, denizcilik ve havacılık mühendisliği alanında monolitik alaşımların yerini alırlar [19]. AMMK'de SiC takviyesi kullanıldığında daha yüksek çekme mukavemeti, daha iyi sertlik, yoğunluk ve aşınma direnci elde edilmesi ile sonuçlanır. Al_2O_3 takviyesi kullanıldığında malzemenin aşınma direnci ile basınç dayanımı elde etmesini sağlar. İyi sertlik elde edilmesi için, AMMK'ye Bor Karbür (B_4C) ilave edilir, ancak yeterli aşınma direnci sağlanmaz [23].

Fiber şeklinde takviye elemanının ilavesi sonucu alüminyuma yüksek elastiklik modülü kazandırılmaktadır. Örneğin; saf alüminyum elementinin elastiklik modülü 70 GPa'dır. Elastiklik modülünün düşük olmasına rağmen, yapısına % 60 hacim oranında alüminyum fiber takviye ilavesi ile elastiklik modülü 240 GPa değerine yükselmektedir [27]. Seramik takviyesi ile AMMK'lerdeki artan mekanik özellikler Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. 2 Seramik takviyeli AMMK'lerin mekanik özellikleri [3]

Kompozit	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	E Modülü (GPa)
A356(T6)	205	280	6	76
A356-10%SiCp (T61)	287	308	0,5	82
A356-15%SiCp (T61)	329	336	0,2	91
A356-20%SiCp (T61)	336	357	0,4	98
A380 (F)	160	320	3,7	72
A380-10%SiCp (F)	245	332	1,0	9,5
A380-20%SiCp (F)	308	356	0,4	114

1990-2000 yılları arasında, daha iyi özellikleri nedeniyle, AMMK'ler otomotiv endüstrisinde, uçak motorları ve deniz endüstrisi gibi özel alanlarda kapsamlı bir şekilde kullanılmıştır [23].

2.1.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler yüksek sıcaklığa dayanıklı, sert ve aşınmaya karşı dirençli olması nedeniyle, yüksek sıcaklıktaki uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Ancak iyi özelliklerine rağmen, seramik malzemeler gevrek ve çekme mukavemet değerinin düşük olması nedeniyle geliştirilmeye açık bir malzeme grubudur. Bundan dolayı seramik malzemelerin yapısal uygulamalarda kullanım alanları kısıtlıdır. Dezavantajları iyileştirmek ve uygulama alanlarını arttırmak için seramik esaslı kompozit malzemelerin üretimi konusunda çalışmalara 1960 yıllarda başlanmıştır.

Yüksek sıcaklıkta termal davranışını iyileştirmek için, refrakter yapısına metal tellerin ilave çalışması ile SMK'lerin ilk üretim çalışmasına başlanmıştır. Ancak üretim olumsuz sonuçlanmıştır. Bunun nedeni yüksek sıcaklıkta ilave edilen metal tellerin hızlı bir şekilde oksitlenmesidir. 1960-1970 yılları arasında silisyum karbür elyaf ile takviye edilmiş cam-seramik kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Böylelikle 1970 yıllarında SMK'lerin üretim çalışmalarına tekrar başlanmıştır [3], [28].

SMK malzemelerinin ana yapısını seramik malzemesi oluşturur. SMK'ler yüksek ergime sıcaklığı, aşınma dayanımı özellikleri ile yüksek sıcaklıkta çalışma uygulamalarında tercih edilmektedirler. En yaygın kullanılan seramik esaslı matris malzemeleri SiC, B₄C, TiC, AlN ve Al₂O₃'tür.

SMK'lerin hala devam eden dezavantajları ise düşük süneklik, düşük tokluk ve termal şoklara karşı kötü davranış göstermesidir [17].

2.1.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimerler düşük ergime sıcaklığı, kolay şekillendirilme, yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı 1930'lu yıllardan beri tercih edilmektedir. İlk olarak 1930'larda uçak parçalarını üretmek için PMK'ler tercih edilmiştir.

PMK'ler polimer esaslı malzemelerdir. PMK'lerin avantajları düşük maliyetli, korozyona karşı dirençli, raf ömrü uzun ve işlenebilme kabiliyeti yüksektir. PMK'larda takviye elemanı olarak elyaf (fiber) tercih edilmektedir [29].

PMK'lerde yaygın kullanılan takviye elemanları cam fiber, aramid (kevlar), bor fiber ve karbon fiberlerdir. Geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen, takviye elemanı olarak fiber kullanılmasından dolayı PMK anizotropik yapıya sahiptir. Bundan dolayı talashı

imalat açısından zor bir malzemedir. PMK’lerde matris elemanı olarak kullanılan reçineler, polimer malzeme grubunda termoset grubuna aittir [17], [21].

Termoset matrisler sıvı halde bulunur daha sonra katılaşırlar. Yüksek sıcaklıklarda ve kimyasalların etkileşimi ile dahi çözünmez, formları bozulmaz. Termoset reçineler izotropik özellik göstermektedir. Termoset reçinelere örnek olarak epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçinedir [17], [30].

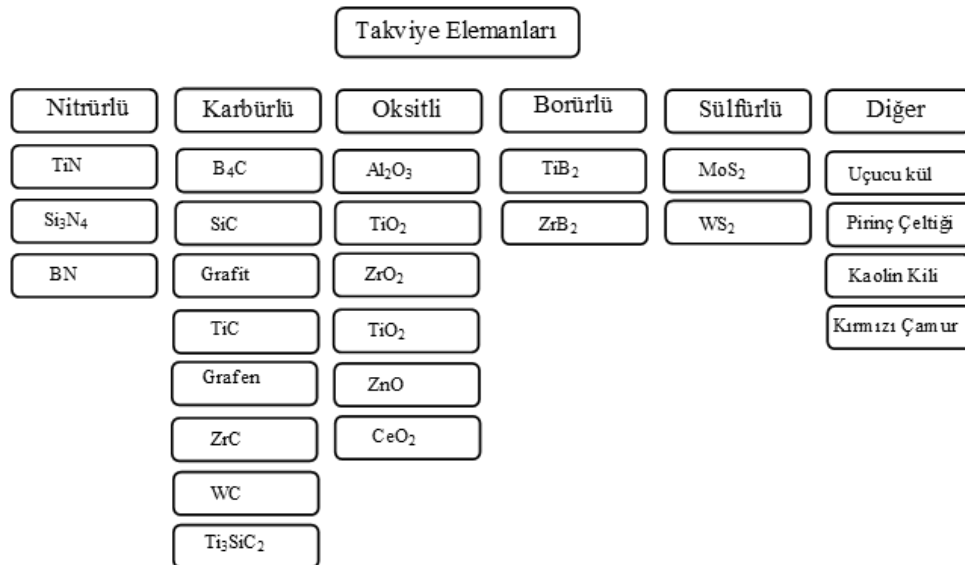
2.1.2 Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerinin bileşeni olan takviye elemanı malzemeye dayanım sağlamak amacıyla ilave edilmektedir. İlave edilen takviye elemanı gelen yükü taşımakta ve malzemeye mukavemet sağlamaktadır. Takviye elemanın türü, fiziksel özellikleri ve hacim oranı ile kompozit malzemesinin özellikleri değişim göstermektedir. Tüm bu parametrelerin değişimi ile kompozit malzemelerinin çeşitliliği de artmaktadır [17], [31].

Matris ve takviye elemanlarının kimyasal kararlılığı ve birbirleri arasındaki uyumluluğu, kompozit malzeme tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir konudur [32].

Takviye malzemesi matris yapısı içerisinde çözünmemektedir. Yapı içerisine ilave edilen takviye malzemesinin mekanik özellikleri kompozit malzemesinin mekanik özelliklerine katkı sağlamaktadır. Örneğin aşınma direnci yüksek bir takviye malzemesi kullanıldığında, kompozit malzemesinin de aşınma direncinin artması beklenmektedir [16], [33].

Takviye partiküllerinin sınıflandırılması Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2. 2 Takviye Elemanlarının Sınıflandırılması [34]

Şekil 2.2' deki 'Diğer' grubunda belirtilen takviye elemanlarından yaygın bir şekilde uçucu kül kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri iyileştirdiği için tercih edilmektedir [35].

Seramik takviye elemanları seçiminde; elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı vb. parametreleri dikkate alınmaktadır. Yaygın olarak kullanılan SiC, B₄C, Al₂O₃ seramik partiküllerinin detaylı özellikleri aşağıda verilmektedir.

Al₂O₃: Ergime sıcaklığı 2100 °C ve yoğunluğu 3,96 g/cm³ olan seramik malzemesi güçlü mekanik özelliklere sahiptir. Bunlar; yüksek aşınma dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyeti gibi özelliklere sahiptir. Sanayide özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir, örneğin silindir gömleği ve fren diski parçalarında kullanılmaktadır [36], [37].

SiC: Ergime sıcaklığı 2750°C ve yoğunluğu 3,2 g/cm³ olan seramik malzemesi mekanik özellikler ve üretilebilirlik açısından birçok avantaja sahiptir. Karbon ve silisyum içeriğine sahip olan seramik malzemesinin ana ham maddeleri ucuz olduğundan oldukça fazla tercih edilmektedir. Aşınma dayanımı yüksek olduğundan uygulama alanı olarak taşlama işlemlerinde tercih edilmektedir [36]. SiC maksimum çalışma sıcaklığı 1400 °C'dir, B₄C seramik malzemesine göre oldukça düşüktür. Çalışma sıcaklığı B₄C düşük olmasına göre termal şoklara karşı dirençlidir [1].

Silisyum karbür mükemmel bir aşındırıcıdır. Asitlere, alkalilere ve erimiş tuzlara 800°C'ye kadar dayanıklıdır. SiC, havada 1200°C'de koruyucu bir silikon oksit kaplaması oluşturur ve 1600°C'ye kadar kaplamayı korumaya devam eder. Düşük termal genleşme ve yüksek mukavemet ile yüksek termal iletkenlik, bu malzemeyi termal şoka dayanıklı uygulamalar için uygun hale getirmektedir [38].

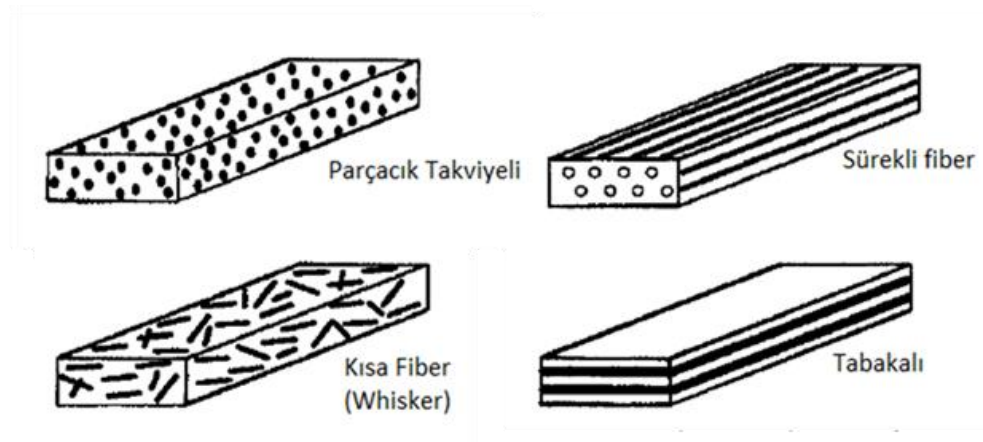
Son uygulama olan; SiC partiküllüne grafit ilavesi ile, kesme kuvvetinin azalmasına, takım ömrünün artmasına ve üretilen bileşenlerin yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olmaktadır [39].

B₄C: Bor karbür; yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sertlik, iyi kimyasal kararlılık ve nötron absorpsiyon yeteneği gibi özelliklerinden dolayı en önemli malzemelerden biridir. Yüksek sertliği nedeniyle B₄C, iyi bir aşınma direncinin önemli bir gereklilik olduğu uygulamalar için AMMK'de takviye olarak Al₂O₃'e bir alternatif olabilir [38].

TiC takviyeli Alüminyum matrisli kompozitler, SiC takviyeli Al matrisli veya Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozitlerden daha sünek bir malzeme elde edildiği gözlemlenmiştir [40].

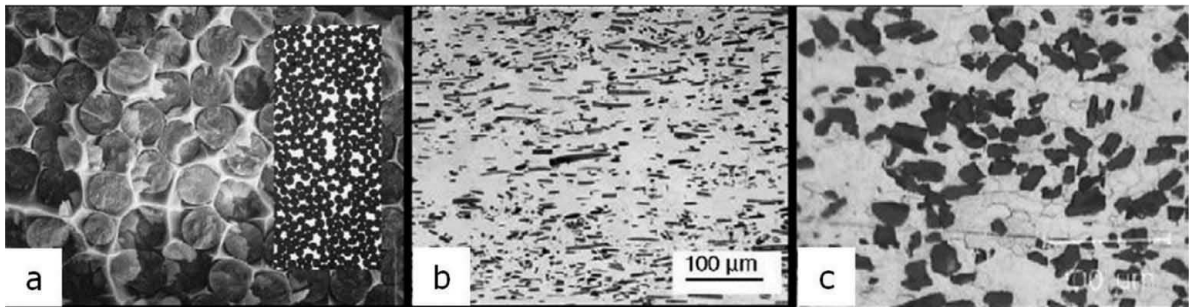
Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, kompozit malzemeleri takviye elemanına göre 4 ana gruba ayrılmaktadır. Takviye elemanına göre kompozitler;

- Parçacık takviyeli kompozitler,
- Fiber takviyeli kompozitler,
- Tabakalı kompozitler ve
- Karma takviyeli kompozitlerdir [3].



Şekil 2. 3 Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması [41]

Takviye eleman sınıflandırmalarına göre malzeme mikroyapısında görünüşleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 4 Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre mikroyapı görüntüleri a) fiber, b) whisker, c) partikül [42]

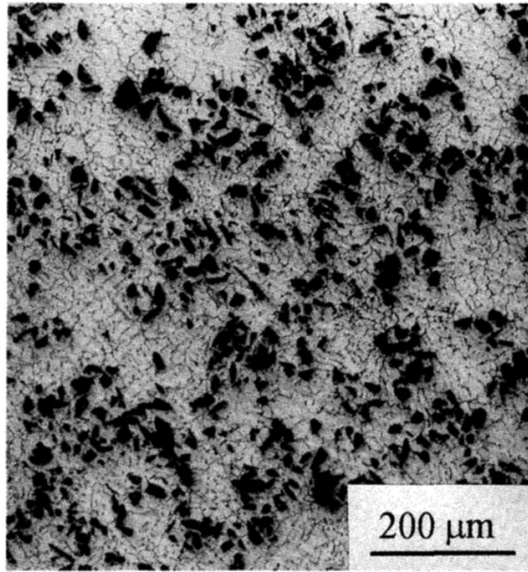
Tablo 2.3'te yaygın kullanılan takviye elemanlarının kullanıldığı uygulama alanları görülmektedir.

Tablo 2. 3 Yaygın kullanılan takviye elemanlarının uygulama alanları [35]

Takviye Elemanları	Özellikler	Uygulama
SiC	Yüksek sertlik, rijitlik, iyi termal özellikler	Piston, şaft, fren diski
B ₄ C	Sertlik, Kimyasal direnç, Yüksek sertlik ağırlık oranı	Aşındırıcı, nozül
Al ₂ O ₃	Yüksek sertlik ve özgül direnç	Refrakter malzeme, aşındırıcı, kaplama
TiB ₂	Aşınma direnci ve yüksek sertlik	Otomotiv ve savunma yapısal uygulamaları
Kırmızı Çamur	Çekme dayanımı, sertlik ve ekonomik	Frenler, bağlantı elemanları, bisiklet endüstrisi

2.1.2.1 Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozitler

Malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için, bilinçli olarak matris yapısına ilave edilen, kabaca eş eksenli bir takviye elemanının, matris ve takviye kombinasyonu ile parçacık takviyeli kompozit malzemeler elde edilmektedir [20]. Parçacık takviyeli kompozit malzemesine ait mikroyapı görüntüsü Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 5 Partikül takviyeli kompozitin mikroyapı görüntüsü [43]

Parçacık takviyesinin yaygın kullanılma sebepleri; takviye elemanının üretilebilirliğinin daha kolay olması ve üretilen parçacık takviyeli kompozit malzemesinin izotropik özellik göstermesidir. Aynı zamanda üretimin maliyeti, diğer takviye türlerine göre çok daha uygundur [20], [31], [32], [44].

Parçacık takviyeli kompozitlerde, matris elemanı olarak metal ve metal alaşımları kullanılırken takviye elemanı olarak seramik bileşikler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bunlar SiC, B₄C, Al₂O₃, TiB₂ parçacıklarıdır. Sık kullanılan seramik parçacık elemanlarının özellikleri Tablo 2.4'te mekanik özellikleri Tablo 2.5'te gösterilmektedir.

Tablo 2. 4 Seramik partiküllerin fiziksel özellikleri [36], [45]

Partikül	Elastiklik modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Isıl genleşme katsayısı (K ⁻¹)	Ergime Sıcaklığı (°C)
SiC	420-450	3,2	4,3x10 ⁻⁵	2750
Al ₂ O ₃	380-450	3,96	7,0x10 ⁻⁶	2100
B ₄ C	448	2,52	6,08x10 ⁻⁶	2420

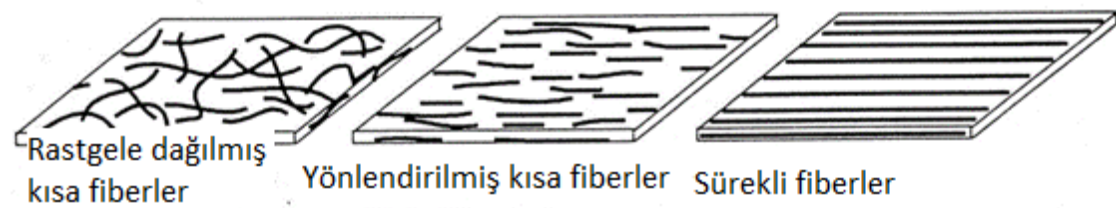
Tablo 2. 5 Seramik partiküllerinin mekanik özellikleri [31]

Malzeme	Eğme Mukavemeti (MPa)	Basma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kırılma Tokluğu (MPa)
SiC	580	588-4116	200	2,80
B ₄ C	310	2600	650	3,00
TiB ₂	277	2400		2,70
Al ₂ O ₃	294-392	2000	248	2,80-4,50

Parçacık takviye elemanının boyutu ve ağırlık oranı parametreleri malzemedeki özellikleri değiştirmektedir. Parçacık elemanın boyutu 1 mikrometrenin altında kullanıldığında, malzeme içerisindeki dislokasyonlar bu küçük boyuttaki parçacıklar sayesinde kitlenmektedir. Dislokasyon hareketleri engellenmiş olduğundan malzeme mukavemet kazanmaktadır [3], [46].

2.1.2.2 Fiber Takviyeli Kompozitler

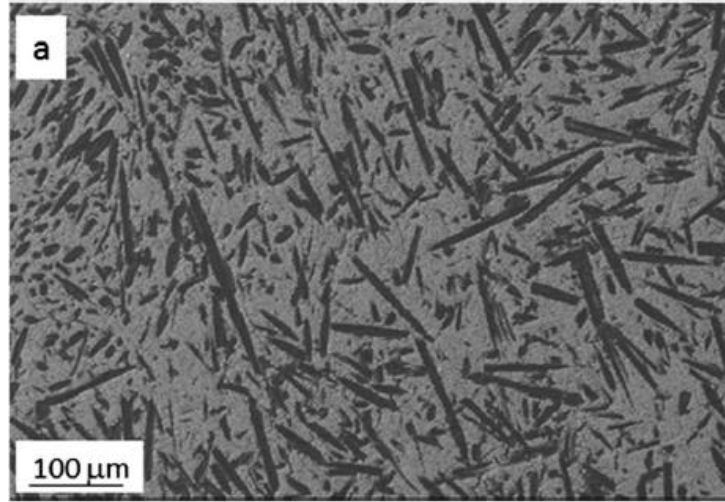
Fiber üretiminde kullanılan liflerin yaklaşık ölçüsü 10 µm'dir. Lifler makaralardan geçirilip fiberler nihai ürün elde edilmektedir [47]. Elyaf (fiber) takviye elemanı 2 alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar sürekli (uzun) fiberler ve süreksiz (kısa, whisker) fiberlerdir, bkz. Şekil 2.6 [16].



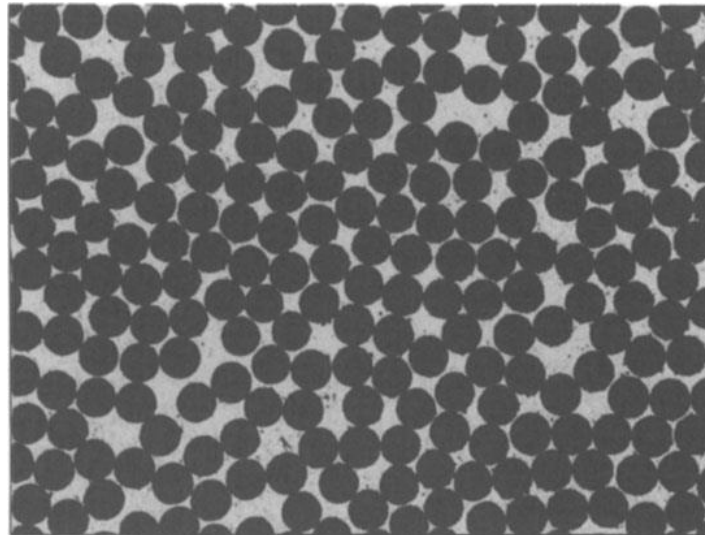
Şekil 2. 6 Sürekli (uzun) ve süreksiz (kısa) fiberler [48]

Fiber takviyeli kompozit malzemelerinin özellikleri; fiber hacim oranı, fiber türü, fiberin dizilimi (yönlenmesi) parametreleri ile değişmektedir. Fiber takviyeli kompozit malzemesi, fiber diziliminden kaynaklı olarak yöne bağlı malzemenin mekanik özellikleri değişmektedir. Yöne bağlı özelliklerin değişimine anizotropi denmektedir. Tüm bu özelliklerinden kaynaklı, partikül takviyeli kompozitlere göre kullanım alanı daha azdır [27], [44].

Şekil 2.7’de kısa fiber takviyeli kompozitin mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Şekil 2.8’de uzun fiberli kompozitin mikroyapı görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. 7 Kısa fiber takviyeli kompozit mikroyapı görüntüsü [49]

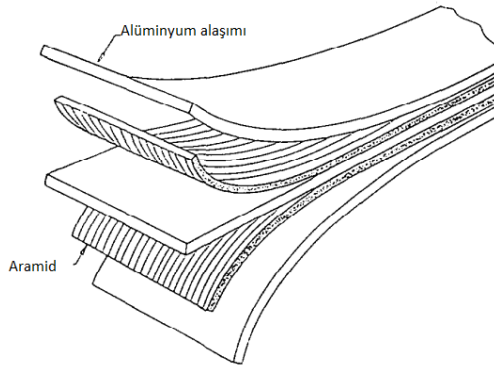


Şekil 2. 8 Alümina fiber takviyeli metal matrisli kompozit mikroyapı görüntüsü [20]

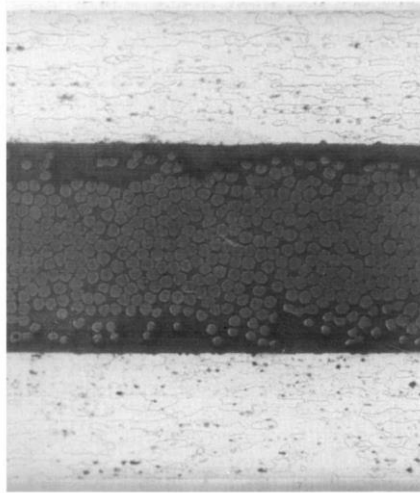
2.1.2.3 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitlerde matris ve takviye elemanları yönteminin adını da aldığı tabaka olarak üretilmektedir. Katman olarak üretilen elemanlar üst üste dizilerek sandviç formunda kompozit elde edilmektedir. Matris ve takviye elemanlarının dizilim yönleri, katman sayıları, kullanılan katmanların kalınlığı ve birbiri ile bağlantısını sağlayacak yapıştırma biçimi tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. Parametreler değiştikçe malzemenin özellikleri de değişmektedir.

Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozitler ilk olarak 1980 yılında üretilmiştir. İlk üretilen tabakalı kompozit malzemesine ARALL adı verilmiştir. Alüminyum matrisli aramid takviyeli kompozit malzemesinin “aramid alüminyum laminate” isminin baş harflerinden ARALL ismi elde edilmiştir. Şekil 2.9’da ARALL kompozit malzemesinin şematik görüntüsü, Şekil 2.10’da malzemenin mikroyapı görüntüsü verilmektedir [50]–[52].



Şekil 2. 9 Alüminyum matrisli aramid takviyeli tabakalı kompozitler [50]



Şekil 2. 10 ARALL’ın mikroyapı görüntüsü [50]

Tabakalı kompozitlerin diğer takviye türlerine göre avantajı; ısıya, neme ve metal malzemeler karşısında darbeye dayanıklılık göstermektedir [51].

2.1.2.4 Karma Takviyeli Kompozitler (Hibrit)

Karma takviyeli kompozitlerin bir diğer adı hibrit kompozitlerdir. Karma kompozitler yapısında iki veya daha fazla takviye malzemesi bulundurmaktadır [6], [35]. Örneğin; SiC seramik partikülünün çekme mukavemeti diğer seramik partiküllerine göre düşüktür. B₄C ve SiC partiküllerinin bir arada kullanılması ile üretilen hibrit kompozitin çekme mukavemeti, SiC seramik partikülünün çekme mukavemetinden yüksek olacaktır [17].

2.2. Matris-Takviye Ara yüzeyi

2.2.1 İslatılabilirlik

Kompozit malzemesinin üretiminde dikkat edilmesi gereken konu ıslatılabilirliktir. İslatılabilirlik, sıvı fazın katı faz üzerinde yayılabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. İslatılabilirlik aynı zamanda sıvı ile katı faz arasındaki temas açısı olarak da bilinmektedir. Şekil 2.11’te temas açısı şematik olarak gösterilmektedir. Temas açısı Young- Dupre denklemi ile hesaplanmaktadır bkz. Denklem 2.1.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (2.1)$$

γ_{sv} katı-buhar ara yüzey enerjisi

γ_{sl} katı-sıvı arayüzey enerjisi

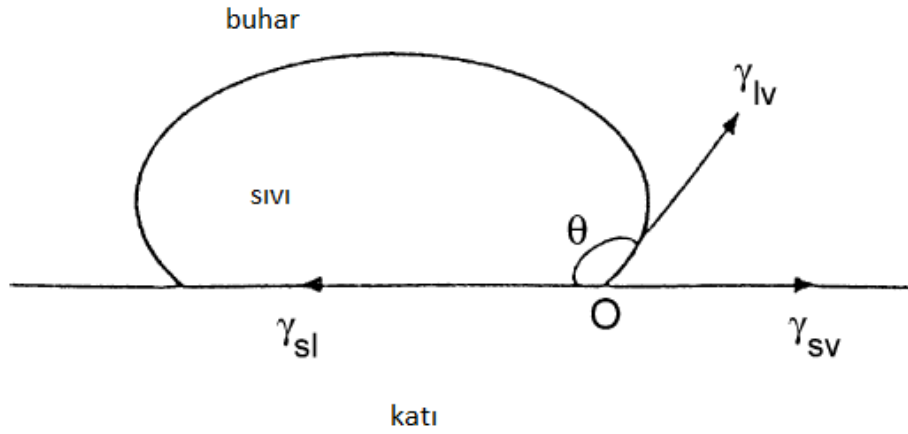
γ_{lv} sıvı-buhar arayüzey enerjisi

Young-Dupre denklemi ile hesaplanan temas açısı;

$\theta = 0^\circ$ ise, iyi ıslatılabilirlik

$\theta = 180^\circ$ ise, kötü ıslatılabilirlik

$0 < \theta < 180^\circ$ ise, kısmi ıslatılabilirlik



Şekil 2. 11 Temas açısı [10], [40]

Ergiyik matris elemanı, takviye yapısına infiltre olması gerekmektedir [53].

Takviye elemanının ıslatılabilirliğinin artırılması için çeşitli metotlar mevcuttur. Bunlar;

- Delannay ve arkadaşlarının çalışmasına göre, vakum desteği ıslatılabilirliği olumlu yönde etkilemektedir. Takviye elemanının matris elemanına infiltre olması için ekstra bir itki kuvveti oluşturmaktadır.
- Takviye elemanı olarak eklenen partiküllerin PVD (fiziksel buhar biriktirme) veya CVD (kimyasal buhar biriktirme) kaplama uygulamaları ile ıslatılabilirlik artmaktadır. En yaygın kullanılan kaplama malzemesi, nikel ve bakır alaşımları ile optimum sonuç sağlanmıştır [10]. Takviye elemanının kaplanması ile takviye matris birbiri içerisinde çok az çözünmektedir. Birbiri içerisinde çözündükleri için matris takviye arasında bağ oluşmaktadır [31]. Metal matrisli kompozit malzemesinde takviye elemanı Nikel elementi ile kaplandığında ıslatılabilirliğin arttığı gözlemlenmektedir [40].
- Seramik partikülünün yüzey özellikleri önemlidir. Yüzeyinde olası oluşacak kirlilikleri elimine ederek ıslatılabilirlik artmaktadır.
- Matris elemanına, reaktif elementlere sahip alaşım ilavesi ile yüzey gerilimi düşmekte ve bu sayede ıslatılabilirlik artmaktadır. Magnezyum, titanyum, lityum, zirkonyum ve kalsiyum reaktif elementlere örnek olarak gösterilebilirler [4], [32], [44], [54]. Yapılan çalışmalara göre alüminyum matris elemanına ağırlıkça %3 magnezyum ilavesi yapıldıktan sonra yüzey gerilimi 0,76'dan 0,62 Nm^{-1} düşmüştür [32].

- Islatılabilirliği iyileştiren bir diğer parametre, alüminyum alaşımının ergitilme sıcaklığıdır. Alüminyum alaşımının sıcaklığı arttıkça ıslatılabilirlik iyileşmektedir [10].

Yapılan araştırmalar sonucunda ergiyik Alüminyum ve takviye elemanı olarak sık kullanılan seramik partiküllerinin temas açıları, uygulanan vakum değerleri Tablo 2.6’te gösterilmektedir.

Tablo 2. 6 Sıvı Alüminyum ve seramik partikül elemanları arasındaki temas açısı [10]

Seramik Partikül	Sıcaklık (°C)	Temas açısı (°)	Vakum (Torr)
SiC	900	150	$2,7 \times 10^{-4}$
	1100	34	$1,5 \times 10^{-5}$
	1100	42	$2,7 \times 10^{-4}$
B ₄ C	900	135	$10^{-5} \times 10^{-6}$
	1100	120	$10^{-5} \times 10^{-6}$
	1100	119	$1,5 \times 10^{-4}$
Al ₂ O ₃	900	90	$2,6 \times 10^{-5}$
	900	120	10^{-5}
	1100	70	$2,6 \times 10^{-5}$
	1100	80	10^{-4}
	1100	83	10^{-5}

2.2.2 Ara yüzey Bağı

Ara yüzey bağı mekanik ve kimyasal olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

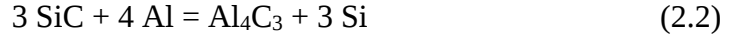
Mekanik bağ; takviye ve matris yüzeylerinin birbirine mekanik olarak kilitlenmesi denmektedir. Bu kilitlenmede ıslatılabilirlik önemli rol almaktadır. Islatılabilirliğin iyi olmadığı yüzeyde boşluk oluşacağı için yüzeyler arasındaki mekanik kilitlenmede tam olarak gerçekleşemeyecektir.

Kimyasal bağ; metalik, iyonik ve kovalent bağ olarak üçe ayrılmaktadır. MMK’nin ara yüzeyinde metalik bağ oluşması ile malzeme sünek özellik gösterecektir [54].

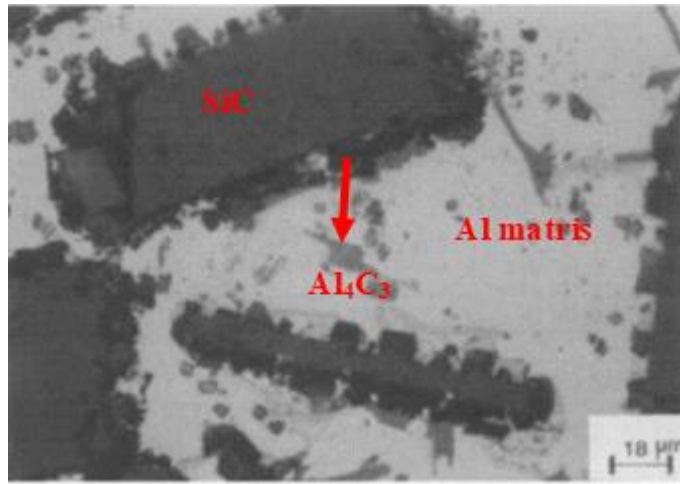
2.2.3 Matris-Takviye Ara yüzeyinde Oluşan Reaksiyonlar

Matris-takviye ara yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonlar matris ve takviye malzemesi kompozisyonuna ve proses sıcaklığı gibi birçok parametreye bağlıdır. Alüminyum matris ve SiC partiküllü kompozit malzemesinde en sık rastlanan faz Al₄C₃’tür, bkz. Şekil 2.12.

Al-Si-C faz diyagramında, oluşan Al_4C_3 fazı kırılgan bir fazdır ve 667-1347°C sıcaklık aralığında Al_4C_3 fazı çözölmektedir. 700°C de reaksiyonlar denklem 2.2 ve 2.3'te belirtildiği gibidir. Al_4C_3 fazı eriyik akışkanlığını olumsuz etkileyen, döküm malzemesini zayıflatın ve dökümün korozyon direncini azaltan kristaller olarak çökelir bkz. Şekil 2.12 [3], [33], [47], [53], [55], [56].



Al_4C_3 fazının oluşması için matris elemanında yeteri kadar silisyum elementi olmalıdır. Fazla silisyum içeriğine sahip alüminyum alaşımı kullanılması halinde ise Al_4C_3 fazı oluşmayacaktır [3].



Şekil 2. 12 SiC seramik partikül-matris ara yüzeyinde oluşan Al_4C_3 fazı [3]

Tablo 2.7’de en sık kullanılan takviye ve matris malzemelerinde ara yüzey reaksiyonları ile meydana gelen fazlar belirtilmiştir.

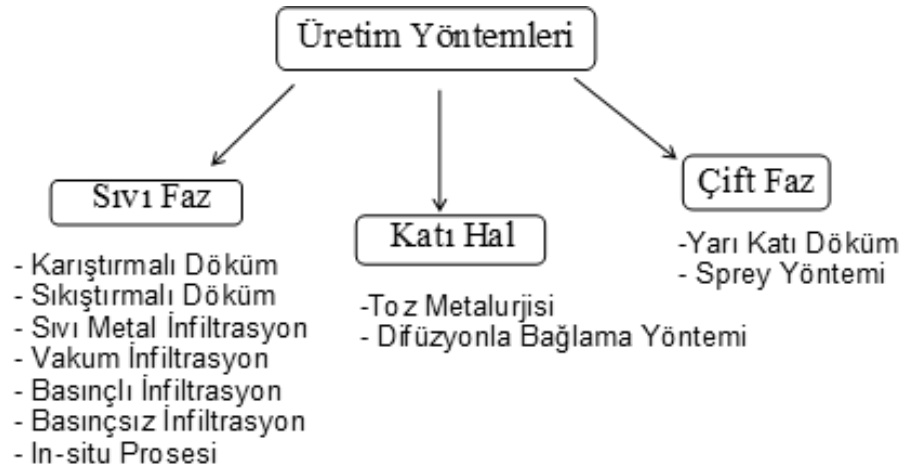
Tablo 2. 7 Ara yüzeyde oluşan fazlar [54]

Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Ara yüzeyde oluşan fazlar
Al	SiC	Al_4C_3 , Si
Al-Mg	SiC	Al_4C_3 , MgO, Mg_2Si , $Mg_2Al_2O_4$
Al-Cu-Mg	SiC	$CuMgAl_2$, MgO

2.3. Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitler için üretim yöntemleri, metal matrisin sıcaklığına bağlı olarak üç ana gruba ayrılmaktadır, bkz. Şekil 2.13. Bunlar katı, sıvı ve çift (katı-sıvı) fazda

üretim yöntemleridir. Malzemenin geleneksel üretim metotlarının uyarlanabilmesi ve üretim maliyeti göz önüne alındığında optimum koşul sıvı faz üretim metodunda mevcuttur [16], [32], [34], [54]. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerinin üretim yöntemleri oldukça fazladır. Çoğu üretim metodu ile alüminyum matrisli seramik parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde ıslatılabilirlik sorunu yaşanmaktadır [11]. Kompozit malzeme üretim sonucunda karşılaşılan bazı hatalar yetersiz döküm teknolojisinden kaynaklanmaktadır. Karşılaşılan bu hatalar porozite, partikül kümelenmesi, oksit inklüzyonları ve ara yüzey reaksiyonlarıdır [53].



Şekil 2. 13 Üretim yöntemlerinin sınıflandırılması [18] [34] [37]

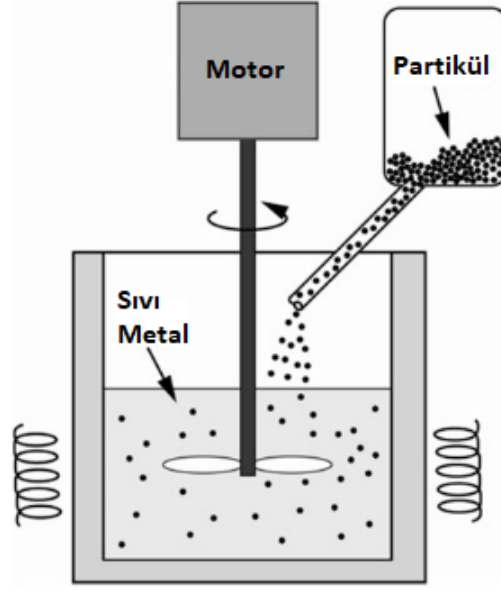
2.3.1 Sıvı Faz Yöntemi

Matris malzemesi ergiyik durumunda iken takviye malzemesinin yapıya ilave edilmesi yöntemine sıvı faz üretim yöntemi adı verilir. Sıvı faz üretim yöntemleri daha ekonomik ve üretimi basit olduğundan sıkça tercih edilmektedir. Bu üretim yönteminde dikkat edilmesi gereken parametre ıslatılabilirliktir. Başarılı bir kompozit elde edilmesi için matrisin yeteri kadar takviye elemanını ıslatması gerekmektedir [57].

2.3.1.1 Karıştırmalı Döküm

Karıştırma döküm işlemi, 1968'de S. Ray tarafından, alümina seramik tozu parçacıklarını alüminyum eriyiğine dahil ederek mekanik karıştırma ile desteklenmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu işlemde, matris mekanik bir karıştırıcı ile ergimiş halde olduğu esnada süreksiz takviye fazları matrise dahil edilir[42], [58].

Partikül takviye elemanının, ergiyik haldeki matris malzemesine eklenmesiyle eş zamanlı olarak karıştırma uygulanarak üretim desteklenmektedir bkz. Şekil 2.14.



Şekil 2. 14 Karıştırmalı döküm yöntemi [3]

Bu karıştırmalı döküm yöntemi ile homojen bir mikroyapı elde edilmektedir. Matrisin soğuyarak yarı katı faz durumuna geldiği aşamada karıştırma işlemi bitirilmektedir [59]. Herhangi bir bağlayıcı ilavesi kullanılmadan sadece karıştırma etkisi ile partikül takviye elemanlarının homojen dağılması esasına dayanmaktadır [3]. Karıştırmalı döküm ile kompozit üretim yönteminde karıştırma hızı, ergiyik alaşımın sıcaklığı, eklenen takviye partikülün boyutu, ön ısıtma sıcaklığı ve kalıp tipi (malzemesi) önemli parametrelerdir [60]. Karıştırmak için kullanılan pervane, sıvı fazda sıkça rastlanan ıslatılabilirlik sorununu da iyileştirmektedir. Takviye elemanın yapıda homojen bir şekilde dağılması için birçok parametre test edilmektedir. Bunlar; takviye elemanı tozlarının asal gaz ile matris içine ilavesi, girdap (vorteks) ile takviye tozlarının ilavesi, matris ve takviyenin önce bir araya getirilip daha sonra karıştırılması, karışım sağlarken ayrıca ultrasonik dalgalar ile titreşim sağlanmasıdır [16], [45], [61].

Karıştırmalı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.8’de gösterilmektedir.

Tablo 2. 8 Karıştırmalı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]

Avantaj	Dezavantaj
Kolay, ekonomik ve seri üretime uygun	Homojenlik ve yüksek porozite elde etmek zor
İyi matris takviye ara yüzeyi elde edilir	Matris ve takviye arasında düşük ıslatılabilirlik görülebilir

2.3.1.2 Sıkıştırılmalı Döküm

Geleneksel metal kalıba döküm yöntemi ile benzerlik gösterip ekstra yüksek basınç (50-200MPa) ile geleneksel yöntem geliştirilmiştir. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile sürekli fiber ve partikül çeşidinde takviye elemanlarına sahip kompozit malzeme üretilmektedir. Sıvı metal infiltrasyon yönteminde kullanılan ön şekli (preform) oluşturulmuş takviye elemanı bu yöntemde de kullanılmaktadır. Ön şekil ile oluşturulan takviye elemanı porozlu yapısı ile infiltrasyona destek sağlamaktadır. Yüksek basınç etkisiyle matris elemanı takviye elemanına infiltre olmakta ve başarılı kompozit üretimi elde edilebilmektedir. Yüksek basınçla kompozit üretimi gerçekleştirildiği için basıncın fiberlere zarar verme olasılığı oldukça yüksektir. Yüksek basıncın üretimde avantajı ise üretilen malzemenin gözenek miktarı da basınç sayesinde oldukça azalmaktadır.

Sıkıştırılmalı döküm ile üretim yönteminde dikkat edilmesi gereken parametreler ergiyik metalin (matrisin) katılaşma göstermeden takviye elemanını ısıtması gerekmektedir. Bu yüzden takviye elemanı ve kalıba ön ısıtma yapılmaktadır [45], [62]–[64].

Proses aşamaları ergiyik kalıba dökülmekte, basınç uygulama ünitesi aşağı inmekte ve ergiyik pres ile katılaştırılmaktadır. Katılaşma tamamlandıktan sonra üretilen parça kalıptan çıkartılmaktadır [65].

Tablo 2.9’de sıkıştırılmalı döküm ile MMK’nin üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

Tablo 2. 9 Sıkıştırılmalı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]

Avantaj	Dezavantaj
Esnek ve kolay bir proses	Uygun homojenlik elde etmek zordur ve takviye zarar görebilir.
Seri üretim için uygun	Matris ve takviye arasında reaksiyon gerçekleşmektedir

2.3.1.3 Sıvı Metal İnfiltrasyonu

Düşük seramik ağırlık oranına sahip kompozit malzemelerin üretiminde diğer üretim yöntemleri kullanılabilir. Yüksek seramik ağırlık oranına sahip kompozit malzeme üretiminde ise yöntemler sınırlıdır. Seramik ağırlık oranı yüksek olduğu için kompozit malzemenin yoğunluğu fazla olmakta ve üretim zorlaşmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, seramik partiküllerinin gözenekli yapıya sahip ön şekil (preform) formuna getirilmesi ile üretim kolaylaşmaktadır. Preform gözenekli bir yapıda

olduğundan, sıvı metal gözeneklerden infiltre olmaktadır. Sıvı metale itki kuvvetini sağlaması için üretim prosesinde basınç ve/veya vakum kullanılmaktadır. Basınç veya vakum ile desteklenmesi sonucu infiltrasyon oldukça iyileştirilmektedir [61]–[64].

Ergiyik metalin, porozlu yapıya sahip preforma yani takviye elemanına infiltre olması ile kompozit malzeme üretilmektedir. Sıvı matrisin akışkanlığının uygun şekilde kontrol edilmesi, bu tekniğin önemli parametresidir. Ergiyik metale, takviye preformu sonradan ilave edilmektedir ve bu yöntem oldukça pahalıdır. Asal gaz veya basınçlı mekanik bir ortam ile desteklenmektedir. Ergiyik metalin takviye elemanının porozlu kısmından geçişi sırasında oluşacak sürtünme etkisini elimine etmek için genellikle basınç uygulanmaktadır. Matris malzemesinin çatlaması, katılma sırasında matris ve takviye arasındaki diferansiyel büzülmeden kaynaklanmaktadır. Eşit ısı genleşme katsayılarına sahip bileşenler seçilerek matrisin çatlama ihtimali en aza indirilebilir [32], [56].

Bir diğer dikkat edilmesi gereken parametre ise matris ve takviyenin yüzey özellikleridir. Matris ve takviyenin yüzey özellikleri de ıslatılabilirliği etkilemektedir. Ara yüzey oluşacak bir oksit ıslatılabilirliği kötü etkilemektedir. Bunun nedeni metal-oksit arasındaki temas açısı 90°C’den yüksektir. Mükemmel ıslatılabilirlik için temas açısı 0°C’ye yakın olmalıdır [67]. Bölüm 2.2.1’de ıslatılabilirliği iyileştirmek ve dikkat edilmesi gereken detaylı konular belirtilmiştir.

Tablo 2.10’da sıvı metal infiltrasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

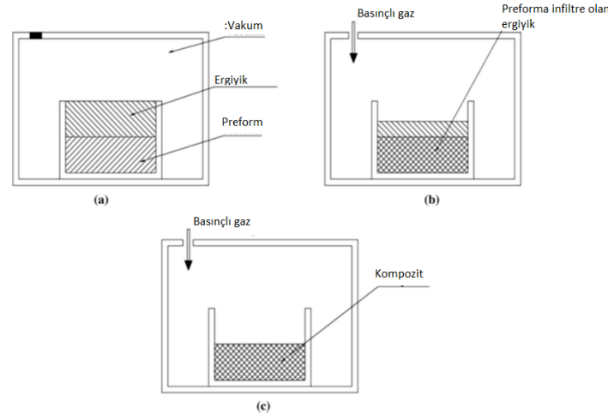
Tablo 2. 10 Sıvı metal infiltrasyon yönteminin avantaj ve dezavantajları [56]

Avantaj	Dezavantaj
Matris tek bir proses adımı ile üretilmektedir.	Uzun üretim süresi
Matris homojen formda elde edilmektedir.	Takviye elemanı ve matris elemanı arasındaki ara yüzeyde istenmeyen reaksiyonların gerçekleşmesi

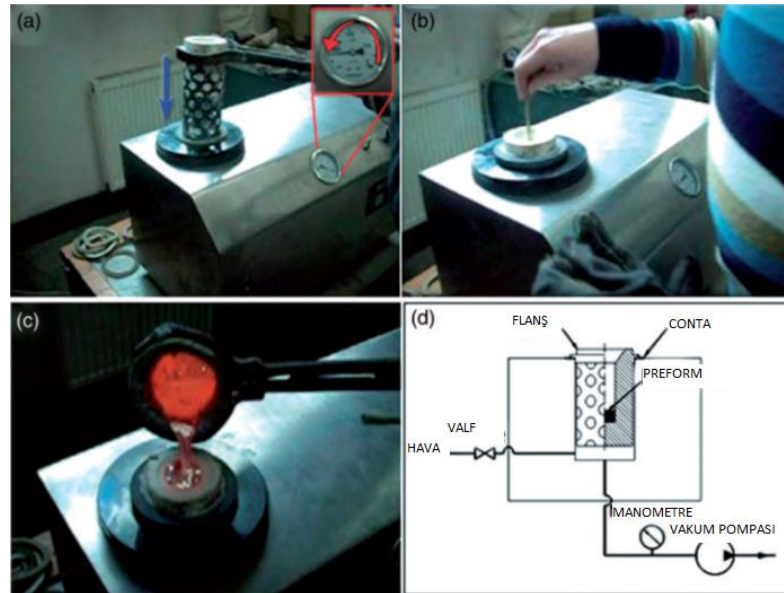
2.3.1.3.1 Vakum İnfiltrasyon

Ergiyik haldeki matris malzemesi ve takviye elemanına negatif basınç uygulanmaktadır. Matrisin, takviye elemanını iyi ıslatabilmesi için negatif basınç bir itki kuvveti oluşturmaktadır. Böylelikle vakum desteğiyle, preformun gözeneklerine ergiyik metal infiltre olmaktadır. İnfiltrate olması için de ıslatılabilirliğin iyi olması gerekmektedir. Mükemmel ıslatılabilirlik için temas açısı 0° olmalıdır [1].

Vakum pompası kalıba direk bağlanmaktadır. Vakum pompası açıldığı anda ergiyik metal preformun poroz yapısına dolmaktadır [68]. Bu üretim yönteminde yapıdaki takviye ağırlık oranı, vakum değeri, infiltrasyon sıcaklığı ve infiltrasyon süresi kompozit üretiminde önemli parametrelerdir [69]. Şekil 2.15'te vakum infiltrasyon yöntemi ile kompozit üretimi şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 2.16'da bu çalışmada da kullanılan dereceli hassas döküm yöntemi ile gerçekleştirilen vakum infiltrasyonun aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2. 15 Vakum infiltrasyon a) preformda sıkışan havayı çıkarmak için vakumla gerçekleştirilen sızma işlemi b) ergiyik için itici güç olarak basınçlı gaz uygulamak c) kompozit üretimi [70]



Şekil 2. 16 a) Kalıbın yerleştirilmesi vakumun uygulanması b) preformun kalıba yerleştirilmesi c) ergiyik metalin kalıba dökülmesi d) vakum destekli infiltrasyon sisteminin şematik görünümü [71]

2.3.1.3.2 Basınçlı İnfiltrasyon

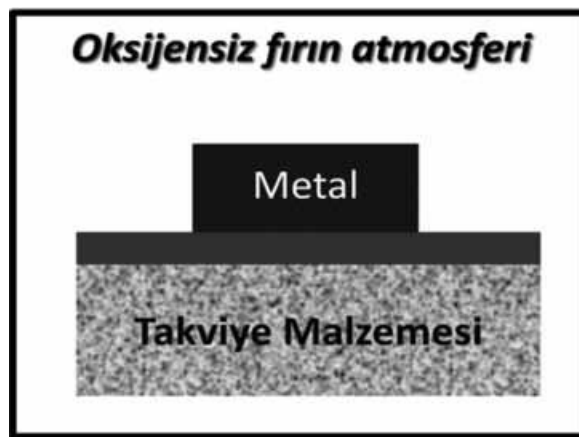
Basınçlı infiltrasyon ile üretim yöntemi genellikle kompozit malzemesinin içerisinde yüksek oranda takviye elemanı bulunması halinde tercih edilmektedir [68].

Bu yöntemde sıvı metale basınç uygulanması sonucunda gözenekli yapıya sahip preform içerisine sıvı metal infiltre edilir. İnfiltrasyonun verimli bir şekilde sonuçlanması için sıvı metale uygulanan minimum basınca eşik basınç değeri denmektedir. Basınçlı infiltrasyon yönteminde mekanik bir basınç uygulanmamaktadır. Basınç olarak asal gazlar kullanılmaktadır, bu nedenle de sıkıştırılmalı döküm yönteminden farklıdır [72], [73].

Basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerde dikkat edilmesi gereken parametreler vardır. Bunlar; sıvı metal sıcaklığı, infiltrasyon süresi, takviye tane boyutu ve uygulanan basınçtır [73].

2.3.1.3.3 Basınsız İnfiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon yönteminden tek farkı döküm esnasında basınç uygulanmadan matris elemanının takviye elemanına infiltre edilmesidir. Takviye elemanı iyi ıslatılabilirlik özelliğe sahip olmalıdır. Basınsız infiltrasyon metodu ile üretimde ıslatılabilirliğin iyileşmesi için alüminyum matris içine magnezyum (Mg) ilavesi ve azot ortamında üretim gerçekleştirilmektedir [1], [74]. Sıvı matris içerisine bakır (Cu) ilavesi ile infiltrasyonun gerçekleşmesi için uzun süre beklenmesi gerekmektedir. Silisyum (Si) ilavesi ile akışkanlık artmakta ve infiltrasyon olumlu etkilenmektedir [75]. Şekil 2.17’de basınsız infiltrasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir

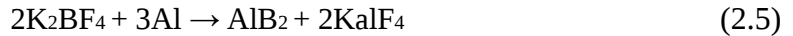
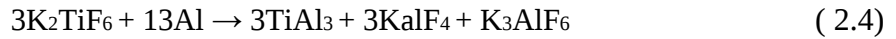


Şekil 2. 17 Basınsız İnfiltrasyon yöntemi [66]

2.3.1.4 Insitu Prosesi (Yerinde Çekirdeklenme)

Exsitu metoda alternatif üretim yöntemi olan insitu metodunda ise ergiyik metale önceden ilave edilen farklı türdeki alaşım ergiyik ile reaksiyona girmektedir. Diğer sıvı fazdaki tüm üretim yöntemlerinde takviye elemanı olarak toz partikül ilave edilmekteyken, insitu yönteminde boyut sınırlaması yoktur. Insitu yöntemindeki dezavantajlar takviye ve matris elemanı ara yüzeyindeki oluşan reaksiyonlar sonucu oluşan ara fazlar, takviye elemanının yüzeyinde oluşan istenmeyen kirlilikler sonucu ıslatılabilirlikte sorun yaşanabilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu ilave edilen alaşım ile ıslatılabilirlik iyileşmekte ve takviye elemanı matris elemanı içerisinde homojen dağılmaktadır [5], [76], [77].

İlave edilen alaşım sonucu en çok üretilen takviye elemanı olarak TiB_2 , Mg_2Si ve TiC 'dür. Potasyum hegzafloortitanat (K_2TiF_6) tuzu ve potasyum tetrafloroborat (K_2BF_4) tuzları karıştırılarak alüminyum ergiyik malzemesine ilave edilmesi sonucu denklem 2.4-2.6' daki gibi alüminyum ve tuzlar reaksiyonlara girerek, TiB_2 mikroyapıda takviye elemanı olarak elde edilmektedir [16].

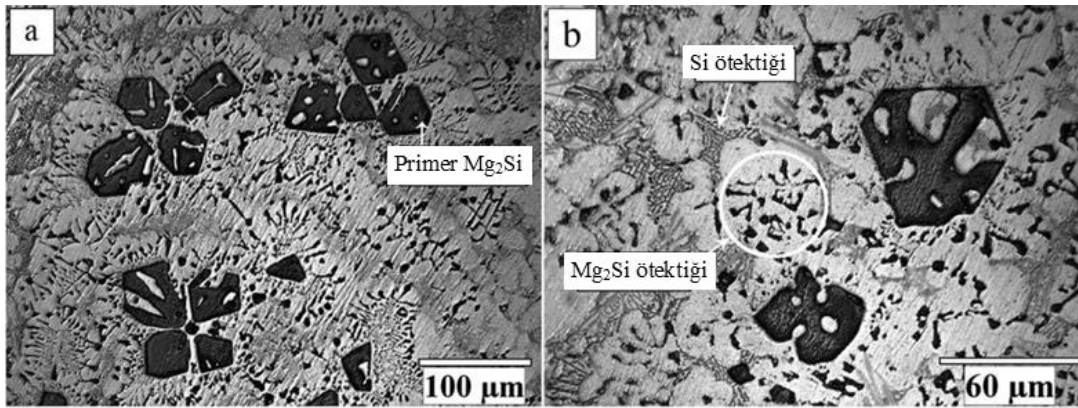


İnsitu yöntemi ile üretilen diğer Mg_2Si partikülü ise yüksek ergime derecesi $1085^\circ C$, düşük yoğunluk $1,99 \times 10^3$, yüksek elastiklik modülü 120 GPa gibi iyi mekanik özelliklere sahiptir. Mg_2Si bileşiği çok kristalli bir formda $450^\circ C$ ' de sünek-kırılgan sıcaklığa sahiptir. Bu nedenle, yeterli mekanik dayanım elde etmek ve kırılganlık sorununun üstesinden gelmek için ince primer Mg_2Si parçacıkları içeren kompozitlere ihtiyaç vardır [78], [79].

Ergiyik halde bulunan alüminyum matrise Mg alaşımının ilave edilmesi sonucu katılaşma sırasında Mg_2Si partikülü elde edilmektedir. Mg_2Si partikülü iki farklı şekle sahiptir. Bunlar düzensiz formda ince taneli ötektik ve büyük taneli polihedral formdur. Ergiyik malzemenin katılaşması sırasında (yaklaşık $670^\circ C$) ilk olarak primer Mg_2Si çekirdeklenmesi ve büyümesi ile başlar, daha sonra sıcaklığın düşmesi ile (yaklaşık $580^\circ C$) Mg_2Si ötektiği çekirdeklenir ve büyür. Mg_2Si ötektiği, primer Mg_2Si fazının etrafında çekirilenmektedir. Yaklaşık $500^\circ C$ 'de ise Si ötektiği oluşmaktadır [80].

Şekil 2.18'de görüldüğü gibi α -alüminyum, primer Mg_2Si , Mg_2Si ötektiği ve Si ötektik fazlarına sahip numunelerde soğuma hızı daha yüksek olduğu için Mg_2Si partikülleri daha

ince hale gelir. Bununla birlikte, morfolojileri hala dendritik ve düzensiz polihedral formundadır. Bu mikroyapı ve ayrıca primer Mg_2Si partiküllerinde bulunan bazı boşluklar bu alaşımların mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Bu olayın ana nedeni, büyüme sürecinde durağan ve karışmamış ergiyik metalin varlığı ile ilgilidir. Mg_2Si fazının tane sınırı ile temas halinde olan ergiyik alüminyumdaki sınır tabakası zaman geçtikçe kalınlaşmaktadır. Bu nedenle, primer Mg_2Si tane sınırlarının Mg ve Si elementleri açısından zengin merkezi bölgeleri, ergiyik metalle ara yüzey oluşturamaz. Bu difüzyon eksikliği, Mg_2Si partiküllerinde boşlukların oluşmasına neden olmaktadır [81], [82].



Şekil 2. 18 İnsitu Magnezyum alaşım takviyesi ile mikroyapıda oluşan primer Mg_2Si , Mg_2Si ötektik fazı ve Si ötektığı [80]

Primer Mg_2Si parçacıkları $\alpha-Al$ fazı ile çevrilidir. Katılaşma sırasında Mg_2Si partiküllerinin etrafındaki matris yapısında bulunan magnezyum ve silisyum element içeriğinin azalması bu olayın nedeni olabilir. Ayrıca soğutma hızının artması Mg ve Si atomlarının difüzyonunu azaltır ve Mg_2Si fazı çevresinde alaşım elementlerinin eksikliğine neden olur [80].

2.3.2 Katı Hal

Katı hal üretim yöntemleri toz metalurjisi ve difüzyon bağlanma yöntemleridir.

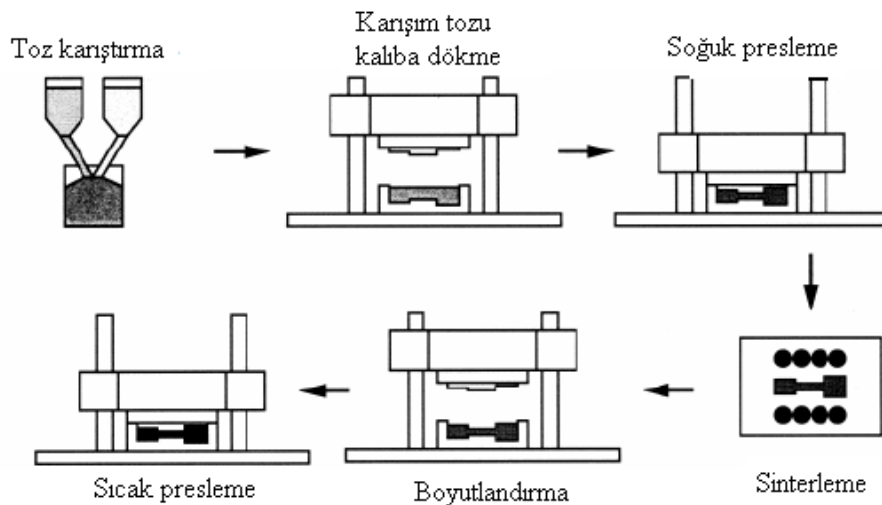
2.3.2.1 Toz Metalurjisi

Metal tozları görece yüksek fiyatlı olduğu için toz metalürjisi diğer üretim yöntemi olan sıvı infiltrasyon yöntemine göre daha maliyetlidir. Toz metalurjisi ile üretim aşamaları şu şekildedir;

(1) gazla atomize edilmiş matris alaşımlarının ve toz halindeki takviyenin harmanlanmasını; (2) homojen karışımın kabaca %80 yoğunluğa kadar sıkıştırılması (soğuk presleme); (3) uçucu kirletici maddeleri (yağlayıcılar ve karıştırma ve harmanlama katkı maddeleri), su buharını ve gazları uzaklaştırmak için (birbiriyle bağlantılı açık bir gözenek yapısına sahip olan) ön kalıbın gazının alınması ve (4) vakumlu sıcak presleme veya sıcak izostatik presleme ile bütünleştirme. Sıcak preslenmiş silindirik kütükler daha sonra ekstrüde edilebilir, haddelenebilir veya dövülebilir [56].

Toz metalürjisi ile kompozit üretiminde alaşımlama mekanik olarak yapılmaktadır, bkz. Şekil 2.19. Toz halindeki matris elemanına, toz olarak takviye elemanları eklenip pres uygulanması ile istenilen şekilde üretim yapılabilir. Presleme işlemi sonrasında dayanım kazanması için sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Alaşımlama prosesinde uygulanan pres işlemi sıcak ve soğuk olarak uygulanabilmektedir. Soğuk pres uygulandığında toz partikülleri kırılma sorunu yaşanacağından, sıcak preste başarılı kompozit üretilmektedir. Yüksek yoğunluğa sahip kompozit malzemelerin üretimi için sıcak pres, soğuk preslemeye göre daha çok tercih edilmektedir [16], [36], [83]. Matris elemanı olarak kullanılacak toz 1 mm'den daha küçük olmalıdır. Matris ve takviye elemanının toz partikül boyutları birbirinden çok farklı olmamalıdır. Matris toz partikülü takviye partikül boyutuna göre daha büyükse topaklanma oluşacak ve takviye mikroyapıda homojen dağılım gösteremeyecektir [61], [84]

AMMK için yapılan araştırmalar sonucunda, alüminyum tozu ile takviye olarak Al_2O_3 kullanılması sonucu elde edilen ürünler daha fazla gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür. Ancak daha büyük ölçekte üretim yapıldığında kullanılabilir [23].



Şekil 2.19 Üretim aşamaları [36]

Toz metalürjisi ile MMK üretiminde avantaj ve dezavantaj bilgileri Tablo 2.11’de gösterilmektedir.

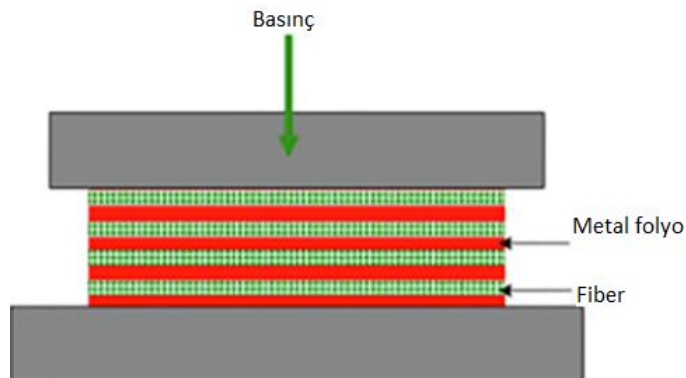
Tablo 2. 11 Toz metalürjisi yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]

Avantaj	Dezavantaj
Ürünün porozitesi ayarlanabilir	Teçhizat ve ekipmanlar pahalıdır böylelikle prosesin maliyeti yüksektir
İyi mekanik özellikler elde edilir	Nihai ürünler düşük süneklik ve dayanıma sahiptirler
İstenilen şekil başarılı şekilde elde edilir	Toz malzemelerinin maliyeti yüksektir

2.3.2.2 Difüzyonla Bağlama Yöntemi

Bu yöntemin amacı, benzer veya farklı metal katmanları ve fiberleri gerekli basınç altında ergime gerçekleşmeden sandviç metale birleştirmektir. Metal folyo – fiber – metal folyo olmak üzere tabaka şeklinde üretilmektedir. Sıcak pres uygulanması ile metal folyo ergiyerek fiberlere doğru yayılmaktadır. Sıcaklık, matrisin erime noktasının %70’ine kadar değiştirilebilir. Üretimin gerçekleşebilmesi için dikkat edilmesi gereken parametreler takviye elemanı türü, dizilimi, üretim sıcaklığı ve uygulanan basınçtır. Difüzyon süreci sıcaklık, basınç ve difüzyon zamanlaması ile kontrol edilebilir. Diğer üretim yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda üretim gerçekleştirilmektedir. Yüksek sıcaklıkta fiberler ve matrisler ara yüzeyde reaksiyon göstermesi sonucu yük taşıma özelliği kötü etkilenmektedir [16], [22], [72], [73].

Şekil 2.20’de difüzyonla bağlama yönteminin şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. 20 Difüzyonla bağlama yöntemi [23]

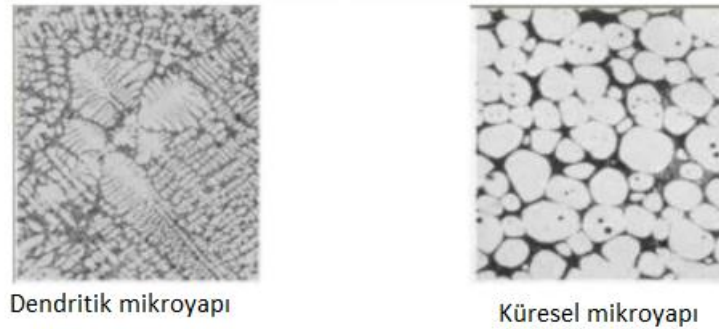
2.3.3 Çift Faz

Çift faz üretim yönteminde matris elemanının sıvı ve katı fazını bir arada bulunduğu sıcaklıkta takviye elamanı matris elemanına eklenmektedir. Çift faz yönteminin alt başlıkları yarı katı döküm ve spreyci yöntemidir.

2.3.3.1 Yarı Katı Döküm

Geleneksel üretim yöntemlerinde dövme ve döküm alaşımları ayrı ayrı üretilebilmekte ve şekillendirilebilmektedir. Yarı katı yönteminde hem dövme alaşımları hem döküm alaşımları bu yöntemle üretilebilmektedir.

Metallerin yarı katı yönteminde şekillendirilebilmesi için malzemenin mikroyapısında dendritik yapının bulunmaması gerekmektedir. Dendritik yapıyı elimine etme yollarından biri mekanik veya elektromanyetik karıştırıcı ile dendritik kollarının kırılması sonucu küresel bir mikroyapı elde edilmesidir, bkz. Şekil 2.21. Şekillendirilebilirlik için malzemenin küresel yapıya sahip olması gerektiği 1970li yıllarda yapılan çalışmalar sonucu tespit edilmiştir [74]–[78].

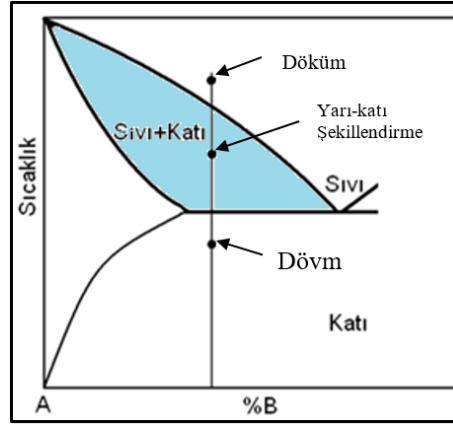


Şekil 2. 21 Dendrit kollarının kırılması sonucu küresel mikroyapı eldesi [79]

Yarı katı ile üretilen küresel mikroyapıya sahip malzeme tiksotropik özellik göstermektedir. Kuvvet altında malzemenin viskozitesi azalmaktadır. Malzemeye uygulanan kuvvetin kaldırılması ile malzemeye hiç kuvvet uygulanmadığı durumdaki mekanik özellikler görülmektedir. Bu davranışa tiksotropik özellik denmektedir [74], [75], [80].

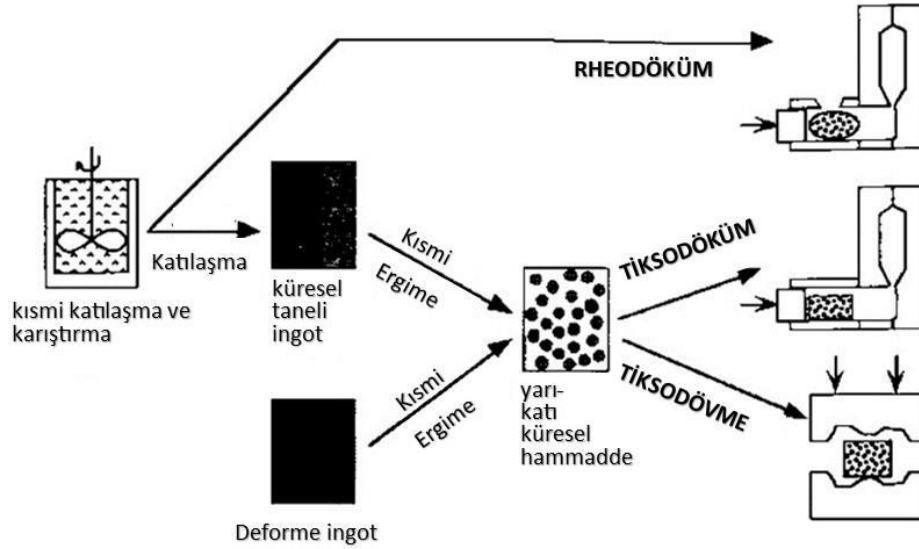
Yarı katı ile kompozit üretiminde, takviye partikülleri yarı katı durumdaki matris malzemesine ilave edilerek malzeme elde edilmektedir [16].

Şekil 2.22’de faz diyagramında yarı katı şekillendirme bölgesi gösterilmektedir.



Şekil 2. 22 Faz diyagramında yarı katı şekillendirme bölgesi [94]

Yarı katı yöntemi 2 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar rheo-döküm ve tikso-döküm olarak adlandırılmaktadır, bkz. Şekil 2.23.



Şekil 2. 23 Yarı katı işlemleri [95]

Tikso-döküm: Ergiyik formdaki malzemenin yarı katı bölgeye yani likidüs ve solidüs eğrisinin arasındaki (Şekil 2.23) bölgesindeyken karıştırma etkisi ile dendrit kolları kırılmakta ve küresel form elde edilmektedir. Malzemenin katılaşması tamamlandıktan sonra, küresel yapıdaki malzeme tekrar yarı katı bölgeye ısıtılmakta ve dökümü gerçekleştirilmektedir. Porozite, geleneksel döküm yöntemlerin aksine, tikso-döküm yöntemi ile azaltılmaktadır [96].

Rheo-döküm: Ergiyik formdaki malzeme yarı katı bölgeye soğutulmakta ve mekanik karıştırıcı ile karıştırılmaktadır. Bunun sonucunda dendritik yapı küresel forma

dönüşmektedir. Ara katılaşma tamamlanmadan kalıba enjekte edilerek döküm gerçekleştirilmektedir [97].

Ergiyik malzeme ile karıştırıcının teması sonucu, karıştırıcı aşınabilmektedir. Bu dezavantajından dolayı rheo-döküm yöntemi sanayide fazla tercih edilmemektedir [98].

Yarı katı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.12’de gösterilmektedir.

Tablo 2. 12 Yarı katı döküm yönteminin avantaj ve dezavantajları [99], [100]

Avantaj	Dezavantaj
Daha az büzülme, azaltılmış makrosegregasyon ve mikroporozite	Özel hammaddeye ihtiyaç duyulmaktadır, kaynakları sınırlıdır.
Proses işlemi kısa süreceğinden maliyet optimum koşuldadır	Ekipman ve teçhizatların maliyetleri yüksektir.
Otomasyon sisteme uygundur	
Döküme kıyasla %65 daha az enerji ile üretim gerçekleştirilebilmektedir	

2.3.3.2 Sprey Yöntemi

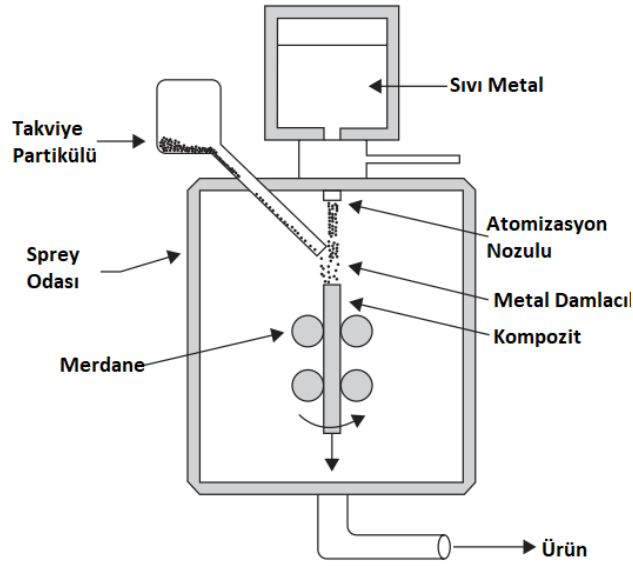
Sprey biriktirme yöntemi ticari olarak 1970'lerin sonlarında ve 1980'lerde Osprey, Ltd. (Neath, Birleşik Krallık) tarafından eriyik metal akışını soğuk gaz jetleri ile atomize ederek dökme malzeme oluşturma yöntemi olarak geliştirilmiştir.

Sprey ile püskürterek biriktirme yöntemi ile, bir eriyiği atomize etmeyi ve metal tozu imalatında olduğu gibi damlacıkların tamamen katılaşmasına izin vermek yerine, yarı katı damlacıkları bir alt-tabaka üzerinde toplamayı içerir. İşlem, hibrit hızlı katılaşma işlemidir. Çünkü; metal sıvıdan katıya hızlı bir geçiş yapar, ardından yavaş soğuma ile oda sıcaklığına gelmektedir.

Osprey firma bünyesinde üretilen çoğu MMK malzemesinin, üretilme amacı seramik partiküllerinin homojen olarak dağılmasıdır. Osprey MMK malzemesinin diğer önemli avantajları mikroyapısında güçlü bir ara yüzey bağı, çok az gerçekleşen ara yüzey reaksiyonları ve çok düşük oksit içeridir[56].

Yüksek hızlı soy gaz jeti yardımıyla, takviye ilavesiyle sabit metalik alt tabaka üzerine atomize edilmiş ince ergimiş metal damlacıkları püskürtülür. Daha sonra metalin katılaşmasına izin verilir. İstenen MMK'yi elde etmek için biriktirme hızı, püskürtme memesi ile alt tabaka arasındaki mesafe, kullanılan soy gaz, püskürtme basıncı ve püskürtme açısı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmalıdır. Bu yöntemin maliyeti çok daha azdır[23].

Şekil 2.24'te Sprey yönteminin şematik görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2. 24 Sprey yöntemi [23]

Tablo 2.13'te sprej yöntemi ile MMK üretiminin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

Tablo 2. 13 Sprej yönteminin avantaj ve dezavantajları [42]

Avantaj	Dezavantaj
Ekipman teçhizat maliyeti uygun	Üretim sırasında parçada porozite meydana gelebilmektedir.
Matris elemanı ve takviye elemanı daha az süre etkileşimde kaldığı için diğer yöntemlere göre ara yüzeyde istenmeyen reaksiyon daha az gerçekleşmektedir.	

2.4. Uygulama Alanları

Kompozit malzemelerin yüksek özgül modülü, dayanım ve aşınma direnci gibi özelliklerinin iyi olmasından dolayı kullanım alanları da oldukça geniştir. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin uygulama alanlarına örnek olarak otomotiv sektörü ve havacılık sektörü gösterilmektedir. Otomotiv sektörü için fren disk ve piston parçası örnek uygulama olarak gösterilmektedir [38], [59]–[61]. Tablo 2.14'te kompozit malzemelerinin otomotiv sektöründeki uygulamaları gösterilmektedir. Havacılık sektöründeki uygulamaları tablo 2.15'te gösterilmektedir.

Tablo 2. 14 Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzemeler [1]

Kompozit	Uygulamalar	Avantajlar
Al-SiC partikül	Piston fren balatası, şaftlar	Hafiflik, aşınma direnci
Mg-SiC	Dişli çarklar, makaralar	Ağırlık tasarrufu, yüksek mukavemet
Grafit/Al	Kendinden yağlamalı yataklar	Yüksek mukavemet, ağırlık tasarrufu
Al-Al ₂ O ₃	Piston halkası, yanma odası	Aşınma direnci
Al-Al ₂ O ₃	Silindir gömlekleri	Yüksek mukavemet, düşük termal genleşme
Cu-Grafit	Elektrik malzemeleri	Düşük sürtünme aşınma
Al-TiC	Silindir, rulman	Düşük aşınma ve hafiflik

Tablo 2. 15 Havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemeler [1]

Kompozit	Uygulamalar	Avantajlar
Al-SiC partikül	Uçak omurga ve iskeletleri	Aşınma direnci
Al karbon fiber	Uçak motorları	Termal kararlılık
Mg-Al ₂ O ₃ fiber	Uçak motorları	Termal kararlılık
Al-Ti/Be şerit	Helikopter pervane şaftı	Mukavemet
Ti-Al/karbon fiber	Roket motorları	Termal kararlılık
Ti/Mb fiberler	Ses üstü uçak roketi	Yüksek servis sıcaklığı
Ti-Al/SiC	Turbojet motor aksamaları	Yüksek mukavemet

Alüminyum hibrit metal matrisli kompozitler, havacılık ve otomobil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle araştırmacıların ilgi alanıdır. Bir hibrit kompozit, iki veya daha fazla takviye malzemesinin özelliklerinden yararlanır ve diğer malzemelerde elde edilemeyen benzersiz fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler içerebilmektedir. Literatürün incelenmesi sonucunda yapılan çalışmalar,

Mostofapoor ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada[103], Al-Mg₂Si kompozitine karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak farklı miktarlarda SiC mikro boyutlu (37 µm) partiküller eklenmiştir. Daha sonra numunelere sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Son olarak, farklı miktarlarda SiC'nin Al-Mg₂Si insitu kompozitinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kompozitin mikro yapı özellikleri, optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, SiC parçacıklarının Al-Mg₂Si matrisinde iyi bir dağılıma sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Sertlik, referans kompozit için 110 HB' den ağırlıkça %9 SiC içeren kompozit için 135 HB değerine yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Al-Mg₂Si kompozitinin akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla 90 ve 160 MPa ölçülmüştür. Al-Mg₂Si kompozitine %9 SiC ilave edildiğinde akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla 125 ve 260 MPa'ya yükselmiştir.

Singh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada[104], toz metalurjisi ile üretilen 2024-SiC-Gr hibrit kompozitinde Gr oranı arttıkça sertlik önce artmış sonra azalmıştır. Aşınma direncini ise arttırmıştır. Optimum koşullar altında Gr parçacıklarının varlığının aşınma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ortaya çıkarmışlardır. Bu fenomen, Gr parçacıklarının kendi kendini yağlayan bileşen olarak hareket etmesi ve karşı yüzeye bulaşması, böylece aşınma oranını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Moktar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada[44], insitu ve exsitu takviye elemanları ile karıştırmalı döküm yöntemi ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Takviye ağırlık oranı arttıkça da sertlik değerinin düştüğünü gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada en iyi sertlik değeri 82.5 HV değeri elde edilmiştir. Exsitu olmadan (SiC'süz) sadece insitu ile (Mg₂Si) daha iyi mekanik (sertlik ve aşınma dayanımı) sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.1’de literatürde bulunan Al matrisli hibrit kompozitlerin üretim yöntemleri ve kullanılan takviye türleri verilmektedir. En yüksek sertliğe sahip (225 HB) kompozit numunesinde, yüksek entropili alaşım tozu ve SiC partikülü takviye elemanı olarak kullanılarak sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilmiştir.

Tablo 3. 1 Literatürdeki hibrit takviyeli Al matrisli kompozitler [105]

Matris	Hibrit Takviye (%)	Üretim Yöntemi
AA6061	13Al ₂ O ₃ _{kısa} fiber+7Al ₂ O _{3p}	Sıkıştırılmalı döküm
AA7075	50SiC _p +5Cr _p	Sıkıştırılmalı döküm
AA7075	40SiC _p +5Ti _p	Sıkıştırılmalı döküm
A356	Al ₂ O _{3p} +Al ₃ Zr _p	Manyetokimya (insitu)
AA7075	5YEA _{toz} +40SiC _p	Sıkıştırılmalı döküm
AA5083	Al ₂ O _{3p} +Gr _p	Sürtünmeli karıştırılmalı döküm

4.1. Malzeme Seçimi

Bu çalışmada A356, A380 ve A413 alüminyum alaşımları matris olarak kullanılmış, dışarıdan (exsitu) takviye malzemesi olarak SiC tozu, içeride (insitu) Mg₂Si takviye malzemesi oluşturmak için de AM50 magnezyum alaşımı kullanılarak hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. AM50 ağırlık oranları ve matris elemanları ile farklı kombinasyonlar denenmiştir. Üretilen numunelerin listesi ve numune kodları Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

Tablo 4. 1 Üretilen Hibrit Kompozitlerin Numune Kodları

Matris	İnsitu Takviye Ağırlık Oranı	Numune Kodu
A356	%0 AM50	356-0 (356-R)
	%5 AM50	356-5
	%10 AM50	356-10
	%15 AM50	356-15
A380	%0 AM50	380-0 (380-R)
	%5 AM50	380-5
	%10 AM50	380-10
	%15 AM50	380-15
413	%0 AM50	413-0 (413-R)
	%5 AM50	413-5
	%10 AM50	413-10
	%15 AM50	413-15

Matris ve takviye elemanı olarak kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları optik emisyon cihazından (Hilger Analytical) alınmıştır. Kompozisyon verileri Tablo 4.2 ve 4.3’te gösterilmektedir.

Kullanılan SiC tozunun ortalama tane boyutu 89,5 µm’dur. Takviye malzemesi olarak SiC seramik partikülünün seçilme nedenleri;

- SiC düşük ısı genleşme katsayısı, iyi ısı iletimi, iyi aşınma dayanımı ve yüksek sertlik özelliklerine sahip olması ve,
- Matris malzemesi olan alüminyum ve SiC kombinasyonu sayesinde kompozit üretimi sırasındaki sorunların azalmasıdır.

AM50 alaşımı insitu olarak yapıda takviye oluşturmak için matrise ilave edilmiştir. Matris malzemesi olarak alüminyum döküm alaşımları kullanılmaktadır ve alaşım içerisinde silisyum oranı fazladır. Insitu yönteminde ergiyik yapısına ilave edilen magnezyum alaşımı silisyum elementi katılma sırasında reaksiyona girerek, yapıda Mg_2Si fazını oluşturur. Mg_2Si fazının oluşumu matristeki silisyum elementi magnezyuma difüze olması ile bileşik oluşturmaktadır. Ergiyik alaşımına ilave edilen magnezyumun ağırlık oranı arttıkça Mg_2Si fazının oluşumu artmıştır. Katılma sırasında ilk oluşan primer Mg_2Si fazı sonrasında sıcaklığın düşmesi ile silisyum ötektğine benzer iğnems formda Mg_2Si ötektik fazı çekirdeklenip büyümektedir. Primer Mg_2Si fazı daha büyük tane boyutuna polihedral forma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu faz içerisinde oluşan bir takviye görevi görür ayrıca sıvı alüminyum içinde artan Mg oranı vizkoziteyi artırmış ve ıslatılabilirliği yükseltmiştir.

Hibrit kompozit üretimi için preform üretiminde SiC seramik partikülünün ağırlık oranı sabit tutulmuştur. AM50 alaşımının ağırlık oranı farklı kombinasyonlarda yapıya ilave edilmiştir.

Tablo 4. 2 Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal analizi

Alaşı m	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb	Ti	Al
A356	7,2	0,14	0,01	0,02	0,35	0,008	-	0,123	Kalan
A380	8,62	0,82	3,09	0,22	0,28	0,9			Kalan
413	12,20	0,361	0,18	-	0,001	0,002	0,14	0,016	Kalan

Tablo 4. 3 Takviye malzemesi olarak kullanılan magnezyum AM50 alaşımının kimyasal analizi

Alaşı m	Si	Fe	Cu	Mn	Al	Zn	Pb	Ti	Mg
AM50	0,1	0,004	0,01	0,3	4,9	0,2	-	-	Kalan

4.2. Kompozit Üretimi

4.2.1. Preform Üretimi

Preform üretim aşamasına bağlayıcı olarak koloidal silika (KS) ve polivinil alkol (PVA) kullanılmıştır. İki adet bağlayıcı kullanılmasının temel nedeni; PVA'nın KS'ye göre daha düşük sıcaklıkta uçuculuk özelliği göstermesidir. PVA uçuculuk özelliği göstermesi

sonucunda preformda gözeneklilik oluşturmaktadır. KS yüksek sıcaklıklarda preform yapısında bağlayıcı özelliği göstermesi nedeni ile kullanılmıştır.

100 ml saf su içerisinde %20 oranında PVA kademeli olarak ilave edilerek manyetik karıştırıcı ile çözündürülmüştür. Sol-gel prosesi olan bu aşamadan sonra elde edilen jel kıvamındaki PVA-su karışımının içerisinde 40 g SiC takviye tozu ve 10 ml KS eklenmiş, mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Üretilen seramik çamur, istenilen preform boyutundaki boşluklara sahip silikon kalıp içerisinde dökülmüş ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilip kurutulmuştur. Deneyde kullanılan silikon kalıbın görseli ve preformun görseli Şekil 4.1’te gösterilmektedir. 24 saat bekletilen preformun hasarsız kalıptan çıkarılması için esnek silikon kalıp kullanılmıştır. Preformun yapısındaki PVA’nın uzaklaştırılması ve mukavemetinin kazanması için 1000°C’de 3 saat bekletilerek sinterleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 4. 1 Silikon kalıp ve preform

4.2.2. Kalıp Üretimi

Kalıp malzemesi olarak ticari bir alçı bağlı dereceli hassas döküm kalıp tozu kullanılmıştır. Alçı çamuru için ağırlıkça %40 oranında olacak şekilde 550 g hassas döküm tozu ve 220 ml saf su kullanılmıştır [3]. Hazırlanan alçı çamuru mekanik karıştırma uygulanmıştır. Karıştırma prosesi 3 dakika devam etmiştir.

Hassas dökümle kompozit malzeme üretilmesi için model boşluğu gereklidir. Model boşluğu için mum model oluşturulmuştur. Mum model 20 mm çapı 70 mm boy ölçülerine sahiptir. Hazırlanan mum model silikon altlığı sabitlenmiştir. Delikli derecenin de etrafı bant ile kapatılarak silikon altlığı oturtulmuştur. Titreşim altında hazırlanan alçı çamuru mum modelin üzerinden delikli dereceye dökülmekte ve titreşim sayesinde alçı çamurunda oluşacak hava kabarcıkları giderilmiştir. Alçı kalıbın katılması beklendikten sonra delikli derece etrafındaki bantlar sökülerek mum giderme işlemi

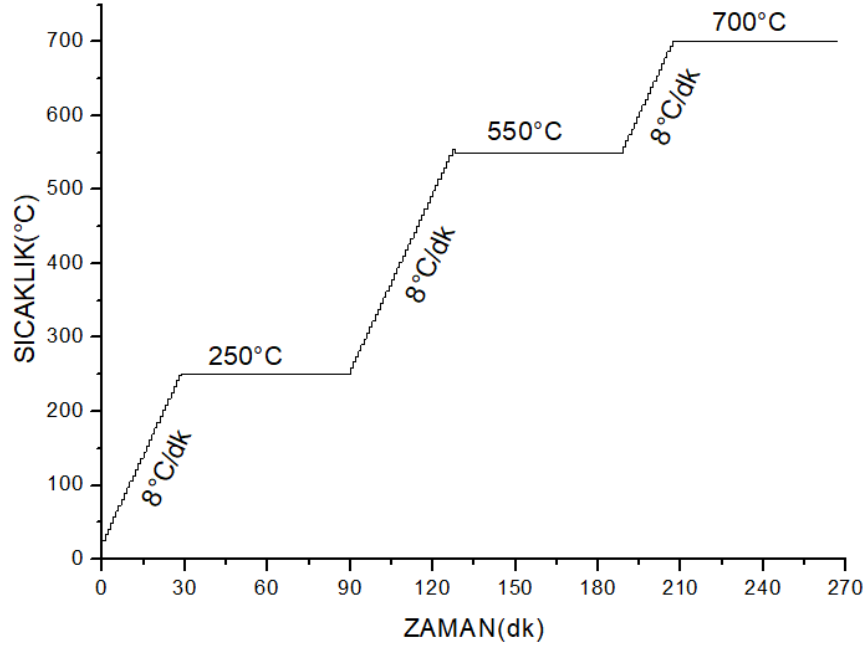
yapılmıştır, bkz. Şekil 4.2. Mum giderme işlemi etüv 'de 100°C'de 1 saat bekletilerek gerçekleştirilmiş ve kalıp boşluğu elde edilmiştir.



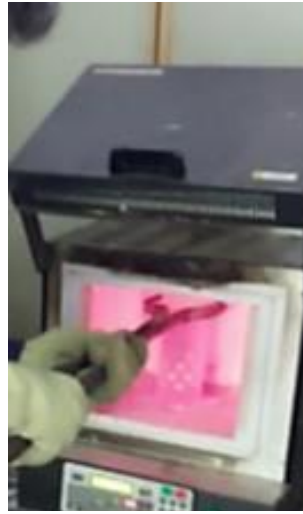
Şekil 4. 2 Alçı kalıp

Alçı kalıp içerisine ergiyik metal dökülmeden önce, kalıp kademeli olarak ısıtılmıştır. Kalıbın kademeli olarak ısıtılma sebebi, kalıbın ergiyik metalle karşılaştığı anda çatlamasını ve kırılmasını engellenmiştir. Alçı kalıbın ısı iletim katsayısı düşük olduğu için ergiyik metali kalıbın iç yüzeyine ilk temas ettiğinde, kalıbın dış yüzeyi ve iç yüzeyinin sıcaklıkları eşit olmamaktadır. Kademeli ısıtma ile kalıbın iç yüzey ve dış yüzey sıcaklıkları dengelenmiştir.

Kalıbın kademeli olarak ısıtılması esnasında kalıp içerisine SiC preformlar da eklenmiştir. Bu sayede döküm işlemine ön hazırlık yapılmıştır. Şekil 4.3'te, alçı kalıbın kademeli olarak hangi sıcaklıklarda bekletilerek ısıtıldığı (kalıp pişirme rejimi) grafikte gösterilmektedir. Şekil 4.4'te alçı kalıbın kademeli olarak ısıtılmasında kullanılan fırının resmi gösterilmektedir. Grafikte de belirtildiği gibi 250°C, 550°C ve 700 °C sıcaklık değerlerinde 1'er saat beklenir ve bu sıcaklık değerleri önemlidir. Kalıp malzemesinin silika içeriğinin polimorfik dönüşümleri sonucu gerçekleşen genleşmelerin kalıbı çatlatmaması için basamaklı bir ısıtma yapılmıştır.



Şekil 4. 3 Alçı kalıp pişirme rejimi [3]



Şekil 4. 4 Alçı kalıp pişirme

4.2.3 Vakum İnfiltasyon Döküm

Alüminyum alaşımı 750°C'de (10°C/dk. artışı ile) ergitilmiştir. AM50 alaşımı 200 °C'de ön ısıtılarak dökümün yaklaşık 10 dakika öncesinde ergiyiğe ilave edilmiştir. Şekil 4.5'te ergiyik yapısına ilave edilen AM50 alaşımının mikroyapıda gerçekleştirmiş olduğu

kimyasal reaksiyonlar faz diyagramında gösterilmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda yapıda alfa-alüminyum fazının yanında Mg_2Si fazı da oluşmaktadır.

Şekil 4.5'te Al-Mg-Si elementlerinin üçlü faz diyagramı görülmektedir. Bu faz diyagramında Silisyum elementi %9,4 olarak sabit alınarak hazırlanmıştır.

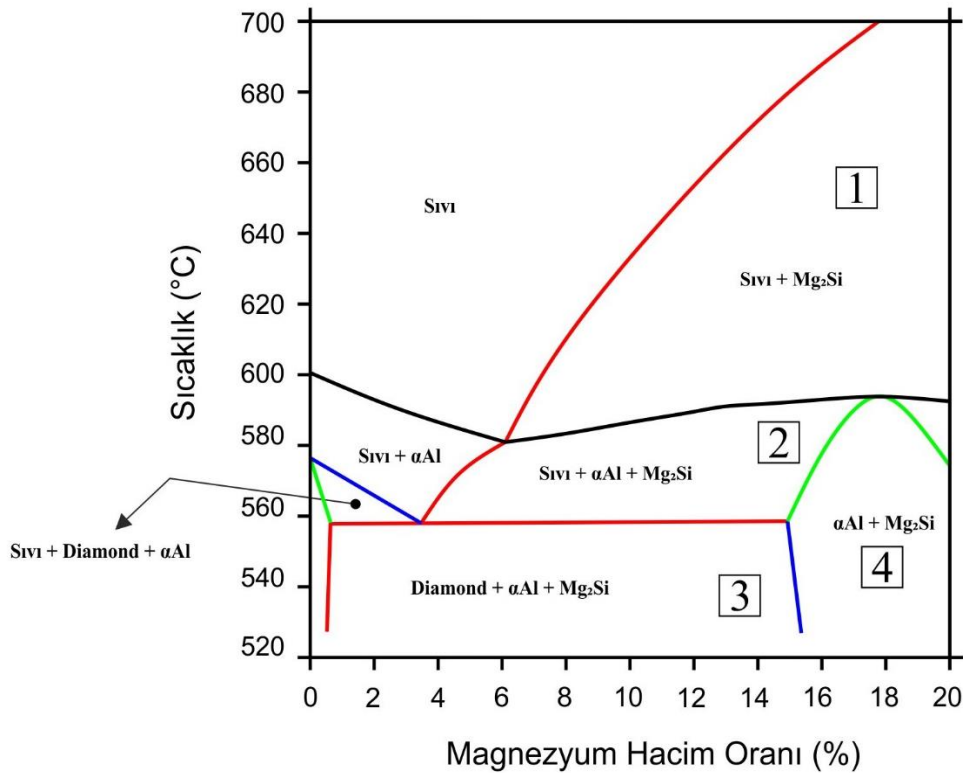
Bu faz diyagramında da görüldüğü üzere faz oluşum 4 farklı bölgeye ayrılmaktadır. 1.bölgede Mg_2Si fazı çekirdeklenip büyümektedir.

2.bölgede Mg_2Si ötektik fazı çekirdeklenip büyümektedir.

3.bölgede Si içeriği, Mg_2Si oluşumu için olan stokiyometri oranından daha fazla olduğundan, kompozisyondaki ekstra Si içeriği ötektik Si fazını oluşturur.

4.bölgede Mg ve Si arasındaki eşit stokiyometri oranında, katılma Al- Mg_2Si ikili ötektik oluşumu ile tamamlanır [80].

%10 Mg içeriğine sahip kompozisyonda, faz diyagramında dikey düz çizgi çekildiğinde yaklaşık 620-640 °C' de aralığında Mg_2Si fazı çekirdeklenmeye başlamıştır.

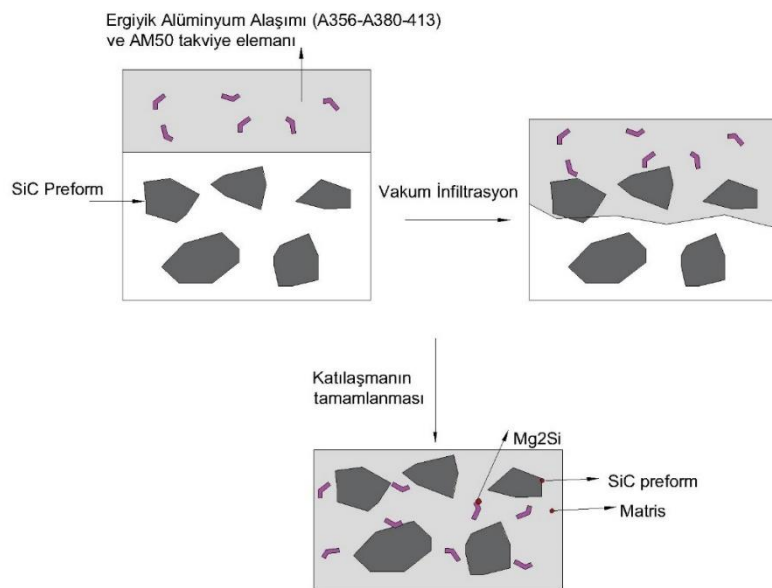


Şekil 4. 5 Al-Mg-Si üçlü faz diyagramının silisyum oranı %9,4 sabit kalacak şekilde ikili faz diyagramına dönüşümü [80]

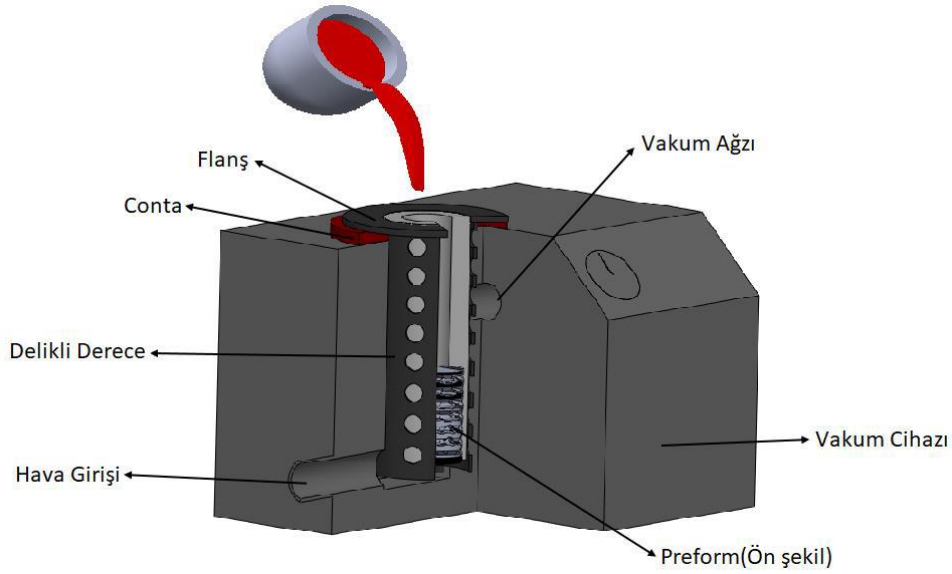
Preform ve alçı kalıp hazırlama aşamaları gerçekleştirilmesi ile vakum infiltrasyon döküm aşamasına geçilmektedir. Vakum destekli infiltrasyon dökümde negatif basınç uygulanmıştır. Negatif basınç değeri olarak 10^5 Pa uygulanmıştır. Böylelikle delikli dereceden geçen negatif basınç ile preformdaki gözeneklere ergiyik infiltre olmuştur. İnfiltrasyonun sağlanması için 20 dakika vakumda bekletilmiştir. Deney esnasındaki vakum destekli hassas dökümün gerçek resmi Şekil 4.6’da gösterilmektedir. İnfiltrasyon sırasında mikroyapıdaki değişimler Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Vakum infiltrasyon cihazının şematik görünümü ise Şekil 4.8’da verilmektedir.



Şekil 4. 6 Vakum infiltrasyon yöntemi ile hassas döküm



Şekil 4. 7 Sıvı metalin infiltrasyon mekanizması



Şekil 4. 8 Vakum infiltrasyon cihazının şematik görünümü [3]

4.3. Karakterizasyon

Hibrit kompozitlerin döküm işlemleri gerçekleştirildikten sonra sertlik ve aşınma testleri için numunelere monteleme işlemi yapılmıştır. Monteli numuneler 180, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 meshlerine sahip SiC seramik partiküllü aşındırıcı zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Kaba ve ince olarak iki aşamada parlatma işlemleri yapılmıştır. Kaba parlatma işlemi için 6 µm elmas solüsyon, ince parlatma için 1 µm elmas solüsyon ile numunelerin parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yüzeyleri hazırlanan hibrit kompozitleri sırası ile mikroyapı görüntüleri alma, sertlik ve aşınma analizi uygulanmıştır.

4.3.1 Mikroyapı İncelemeleri

Numunelerin yüzeyleri zımparalama, parlatma dağlama işlemleri ile hazırlanan numuneler optik mikroskop (OM, Nikon eclipse MA100) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU3500) kullanılarak numunelerin farklı büyütmelemlerle (50X, 100X ,200X, 500X) mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. SEM cihazında mikroyapı görüntüsü elde ederken eş zamanlı olarak EDS analizi ile numunedeki elementel dağılım da belirlenmiştir.

4.3.2 Brinell Sertlik Ölçümü

Hibrit kompozitlere batıcı uç olarak 2,5 mm çapında çelik bilye ve 62,5 kg yük uygulanarak sertlik ölçümleri (Bulut makine BMS 200-RBOV cihazında) alınmıştır. Her bir numune için 3 adet sertlik sonuçları alınıp aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

Malzeme yüzeyinde oluşan 3 adet iz çapı ölçülerek denklem 4.1 kullanılarak sertlik sonuçları elde edilmiştir.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4.1)$$

4.3.3 Aşınma Testi

Her numune için aşınma analizi kuru koşullarda ball-on-disc ekipmanları ve alümina topu kullanılarak (Turkyus tribometre) cihazında gerçekleştirilmiştir. ASTM G99-17 standardında belirtilen hesaplama göre (bkz. Denklem 4.2) hacim kaybı hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan hacim kaybından aşınma oranına geçiş yapmak için Denklem 4.3 kullanılmıştır.

$$V = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \quad (4.2)$$

V: Hacim kaybı

R: Aşınma iz yarıçapı

r: Test düzeneğinde kullanılan aşındırıcının yarıçapı

d: Aşınma iz genişliği

$$W_R = V / (L * P) \quad (4.3)$$

W_R : Aşınma Oranı

L: Kayma mesafesini

P: Yük

Tablo 4.4'te aşınma analizi için kullanılmış olan deney parametreleri gösterilmektedir.

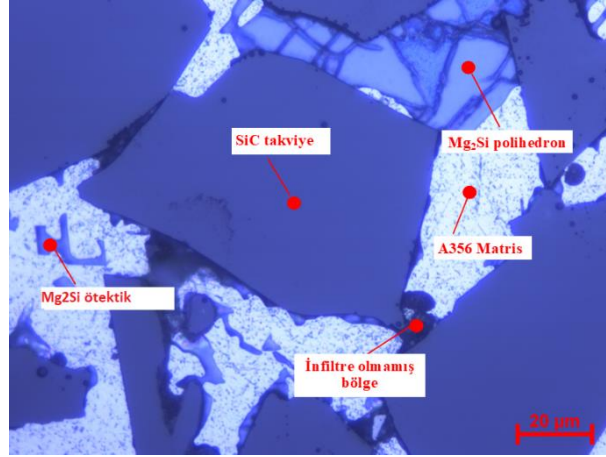
Tablo 4. 4 Aşınma analizi deney parametreleri

Kayma Mesafesi (m)	150
Aşındırıcı Bilye Çapı (r) (mm)	6
Uygulanan Yük (P) (N)	10
Hız (m/s)	0,1

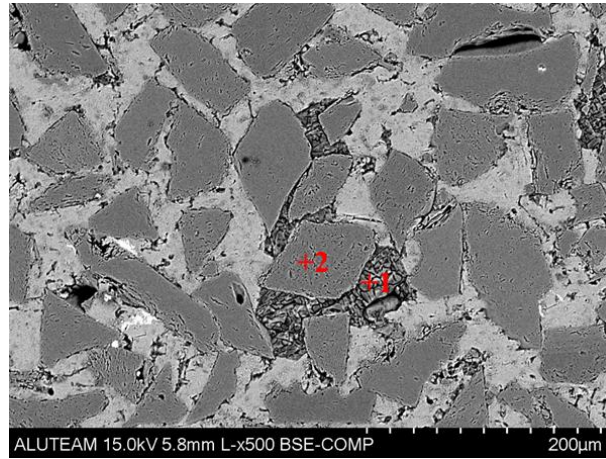
Aşınma analizi sonrası numunelere SEM görüntüleri, EDS ve yüzey pürüzlülük profil grafikleri oluşturularak yorumlanmaktadır.

5.1. Mikroyapıların İncelenmesi

Şekil 5. 1 ve 5.2’de 356-15 numune kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. 1 356-15 kodlu numunenin OM görüntüsü



Şekil 5. 2 356-15 kodlu numunenin SEM görüntüsü

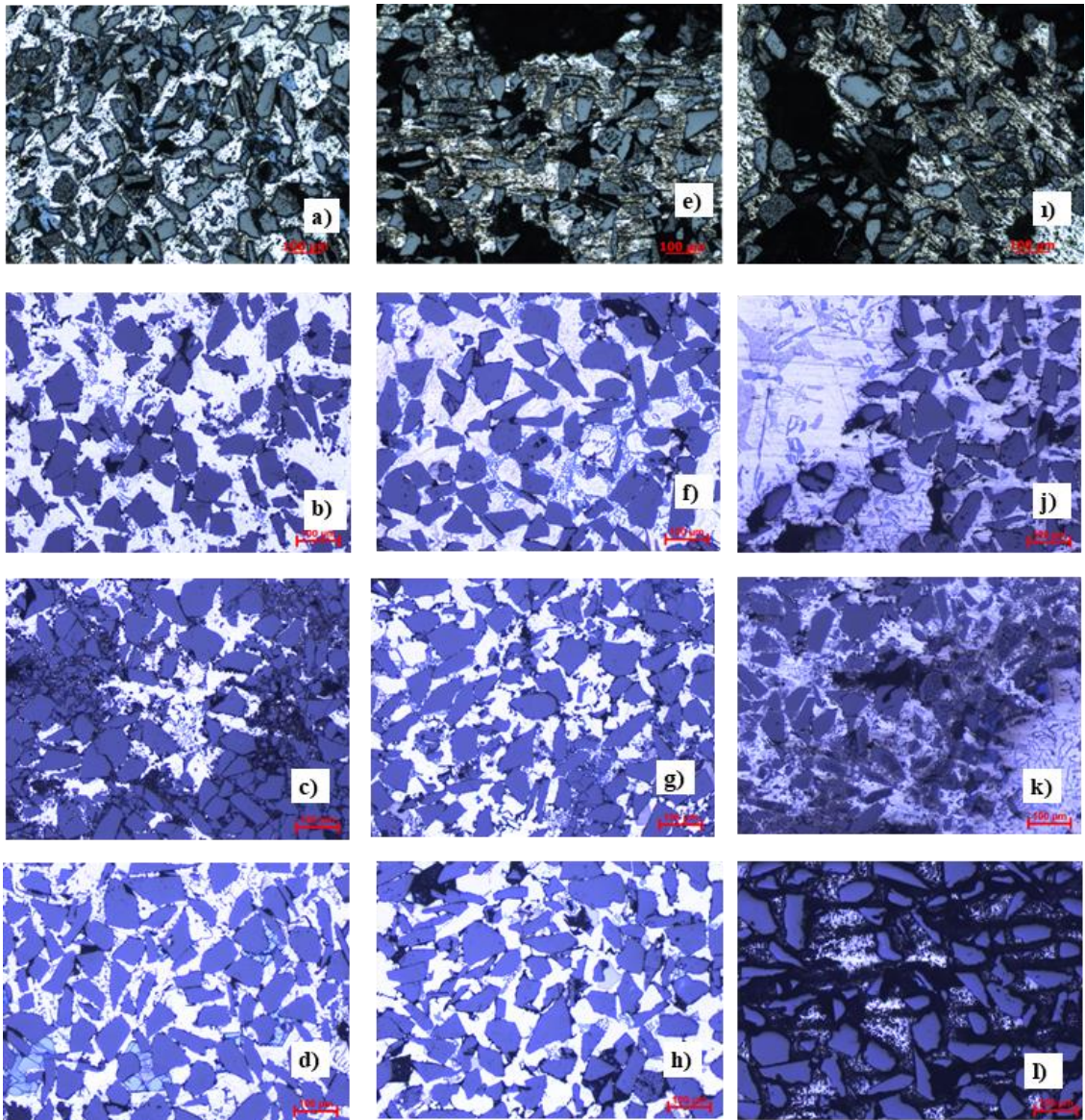
Şekil 5.2’de SEM görüntüsü verilmekte olan 356-15 kodlu numunenin noktasal EDS verileri Tablo 5.1’de verilmektedir. Yapılan analiz sonucunda yapıda başarılı bir şekilde

insitu takviyesiyle Mg_2Si fazının oluştuğunu, exsitu yöntemiyle de oksitlenmiş SiC takviyelerine metal infiltre olduğunu söyleyebilmekteyiz.

Tablo 5. 1 356-15 kodlu numunenin noktasal EDS verileri (%ağ)

EDS Bölgeleri	Mg	Si	C	O
1	53,64	46,36	-	-
2	-	33,40	7,79	58,81

Şekil 5. 3 üretilmiş hibrit kompozitlere ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



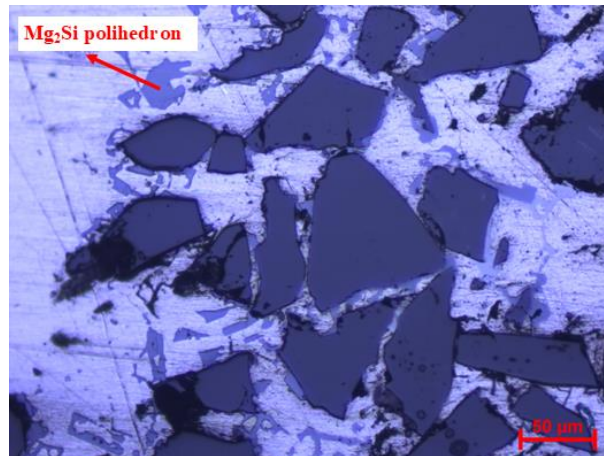
Şekil 5. 3 Üretilmiş hibrit kompozitlere ait mikroyapı görüntüleri (a) 356-R (b) 356-5 (c) 356-10 (d) 356-15 (e) 380-R (f) 380-5 (g) 380-10 (h) 380-15 (i) 413-R (j) 413-5 (k) 413-10 (l) 413-15

A356 ve A380 alaşımlarına ait üretilen tüm numunelerde infiltrasyon sorunu yaşanmamıştır. Ancak 413-15 kodlu numunede infiltre olmayan bölgeler fazlaca görülmektedir. Mikroyapılarda açık bölgeler matris, koyu mavi bölgeler exsitu SiC seramik takviye partiküllerini göstermektedir. Açık mavi olarak gösterilen bölge insitu Mg_2Si takviye malzemesidir. Matrisin, takviye elemanını yeteri kadar ıslatamaması sonucu ile siyah bölgeler oluşmaktadır. Şekil 5.1’de siyah bölgeler görülmektedir.

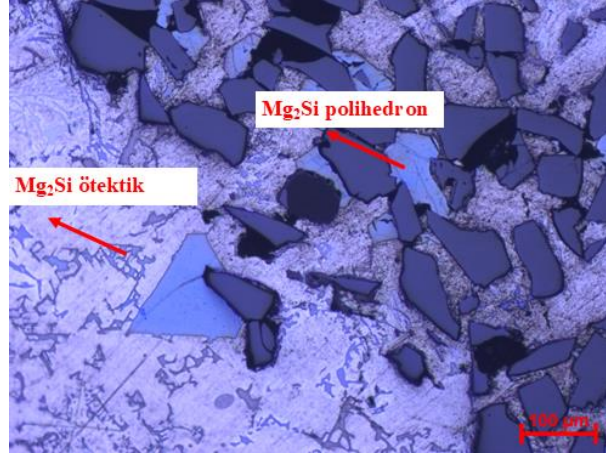
Alfa alüminyum, ötektik, SiC ve Mg_2Si fazı görülmektedir. Porozite ve döküm boşlukları mikroyapıda görülmektedir.

Tüm üretilen numunelerde SiC takviye elemanı yapıda homojen olarak dağılmıştır. A356 alaşımına insitu AM50 alaşım takviye uygulanması ile yapıda iri taneli Mg_2Si fazı oluşmaktadır. AM50 alaşımının ağırlık oranı arttıkça da yapıdaki Mg_2Si fazının tanesi irileşmeye başlamıştır ve kümeleşmiş Mg_2Si fazı görülmektedir (Şekil 5.3, d). A380 alaşımının mikroyapısı incelendiğinde ise; AM50 ağırlık oranı artsa bile 356-15 kodlu numunedeki kadar iri taneli Mg_2Si fazı tespit edilmemiştir (Şekil 5.3, h). Düşük AM50 ağırlık oranlarında Mg_2Si fazı sadece ötektik formdayken, yüksek AM50 ağırlık oranlarında ise hem birincil kristal hem de ötektik olarak görülmüştür. Birincil kristal polihedron yapısında, ötektik ise iğnesel olarak biraz Si ötektiğine benzer bir formda oluşmuştur. Referans numunelerde 356, 380 ve 413 numunelerin optik mikroyapı görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.3, a, e, ı) 356 alaşımının kompozisyonunda magnezyum elementinin fazla olması sonucu yapıda Mg_2Si fazı oluşmuştur. 380 alaşımında faz oluşma oranı azalmış ve 413 alaşımı ile üretilen referans numunesinde ise çok az Mg_2Si fazı oluşmuştur.

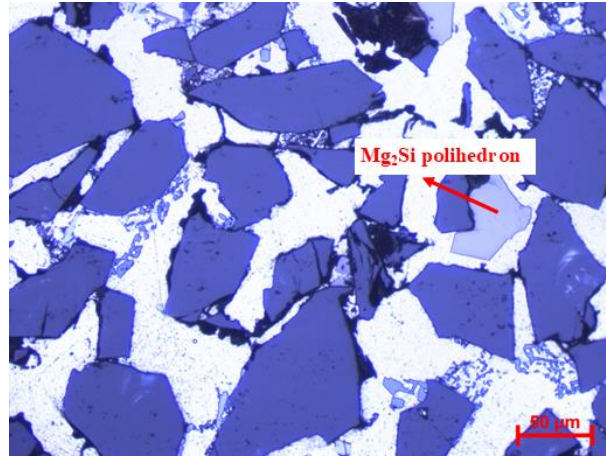
Şekil 5.4–5.6’ da numunelerin OM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. 4 413-5 kodlu numunenin OM’da görülen Mg_2Si polihedron fazı

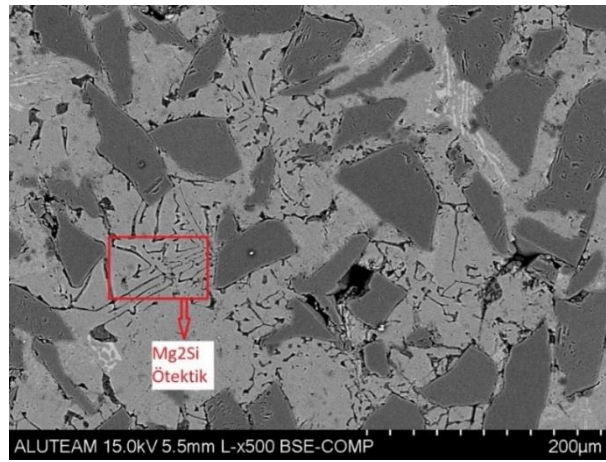


Şekil 5. 5 413-15 kodlu numunenin OM'da görülen Mg_2Si polihedronu ve ötektik fazları



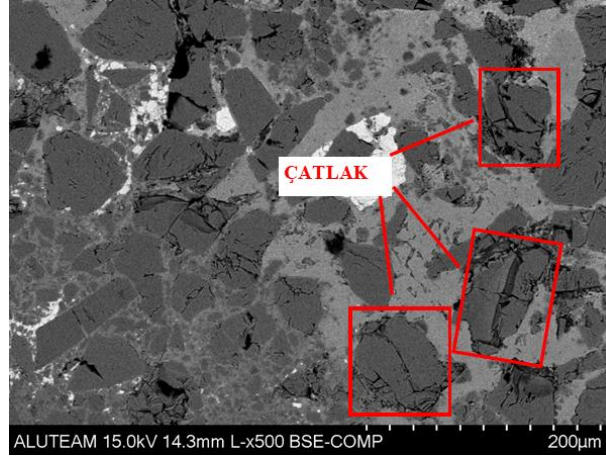
Şekil 5. 6 380-15 kodlu numunenin OM'da görülen Mg_2Si polihedron fazı

Şekil 5. 7-5.9'da numunelerin SEM mikroyapıları verilmiştir.



Şekil 5. 7 356-10 kodlu numunenin mikroyapısında oluşan Mg_2Si ötektik fazı

356-10 kodlu numunenin SEM görüntüsünde Mg_2Si ötektik fazı görülmektedir (Şekil 5.7).

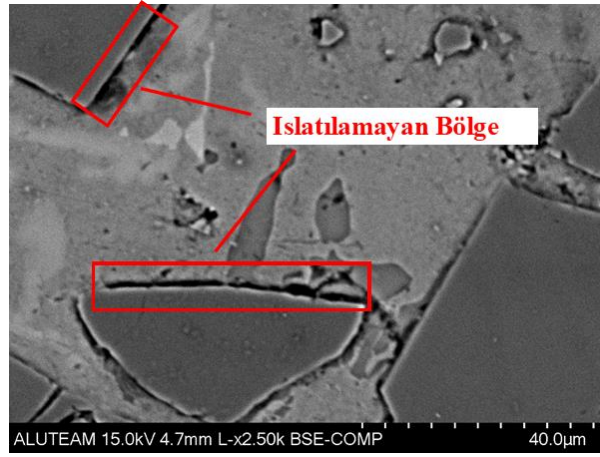


Şekil 5. 8 380-10 kodlu numune yapısında bulunan SiC takviyelerinde meydana gelen çatlaklar

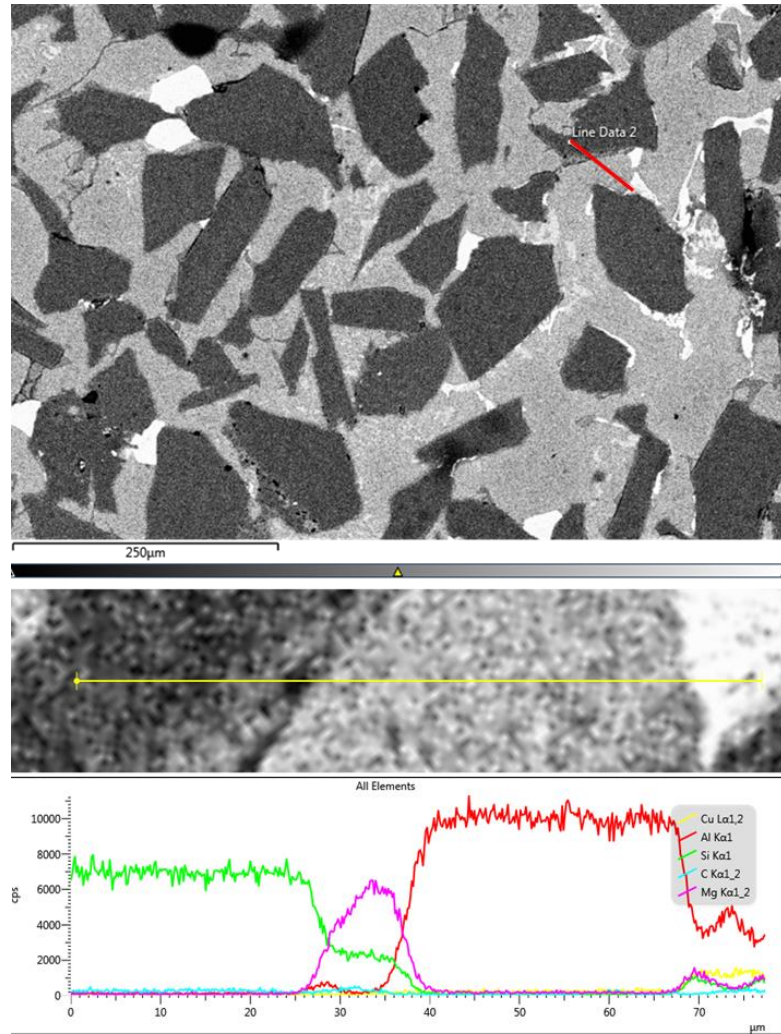
380-10 kodlu numune SiC preformunda döküm sonrası çatlama meydana gelmiştir. Bu çatlakların kalıbın döküm sonrasında suya sokulması sırasındaki hızlı soğuma sonucu oluşma ihtimali yüksektir. (Şekil 5.8).

413 alaşımı ile yapılan hibrit kompozitlerde infiltrasyon sorunu yaşanmaktadır (Şekil 5.3 (k, l)). Özellikle 413-15 kodlu hibrit kompozit numunesinde infiltrasyon sorunu oldukça fazladır. İnfiltrate olmamış bölgeler koyu siyah renkle görülmektedir. 413-15 kodlu numunede infiltrate sorunu yaşandığından ara yüzey elde edilememiştir. Bundan dolayı, numunenin sertliği 35 HB çıkmaktadır. Tüm numunelere ait sertlik sonuçları bölüm 5.2’ de verilmektedir.

413-10 kodlu numunede matris elemanı tarafından takviye elemanının ıslatılamayan bölgeler gösterilmektedir. SiC seramik partikül ile matris elemanı arasındaki ara yüzeyde koyu bir renk görülmektedir, koyu renk de sürekli bir devamı söz konusu değildir (Şekil 5.9).

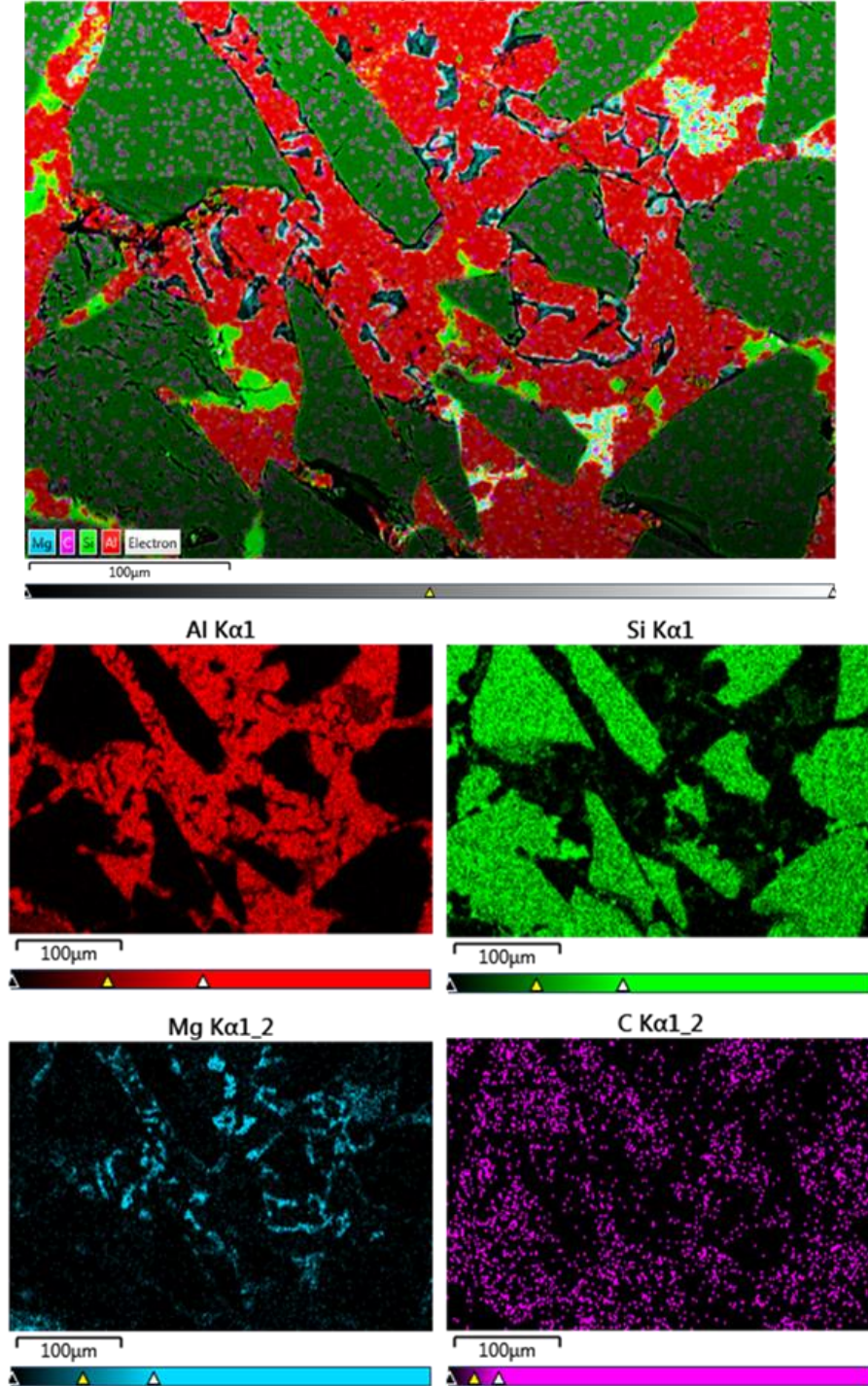


Şekil 5. 9 413-10 kodlu numunede infiltrasyon sonrası matris tarafından ıslatılamayan bölgeler



Şekil 5. 10 380-15 kodlu numuneye yapılan çizgisel EDS analizi

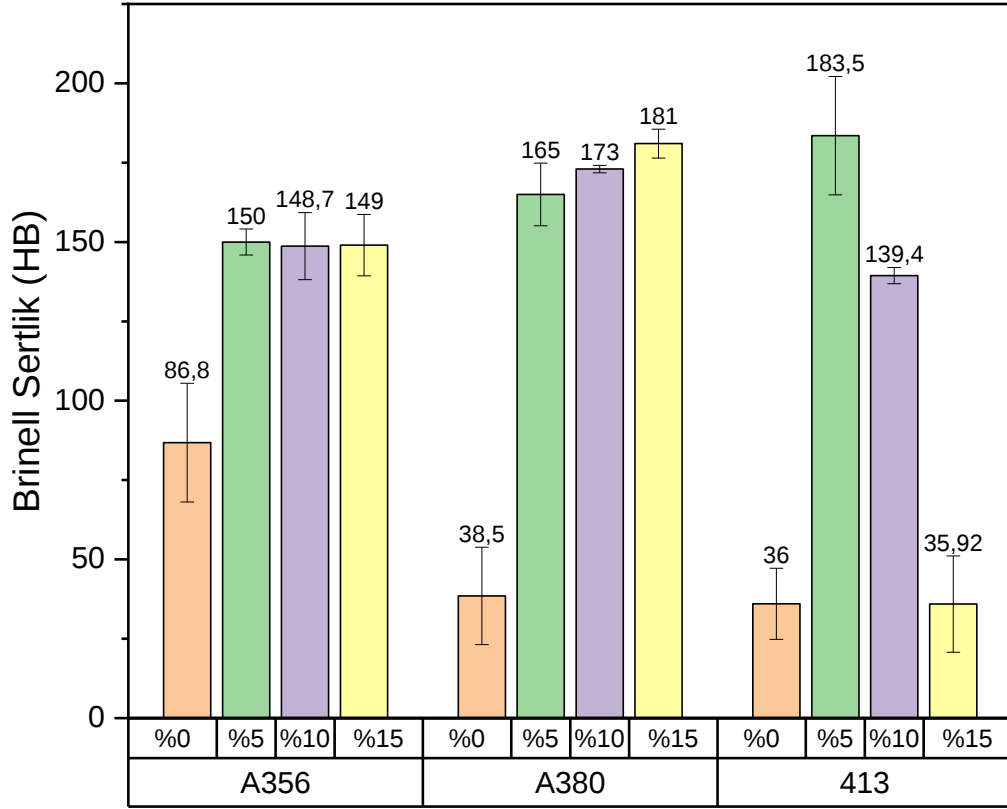
380-15 ve 413-5 kodlu numunelere ait SEM-EDS çizgisel, haritalama analiz sonuçları görülmektedir. SEM-EDS görüntülerinde matrise homojen bir biçimde dağılmış SiC takviye parçacıklarının varlığı ve Mg_2Si partikülleri açık olarak görülmektedir (Şekil 5.10, 5.11).



Şekil 5. 11 413-5 kodlu numuneye ait SEM-EDS haritalama analiz sonuçları

5.2. Sertlik Değerlerinin İncelenmesi

Şekil 5.12’de numunelerin sertlik dağılımı verilmiştir.



Şekil 5. 12 Numunelere ait Brinell Sertlik Değerleri

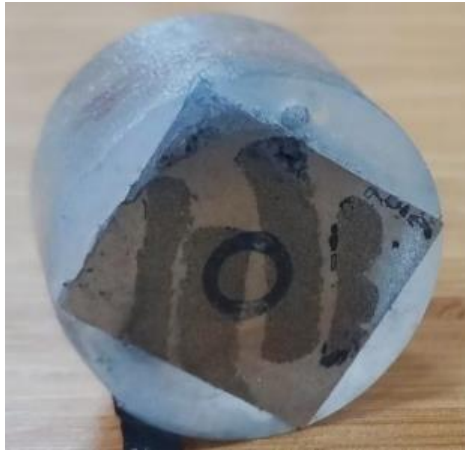
Takviyesiz kum kalıba dökümü gerçekleştirilen ısıtılmış işlemlenmiş alüminyum döküm alaşımlarının A356, A380 ve 413 sertlik değerleri sırasıyla 55, 65 ve 80 HB’dir [106]. Üretilen numunelerde takviye oranının artması ile A380 alaşımında sertlik artışı ağırlık oranının artması ile birlikte gözlemlenmiş, A356 alaşımında sertlik sabit kalmıştır. 356-10 ve 356-15 kodlu numunelerin sertlik değerlerinde takviye elemanının ağırlık oranının artmasına rağmen sertliğin sabit kalması matris ve takviye elemanı arayüzey bağının eksikliğinden kaynaklanmaktadır. 413 alaşımında ise sertlik ağırlık oranı arttıkça azalma göstermiştir. 413-15 kodlu numunenin mikroyapısı incelendiğinde infiltrasyon sorunu yaşanmıştı bu yüzden matris ve takviye elemanı arasında boşluklar oluştuğu için malzemeye gelen yükü matris takviye elemanına aktaramamaktadır. Bu yüzden sertlik değeri düşük çıkmaktadır. Takviye oranı arttıkça kompozit malzemesinin sertlik özelliğinin artması beklenmekte olmasına rağmen bu çalışmada 356 ve 413 kodlu numuneler için beklenen sertlik artışı oluşmamaktadır.

James ve arkadaşları [13], Hariharan ve arkadaşları[13] çalışmalarında da takviye ağırlık oranı artmasına rağmen sertlikte bir azalış gözlemlenmiştir.

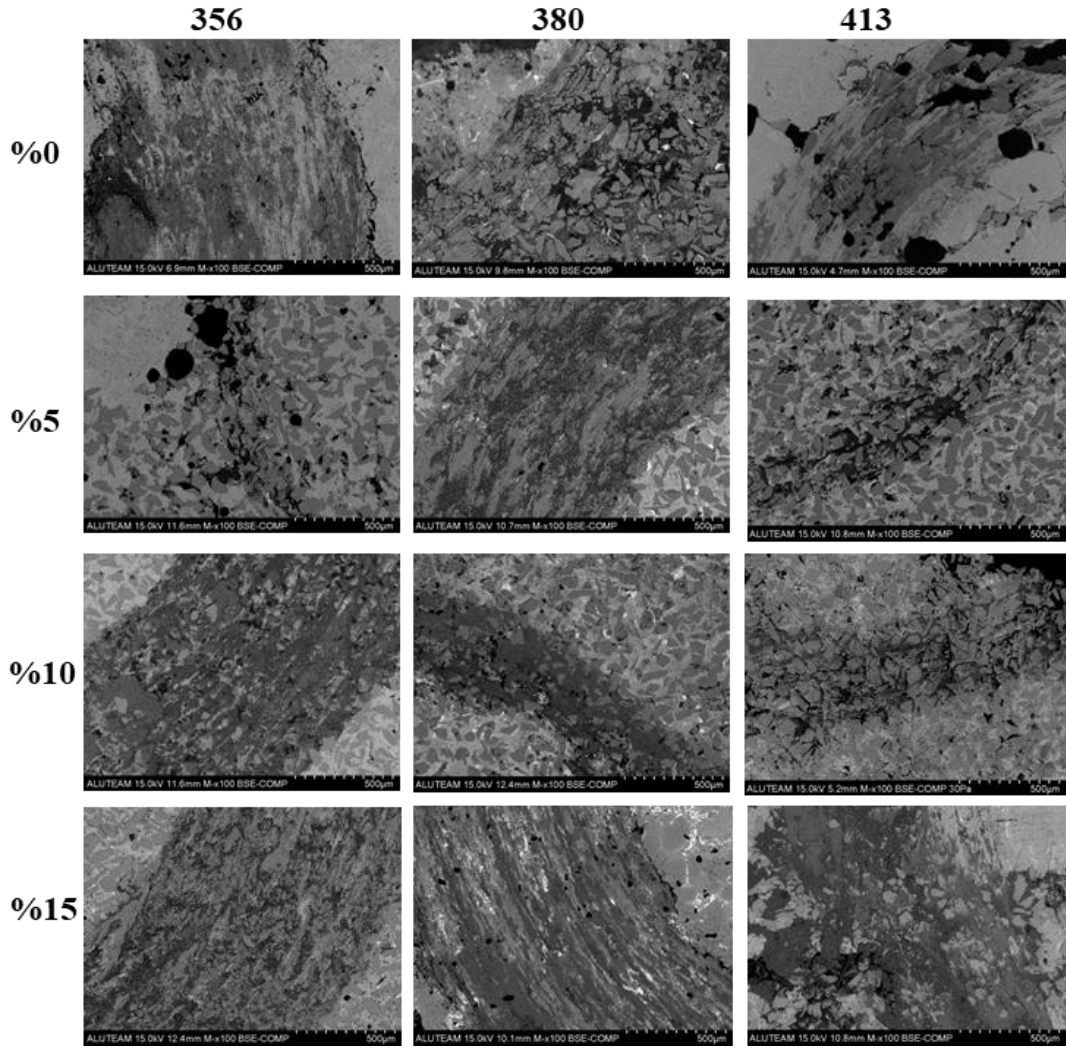
Mostafapoor ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [103] karıştırmalı döküm ile üretilen Al-Mg₂Si kompozitinde 110 HB elde edilmiştir. SiC takviyesi ile maksimum 130 HB elde edebilmişlerdir.

5.3. Aşınma Davranışının İncelenmesi

Üretilen kompozit malzemelere Al₂O₃ aşındırıcı bilye kullanılarak aşınma testi yapılmıştır. Her bir numunenin aşınma izlerine ait makroyapı ve SEM görüntüleri Şekil 5.13 ve 5.14'te verilmiştir. SEM görüntüleri üzerinden her bir numunenin aşınma izleri incelendiğinde hem adhezif hem de abrazif aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir. Uzun ve sürekli oluklar(yivler) abrazif aşınmayı temsil ederken, kraterler ise adhezif aşınmayı temsil etmektedir.



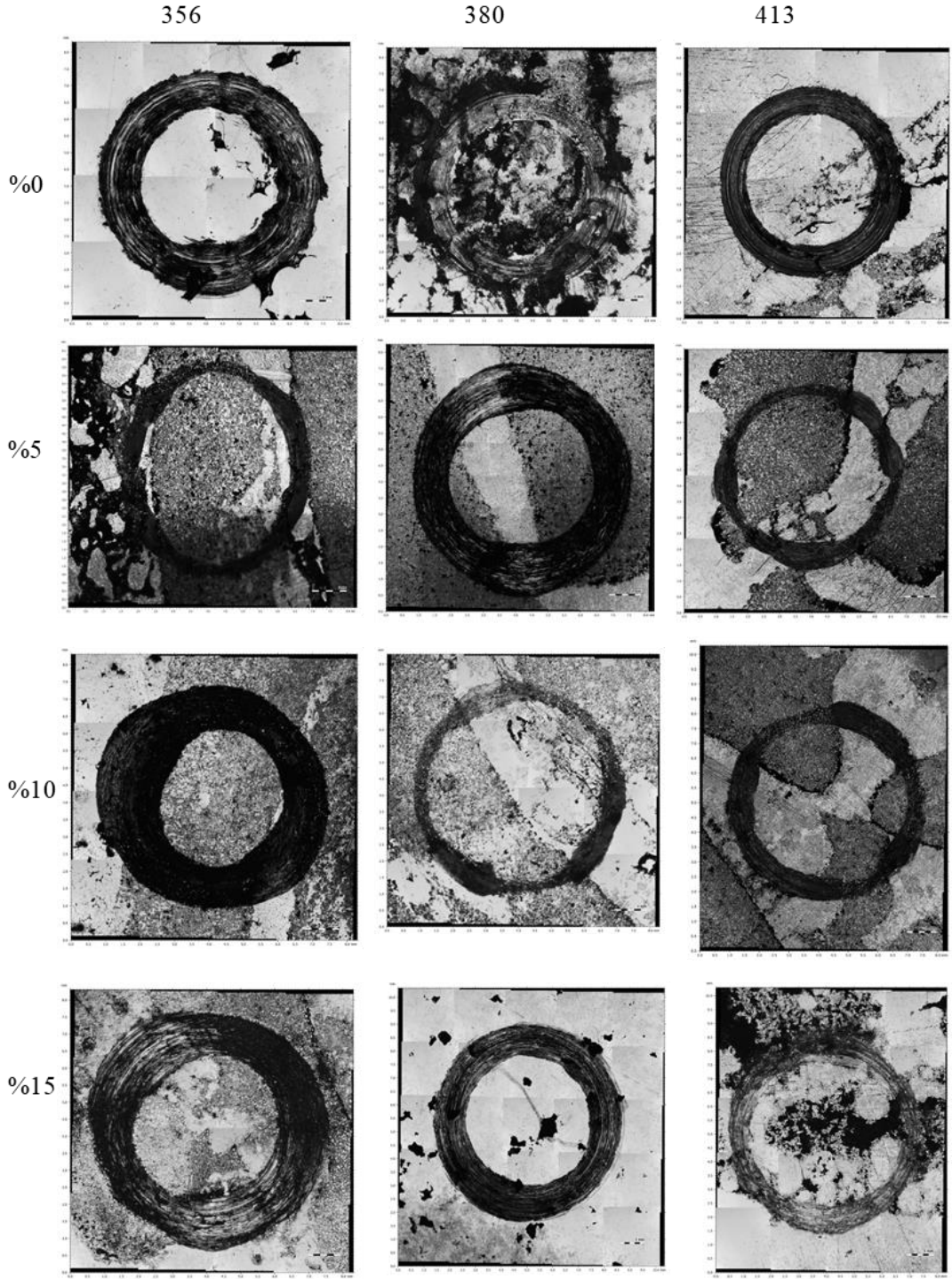
Şekil 5. 13 Kompozit numunesine aşınma testi sonucu makroyapı görüntüsü



Şekil 5. 14 Üretilen tüm numunelerin aşınma analizi sonucu SEM mikroyapı görüntüleri

356-5, 380-10, 413-5 ve 413-10 kodlu numunelerde kraterler gözlemlenmektedir. Adhezif aşınma göstermiş numunelerin yüzeylerinde aşınma iz genişlikleri diğer numunelere göre aşınma iz genişlikleri daha küçüktür.

356-10, 356-15, 380-5 ve 380-15 kodlu numunelerde ise uzun ve sürekli yivler gözlemlenmektedir. Bu numunelerde abrazif aşınma göstermiş numunelerdir. Aşınma iz genişlikleri çok daha büyüktür (Şekil 5.14).

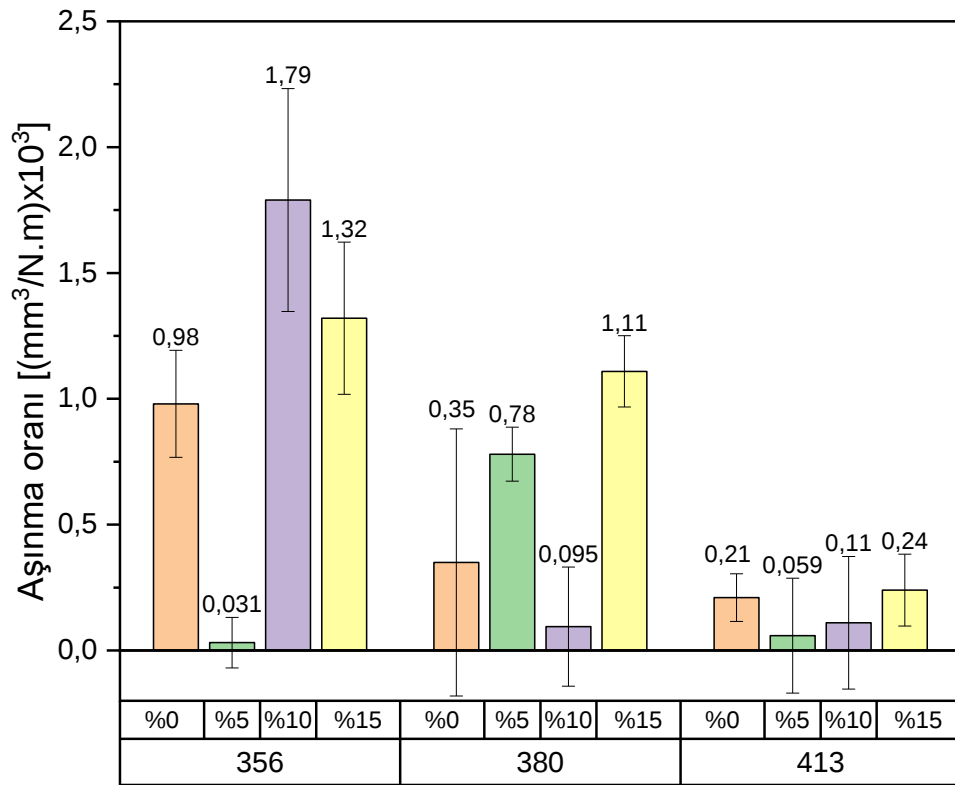


Şekil 5. 15 Üretilen tüm numunelerin aşınma analizi sonucu mikroyapı görüntüleri

Üretilen numuneler Nikon/Smartproof-5 cihazında daha küçük büyütme ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 5.15). Smartproof cihazı ile numune yüzeyindeki aşınma izi tümüyle görülebilmektedir. Üretilen tüm numunelerde aşınma iz genişlikleri matris yüzeyi üzerinden geçtiğinde kalın iken, preform yüzeyi üzerinden geçtiğinde net bir şekilde aşınma iz genişlikleri incelmektedir. Aşınma iz genişlik parametresi denklem 4.2

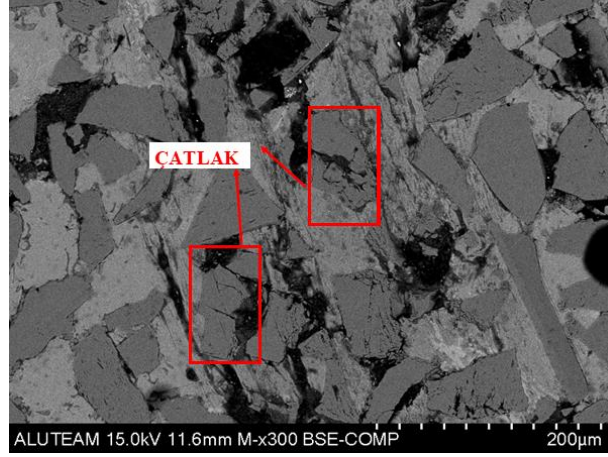
de görüldüğü üzere ağırlık kaybını etkilemektedir. Denklem 4.3'te görüldüğü üzere ağırlık kaybı da aşınma oranını etkilemektedir. Şekil 5.15'teki aşınma iz genişliklerine göre yorum yapıldığında en iyi aşınma oran değerleri 356-5, 380-10, 413-5, 413-10 kodlu numunelerde elde edileceği beklenmektedir.

Şekil 5.16'da tüm numuneler için denklem 4.3 ile hesaplanan aşınma oranları verilmektedir. Mikroyapı görüntülerinden çıkarılan hipotez aşınma oran değerleri ile de desteklenmektedir. En düşük aşınma oranına sahip 356-5 kodlu numune en iyi aşınma dayanımı göstermektedir.



Şekil 5. 16 Takviye ağırlık oranlarına göre değişen aşınma oranları

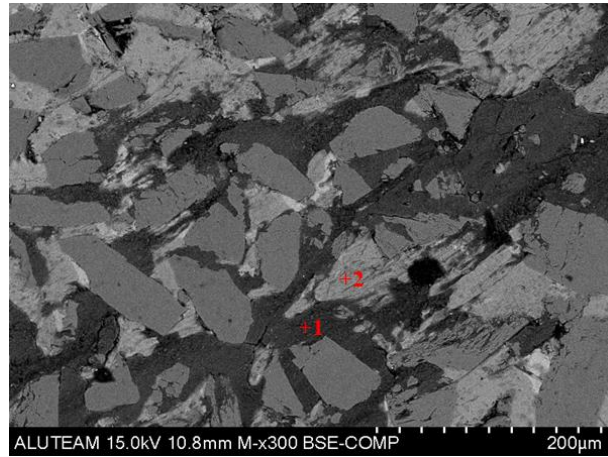
En iyi aşınma dayanımı göstermiş olan 356-5 kodlu numunenin x300 büyütmedeki mikroyapı görüntüsü Şekil 5.17' de verilmektedir.



Şekil 5. 17 356-5 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü

356-5 kodlu numune yüzeyinin incelenmesi sonucunda, matris-takviye ara yüzey bağı kuvvetli olduğu için aşınma testi sırasında uygulanan 10N yükü matris takviye elemanına iletmiş ve takviye elemanı yükü taşıyabilmektedir. Aşınma analizi sonucunda SiC takviye elemanı yük karşısında çatlama göstermiş ancak uygulanan yükü taşımaya devam etmiştir. Yüzeyde SiC partikülünden kopup aşınma analizine dahil olmuş bir partikül gözlemlenmemiştir. Aynı zamanda yüzeyde uzun ve sürekli yivler görülmediğinden adhezif aşınmaya örnektir ve numune plastik deformasyona uğramamıştır. Tüm bunların sonucunda aşınma dayanımı iyi bir numune elde edilmiştir.

Diğer iyi aşınma dayanımı göstermiş olan 413-5 kodlu numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.18’ de verilmektedir.



Şekil 5. 18 413-5 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü

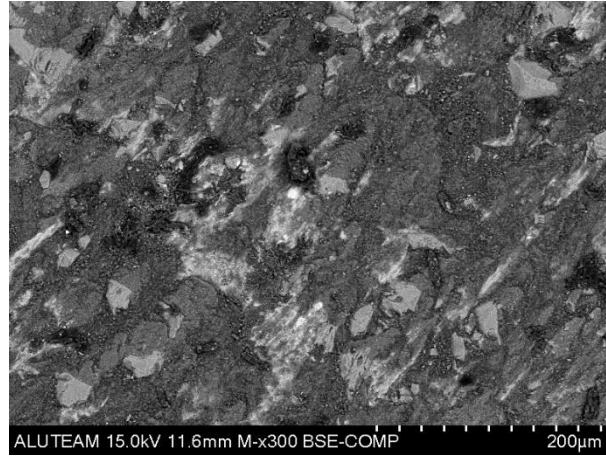
413-5 kodlu numunenin mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, yüzeyde uzun ve sürekli yivler gözlemlenmemektedir. Aşınma analizi sırasında az miktarda SiC preformundan

partiküller koparak matrisi aşındırmıştır. Numune yüzeyine noktasal EDS analizi yapıldığında (**Tablo 5.2**) 1 nolu bölgede matris alaşımı olan alüminyumun yüzeyinde, yüzeye yapışan SiC partikülüne ait elementler gözlemlenmiştir. Bu yüzden SiC partikülünün yapıdan koparak matrisi aşındırarak yüzeye gömüldüğünü ve yapıştığını söyleyebilmekteyiz. Az miktarda SiC partikülü yüzeyden koptuğu ve matris yapısına dahil olduğu için numune plastik deformasyona uğramamıştır.

Tablo 5. 2 Şekil 5.18’de belirtilen noktasal EDS verileri (%ağ)

EDS Bölgeleri	O	Al	Si	Mg	C
1	59,46	21,54	5,59	0,9	12,52
2	52,1	19,26	3,83	-	4,41

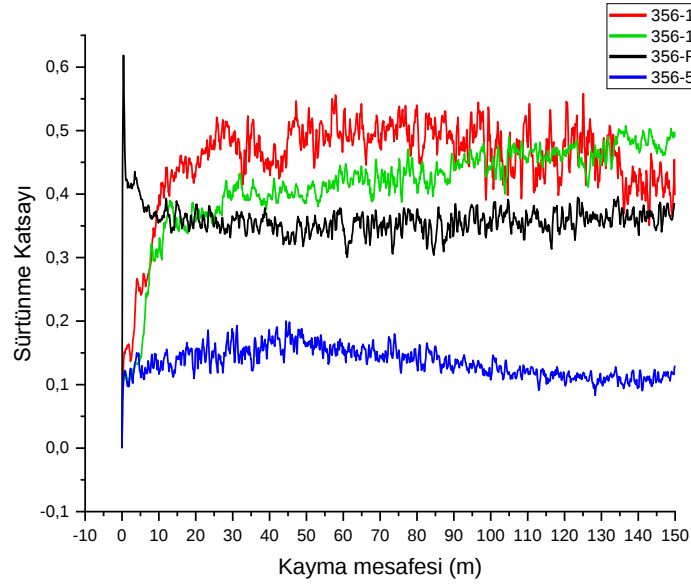
Kötü aşınma dayanımı göstermiş olan 356-10 kodlu numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.19’da verilmektedir.



Şekil 5. 19 356-10 kodlu numunenin aşınma analiz sonucu SEM görüntüsü

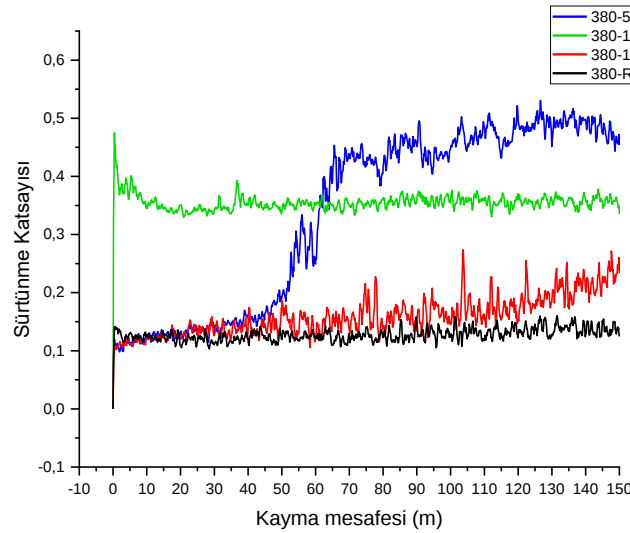
356-10 kodlu numunenin mikroyapısı incelendiğinde SiC partikülü yapıdan çok fazla kopmuş ve aşınma analizine dahil olarak numuneyi plastik deformasyona uğratmıştır. Yüzeyde uzun ve sürekli yivler gözlemlenmektedir. Partikülden kopan parçalar yerini boşluk olarak bırakmış ve boşluklar mikroyapıda siyah renkte görülmektedir. Preformdan kopan diğer partiküller matris yapısını aşındırmıştır.

Aşınma analizi süresince mesafeye bağlı sürtünme katsayısı her bir numune için cihaz tarafından hesaplanmıştır. Şekil 5.20- 5.22’ de mesafeye bağlı sürtünme katsayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 5. 20 356-R, 356-5, 356-10 ve 356-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları

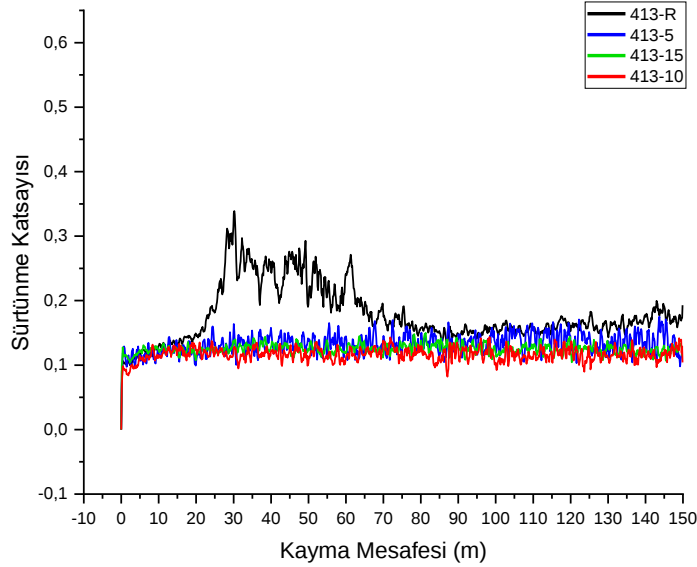
Aşınma oranı en iyi çıkan 356-5 kodlu numunenin sürtünme katsayı değeri 0,1-0,15 civarında çıkmaktadır. 356-10 ve 356-15 kodlu numunede SiC preformundan kopan partiküllerin fazla olması ile sürtünme katsayı değeri artmakta ve stabil olarak devam etmektedir.



Şekil 5. 21 380-R, 380-5, 380-10 ve 380-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları

380-R kodlu numune en az sürtünme katsayısına sahipken AM50 alaşımının yapı içerisindeki ağırlık oranı arttıkça aşınma dayanımı olumsuz yönde etkilenmektedir. En

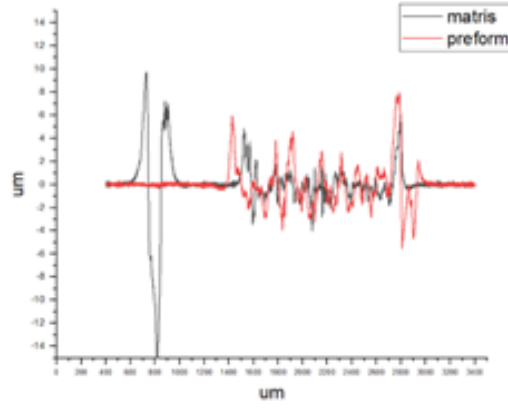
yüksek sürtünme katsayısı 380-5 kodlu numunede görülmektedir. 380-5 kodlu numunede aşınma analizi sırasında preformlu yüzeyden matris yüzeyine geçiş yaparken sürtünme katsayısında belirgin bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 5.22 413-R, 413-5, 413-10 ve 413-15 numune kodlarına ait mesafeye bağlı sürtünme katsayıları

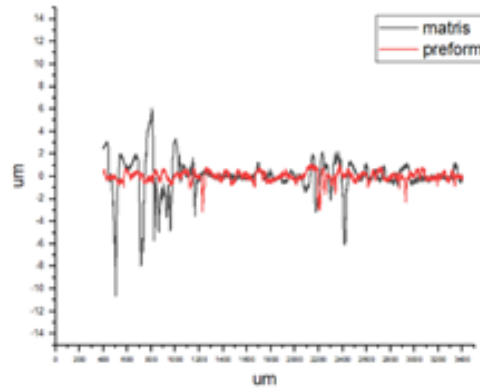
Aşınma dayanımı en yüksek kompozit numuneleri 413 alaşımına ait numunelerde gözlemlenmektedir. 413-R kodlu numunenin yüzeyinden kopan SiC partikülleri sürtünme katsayısını arttırmış ve daha sonra plastik deformasyona uğraması ile yüzeydeki yükseltileri eşitleyerek azalarak stabil duruma gelmiştir.

Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’de numunelerin yüzey pürüzlülük grafikleri verilmektedir. Yüzey pürüzlülük profil grafikleri incelendiğinde aşınma oranı düşük çıkan numunelerde düşük profil pikleri görülmektedir. 356 matrisli numunelerde preform-aşınma izi-preform bölgesinde en düşük profil piki gösteren 356-5 kodlu numunedir. 380 matrisli numunelerde en düşük profil piki gösteren 380-10 kodlu numunenin preform-aşınma izi-preform yüzeyidir. 413 matrisli numunelerde ise en düşük profil piki 413-5 kodlu numuneye aittir. 413-10 ve 413-15 kodlu numunelerde infiltre olmayan bölgelerin fazla olduğu mikroyapılarda gözlemlenmişti. Ancak 413 matrisli numunelerin aşınma dayanımlarının iyi çıkma sebebi, düşük infiltrasyon sonucu aşınacak matris miktarının azaldığı ve böylelikle aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.



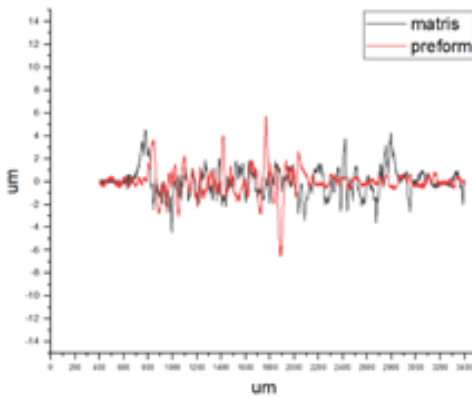
a) 356-R

Rvmax (matris) : 16,7137 um
Rvmax (preform) : 5,5307 um



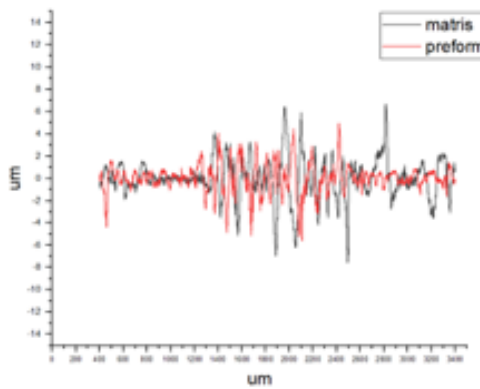
b) 356-5

Rvmax (matris) : 10,6245 um
Rvmax (preform) : 3,1247 um



c) 356-10

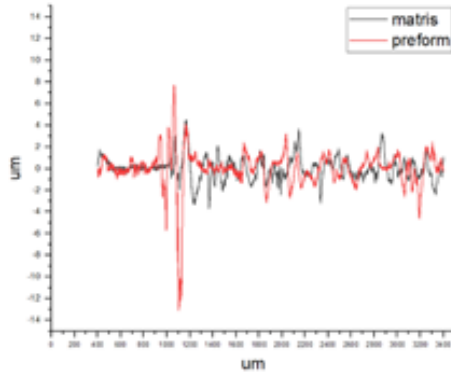
Rvmax (matris) : 4,4676 um
Rvmax (preform) : 6,5229 um



d) 356-15

Rvmax (matris) : 7,5655 um
Rvmax (preform) : 5,6101 um

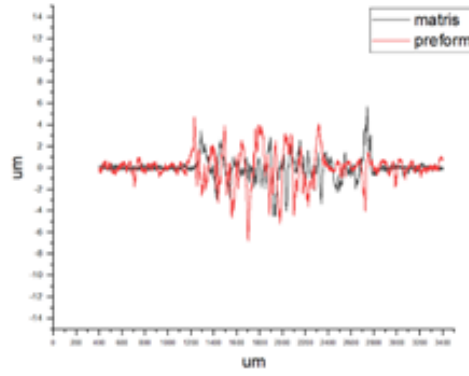
Şekil 5. 23 356 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri



a) 380-R

Rvmax (matris) : 3,7030 um

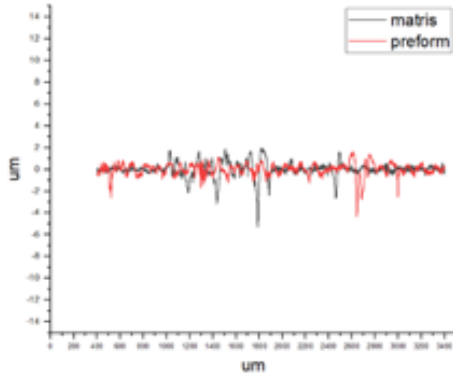
Rvmax (preform) : 13,1021 um



b) 380-5

Rvmax (matris) : 4,5241 um

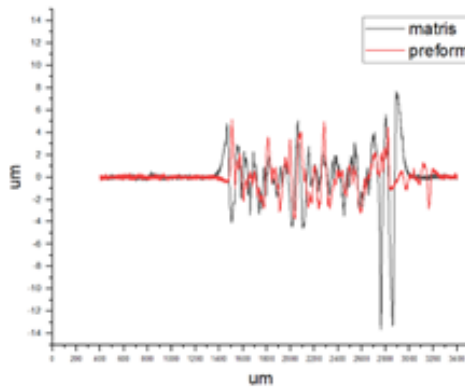
Rvmax (preform) : 6,8070 um



c) 380-10

Rvmax (matris) : 5,2924 um

Rvmax (preform) : 4,3271 um

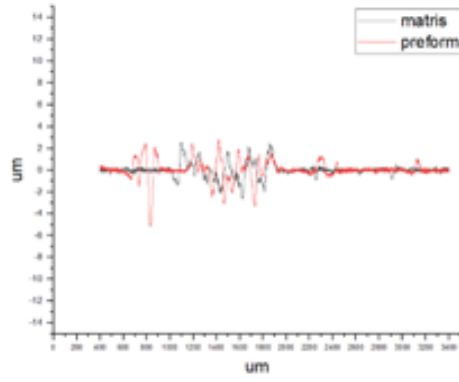


d) 380-15

Rvmax (matris) : 13,6225 um

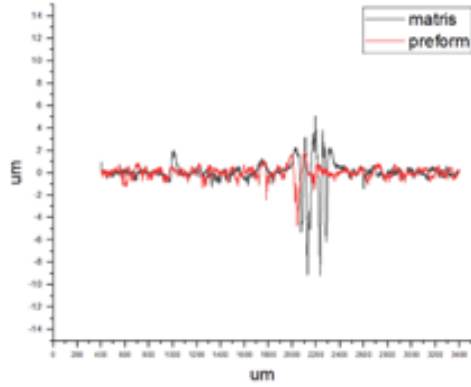
Rvmax (preform) : 3,7565 um

Şekil 5. 24 380 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri



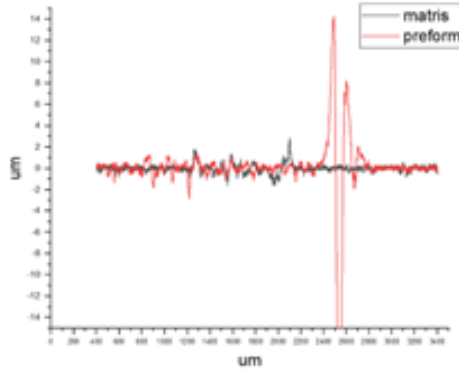
a) 413-R

Rvmax (matris) : 2,6865 um
Rvmax (preform) : 5,1689 um



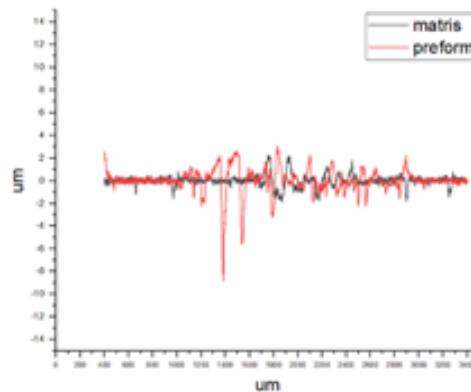
b) 413-5

Rvmax (matris) : 9,1554 um
Rvmax (preform) : 4,7209 um



c) 413-10

Rvmax (matris) : 1,6267 um
Rvmax (preform) : 32,8994 um



d) 413-15

Rvmax (matris) : 1,8432 um
Rvmax (preform) : 8,8513 um

Şekil 5. 25 413 matris alaşımı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük profil grafikleri

Hibrit kompozit, iki veya daha fazla takviye malzemesinin özelliklerinden yararlanır ve diğer kompozit malzemelerinde elde edilemeyen benzersiz fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri içerebilmektedir. Bu çalışma kapsamında ıslatılabilirliği iyileştirmek ve mekanik özellikleri iyileştirmek için; matris eleman tipi, takviye eleman tipi, ağırlık oran seçimi ve kompozit üretim yöntemi seçilip kompozit üretim gerçekleştirilmiştir.

Bu nedenle, çalışmada geleneksel alaşımlara göre daha iyi mekanik özelliklere sahip hibrit kompozitler üretilmiştir. 3 farklı döküm alaşımı, matris elemanı olarak seçilmiş ve üretilebilirlik incelenmiştir. Dökülebilirlik özellikleri iyi olduğu için A356, A380 ve 413 alaşımları tercih edilmiştir. En iyi sonuçlar A380 matrisli kompozit numunelerinde elde edilmiştir.

Çalışmada iki farklı takviye elemanı kullanılmıştır. Bunlar exsitu yöntemiyle üretim için SiC ve insitu yöntemiyle üretim için Mg_2Si ' dir. İnsitu yöntemi için kullanılan AM50 alaşımının ağırlık oran parametrelerinin optimizasyonu da çalışılmıştır. %5, %10 ve %15 ağırlık oranlarındaki kompozit malzemelerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Toplamda on iki farklı parametre çalışma kapsamında denenmiştir. Tüm parametrelere karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri, sertlik değerleri, aşınma dayanımları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Vakum destekli döküm ile üretilen tüm numunelerde (413-15 kodlu numune hariç) infiltrasyon sorunu yaşanmamıştır. Hibrit kompozit malzeme başarıyla üretilmiştir. AM50 ağırlık oranının kompozit malzemesindeki değişimi ile, Mg_2Si partiküllerinin tane boyutunda orantılı artış gözlemlenmiştir. 356-15 kodlu numunenin mikroyapısında Mg_2Si fazı polihedron formda görünmektedir.

Üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde sertlik değerleri AM50 ağırlık oranı ile orantılı bir şekilde artma veya azalma gözlemlenmemektedir. 380 matrisli numunelerde AM50 ağırlık oranının artması ile sertlik de artış gözlemlenmektedir. 356 ve 413 matrisli numunelerde AM50 ağırlık oranının artması ile sertlik de artış gözlemlenmemiştir.

Numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 413 alaşımı hariç infiltrasyon sorunu yaşanmamıştır ancak matris ve takviye elemanlarının arayüzey bağlarına göre aşınma dayanımı değişiklik göstermiştir.

1- Üretilen döküm alaşımlarının mikroyapıları; primer Mg_2Si , Mg_2Si ötektik, SiC ve $\alpha-Al$ tanelerinden oluşmaktadır. Literatürün incelenmesi ve yapılan deneylerin sonucunda yapıya katılan AM50 alaşımının ağırlık oran değerlerinin artması ile katılaşma sırasında oluşan primer Mg_2Si fazının tanesi büyümekte ve polihedran formda oluşmaktadır. 356-15 kodlu numunede en büyük taneye (ortalama 100 μm ölçüsünde) sahip primer Mg_2Si gözlemlenmiştir.

2- Vakum destekli infiltrasyon döküm yöntemi ile üretilen numunelerde ıslatılabilirlik sorunu iyileşmiştir bunun sonucunda mekanik özellikler iyi yönde etkilenmiştir.

3-Sıvı $Al-Si$ alaşımı içerisinde Mg oranının artması ıslatma özelliğini geliştirdiği için kompozit üretimi için yararlıdır. Ancak Mg oranının aşırı yükselmesi sıvı haldeki alaşımın viskozitesini arttırmaktadır, bu durum preform içine nüfuziyeti zorlaştırmakta ve dökümlerde yetersiz infiltrasyona neden olabilmektedir. Yüksek Mg içeren dökümlerde metal akışının güçleştiği döküm deneyleri sırasında 413-15 kodlu numunede gözlenmiştir.

4- Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinden Brinell sertlik değeri incelendiğinde en yüksek sertlik değeri 183,5 HB ile 413-5 kodlu numuneye aittir. Literatürde benzer çalışma ile (SiC ve Mg_2Si) en iyi sertlik değeri olarak 135 HB elde edilmiştir [103].

5- Aşınma analizi sonucunda en iyi sonuç 356-5 ve 413-5 kodlu numunelere aittir. 356-5 ve 413-5 kodlu numunelerin aşınma oran değerleri sırasıyla 0,03; 0,05 [$(mm^3) / (N.m) \times 10^3$] olarak elde edilmiştir. Aşınma izleri incelendiğinde; matris elemanı üzerinde kalın bir iz gözlemlenirken, preform elemanı üzerindeki iz ise inceldir.

6- Çalışma sonucunda AM50 alaşımının ağırlık oranının artması ile orantılı olarak mekanik özelliklerin iyileşmesi gözlemlenmemiştir. En iyi mekanik özellikler %5 AM50 ağırlık oranına sahip numunelerdir.

7- Çalışma kapsamında sertlik ve aşınma dayanımı mekanik özelliklerinin bir arada en iyi alınan sonuçlar %5 AM50 takviyeye sahip 413 alaşımına (413-5 kodlu numune) aittir.

8- İnfiltrasyon, sertlik ve aşınma dayanımları incelendiğinde 380-10 kodlu numunenin üretim reçetesi kompozit malzeme üretimi olarak önerilmektedir.

-
- [1] T. Topuz, “Alüminyum Matrisli Silisyum Karbür ve Vanadyum Karbür İlaveli Hibrit Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu,” *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi*, 2019.
- [2] A. Mazahery and M. O. Shabani, “Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 22, no. 2, pp. 275–280, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(11)61171-0.
- [3] K. Öztürk, “Alüminyum Matrisli Melez Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu,” *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2020.
- [4] R. Narayanan, C. Saravanan, V. Krishnan, and K. Subramanian, “Effect of Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composite – A Review,” *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 23–30, 2015.
- [5] D. K. Sharma, D. Mahant, and G. Upadhyay, “Manufacturing of metal matrix composites: A state of review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 506–519, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.128.
- [6] E. B. Moustafa, A. Melaibari, and M. Basha, “Wear and microhardness behaviors of AA7075/SiC-BN hybrid nanocomposite surfaces fabricated by friction stir processing,” *Ceramics International*, vol. 46, no. 10, pp. 16938–16943, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.274.
- [7] A. Awasthi, N. Panwar, A. S. Wadhwa, and A. Chauhan, “Mechanical Characterization of hybrid aluminium Composite-A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 14, pp. 27840–27844, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.021.
- [8] K. Sunil Ratna Kumar, C. Ratnam, and B. Nagababu, “Fabrication and mechanical behavior of Al 2024-B4C MMCs and Al 2024- B4C -GR hybrid MMCS through powder metallurgy technique,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 219–229, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.295.
- [9] K. M. Shorowordi, T. Laoui, A. S. M. A. Haseeb, J. P. Celis, and L. Froyen, “Microstructure and interface characteristics of B4C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: A comparative study,” *Journal of Materials Processing*

- Technology*, vol. 142, no. 3, pp. 738–743, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00815-X.
- [10] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, “The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, no. 1–3, pp. 324–328, 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00975-X.
- [11] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, “The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, no. 1–3, pp. 329–335, 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00919-0.
- [12] Y. R. Chowdary, C. Yuvaraj, K. P. Rao, and B. Durgaprasad, “Evaluation of Mechanical Properties of Al / SiC-Graphite Hybrid Metal Matrix Composites,” vol. 2, no. 6, pp. 286–289, 2013.
- [13] S. Ravindran, N. Mani, S. Balaji, M. Abhijith, and K. Surendaran, “Mechanical behaviour of aluminium hybrid metal matrix composites - A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 1020–1033, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.191.
- [14] V. V. Monikandan, M. A. Joseph, and P. K. Rajendrakumar, “Dry sliding wear studies of aluminum matrix hybrid composites,” *Resource-Efficient Technologies*, vol. 2, pp. S12–S24, 2016, doi: 10.1016/j.reffit.2016.10.002.
- [15] B. Ralph, H. C. Yuen, and W. B. Lee, “The processing of metal matrix composites - An overview,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1–3, pp. 339–353, 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(96)02645-3.
- [16] A. A. Kısasöz, “Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İnsitu Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu,” *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2018.
- [17] A. İ. Kaya, “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri,” *Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, vol. 8, no. January, pp. 38–45, 2016.
- [18] V. Chak, H. Chattopadhyay, and T. L. Dora, “A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, no. May 2019, pp. 1059–1074, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.042.

- [19] N. Panwar and A. Chauhan, “Fabrication methods of particulate reinforced Aluminium metal matrix composite-A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 5933–5939, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.194.
- [20] A. Evans, C. Marchi, and A. Mortensen, *Metal matrix composites in industry*. 2003. doi: 10.1887/0750308729/b1149c3.
- [21] A. Bahadır, “Toz Metalurjisi Yöntemi ile A356 Matrisli Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu,” *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi*, 2021.
- [22] T. A. Başer, “Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı,” *Mühendis ve Makina*, vol. 53, no. 635, pp. 51–58, 2012.
- [23] P. Sharma, D. Khanduja, and S. Sharma, “Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 23, pp. 2192–2202, 2014, doi: 10.1177/0731684414556012.
- [24] F. Toptan, F. Kumdali, and I. Kerti, “Al-B4C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış,” *Metalurji*, no. 145, pp. 11–18, 2006.
- [25] D. F. Lii, J. L. Huang, and S. T. Chang, “The mechanical properties of AlN/Al composites manufactured by squeeze casting,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 22, no. 2, pp. 253–261, 2002, doi: 10.1016/S0955-2219(01)00255-2.
- [26] S. Senthil, M. Raguraman, and D. T. Manalan, “Manufacturing processes & recent applications of aluminium metal matrix composite materials: A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, no. xxxx, pp. 5934–5938, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.792.
- [27] M. K. Surappa, “Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities,” vol. 28, no. 1–2, pp. 319–334, 2003.
- [28] A. Kalemtaş, “Seramik matrisli kompozit malzemeler,” *Putech & Composites*, no. April, pp. 20–26, 2015.
- [29] N. Gupta and M. Doddamani, “Polymer Matrix Composites,” *Jom*, vol. 70, no. 7, pp. 1282–1283, 2018, doi: 10.1007/s11837-018-2917-x.
- [30] S. Gülmez, “Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler,” *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi*, 2018.

- [31] A. Kalemtaş, “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış,” *Putech Composites*, vol. 8, pp. 18–30, 2014.
- [32] I. A. Ibrahim, F. A. Mohamed, and E. J. Lavernia, “Particulate reinforced metal matrix composites - a review,” *Procedia Manufacturing*, vol. 15, pp. 217–224, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.212.
- [33] K. Ozturk, R. Gecu, and A. Karaaslan, “Microstructure, wear and corrosion characteristics of multiple-reinforced (SiC–B₄C–Al₂O₃) Al matrix composites produced by liquid metal infiltration,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 13, pp. 18274–18285, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.03.147.
- [34] G. Manohar, K. M. Pandey, and S. R. Maity, “Characterization of Boron Carbide (B₄C) particle reinforced aluminium metal matrix composites fabricated by powder metallurgy techniques – A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6882–6888, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1087.
- [35] K. Anand Babu, P. Venkataramaiah, and K. Dharma Reddy, “Mechanical characterization of aluminium hybrid metal matrix composites synthesized by using stir casting process,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 14, pp. 28155–28163, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.058.
- [36] O. Duran, “Vakum İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Pirinç Çeltiği Külü ve Alümina Takviyeli AA7075 Hibrit Kompozitlerin Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” *Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi*, vol. 126, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [37] P. Samal, P. R. Vundavilli, A. Meher, and M. M. Mahapatra, “Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 59, no. September, pp. 131–152, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010.
- [38] P. S. Reddy, R. Kesavan, and B. Vijaya Ramnath, “Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061-Silicon Carbide, Boron Carbide Metal Matrix Composite,” *Silicon*, vol. 10, no. 2, pp. 495–502, 2018, doi: 10.1007/s12633-016-9479-8.
- [39] S. K. Lalmuan, S. Das, M. Chandrasekaran, and S. K. Tamang, “Machining Investigation on Hybrid Metal Matrix Composites- A Review,” *Materials Today:*

- Proceedings*, vol. 4, no. 8, pp. 8167–8175, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.158.
- [40] M. Malaki, A. F. Tehrani, B. Niroumand, and M. Gupta, “Wettability in metal matrix composites,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 7, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3390/met11071034.
- [41] C. T. Lynch and J. P. Kershaw, “Metal matrix composites,” *Metal Matrix Composites*, vol. 4, no. June, pp. 1–170, 2018, doi: 10.1201/9781351074445.
- [42] L. Singh, B. Singh, and K. K. Saxena, “Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): an overview,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 224–240, 2020, doi: 10.1080/2374068X.2020.1729603.
- [43] W. Zhou and Z. M. Xu, “Materials Processing Technology Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites Serial Number of Measured Fields,” *Materials Processing Technology*, vol. 63, pp. 358–363, 1997.
- [44] M. S. Moktar, H. Ghandvar, T. Asma, and A. Bakar, “Microstructure and Mechanical Properties of Hybrid Aluminum Composite with SiC Reinforcement,” vol. 41, no. June, pp. 1–7, 2018.
- [45] T. Koçer, “Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al₂O₃ ve SiC Partikül Takviyeli Al-Mg Metal Matriksli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi,” *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2002.
- [46] K. M. Zwilsky and N. J. Grant, “Copper-silica and copper-alumina alloys of high temperature interest,” *Jom*, vol. 9, no. 10, pp. 1197–1201, 1957, doi: 10.1007/bf03398288.
- [47] L. H. Hihara, “Corrosion of Metal Matrix Composites,” no. October 2015, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09807-6.
- [48] A. Kalemtaş, “Composite materials”, [Online]. Available: http://bap.mu.edu.tr/icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Composite_Materials_3.pdf
- [49] D. Sciti, L. Silvestroni, F. Monteverde, A. Vinci, and L. Zoli, “Introduction to H2020 project C3HARME–next generation ceramic composites for combustion harsh environment and space,” *Advances in Applied Ceramics*, vol. 117, no. sup1, pp. s70–s75, 2018, doi: 10.1080/17436753.2018.1509822.

- [50] L. B. Vogelesang and J. W. Gunnink, “ARALL: A materials challenge for the next generation of aircraft,” *Materials and Design*, vol. 7, no. 6, pp. 287–300, 1986, doi: 10.1016/0261-3069(86)90098-1.
- [51] İ. Yapıcı and A. Yapıcı, “E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ,” *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Derisi*, vol. 1, no. 2, pp. 48–60, 2012.
- [52] M. Kara, ““Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı,”” *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006.
- [53] W. Zhou and Z. M. Xu, “Materials Processing Technology Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites Serial Number of Measured Fields,” *Materials Processing Technology*, 1997.
- [54] F. Toptan, “Alüminyum Matrisli B4C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi,” *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2011.
- [55] L. Zhang, H. Xu, Z. Wang, Q. Li, and J. Wu, “Mechanical properties and corrosion behavior of Al/SiC composites,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 678, pp. 23–30, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.03.180.
- [56] K. Acatay, “ASM Handbook Composite,” *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, vol. 21, pp. 123–151, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-101871-2.00006-0.
- [57] H. Altuner, “Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Difüzyonla Birleştirilmesi,” *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2011.
- [58] S. Ray, “Synthesis of cast metal matrix particulate composites,” *Journal of Materials Science*, vol. 28, no. 20, pp. 5397–5413, 1993, doi: 10.1007/BF00367809.
- [59] M. Özer, K. Kocatepe, and M. Erdoğan, “Yarı-Katı Sıcaklıkta Bekletme Süresinin A357 Alaşımının Tikotropik Mikroyapısı Üzerine Etkileri,” *6th International Advanced Tehcnologies Symposium*, 2011.
- [60] B. N. Sarada, P. L. S. Murthy, and G. Ugrasen, “Hardness and Wear Characteristics of Hybrid Aluminium Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting

- Technique,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, no. 4–5, pp. 2878–2885, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.305.
- [61] H. Ahlatç1, “Alüminyum-Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi,” *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, p. 286, 2003.
- [62] H. Mindivan, “Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi,” *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, vol. 50, 2007.
- [63] L. Froyen and B. Verlinden, “Aluminium matrix composites materials,” *University of Leuven*, no. TALAT Lecture 1402, pp. 1–28, 1994.
- [64] H. Akbulut, “Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı Özellik İlişkilerinin İncelenmesi,” *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 1994.
- [65] A. Çetin, “Sıkıştırma Dökümle Üretilen Alüminyum Tabanlı Kompozitler”, [Online]. Available: <https://dokumhane.net/kutuphane/sikistirma-dokumle-uretilen-aluminyum-tabanli-kompozitler/>
- [66] A. Kalemtaş, “İnfiltrasyon Yöntemiyle Kompozit Üretiminde Etkili Olan Temel Değişkenler,” *Putech Composites*, no. 30, pp. 26–28, 2016.
- [67] V. Michaud and A. Mortensen, “Infiltration processing of fibre reinforced composites: Governing phenomena,” *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 8, pp. 981–996, 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(01)00015-X.
- [68] A. Ramanathan, P. K. Krishnan, and R. Muraliraja, “A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 42, no. May, pp. 213–245, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
- [69] A. Kisasoz, K. A. Guler, and A. Karaaslan, “Metal Matris Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyonla Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Üretimi,” *Metalurji*, vol. 170, pp. 34–38, 2014.
- [70] K. M. Sree Manu, L. Ajay Raag, T. P. D. Rajan, M. Gupta, and B. C. Pai, “Liquid Metal Infiltration Processing of Metallic Composites: A Critical Review,”

Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, vol. 47, no. 5, pp. 2799–2819, 2016, doi: 10.1007/s11663-016-0751-5.

- [71] B. O. Kucukyildirim and A. Akdogan Eker, “Fabrication of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites by vacuum-assisted infiltration technique,” *Journal of Composite Materials*, vol. 55, no. 16, pp. 2225–2235, 2021, doi: 10.1177/0021998320988320.
- [72] F. Gul and M. Acilar, “Effect of the reinforcement volume fraction on the dry sliding wear behaviour of Al-10Si/SiCp composites produced by vacuum infiltration technique,” *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 13–14, pp. 1959–1970, 2004, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.02.013.
- [73] S. A. Uzun and V. Çelik, “Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmiş SiC / Al2014 Kompozitin Isıl İletkenliği Üzerine İnfiltrasyon Sıcaklığının Etkisi,” *6th International Advanced Tehcnologies Symposium*, no. May, 2011.
- [74] S. Pfeiffer, H. Lorenz, Z. Fu, T. Fey, P. Greil, and N. Travitzky, “Al₂O₃/Cu-O composites fabricated by pressureless infiltration of paper-derived Al₂O₃ porous preforms,” *Ceramics International*, vol. 44, no. 17, pp. 20835–20840, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.087.
- [75] M. K. Aghajanian, M. A. Rocazella, J. T. Burke, and S. D. Keck, “The fabrication of metal matrix composites by a pressureless infiltration technique,” *Journal of Materials Science*, vol. 26, no. 2, pp. 447–454, 1991, doi: 10.1007/BF00576541.
- [76] S. C. Tjong and Z. Y. Ma, “Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites,” *Advanced Materials Research*, vol. 284–286, no. July, pp. 1564–1567, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.284-286.1564.
- [77] P. Lawrance C A, Suresh Prabhu, “Production and Characterization of Al 6061-TiB₂ İnsitu Metal Matrix Composite,” *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 156–158, 2014, [Online]. Available: www.iarjset.com
- [78] M. Azarbarmas, M. Emamy, J. Rassizadehghani, M. Alipour, and M. karamouz, “The influence of beryllium addition on the microstructure and mechanical properties of Al-15%Mg₂Si insitu metal matrix composite,” *Materials Science and*

- Engineering A*, vol. 528, no. 28, pp. 8205–8211, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.07.048.
- [79] M. F. Ourfali, I. Todd, and H. Jones, “Effect of solidification cooling rate on the morphology and number per unit volume of primary Mg₂Si particles in a hypereutectic Al-Mg-Si alloy,” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 36, no. 5, pp. 1368–1372, 2005, doi: 10.1007/s11661-005-0228-7.
- [80] S. G. Shabestari, H. Saghafian, F. Sahihi, and M. H. Ghoncheh, “Investigation on microstructure of Al–25 wt-%Mg₂Si composite produced by slope casting and semi-solid forming,” *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 28, no. 3, pp. 158–166, 2015, doi: 10.1179/1743133614Y.0000000143.
- [81] Y. G. Zhao, Q. D. Qin, Y. H. Hang, W. Zhou, and Q. C. Jiang, “Insitu Mg₂Si/Al-Si-Cu composite modified by strontium,” *Journal of Materials Science*, vol. 40, no. 7, pp. 1831–1833, 2005, doi: 10.1007/s10853-005-0705-9.
- [82] A. Mandal and M. M. Makhlof, “Chemical modification of morphology of Mg₂Si phase in hypereutectic aluminium-silicon-magnesium alloys,” *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 23, no. 5, pp. 303–309, 2010, doi: 10.1179/136404610X12693537270019.
- [83] M. Y. Zhou *et al.*, “Progress in research on hybrid metal matrix composites,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 838, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155274.
- [84] G. Akın, “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2006.
- [85] G. Mahendran, V. Balasubramanian, and T. Senthilvelan, “Developing diffusion bonding windows for joining AZ31B magnesium-AA2024 aluminium alloys,” *Materials and Design*, vol. 30, no. 4, pp. 1240–1244, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.06.015.
- [86] A. Shirzadi, “Diffusion Bonding Aluminium Alloys and Composites: New Approaches and Modelling,” *Doctor of Philosophy, University of Cambridge*, 1997.

- [87] N. Akar, “The effect of reheating temperature on the production of thixotropic structure with sima process in AA2024 alloy,” *Gazi Üniv Müh. Mim. Fak. Der.*, vol. 26, no. 2, pp. 381–388, 2011.
- [88] N. Akar and I. Mutlu, “Effect of predeformation rate in sima process on thixotropic structure of AA2024 aluminium alloy,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 25, no. 4, 2010.
- [89] V. Kiliçli *et al.*, “Reo- dökümle üretilmiş AA7075 alüminyum alaşımının metalografik incelenmesi Metallographic examination of AA7075 alloy produced by rheocasting Reo- Dökümle Üretilmiş AA7075 Alüminyum Metallographic Examination of AA7075 Alloy Produced By Rheocasting,” *Journal of Polytechnic*, vol. 20, no. 3, pp. 585–594, 2017.
- [90] M. C. Flemings, R. G. Riek, and K. P. Young, “Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 (U.S.A.),” vol. 179, pp. 199–206, 1989.
- [91] D. B. Spencer, R. Mehrabian, and M. C. Flemings, “Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range,” *Metallurgical Transactions*, vol. 3, no. 7, pp. 1925–1932, 1972, doi: 10.1007/BF02642580.
- [92] I. Hussain and J. Jose, “Thixocasting or Semi solid metal casting”, [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/ilyashussain6/thixocasting-or-semi-solid-metal-casting>
- [93] D. Aydın , Emirhan ; Erzi, Eray; Yüksel, Çağlar; Dışpınar, “SIMA Yöntemi ile SiC Takviyeli A380 ve 6063 Kompozit Üretimi,” *7th Aluminum Symposium*, pp. 555–563, 2015.
- [94] S. Atakul, “Yarı katı şekillendirme için elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile ön malzeme üretimi,” *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi*, 2021.
- [95] H. v. Atkinson, “Semisolid processing of metallic materials,” *Materials Science and Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 1401–1413, 2010, doi: 10.1179/026708310X12815992418012.
- [96] S. P. Midson and A. Jackson, “A comparison of thixocasting and rheocasting,” *Institute of Cast Metals Engineers - 67th World Foundry Congress, wfc06: Casting the Future*, vol. 2, pp. 1081–1090, 2006.

- [97] P. Poddar, "Semi-solid casting," *Special Metal Casting and Forming Processes*, pp. 20–27, 2008.
- [98] T. Basner, "Rheocasting of semi-solid A357 aluminum," *SAE Technical Papers*, no. 724, 2000, doi: 10.4271/2000-01-0059.
- [99] B. Cantor, F. Dunne, and I. Stone, "Metal and ceramic matrix composites," *Metal and Ceramic Matrix Composites*, no. November, pp. 1–417, 2003, doi: 10.1533/9781845698560.305.
- [100] D. Dışpınar, "Küremsi taneli dövme alaşımlarında çözeltiyi alma ısı işlemi."
- [101] A. Kisasoz, K. A. Guler, and A. Karaaslan, "Infiltration of A6063 aluminium alloy into SiC-B 4C hybrid preforms using vacuum assisted block mould investment casting technique," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 22, no. 7, pp. 1563–1567, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(11)61356-3.
- [102] A. Şanlı, "Al 6061 matrisli SiC,Al₂O₃ VE yüksek fırın curufu takviyeli hibrit kompozitlerin yorulma davranışlarının incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi*, 2017.
- [103] S. Mostafapoor, M. Emamy, and A. Mahlouji, "An investigation on the mechanical properties of hybrid metal matrix composites," *Proceedings of Iran International Aluminum Conference*, vol. 97, pp. 918–924, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.367.
- [104] J. Singh, "Fabrication characteristics and tribological behavior of Al/SiC/Gr hybrid aluminum matrix composites: A review," *Friction*, vol. 4, no. 3, pp. 191–207, 2016, doi: 10.1007/s40544-016-0116-8.
- [105] M. Y. Zhou *et al.*, "Progress in research on hybrid metal matrix composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 838, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155274.
- [106] "ASM Handbook Vol 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials, USA," 1990.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Birsen D., Tütük İ., Öztürk K., Acar S., Güler K.A., (2022). “Aluminum Matrix İnsitu Exsitu Hybrid Composite Production By Vacuum Infiltration Method”, 10.Uluslararası Alüminyum Sempozyumu, 3-4 Mart 2022, İSTANBUL.