



**MİDYE KABUĞU TAKVİYESİNİN
ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi

Onur VARSOYOĞLU

Eskişehir 2022

**MİDYE KABUĞU TAKVİYESİNİN ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

Onur VARSOYOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gül İpek SELİMOĞLU

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2022

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Onur VARSOYOĞLU'nun MİDYE KABUĞU TAKVİYESİNİN ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ başlıklı çalışması 18/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Gül İpek SELİMOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Hakan GAŞAN	
Üye	: Doç. Dr. Ali ÇELİK	

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

18/08/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Onur VARSOYOğLU, MİDYE KABUğU TAKVİYESİNİN ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Gül İpek SELİMOğLU

ÖZET

MİDYE KABUĞU TAKVİYESİNİN ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Onur VARSOYOĞLU

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gül İpek SELİMOĞLU

Günümüzde mekanik performansı artıran, düşük maliyetli partikül takviyeli metal matrisli kompozitler, otomotiv ve havacılık sektörleri de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel ve kritik mühendislik uygulamalarında yaygın talep görmektedir. . Bu tezin amacı, CaCO_3 içerdiği bilinen atık midye kabuklarını takviye malzemesi olarak kullanmak ve alüminyumun yoğunluğunu çok fazla değiştirmeden dayançta artış yaratarak yüksek spesifik mukavemete sahip metal matrisli kompozit üretmektir. Aynı zamanda çevre kirliliğine neden olan atık midye kabuklarını takviye malzemesi olarak kullanarak geri dönüşümünü sağlamaktır. Bu çalışmada, alüminyum tozu içerisine 800 °C’de kalsine edilen midye kabuğu takviyesi değişik oranlarda (% ağırlıkça 1-5-10-15) eklenmiştir. Daha sonra bu toz karışımın 500 psi basınçta sıkıştırılması ile elde edilen peletler, ark ergitme ve emme döküm yöntemi ile alüminyum matris kompozit haline getirilmiştir. Ark ergitme sürecinde yaşanan problemler doğrultusunda alternatif bir üretim yöntemi olarak kıvılcım plazma sinterleme yönteminden de faydalanılmıştır. Midye kabuklarının içerikleri ve kalsinasyon öncesi ve sonrasındaki fazların tespitinde sırasıyla X-ışınları flüoresans spektrometresi ve X-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Fourier transform kızılötesi spektrometresi ile desteklenmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunlukları Arşimet yöntemi, midye kabuğu takviyesinin alüminyum matristeki dağılımı optik ve taramalı elektron mikroskopları, farklı miktardaki midye kabuğu ilavesinin mekanik performansa etkisi ise sertlik ve aşınma testleri ile tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Metal matsisli kompozit, Alüminyum, Kalsiyum Karbonat, Ark ergitme, Aşınma.

ABSTRACT

THE EFFECT OF MUSSEL SHELL REINFORCEMENT ON THE PROPERTIES OF ALUMINIUM

Onur VARSOYOĞLU

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gül İpek SELİMOĞLU

Nowadays, low-cost particle-reinforced metal matrix composites that enhance mechanical performance are in widespread demand in a variety of industrial and critical engineering applications, including the automotive and aerospace industries. The main purpose of this thesis is to use waste mussel shells, which are known to contain CaCO_3 , as reinforcement material and to produce metal matrix composite with high specific strength by creating an increase in strength without changing the density of aluminium too much. At the same time, it is to recycle the waste mussel shells, which cause environmental pollution, by using them as reinforcement material. In this study, different ratios (1-5-10-15% by weight) of mussel shell reinforcement that calcined at 800 °C were added to aluminium powder. Then, the pellets obtained by compressing this powder mixture at 500 psi pressure were turned into aluminium matrix composite by arc melting and suction casting method. In line with the problems experienced in the arc melting process, spark plasma sintering method was also used as an alternative production method. X-ray fluorescence spectrometry and X-ray diffractometry were used to determine the contents of mussel shells and the phases before and after calcination, respectively. The obtained results were supported by Fourier transform infrared spectrometry. The densities of the produced composites were determined by the Archimedes method, the distribution of the mussel shell reinforcement in the aluminum matrix was determined by optical and scanning electron microscopes, and the effect of the addition of different amounts of mussel shell on the mechanical performance was determined by hardness and abrasion tests.

Keywords: Metal matrix composite, Aluminium, Calcium carbonate, Arc melting, Wear.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, fikir ve tavsiyeleriyle her zaman destek olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gül İpek SELİMOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımda Eskişehir Osmangazi Üniversitesi laboratuvarlarını kullanmama imkan tanıyan ve her zaman destek olan Prof. Dr. Hakan GAŞAN ve ekibine, her türlü deneysel süreçte yardımlarını esirgemeyen bölüm hocalarım ve değerli arkadaşım Elif ADAMLİK'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her zaman arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur VARSOYOĞLU

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Onur VARSOYOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkileri.....	4
2.1.1. Bakır (Cu)	4
2.1.2. Silisyum (Si)	4
2.1.3. Magnezyum (Mg)	4
2.1.4. Mangan (Mn)	4
2.1.5. Çinko (Zn)	5
2.1.6. Titanyum (Ti).....	5
2.1.7. Demir (Fe)	5
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	7
3.1.1. Polimer matrisli kompozitler	7
3.1.2. Seramik matrisli kompozitler	7
3.1.3 Metal matrisli kompozitler	7
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	9

4.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	9
4.1.1. Karıştırılmalı döküm.....	9
4.1.2. Sıkıştırma döküm	11
4.1.3. Sprey döküm	11
4.1.4. Vakum emme döküm	12
4.1.5. Kıvılcım plazma sinterleme (SPS).....	12
4.2. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler	14
4.1.1. Alüminyum matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri	15
4.1.2. Alüminyum matrisli kompozitlerin kullanım alanları.....	19
4.1.2.1 Otomotiv endüstrisindeki kullanımı.....	20
4.1.2.2. Demiryolu uygulamaları	24
4.1.2.3. Havacılık, uzay ve askeri alanlardaki uygulamaları.....	24
5. AMAÇ VE ÖNEM	28
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
6.1. Karakterizasyon Çalışmaları	32
6.1.1. Midye kabuğunun karakterizasyonu.....	32
6.1.1.1. Tane boyut dağılım analizi	32
6.1.1.2. Fourier transform kızılötesi spektrometresi (FTIR)	32
6.1.1.3. X-ışınları flüoresans (XRF)	32
6.1.1.4. X-ışınları kırınım (XRD)	32
6.1.2. Üretilen kompozitin karakterizasyonu.....	32
6.1.2.1. Mikroyapısal karakterizasyon	32
6.1.2.2. Sertlik ölçüm cihazı	33
6.1.2.3. Arşimet yoğunluk ölçüm düzeneği.....	34
6.1.2.4. Aşınma test cihazı	35
6.1.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	35
7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	37
7.1. Midye Kabuğu	37
7.2. Kompozit	39
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56

KAYNAKÇA.....	58
----------------------	-----------

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Saf alüminyumun genel özellikleri [20]	4
Tablo 4.1. MMK'lerin imalatı için kullanılan farklı tekniklerin karşılaştırmalı analizi [48]	14
Tablo 4.2. Al ₂ O ₃ ve SiC'nin genel özellikleri [50]	17
Tablo 4.3. Kullanımı ispatlanan bazı alüminyum matrisli kompozit uygulamaları [65]	23
Tablo 4.4. Potansiyel ağırlık ve maliyet tasarrufları (Ürün maliyetleri mevcut tasarım toplamının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.) [71]	26
Tablo 7.1. Kalsinasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış midye kabuklarının XRF analiz sonuçları	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bazı mühendislik malzemelerinin dayanım/yoğunluk oranı [19]	3
Şekil 3.1. Farklı sektörlerde MMK'lerin kullanımı [25]	6
Şekil 4.1. MMK üretim yöntemleri [36].....	10
Şekil 4.2. Karıştırmalı döküm düzeneğinin şematik görünümü [40]	10
Şekil 4.3. Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik görünümü [41]	11
Şekil 4.4. Sprey döküm yönteminin şematik görünümü [43]	12
Şekil 4.5. Vakum emme döküm yönteminin şematik görünümü [45].....	12
Şekil 4.6. SPS işleminin şematik görünümü[46]	13
Şekil 4.7. SPS işleminin aşamaları [47]	13
Şekil 4.8. Metal matrisli kompozit pazarında yer alan farklı matris alaşımlarını tercih eden firma oranları [32]	15
Şekil 4.9. MMK'lerin üretiminde kullanılan çeşitli takviye malzemeleri [36]	16
Şekil 4.10. MMK pazarında yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarının kullanım oranları [32]	17
Şekil 4.11. Alüminyum/SiC-grafit krank mili [65]	20
Şekil 4.12. Honda prelude motor bloğu ve silindir gömleği [66].....	21
Şekil 4.13. UWM kompozit malzeme merkezinde üretilen piston, silindir gömleği ve mikroyapıları [67]	22
Şekil 4.14. a) Gri dökme demirden üretilen fren diski b) Al/SiC alüminyum matrisli kompozitten üretilen fren diski [68]	22
Şekil 4.15. Aşınma testi sonrası görüntüler a) Alüminyum matrisli kompozitten üretilen fren diski b) Çelik fren diski [25]	24
Şekil 4.16. a) F-16 b) Alüminyum matrisli kompozitten üretilen kompozit karın kanatçığı [70]	25
Şekil 4.17. a) Tipik bir füzeyi oluşturan komponentlerin şematik görünümü b) Alüminyum matrisli kompozit ile üretilen füze kanadı [71]	26
Şekil 4.18. Alüminyum matrisli kompozit ile üretilen Boeing 777'nin Pratt & Whitney motorundaki fan çıkış vanası [70].....	27
Şekil 4.19 Hubble Uzay Teleskobu için üretilen P100/6061 alüminyum matrisli kompozit anten dalga kılavuzu a) Teleskoba eklenmeden önce b) Teleskop üzerinde [72]	27

Şekil 6.1. Midye kabuğunun TGA analizi sonucu.....	29
Şekil 6.2. a) Kalsine edilmiş midye kabuğu b) Öğütülmüş kalsine midye kabuğu tozları	30
Şekil 6.3. Ark ergitme cihazı	31
Şekil 6.4. Emme döküm yöntemi için kullanılan bakır kalıp	31
Şekil 6.5. a) Sıcak kalıplama cihazı b) Otomatik parlatma cihazı.....	33
Şekil 6.6. Sertlik ölçüm cihazı.....	33
Şekil 6.7. Aşınma test düzeneği.....	35
Şekil 6.8. Aşınma derinlikleri ölçümü için kullanılan profilometre.....	36
Şekil 7.1. Midye kabuklarının XRD analizi	37
Şekil 7.2. Midye kabuğu FTIR analizi	38
Şekil 7.3. Üç farklı toz boyutu için yapılan tane boyut dağılım analizi	39
Şekil 7.4. Ark ergitme yöntemi ile %5 midye kabuğu takviyesi ile üretilen kompozitlerin 500x büyütmedeki optik mikroagrafları a) 50 µm'den büyük, b) 50 µm'den büyük, (c)25 µm'den küçük.	40
Şekil 7.5. 50 µm üzeri tane boyutlu tozlardan %5 takviye ile üretilen kompozite ait SEM görüntüsü (15000x).....	40
Şekil 7.6. Midye kabuğu takviyeli kompozitin EDX analizi.....	41
Şekil 7.7. Farklı tane boyutlarının ve farklı takviye oranlarının yoğunluğa etkisi	42
Şekil 7.8. Farklı takviye oranlarında ve farklı takviye tane boyutlarında üretilen kompozitlerin sertlik değerleri	43
Şekil 7.9. Farklı takviye boyutları ve oranları ile üretilen kompozitin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları.....	44
Şekil 7.10. Ark ergitme ile üretilen kompozitlerin aşınma derinlikleri.....	44
Şekil 7.11. Ark ergitme ve emme döküm yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma yüzeyleri: a, b) %5 c, d) %10 e, f) %15.....	46
Şekil 7.12. SPS ile üretilen kompozitlerin 200x büyütmedeki optik mikroagrafları: a) %5, b) %10 takviyeli	47
Şekil 7.13. Kompozitlerin sırasıyla SEM görüntüleri ve gözeneklilik haritaları a, b) %5, c,d) % 10, e,f) %15 g,h) %20 takviyeli	49
Şekil 7.14. Farklı takviye oranları ile üretilen kompozitlerin % gözeneklilikleri (Image J)	50

Şekil 7.15. Arşimet prensibi ile ölçülen gözeneklilik değerleri	51
Şekil 7.16. SPS ile üretilen farklı takviye oranına sahip kompozitlerin sertlikleri	52
Şekil 7.17. SPS ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları	52
Şekil 7.18. SPS ile üretilen kompozitlerin aşınma derinliği sonuçları	53
Şekil 7.19. SPS ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma yüzeyleri: a, b) takviyesiz c, d) %5 e, f) %10 g, h) %15 j, k) %20 takviyeli kompozitler	54



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alümina
B ₄ C	: Bor Karbür
CaCO ₃	: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit
cm ³	: Santimetre Küp
CO ₂	: Karbondioksit
Cu	: Bakır
dak	: Dakika
EDX	: Energy Dispersive X-ray (Enerji Dağılımlı X-ışınları
Fe	: Demir
FTIR	: Fouirer Transform Infrared Spektroskopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi)
g	: Gram
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
Mn	: Mangan
MPa	: Mega Pascal
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrat
Silika	: SiO ₂
SPS	: Spark Plasma Sintering (Kıvılcım Plazma Sinterleme)

TGA	: Termogravimetrik Analiz
Ti	: Titanyum
TiN	: Titanyum Nitrür
TiB ₂	: Titanyum Diborür
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko Oksit
ZrB ₂	: Zirkonyum Diborit
XRD	: X-ray Diffraction (X-ışınları Kırınım)
XRF	: X-ray Fluorescence (X-ışınları Floresans)
WS ₂	: Tungsten Disülfür
ρ	: Yoğunluk
μm	: Mikron Metre

1. GİRİŞ

Özellikle havacılık ve uzay, savunma, otomotiv başta olmak üzere birçok alanda yaşanan teknolojik gelişmeler nedeniyle tek bir malzemenin istenilen özellikleri karşılayamamasından dolayı kompozit malzemelerin üretilmesine ve kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda ortaya çıkan kompozit malzemeler birden çok malzemenin iyi özelliklerinin tek bir malzemede birleştirilmesi temeline dayanarak son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile artan malzeme özelliği isterlerini karşılayabilecek konuma gelmiştir [1].

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemelerine göre seramik matrisli kompozitler (SMK), polimer matrisli kompozitler (PMK) ve metal matrisli kompozitler (MMK) olarak sınıflandırılırlar [2].

MMK'ler ana yapıyı oluşturan bir metal matris içerisine seramik veya organik takviye elemanının eklenmesi ile elde edilir [3]. MMK'ler yüksek kırılma toklukları, yüksek çekme mukavemetleri, termal şoklara ve yüksek sıcaklıklara karşı dayançları ve yüksek aşınma dirençleri ile ön plana çıkmaktadır [4]. Bunların yanı sıra geliştirilen yeni üretim teknikleri kullanılarak düşük maliyet ile üretilebilirken döküm ve toz metalurjisi gibi klasik metalurjik üretim yöntemleri kullanılarak kolay bir şekilde üretime de uygunlardır [5].

Havacılıktan otomotiv sektörüne kadar birçok alanda düşük yoğunluklu malzemelerin tercih edilmesi alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) matrisli kompozit malzemeleri diğer metal matrisli kompozit malzemelere oranla üzerine daha fazla çalışılır hale getirmiştir. Magnezyum alaşımlarının düşük sünekliği ve tokluğunun yanı sıra oldukça reaktif olmaları sebebiyle alüminyum alaşımları metal matris olarak daha yaygın çalışılmaktadır. Gerek üretim maliyetlerinin düşük olması gerekse yüksek süneklik ve tokluk değerleri ile ön plana çıkan alüminyum ve alaşımlarının mukavemetlerini artırmak amacı ile bazı takviye malzemeleri kullanılmış ve bu neticede alüminyum matrisli kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır.

Başlarda araştırmacılar silisyum karbür (SiC) [6,7], alümina (Al_2O_3) [8,9], silisyum nitrür (Si_3N_4) [10] gibi seramik partikül takviyeleri kullanarak mukavemet değerinde artış elde etmeyi başarmışlardır. Fakat bu takviye malzemelerinin yoğunlukta artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan bu takviye malzemelerinin

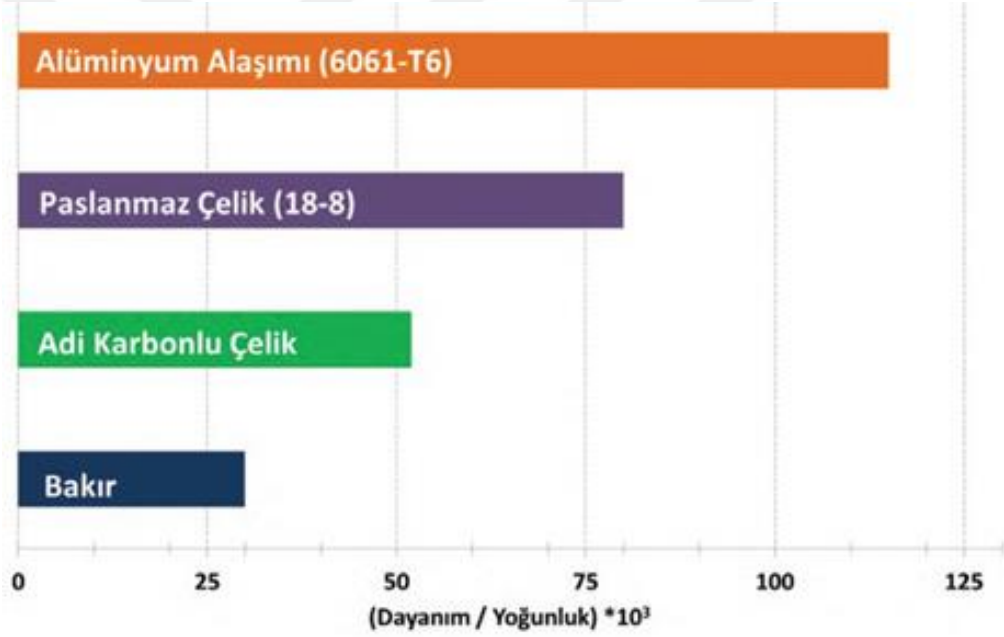
maliyetinin yüksek olması da alüminyumun ön plana çıkan düşük maliyetli olma özelliğini geri plana itmiştir. Bu nedenle hem alüminyumun düşük yoğunluğunu korumak hem de kompozit malzemeyi düşük maliyet ile elde etmek için çeşitli atıklardan elde edilen malzemelerin güçlendirici olarak kullanımına dair çalışmalar ağırlık kazanmıştır. Literatürde bambu kabuğu külü [11], hindistan cevizi kabuğu külü [12], pirinç kabuğu külü [13,14] gibi atık maddeler yukarıda geçen seramik malzemeler ile beraber kullanılarak hibrit kompozit malzemeler üretilmiş ve mukavemet açısından iyi değerler elde edilmesine karşın maliyet ve yoğunlukta istenilen azalma sağlanamamıştır. Öte yandan, yüksek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oranına sahip yumurta kabuğu [15] ve salyangoz kabuğu [16] gibi çok düşük maliyetli atık malzemelerin alüminyum alaşımlarına ilave edilmesiyle mekanik özelliklerin iyileştirildiği bilinmektedir.

Bu çalışma kapsamında, en az yumurta ve salyangoz kabukları kadar CaCO_3 içerdiği [17] bilinen midye kabuklarının takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla Al-Mg-Si alaşımının yoğunluğunu arttırmadan dayançta artış yaratmak amaçlanmıştır. Ayrıca otomotiv, havacılık ve savunma sanayisinde kullanılacak olan parçaların hafifliklerinin önemi de göz önünde bulundurularak en yüksek spesifik mukavemetin elde edildiği optimum takviye oranı belirlenmiştir.

2. ALÜMİNYUM

Doğada oksijen ve silisyumdan sonra en fazla bulunan element alüminyumdur. Alüminyum yer kabuğunun yaklaşık olarak %8'ini oluşturmaktadır [18]. Alüminyum demir esaslı metallerden sonra en yaygın kullanılan malzemedir.

2,7 g/cm³'lük yoğunluk değeri ile alüminyum, magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif üçüncü metaldir. Alüminyumun yoğunluğu, çeliğin 7,83 g/cm³'lük yoğunluğunun yaklaşık üçte biridir. Bu nedenle alüminyum hafiflik gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Her ne kadar mukavemet değeri çelikten düşük olsa da alaşım elementleri, ısıtıl işlemler gibi iyileştirmeler ile mukavemeti çeliğe yakın seviyelere getirilebilir. Bazı mühendislik malzemelerinin spesifik dayanım özellikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir [19].



Şekil 2.1. Bazı mühendislik malzemelerinin dayanım/yoğunluk oranı [19]

Diğer elementler ile kıyaslandığında alüminyumun; yüksek korozyon direnci, şekillendirme kolaylığı, elektrik ve ısıtıl iletkenliğinin iyi oluşu, geri dönüştürülebilir olması ve kolay işlenebilirliği ön plana çıkan diğer özellikleridir [18]. Saf alüminyumun genel özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir [20]. Hafiflik ve mukavemetin beraber istendiği otomotiv, havacılık ve uzay gibi alanlarda düşük mukavemet değerlerinden dolayı saf alüminyumun kullanımı kısıtlıdır. Bu alanlarda alüminyum alaşımları tercih edilmektedir.

Tablo 2.1. Saf alüminyumun genel özellikleri [20]

Atom numarası	13
Yoğunluğu	2,7 g/cm ³
Ergime noktası	660 °C
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Atom ağırlığı	26,97 g/mol

2.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkileri

Alaşım elementleri bazen katı çözelti sertleşmesi, bazen de yaşlandırılabilme özelliği sağlayarak alüminyumun mukavemetini artırır. En yaygın kullanılan alaşım elementlerine aşağıda kısaca değinilmiştir.

2.1.1. Bakır (Cu)

En fazla %12 oranında kullanılan bakır bu orana kadar mukavemeti artırır. %12'den fazla ilavesi durumunda alaşımda gevrekleşme görülmeye başlanır. Ayrıca alaşım elementi olarak bakır bulunduran alüminyum alaşımları çökeltme sertleşmesi ile sertleştirilebilir. Bakır ilavesi ile alaşımın korozyon direncini azaltıcı etki gösterebilir [21, 22, 23].

2.1.2. Silisyum (Si)

Silisyum %20 oranına kadar kullanılabilir. Bu değer üzerine çıkmak alaşımın işlenebilirliğini düşürmektedir. Çekme mukavemetleri çok yüksek değildir. Silisyum ilavesi alaşımın korozyon dayancını, kaynak kabiliyetini ve akışkanlığını artırıcı özellik gösterir [21, 22, 23].

2.1.3. Magnezyum (Mg)

Magnezyum ilavesi alaşıma yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve yüksek korozyon dayancı sağlar. Al-Si alaşımlarına magnezyum ilavesi ile oluşan Mg₂Si fazı sertliği artırır [21, 22, 23].

2.1.4. Mangan (Mn)

Mangan, alaşım içerisinde demirle beraber kullanıldığında dökülebilirliği artırır. Alaşımların süneklik, tokluk ve işlenebilirliğini iyileştirici özellik gösterir [21, 22, 23].

2.1.5. Çinko (Zn)

Çinko, magnezyum ve bakır varlığında yaşılandırılabilirliğı sağlar. Alaşıma yüksek çekme ve darbe mukavemeti sağlar. Alaşım içerisindeki çinko miktarı arttıkça alaşımın akışkanlığını artırıcı özellik gösterir. Çinko sıcak yırtılmaya sebep olabilir [21, 22].

2.1.6. Titanyum (Ti)

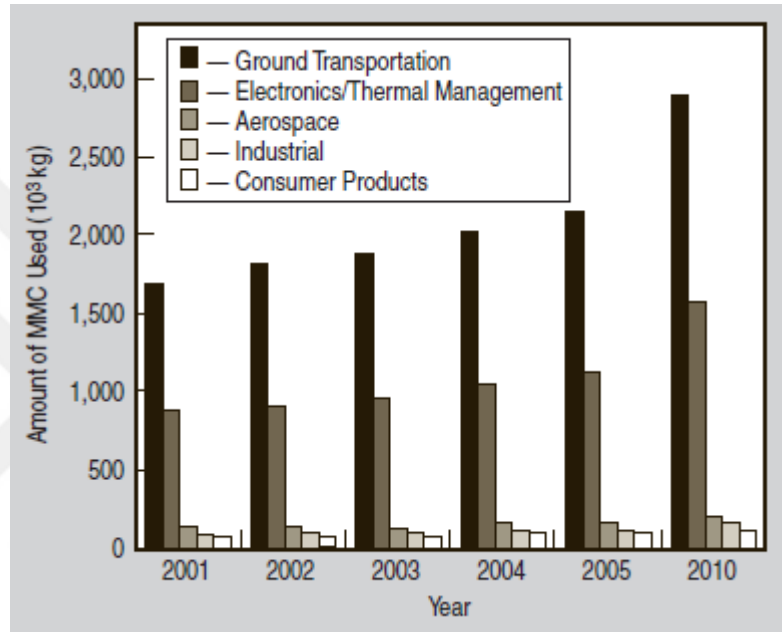
Alaşıma eklenen titanyum tane küçültücü etki gösterir. En iyi etkisi bor ile beraber kullanıldığında gözükteğı için bor ile beraber kullanımı yaygındır. Titanyum, alaşımın çekme mukavemeti ve sünekliğini artırır [21, 22, 23].

2.1.7. Demir (Fe)

Döküm alaşımların sıcak çekme eğilimini azaltıcı yönde etki eder. Gevreklik meydana getirdiğı için alüminyum alaşımlarında kullanımı tercih edilmez [21, 22, 23].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Endüstride hemen her alanda ortaya çıkan teknolojik gelişmelerle beraber geleneksel malzemeler beklenen özellikleri karşılayamaz duruma gelmiştir. Bu duruma çözüm olarak 20. yüzyılın ortalarında ortaya çıkan kompozit malzemeler günümüzde otomotiv, savunma, havacılık ve uzay başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [5, 24] . Farklı sektörlerde MMK'lerin kullanımı Şekil 3.1'de verilmiştir [25].



Şekil 3.1. Farklı sektörlerde MMK'lerin kullanımı [25]

Kullanılacak alana ve istenilen özelliklere bağlı olarak iki veya daha fazla malzemenin beklenen özellikleri karşılayacak şekilde birleştirilmesi ile oluşan yeni malzeme kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan her bir malzeme tek başlarına kullanıldıklarında sağlayamadıkları belirli özellikleri kompozit malzeme ile kazanırlar. Böylece kompozit malzemeler, istenilen her alana ve özelliğe uygun malzeme tasarlanmasına ve üretilmesine olanak sağlar [26].

Kompozit malzemeler, matris ve takviye fazı olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelir. Burada, görevi içerisine dağıtılan takviye elemanlarını bir arada tutmak olan matris fazı sürekli fazdır. Matris malzemesinde geliştirilmesi beklenen özellikleri iyileştirmek için kullanılan takviye fazı ise süreksiz fazdır [5].

Kompozit malzemeler matris malzemesinin türüne göre olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmışlardır [27]:

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Matris malzemesi olarak termosetler, termoplastikler ve elastomerlerin kullanıldığı kompozit malzemeler polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK) olarak adlandırılır. PMK’lerde güçlendirici olarak cam, karbon ve aramid gibi takviye elemanları kullanılır. PMK’lerde kullanılan takviye elemanları elyaf veya fiber formda olabilir. PMK’ler yüksek spesifik mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek korozyon direnci, seçilen takviye malzemesinin yapısına bağlı olarak yüksek darbe dayanımı, kolay üretilebilirlikleri ve düşük üretim maliyetlerinden dolayı çok çeşitli ve yaygın kullanım alanlarına sahip kompozit malzemelerdir [28, 29].

3.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Yüksek sıcaklıklarda çalışma avantajı ile polimerlerin, düşük yoğunluğu ile de yüksek yoğunluklu metallerin önüne geçen seramik malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Gevrek malzemeler olan seramikler çatlaklara karşı çok hassastır. Bu durum ise seramiklerin yüksek aşınma dayancısı, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve düşük yoğunluk gibi avantajlarının önüne geçerek seramik malzemelerin kullanımını sınırlandırmaktadır. Son dönemlerde seramik malzemeler üzerine yapılan araştırmaların çoğu seramik matrisi çatlaklara karşı daha az duyarlı hale getirme üzerinedir. Kullanılan takviye malzemeleri sürekli ve süreksiz olarak iki temel grupta sınıflandırılır. Bu takviyelerin seramik matrisin kırılma tokluğu üzerindeki etkileri incelendiğinde en iyi sonucu sürekli fiber takviyelerin verdiği görülmüştür [30, 31].

3.1.3 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler genellikle metallerin iyi süneklik ve tokluğu ile seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek aşınma dayancısını birleştirmek amacı ile metal matris içerisine seramik partikül takviyesi ile üretilen malzemelerdir. Matris malzemesi olarak kullanılan metal veya metal alaşımları ile kıyaslandığında MMK’ler daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler gösterir. Matris malzemesi olarak alüminyum (Al), magnezyum (Mg), titanyum (Ti) gibi hafif metaller başta olmak üzere

hemen hemen tüm metaller ve alaşımları kullanılabilir. Takviye malzemesinin türüne göre [32];

- Partikül takviyeli,
- Süreksiz fiber (kısa fiber ya da visker) takviyeli,
- Sürekli fiber takviyeli,

olmak üzere üç grupta incelenirler.

Bu takviye türlerinin kullanımları incelendiğinde kompozit üzerine etkileri bakımından en iyi sonuçlar sürekli fiber takviyelerde gözlemlense de endüstriyel anlamda en fazla tercih edilen partikül takviyelerdir. Bunun nedeni olarak partikül takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerin diğerlerine kıyasla üretim kolaylığı ve buna bağlı olarak nispeten düşük maliyeti gösterilebilir. Aynı zamanda partikül takviyeli kompozitlerde özelliklerin yöne bağlı değişim göstermemesi de yaygın tercih edilme nedenlerinden birisidir [33].

Parçacık takviyeli kompozitler sürekli fiber takviyeli kompozitlerden 100 kat, visker takviyeli kompozitlerden 5 kat daha ucuza mal edilebilmektedir [5].

4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

MMK'ler geleneksel metaller ve alaşımları ile karşılaştırıldığında; yüksek spesifik mukavemet, yüksek aşınma dayancı, üstün yüksek sıcaklık özellikleri ve yüksek yorulma direnci gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Buna karşın, yapılan takviyeler ile matris metalinin sünekliğinde takviyesiz metale göre düşüş gözlemlenmektedir [34].

Hemen hemen her türlü metalin matris malzemesi olarak kullanılmasına rağmen son yıllarda otomotiv, havacılık ve uzay gibi hafif malzeme arayışı içinde olan alanlarda gerçekleşen gelişmeler nedeniyle Al, Mg ve Ti gibi düşük yoğunluklu metaller daha fazla tercih edilmektedir [35]. Düşük yoğunluğun yanında yüksek tokluk ve yüksek süneklik gibi özellikler matris malzemesinde aranmaktadır.

Kompozit malzemeye uygulanan yükün büyük bir kısmını takviye fazı taşımaktadır [6]. Uygulanan yükü takviye fazına ileten matris malzemesinin bir diğer görevi de takviye malzemelerini korozyon ve aşınmadan korumaktır.

4.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit üretim yöntemleri katı hal, sıvı hal ve diğer yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılırlar (Şekil 4.1) [36].

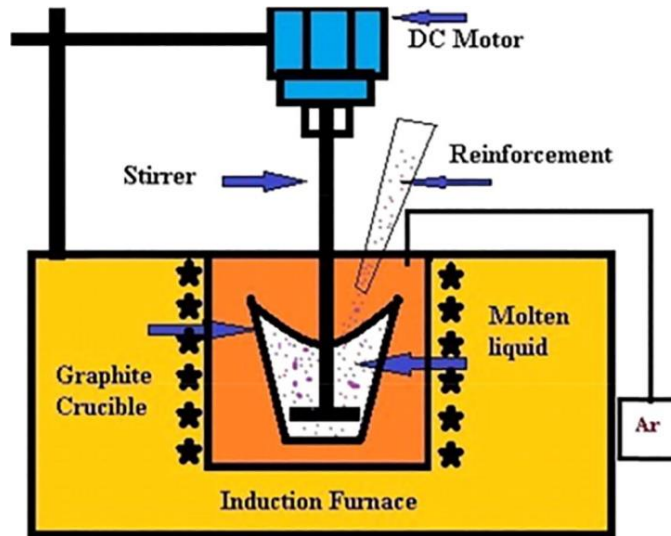
MMK üretiminde kullanılan yöntem, takviye oranı ve cinsi, matris ve takviye arasında oluşan arayüzey özelliklerini ve bunlara bağlı olarak da nihai ürünün özelliklerini etkilemektedir [37]. Bu nedenle, malzemeden beklenen özelliklere ve bu malzemenin kullanılacağı alana göre üretim yöntemi seçilmelidir.

4.1.1. Karıştırmalı döküm

Karıştırmalı döküm (Şekil 4.2), mekanik karıştırma işlemi kullanılarak takviye fazın sıvı metal içerisine eklendiği kompozit üretim yöntemidir. Sıvı kompozit daha sonra geleneksel döküm yöntemleri ile dökülür ve geleneksel metal şekillendirme teknolojileri ile işlenebilirler. Karıştırmalı döküm metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi için en basit ve en ekonomik yöntemdir. Büyük boyutlu parçaların üretilmesine olanak sağlaması en büyük avantajlarından. Karıştırmalı döküm yöntemiyle metal matrisli kompozit üretiminde dikkat edilmesi gerekenler; takviyenin matris içinde homojen dağılması, matrisin takviyeyi ıslatabilirliği, takviye ve matris arasında oluşacak kimyasal reaksiyonlardır [38,39].



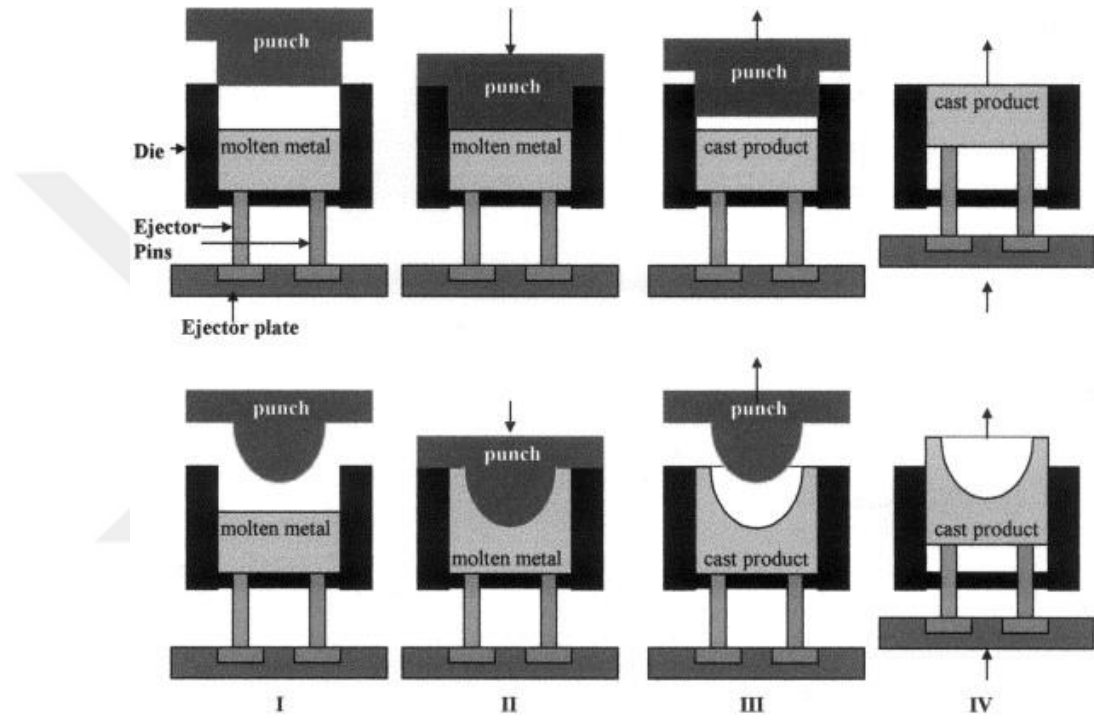
Şekil 4.1. MMK üretim yöntemleri [36]



Şekil 4.2. Karıştırmalı döküm düzeneğinin şematik görünümü [40]

4.1.2. Sıkıştırma döküm

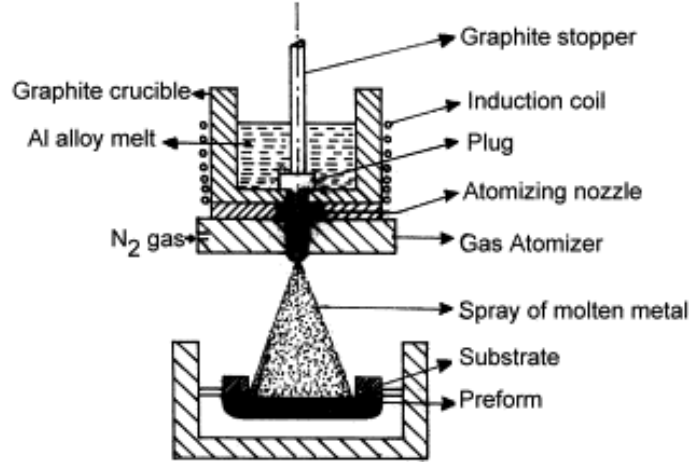
Sıkıştırma döküm (Şekil 4.3), yeniden kullanılabilir bir kalıp içinde yüksek basınç altında katılaşmanın gerçekleştirildiği bir üretim yöntemidir. Bu işlemde, hidrolik pres üzerine bir kalıp seti yerleştirilir ve bu kalıp seti önceden ısıtılır. Açık kalıp setinin alt yarısına ergimiş alaşım dökülür ve kalıp boşluğunu dolduran ergimiş alaşım katılaşana kadar pres uygulanır. Üretilen ürünlere uygulanan üretim sonrası işlemler çok az olduğu için net şekle yakın bir imalat yolu olarak kabul edilir [41].



Şekil 4.3. Sıkıştırma döküm yönteminin şematik görünümü [41]

4.1.3. Sprey döküm

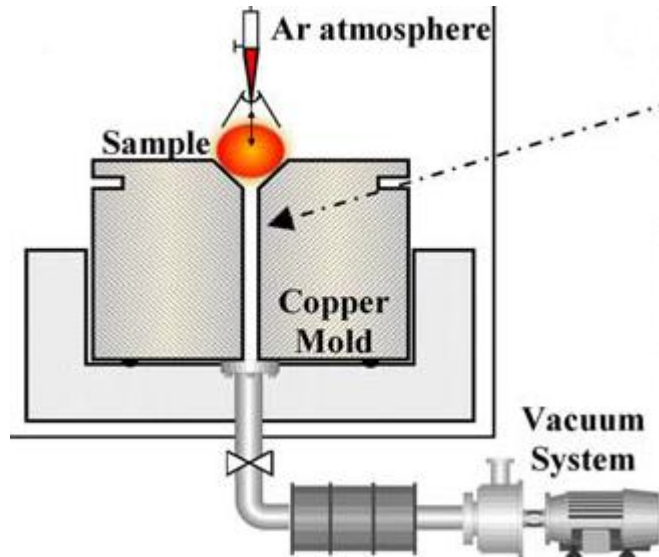
Bu döküm yönteminde metal bir indüksiyon fırınında ergitilir ve bir nozuldan dökülür. Yüksek basınçlı bir soygaz jeti dökülen metali damlacıklar halinde parçalar. Yerleştirilen altlıkta parçalanan bu damlacıklar henüz katılaşmamışken toplanır ve bir ön form oluşturur. Damlalar altlıkla teması sırasında yarı katı yarı sıvı formdadır ve bu temas ile yayılarak geniş bir alanı kaplarlar. Altlık üzerinde biriken bu metal, o hali ile kullanılacağı gibi çeşitli plastik deformasyon işlemleri ile işlenerek de kullanılabilir [42,43]. Sprey döküm yönteminin şematik görünümü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Sprey döküm yönteminin şematik görünümü [43]

4.1.4. Vakum emme döküm

Bu yöntemde ergitme altlığına yerleştirilen metal, uç ve altlık arasında oluşturulan ark ile ergitilir. Daha sonra vakum pompası ile bir emme basıncı oluşturularak ergimiş metal kalıp içerisine doldurulur. Ergitme işleminden önce ergitme odası vakuma alınarak olası oksitlenme durumlarının önüne geçilebilir. Vakum miktarı, vakum süresi, ergimiş metalin sıcaklığı gibi proses parametreleri önem taşır [44]. Şekil 4.5’de vakum emme dökümün şematik görüntüsü gösterilmiştir.

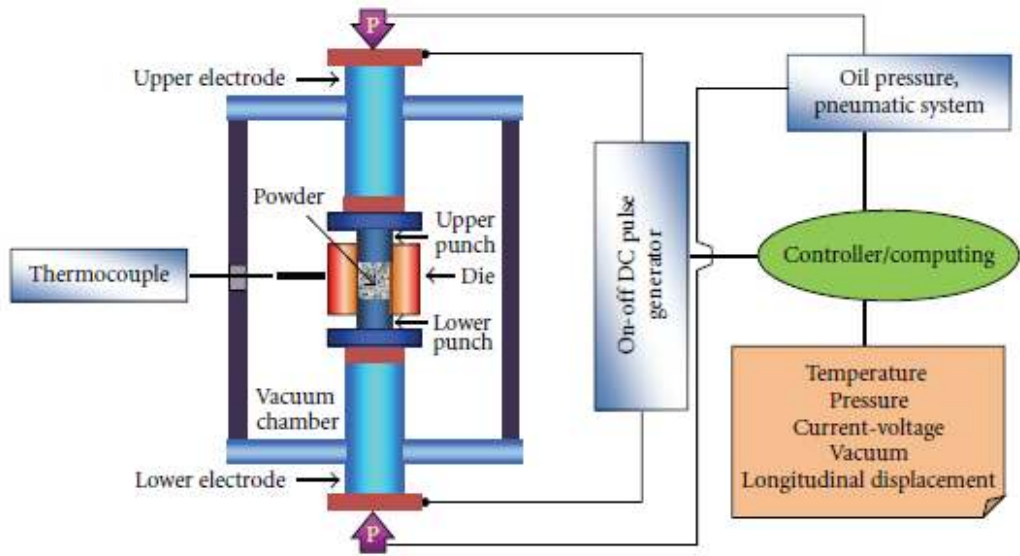


Şekil 4.5. Vakum emme döküm yönteminin şematik görünümü [45]

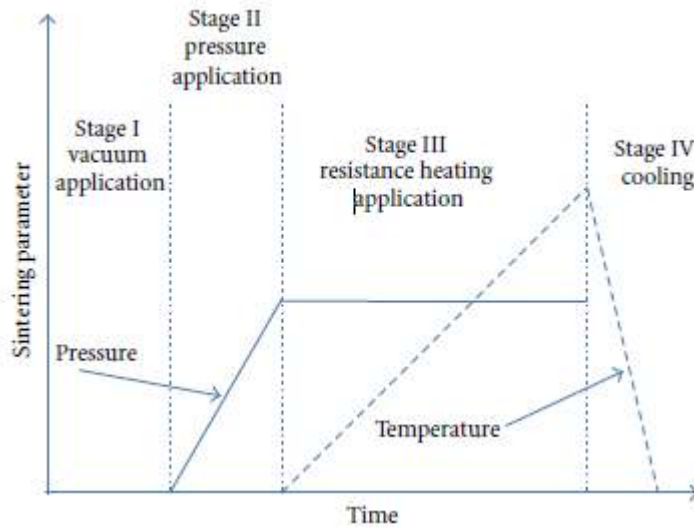
4.1.5. Kıvılcım plazma sinterleme (SPS)

Kıvılcım plazma sinterleme (SPS) (Şekil 4.6), seramiklerin ve toz metallerin kısa sinterleme süresinde minimum tane büyümesi ile yoğunlaştırma sonuçları elde etmek için büyük bir potansiyele sahip yeni geliştirilmiş hızlı bir sinterleme tekniğidir [46]. Bu

işlemede harici bir ısıtma kaynağı kullanmak yerine elektrik ileten kalıptan ve uygun durumlarda da numuneden darbeli bir doğru akım geçmesine izin verilir. Burada kalıp aynı zamanda bir ısıtma kaynağı görevi görür ve bu nedenle ısıtma işlemi çok verimlidir. SPS, çok hızlı ısıtma hızları ve çok kısa tutma süreleri ile tamamen yoğun numuneler elde etme olanağı sağlar. SPS işlemi genellikle dört ana basamakta gerçekleşir (Şekil 4.7). İlk aşama gazları gidermek için vakuma alma işlemidir. Daha sonra ikinci aşama olan basınç uygulanır ardından ısıtma ve son olarak soğutma ile işlem tamamlanır [47].



Şekil 4.6. SPS işleminin şematik görünümü[46]



Şekil 4.7. SPS işleminin aşamaları [47]

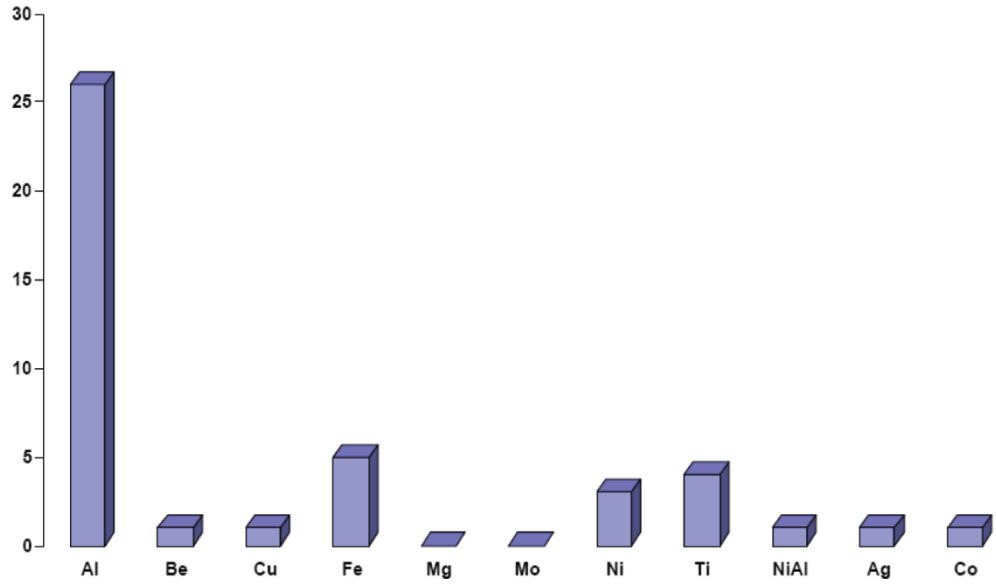
MMK üretiminde yaygın olarak kullanılan üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. MMK’lerin imalatı için kullanılan farklı tekniklerin karşılaştırmalı analizi [48]

Üretim yöntemi	Şekil ve boyut aralığı	Hacim oranı aralığı	Takviyede hasar	Maliyet
Karıştırmalı döküm	Geniş şekil aralığı, daha büyük boyut; 500 kg’a kadar	0,3’e kadar	Hasar yok	En ucuzu
Sıkıştırırmalı döküm	Ön form şekli ile sınırlı	0,5’e kadar	Ciddi hasar	Orta derecede pahalı
Sprey döküm	Sınırlı şekil, büyük şekil	0,3 - 0,7		Pahalı
Toz Metalurjisi	Geniş şekil aralığı; sınırlı boyut		Takviye kırılması	Pahalı

4.2. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler

Matris malzemesi seçimi kompozit için en önemli aşamalardan biridir. Hemen hemen her alanda gelişen teknoloji ile mühendislik malzemelerinden beklenen özellikler giderek artmıştır. Matris malzemesinden beklenen bu özelliklerin başlıcası yüksek spesifik mukavemettir. Yüksek spesifik mukavemetin yanı sıra yüksek sünekliğe ve korozyon direncine sahip olmasıyla beraber magnezyum ve titanyum gibi diğer düşük yoğunluğa sahip metallerden ucuz olması alüminyumunu birçok araştırmacı tarafından üzerine çalışılır bir konu haline getirmiştir [32]. Ayrıca ergime noktasının düşük olması sebebiyle kompozit üretim maliyetlerini de düşürmektedir [49]. Metal matrisli kompozit pazarında yer alan firmalarca kullanılan matris metalleri Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. Kısaca alüminyumun hafiflik, yüksek süneklik ve tokluk özellikleri ile kullanılan takviye elemanının yüksek mukavemet ve sertlik gibi özelliklerinin kombine edilmesi ile yüksek spesifik mukavemet ve yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklere sahip olarak üretilen malzemeler, alüminyum matrisli kompozit malzemelerdir [32].



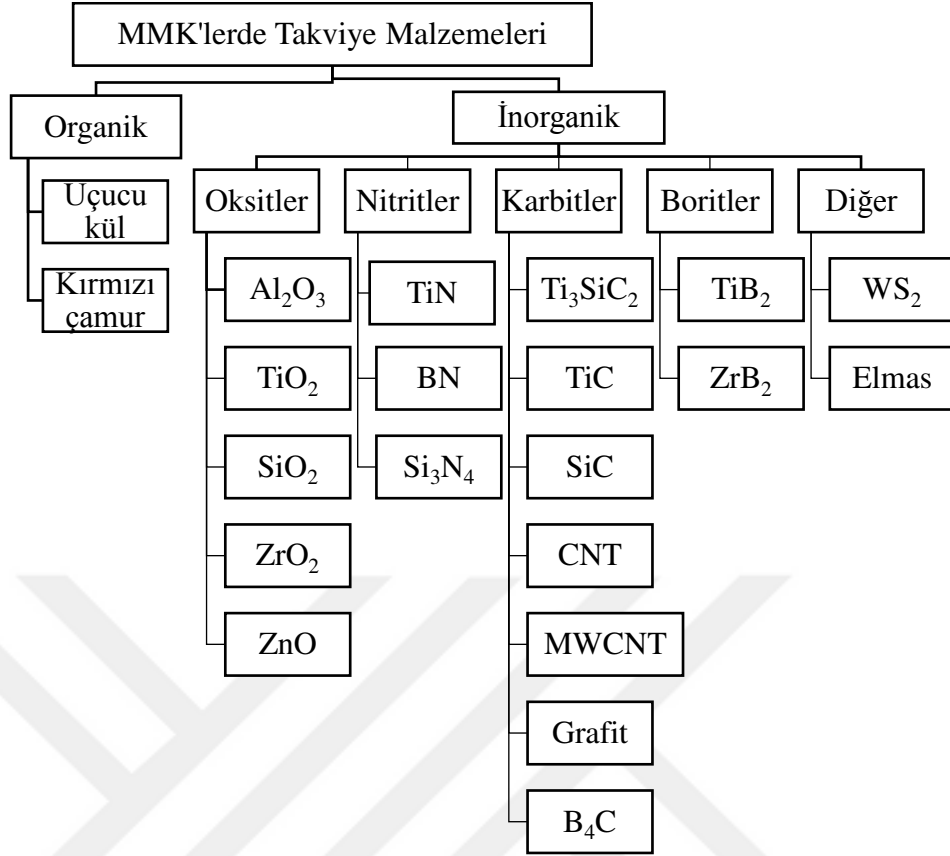
Şekil 4.8. Metal matrisli kompozit pazarında yer alan farklı matris alaşımlarını tercih eden firma oranları [32]

Alüminyum matrisli kompozitlerin takviyesiz alüminyum alaşımlarına kıyasla sağladığı avantajların bazıları şöyledir [27]:

- Yüksek mukavemet
- Geliştirilmiş sertlik
- Daha düşük yoğunluk
- Daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri
- Daha iyi aşınma dayancı
- Kontrollü termal genleşme katsayısı
- Yüksek elastisite modülü

4.1.1. Alüminyum matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri

Kullanılan takviye malzemeleri organik ve inorganik olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Organik takviye malzemeleri sınıfında kırmızı çamur (demir oksit) ve uçucu küller (pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi kabuğu külü vb.) bulunur. İnorganik takviye malzemeleri ise oksitler (Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO vs.), nitritler (Si_3N_4 , TiN vs.), karbitler (SiC , B_4C vs.), boritler (TiB_2 , ZrB_2 vs.) ve diğer (WS_2 , elmas vs.) takviye elemanları olarak dört ana grupta incelenir. MMK'lerde kullanılan takviye elemanları Şekil 4.9'da gösterilmektedir [36].

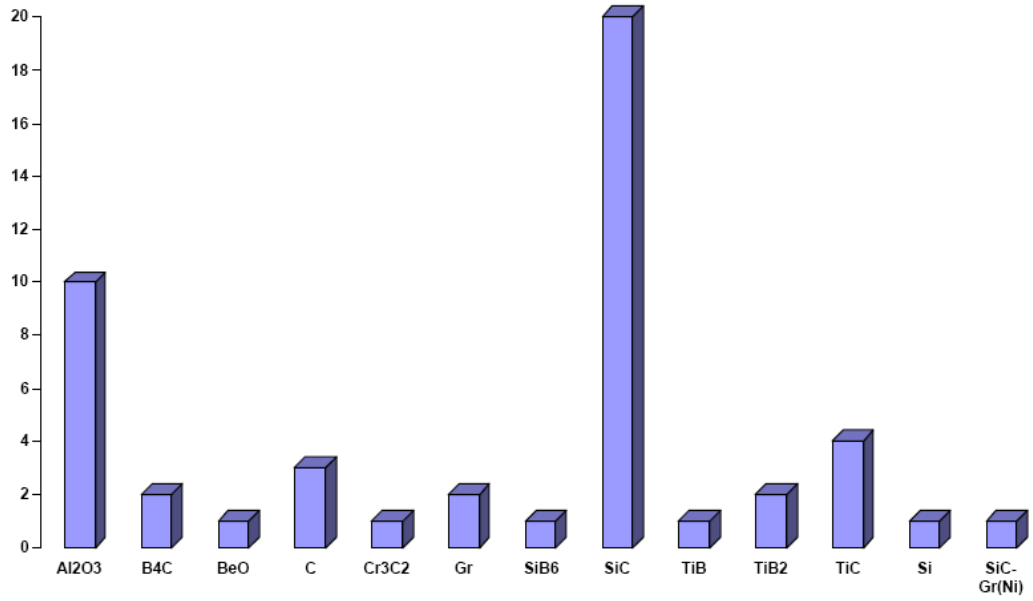


Şekil 4.9. MMK'lerin üretiminde kullanılan çeşitli takviye malzemeleri [36]

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde bu takviye elemanları arasından en çok tercih edilenler seramik partiküllerdir [50]. SiC, Al₂O₃, B₄C ve TiC gibi geleneksel seramik takviyeler, üzerine en fazla çalışılan takviye elemanlarındandır. MMK pazarında yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarının kullanım oranları Şekil 4.10'da verilmiştir.

Yüksek sertlik değerlerine sahip SiC ve Al₂O₃ gibi seramik partiküller alüminyum alaşımının aşınma direncini ve mukavemetini artırılabilir. Fakat bu seramik malzemelerin yoğunlukları alüminyumun 2,71 g/cm³'lük yoğunluğuna kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle artan takviye oranları ile üretilecek kompozitin yoğunluğunda artış meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bunun sonucunda ise özellikle otomotiv, havacılık ve uzay alanlarında aranan hafiflik beklentisi karşılanamayacaktır.

Al₂O₃ ve SiC'ün genel özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir. [50]



Şekil 4.10. MMK pazarında yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarının kullanım oranları [32]

Tablo 4.2. Al_2O_3 ve SiC'nin genel özellikleri [50]

Özellik	Al_2O_3	SiC
Elastisite modülü (GPa)	380-450	420-450
Yoğunluk (g/cm^3)	3,96	3,20
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Isıl iletkenlik (w/m.K)	5-10 (1274 K'de)	10-40 (1273 K'de)
Poisson oranı	0,25	0,17
Sertlik (HV)	2100	2400

Alüminyum matrisli kompozitlerin düşük maliyetli takviyeler ile istenilen mekanik özelliklerin karşılanması sonucunda otomotiv, havacılık, uzay ve savunma sanayi gibi sektörlerle daha fazla katkı sağlayacağı ve başka alanlarda da kullanımının artacağı açıktır. Bu nedenle araştırmacılar çok düşük maliyetler ile elde edilebilecek, doğada yenilenebilen ve matrise eklenmesi sonucunda aranan özellikleri sağlayabilecek takviye malzemeleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bunun sonucunda yumurta kabuğu ve salyangoz kabuğu gibi $CaCO_3$ bakımından zengin atık malzemeler araştırmacılar tarafından takviye malzemesi olarak değerlendirilmiştir [15,16, 51,52].

CaCO_3 , alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışını olumlu etkileyen yağlayıcı özelliğe sahiptir. Takviye olarak CaCO_3 kullanımı kompozit malzemenin mekanik mukavemetini ve korozyon direncini artırır [53]. Yapısında %94-97 oranında CaCO_3 içeren yumurta kabuğu üzerine yapılan çalışmalar sonucunda yoğunluğun, karbonize edilmemiş yumurta kabuğunda $2,2\text{-}2,62 \text{ g/cm}^3$ aralığında değiştiğini, karbonize edilmiş yumurta kabuğu tozlarında ise $1,98 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar düştüğünü göstermektedir [35, 54, 55, 56]. Ayrıca CaCO_3 bakımından zengin olan ve yapısında %81-98 oranında CaCO_3 bulunduran salyangoz kabuklarının $2,55\text{-}2,81 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen yoğunluklarının kalsinasyon işlemi ile $1,63 \text{ g/cm}^3$ değerine düşürülebildiği literatürdeki çalışmalarla kanıtlanmıştır [16]. Elde edilen bu değerler ile mineral CaCO_3 yerine yumurta ve salyangoz kabuklarının takviye malzemesi olarak kullanımı metal matrisli kompozitler için takviye malzemesi arayışında en son yenilikler olarak ön plana çıkmaktadır.

Chaithanyasai ve ark. [57] yaptıkları çalışmada yumurta kabuğu takviyesinin, 6061 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Yumurta kabuğu takviyesi sonucu alüminyumun $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluğu $2,28 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar düşürülmüş, aynı zamanda sertlik değerinde artış sağlanmıştır. Yumurta kabuğu takviyesi ile ilgili yapılan bir başka çalışmada Puspitasari ve ark. [58] takviye sonucunda çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde iyileşme olduğunu göstermiştir.

Öte yandan, kalsine salyangoz kabuğu ve kalsine edilmemiş salyangoz kabuğu parçalarının takviye olarak kullanılabilirliği üzerine yapılan çalışmalarda, alüminyum matrise salyangoz kabuğu takviyesi ile sertlik, darbe, basma ve çekme dayanımları gibi mekanik özelliklerde artış sağlarken yoğunluk ve uzamanın azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla beraber salyangoz kabuğu takviyesinin iyi sertlik, mukavemet ve hafiflik istenen uygulamalara düşük maliyetli alternatif olabileceğini ortaya koymuştur [51,59].

Umunakwe ve ark. [60] deniz salyangozunun takviye olabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, deniz salyangozu kabuğu takviyesi ile alüminyum matrisin sertliğinin, mukavemetinin, elastik modülünün ve sünekliliğinin iyileştirildiğini ispatlamışlardır. Aynı zamanda kompozitin karbür, oksit ve borür takviye malzemelerine göre daha düşük maliyet ile elde edildiğini vurgulamışlardır.

Dwiwedi ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmada ise farklı oranlarda midye kabuğu takviyesinin Al6061 matrisin özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda midye kabuğu takviyesi ile alaşımanın sertlik ve aşınma dayancında artış olduğu duyurulmuştur. Kompozit malzemenin sergilediği maksimum özellikler %6 midye kabuğu takviyesinde elde edilmiştir. Takviyesiz alaşımanın ~46 HRB olan sertlik değeri %6 takviye ile ~62 HRB'ye çıkarılmıştır.

Literatürdeki CaCO_3 içeren takviyeler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, dünya çapında giderek artan ve yoğun miktarda çevre kirliliğine neden olan midye kabuklarının, içeriğindeki yüksek CaCO_3 oranları göz önünde bulundurularak, alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılıp geri dönüşümünün sağlanabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca atık midye kabuklarının geri dönüşümü sağlanırken, alüminyum matrisli kompozit pazarında kullanılan geleneksel takviye malzemelerine oldukça düşük maliyetli alternatif takviye malzemesi sağlanacağı düşünülmektedir.

Çin 2010 yılında 10,35 milyon tonla, dünya çapında kabuklu deniz ürünleri üretiminin %70,8'ini ve çift kabuklu yumuşakça üretiminin %80'ini temsil etmektedir. Çin'in ardından Japonya (819.131 ton), Amerika Birleşik Devletleri (676.755 ton) gelmektedir [61]. Malezya Balıkçılık Dairesi Başkanlığına göre midye üretimi 2016 yılında bir önceki yıla göre 154,14 ton artmıştır ve 2016 yılında 1827,27 ton midye üretildiği ve bu sayısının giderek arttığı tahmin edilmektedir [62].

Fakat üretilen bu midyelerin %33'ünü dolgusu toplandıktan sonra atılan kabuklar oluşturmaktadır. Bu nedenle her yıl dünya çapında 1 milyon tonun üzerinde atık midye kabuğu üretildiği tahmin edilmektedir [61].

Galiçya'daki konserve endüstrisi yılda 25 bin ton atık midye kabuğu ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu atık kabuklar her ne kadar kümes hayvanları yemi, gübre ve toprak asitliği düzenlemek amaçlı kullanılsa da bu atık ürünlerin büyük bir kısmı çöplüklere veya denize dökülmektedir. Atık midye kabuklarının %100'ünün değerlendirilebilmesi için yeni kullanım alanlarının bulunması gerekmektedir [63].

4.1.2. Alüminyum matrisli kompozitlerin kullanım alanları

Alüminyum matrisli kompozitler başta otomotiv, havacılık ve savunma sektörü olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir.

4.1.2.1 Otomotiv endüstrisindeki kullanımı

Kullanılan fosil yakıtlar ve bunların kullanımı ile doğaya salınan zararlı gazlar göz önüne alındığında yakıt tüketimini azaltmak, içinde bulunduğumuz gezegenin dengesini korumamıza yardımcı olacak başlıca etmenlerden birisidir. Bununla beraber otomobil seçiminde düşük yakıt tüketimi hemen hemen her kullanıcı için ana kriterlerden birisidir. Yakıt tüketimini azaltmak için uygulanacak başlıca yöntem taşıtın ağırlığını azaltmak olacaktır.

Toplam araç ağırlığında yapılacak 100 kg'lık azalma ile yakıt kullanımının 0,3 lt/100 km azalacağı ve buna bağlı olarak karbondioksit (CO₂) emisyonunda 7,5-12,5 gr düşüş sağlanacağı yapılan bir çalışma ile elde edilmiştir [19].

Bir otomobilde kullanılan alüminyum parçaların ağırlığı 2006 yılında 142 kg iken yapılan tahminlere göre 2035 yılında 323 kg'a ulaşacaktır [64].

Alüminyum matrisli kompozitlerin ulaşım alanındaki ana faydaları düşük yakıt tüketimi ve daha az zararlı gaz emisyonudur [27].

Otomotiv endüstrisinde yüksek uygulama alanına sahip olan alüminyum matrisli kompozitlere örnek olarak valfler, piston, piston kolu ve pimi, silindir kapağı, krank mili ana yatağı, motor bloğu verilebilir. Şekil 4.11'de alüminyum matrisli kompozitten üretilen krank mili gösterilmiştir [65].

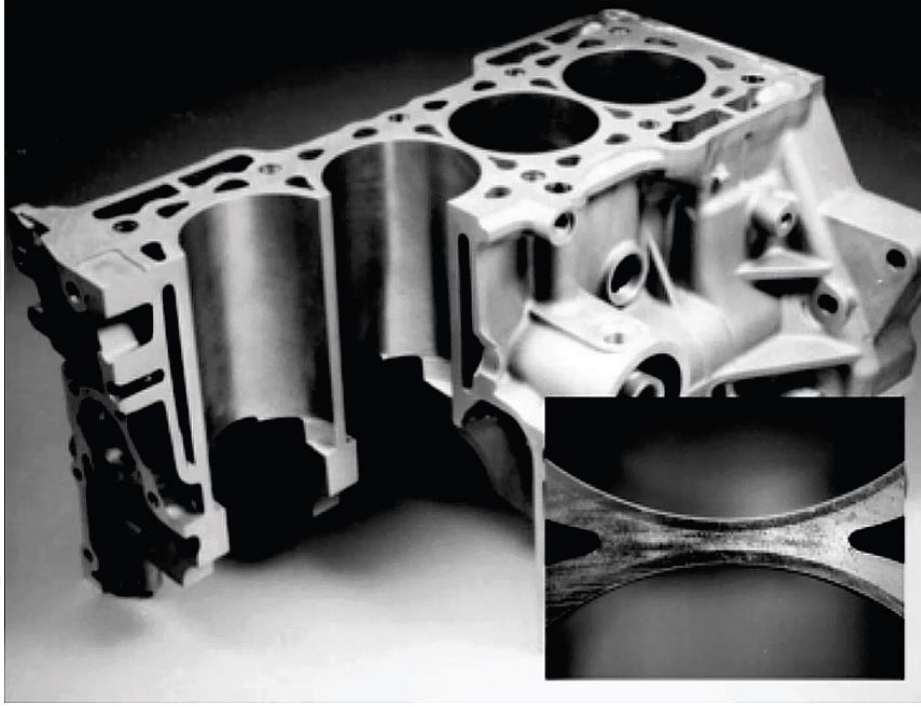


Şekil 4.11. Alüminyum/SiC-grafit krank mili [65]

1983 yılında Toyota Motor Company tarafından dizel motor pistonlarında dökme demir yerine kullanılan alüminyum matrisli kompozitler bu alanın ilk başarılı örneklerini oluşturmuşlardır [65].

Otomotiv motorunda alüminyum matrisli kompozit kullanımı ile ilgili diğer bir örnek Honda Prelude'da kullanılan silindir gömleğidir [65]. Aşınma direnci için Al-Si

matris içerisinde %12 Al_2O_3 içeren alüminyum matrisli kompozit kullanılmıştır. Dökme demirle kıyaslandığında %50 ağırlık tasarrufu sağlayan bu uygulama ilk olarak Honda Prelude 2.3L motorunda uygulanmıştır. Ardından Honda S2000, Toyota Celica ve Porsche Boxster motorlarında da kullanılmıştır. [65]. Honda Prelude motorunda kullanılan alüminyum matrisli kompozit motor bloğu ve silindir gömleği Şekil 4.12’de verilmiştir [66].



Şekil 4.12. Honda prelude motor bloğu ve silindir gömleği [66]

Wisconsin-Milwaukee Üniversitesi Kompozit Malzeme Merkezi’nde grafit partikülleri içeren alüminyum matrisli kompozit malzemeden pistonlar ve silindir gömlekleri geliştirilmiştir [67]. Üretilen pistonlar ve silindir gömlekleri gazlı ve dizel motorlarda ve yarış arabalarında test edilmiş sonuç olarak daha düşük aşınma oranları ve sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Geliştirilen piston ve silindir gömleği Şekil 4.13’de verilmiştir.

Otomobillerde genelde gri dökme demirden üretilen fren diskleri, otomobilin ağırlığını azaltma konusunda hedef alınan komponentlerin başında gelmektedir. Dökme demirlere kıyasla alüminyum matrisli kompozitlerin çok daha hafif olmaları ve üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olmaları, alüminyum matrisli kompozitleri fren diski üretimi konusunda çalışılır hale getirmiştir.

Dört kapılı bir sedan arabada kullanılan ve gri dökme demirden elde edilen fren diskleri yerine, Herling tarafından yürütülen bir projede SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitler kullanılmıştır. Gri dökme demirden elde edilen fren diskinin 8,44 kg'lık ağırlığı alüminyum matrisli kompozit malzemeler kullanılarak 3,32 kg'a düşürülmüştür [68]. Şekil 4.14'de bu fren diskleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13. UWM kompozit malzeme merkezinde üretilen piston, silindir gömleği ve mikroyapıları [67]



Şekil 4.14. a) Gri dökme demirden üretilen fren diski b) Al/SiC alüminyum matrisli kompozitten üretilen fren diski [68]

Küçük ekonomik bir aracın %12'sinin, dizel bir kamyonun %15-17'sinin dökme demirden üretilen parçalar olduğu göz önüne alındığında dökme demir parçaların alüminyum parçalar ile değiştirilmesi araçta ciddi bir ağırlık azalması sağlar [69].

Yüksek dayanımlarının sonucu olarak kardan şaftlarında kullanılan alüminyum matrisli kompozitlere örnek olarak 1997 yılında Chevrolet S-10 ve GMC Sonoma taşıma kamyonunda kullanılan alüminyum matrisli kompozit kardan şaftları verilebilir. [65]

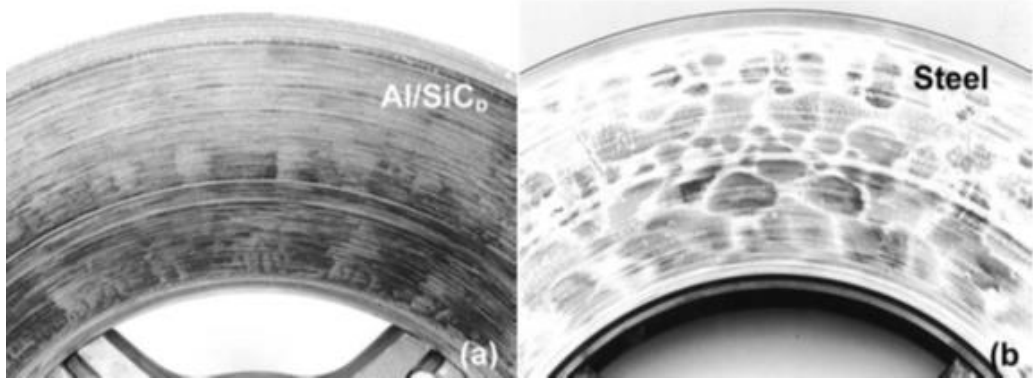
Alüminyum matrisli kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki bazı ispatlanan kullanımları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. *Kullanımı ispatlanan bazı alüminyum matrisli kompozit uygulamaları [65]*

Üretici	Kompozit	Parça
Duralcan, Martin maretta, Lanxide	Al/SiCp	Pistonlar
Duralcan, Lanxide	Al/SiCp	Fren rotorları, kaliperler, gömlekler
GKN, Duralcan	Al/SiCp	Pervane şaftı
Nissan	Al/SiCw	Bağlantı çubuğu
Toyota	Al/Al ₂ O ₃	Segmanlar
Dupont, Chrysler	Al/Al ₂ O ₃	Bağlantı çubukları
Martin Marietta	Al/TiCp	Pistonlar, bağlantı çubukları
Honda	Al/Al ₂ O ₃ -Cf	Motor blokları
Lotus Elisse, Volkswagon	Al/SiCp	Fren rotoları
Chrysler	Al/SiCp	Fren rotorları
GM	Al/SiCp	EV-1 için arka fren kampanası, tahrik mili, motor beşiği
MC-21, Dia-Compe, Manitou	Al/SiCp	Bisiklet çatal freni ve disk fren rotorları

4.1.2.2. Demiryolu uygulamaları

Bir demiryolu aracı için tipik fren sistemi dört fren diski, kaliperler, el freni ve elektromanyetik frenden oluşur. Bunların ağırlığı bir vagon alt düzeneğinin toplam ağırlığının yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Bu uygulama için SiC partiküllü alüminyum matrisli kompozit kullanılmıştır. Özel bir proses ile takviyesiz alaşım ve alüminyum matrisli kompozit ardışık katmanlar halinde dökülmüştür. Bu çalışma ile kompozit stratejik olarak daha önemli olan bölgeye uygulanmış ve böylece maliyetin düşmesine olanak sağlamıştır. Küresel grafitli dökme demirden üretilen bu sistemin ağırlığı alüminyum matrisli kompozit malzeme kullanılarak 115 kg'dan 65 kg'a düşürülmüş ve %43'lük ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Çelik ve alüminyum matrisli kompozitten üretilen fren disklerinin aşınma testi sonrası görüntüleri Şekil 4.15'de verilmiştir. Çelik ve alüminyum matrisli kompozit fren disklerinin bu görselleri karşılaştırıldığında nispeten iyi durumda olan alüminyum matrisli kompozite karşın çelik fren diskinde çatlaklar gözlemlenmiştir [25].



Şekil 4.15. Aşınma testi sonrası görüntüler a) Alüminyum matrisli kompozitten üretilen fren diski b) Çelik fren diski [25]

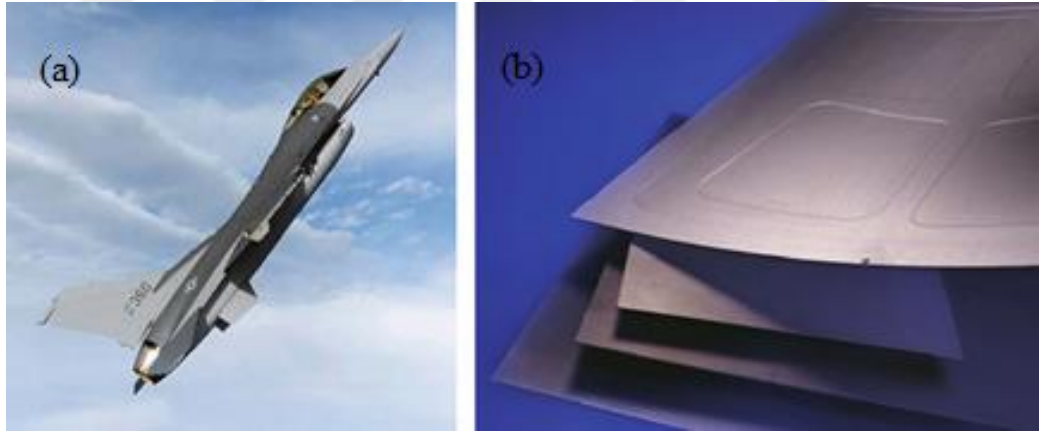
4.1.2.3. Havacılık, uzay ve askeri alanlardaki uygulamaları

Ürün performansının maliyetten önde olduğu havacılık sektöründe bir malzemedan beklenen özellikler hafiflik, yüksek sertlik, mukavemet ve özel ısıl genleşme ve iletkenliktir [70].

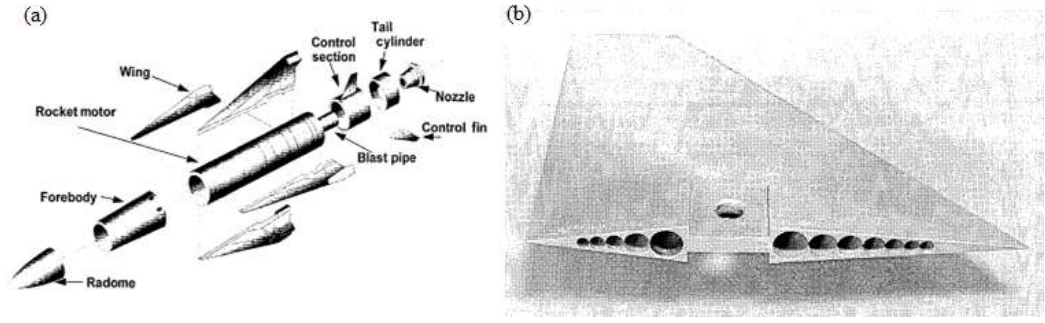
Alüminyum matrisli kompozitler askeri uçaklarda çok fazla kullanım alanı bulmaktadır. Daha önce takviyesiz alüminyum alaşımı kullanılarak üretilen F-16 uçaklarının karın kanatçıkları alüminyum matrisli kompozitler ile değiştirilmiştir. Karın kanatçıklarında kullanılan alüminyumun, alüminyum matrisli kompozitler (Şekil 4.16)

ile değiştirilmesi ile kanatçıkların ömrü dört kat artmıştır. Yine F-16'ların yorulmaya direnci düşük olan giriş kapıları Al/SiCp alüminyum matrisli kompozitler ile değiştirilmiştir [70].

Alüminyum matrisli kompozitlerin kullanıldığı bir başka alan ise fzelerdir. Yüksek ısıl dayanım ve mukavemetin arandığı bu alanda alüminyum matrisli kompozitler güçlü birer adaydır. elik ve titanyum gibi metallerin ağırlıklarından dolayı füzelerde kullanımı zordur. Bu nedenle alüminyum matrisli kompozitler füze kanat ve kanatçıkları için kullanılabilirler [70]. Alüminyum bazlı metal matrisli kompozitlerin füzelerde kullanımını araştırmak üzere 1990 yılında Technical Demonstrator Programme (TDP) kurulmuştur. Bu kapsamda n gövde yapısı, kanat, kuyruk silindiri, kontrol kanadı ve şaftı ve kontrol silindiri olmak üzere beş farklı füze komponentinin alüminyum matrisli kompozitler ile üretimi araştırılmıştır. Bahsi geçen füze komponentleri ve alüminyum matrisli kompozitler ile üretilen kanatçık şekil 4.17'de, tasarım çalışmaları sonucu sağlanan potansiyel ağırlık ve maliyet tasarrufu Tablo 4.4'de gösterilmiştir. [71]



şekil 4.16. a) F-16 b) Alüminyum matrisli kompozitten üretilen kompozit karın kanatçığı [70]



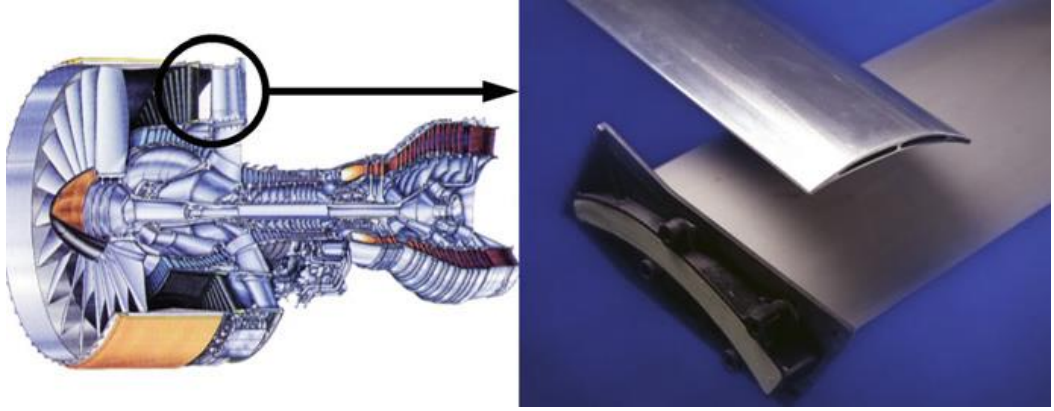
Şekil 4.17. a) Tipik bir füzeyi oluşturan komponentlerin şematik görünümü b) Alüminyum matrisli kompozit ile üretilen füze kanadı [71]

Tablo 4.4. Potansiyel ağırlık ve maliyet tasarrufları (Ürün maliyetleri mevcut tasarım toplamının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.) [71].

Komponent	Eski Malzeme	Yeni Malzeme	%Ağırlık Tasarrufu	%Maliyet tasarrufu
Ön gövde	Çelik	PM Al-Mg-Si + %ağr. 20 SiC	49	94
Kanat	Alüminyum	PM Al-Cu-Mg + % ağr. 20 SiC	15	-
Kuyruk silindiri	Alüminyum	Döküm Al-Si + %ağr. 20 SiC	34	112
Kontrol kanadı ve şaftı	Alüminyum/çelik	SiC fiber takviyeli alüminyum	40-60	93
Kontrol silindiri	Alüminyum	Karbon fiber takviyeli alüminyum	-	167

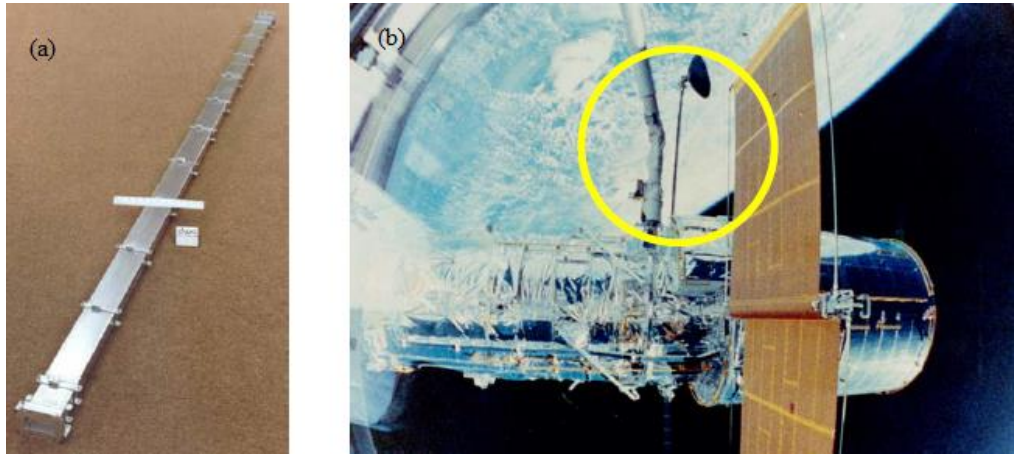
Alüminyum matrisli kompozitler aynı zamanda ticari havacılık uygulamalarında da kullanım alanı bulmuştur. Daha önce karbon/epoksi kompozitten üretilen fakat yabancı cisim hasarı nedeniyle problem yaşanan Boeing 777'nin Pratt & Whitney motorundaki fan çıkış vanası (Şekil 4.18) SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit

malzeme ile üretilerek soruna çözüm bulunmuş ve bakım ve onarım maliyetlerinde tasarruf sağlanmıştır [70].



Şekil 4.18. Alüminyum matrisli kompozit ile üretilen Boeing 777'nin Pratt & Whitney motorundaki fan çıkış vanası [70]

Alüminyum matrisli kompozitlerin uzay alanında kullanımına Hubble Uzay Teleskobunun anteni verilebilir. Uzay aracı ve anten çanağı arasında elektrik sinyalleri ileterek dalga kılavuzu görevi sağlayan bu parça Grafit/Al kompozittir. Matris malzemesi olarak 6061 Al kullanılmıştır (Şekil 4.19). Bu uygulamada alüminyum matrisli kompozitlerin mükemmel elektriksel iletkenlik ve yüksek boyutsal kararlılık gibi özelliklerinden faydalanılmıştır [72].



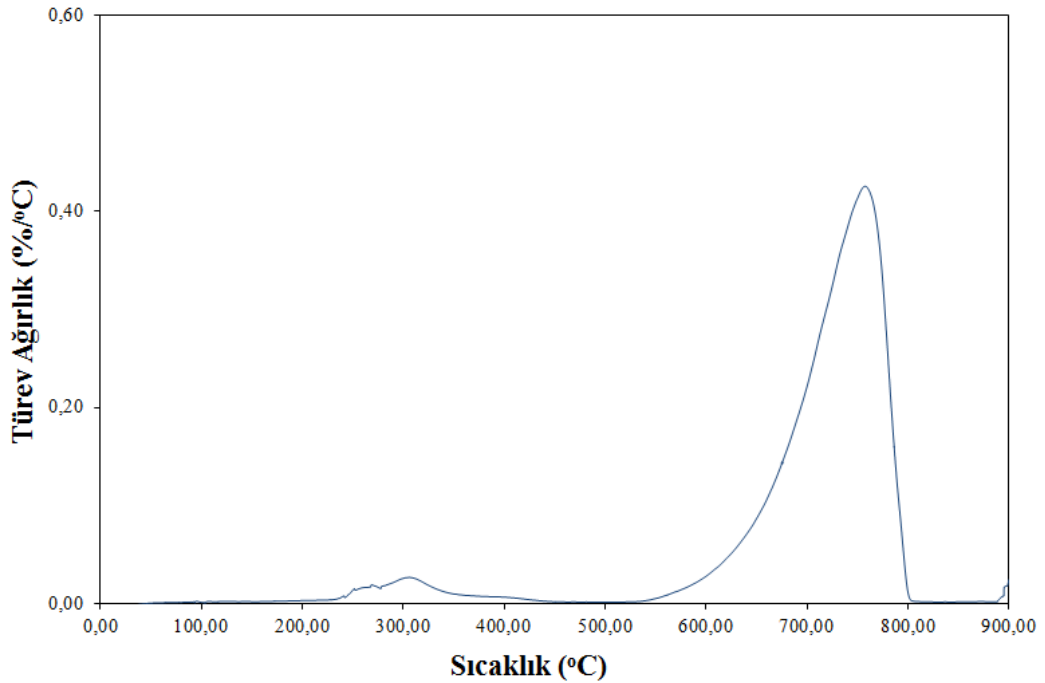
Şekil 4.19 Hubble Uzay Teleskobu için üretilen P100/6061 alüminyum matrisli kompozit anten dalga kılavuzu a) Teleskoba eklenmeden önce b) Teleskop üzerinde [72]

5. AMAÇ VE ÖNEM

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler, geleneksel alüminyum alaşımlarına kıyasla yüksek spesifik mukavemet, sertlik ve aşınma direnci sergilemesi ve yaşanan teknolojik gelişmeler doğrultusunda özellikle hafifliğin önemli olduğu alanlarda ön plana çıkan malzemeler olmuşlardır. Bu çalışmada saf alüminyumun yüksek korozyon direnci, yüksek süneklik ve tokluk değerine karşın düşük mukavemetinden dolayı alaşımlarına oranla daha düşük kullanım alanı bulması göz önünde bulundurularak mekanik ve tribolojik özelliklerini güçlendirmek amacı ile matris malzemesi olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışma kapsamında başta otomotiv ve havacılık olmak üzere birçok sektörde aranan mekanik ve tribolojik özelliklerin (spesifik mukavemet, sertlik, aşınma direnci) maliyet etkin bir şekilde geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, doğada sürekli yenilenmesi sonucunda çevre kirliliğine neden olan ve bozunmaları sürecinde çevreye zarar veren atık midye kabuklarının kompozit malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılması ile hem midye kabuklarının endüstriyel amaçlı geri dönüşümü ile çevre kirliliğinin önüne geçilmesi hem de maliyet etkin bir şekilde ürün elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, midye kabuklarının doğada sürekli yenilenebilirlik içerisinde olmalarından dolayı alüminyum matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan seramik takviye elemanlarına düşük maliyetli alternatif oluşturması ve aynı zamanda midye kabuklarının geri dönüşümü ile “Yeşil Mutabakata Uyum Kapsamındaki Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları” kapsamında “Yeşil ve Sürdürülebilir Tarım: Tarladan Sofraya Sürdürülebilir Tarım” başlığı altındaki “Tarımsal Üretimde ve Gıda Sektöründe Atık ve Artıkların Geri Dönüşümünün Sağlanmasına ve Tekrar Değerlendirilmesine Yönelik Yenilikçi Uygulamalar” alt başlığına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

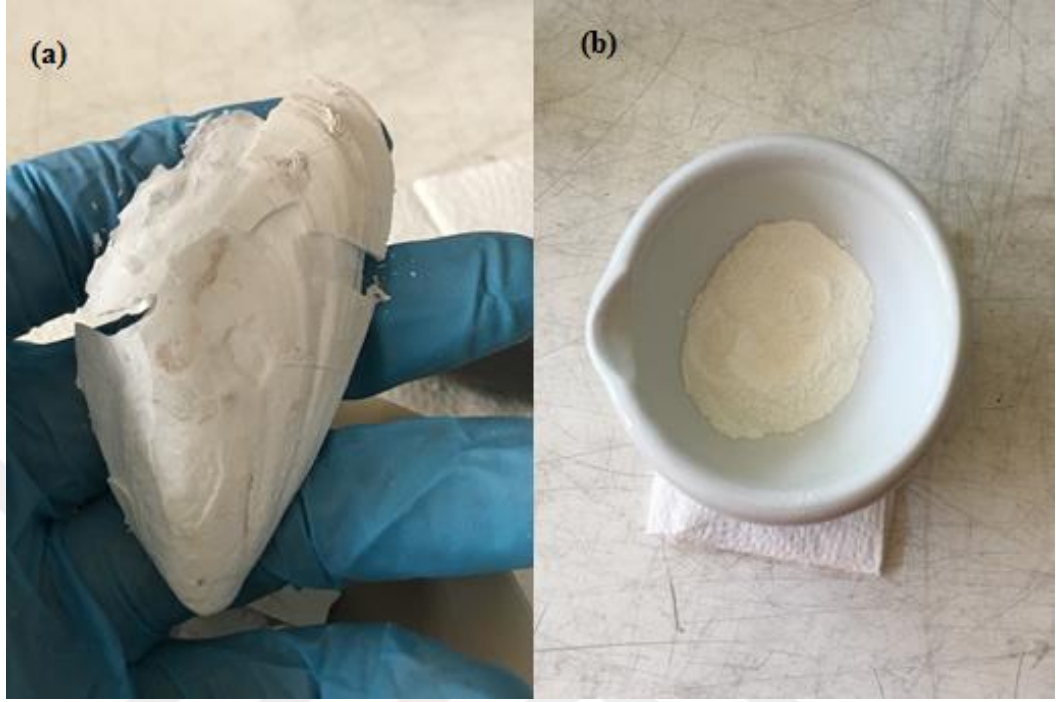
Bu çalışma kapsamında, Al matris kompozit üretiminde takviye olarak midye kabuğu kullanılmıştır. Kompozit üretim yöntemi olarak kullanılması hedeflenen karıştırmalı döküm altyapısı üniversitemiz bünyesinde bulunmadığı için alternatif ergitme yöntemlerine yönelerek ark ergitme yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Yapılan literatür taramasında biyo-kabuk yapıların kalsinasyon sıcaklıklarının alüminyumun ergime sıcaklığı ile yakın olması [15,16] nedeniyle ergitme işlemi sırasında kabukların kalsinasyona uğrayacağı ve bu nedenle gaz çıkışı gerçekleşerek kompozitlerde gözenekliliğe neden olacağı düşünülmüş ve aynı zamanda kalsinasyon ile yapıdaki emprüte miktarını azaltmak için kalsinasyon işlemi uygulanmasına karar verilmiştir. Piyasadan temin edilen atık midye kabuklarının kalsinasyon sıcaklığının tayini için TGA Q500 (TA Instrument, USA) cihazı kullanılmıştır. Oda sıcaklığından 900 °C'ye 10 °C/dak ısıtma hızıyla azot atmosferinde ısıtılan tozların kalsinasyon sıcaklıkları belirlenmiştir. Termogravimetrik analiz sonucu (Şekil 6.1) CaCO_3 'ün kalsiyum oksite (CaO) dönüşümünün ~810 °C'de tamamlandığı görüldüğü için kalsinasyon sıcaklığı 800 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1. Midye kabuğunun TGA analizi sonucu

Midye kabukları yıkanıp kurutulduktan sonra MSE marka ATN_1100_18 model (Türkiye) fırında 10 °C/dak hızla 800 °C'ye ısıtılmış, 2 saat süreyle bu sıcaklıkta kalsine

edilmiştir. Kalsinasyon sonrasında midye kabukları havanda kolaylıkla öğütülebilir hale gelmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. a) Kalsine edilmiş midye kabuğu b) Öğütülmüş kalsine midye kabuğu tozları

Takviye boyutunun mekanik ve tribolojik özellikler üzerine etkisini incelemek üzere öğütülmüş tozlar Fritsch Analysette 3 marka titreşimli elek sistemine yerleştirilen 25 μ ve 50 μ 'luk elekler ile 30 dakika boyunca 1,5 mm titreşimde elenerek 25 μ altı, 25 μ - 50 μ ve 50 μ üzeri olmak üzere üç boyuta ayrılmıştır.

Ayrıca ağırlıkça farklı oranlarda (%5, 10, 15 ve %20) takviye içeren Al matris kompozitler üretilerek katkı miktarının yapının homojenliğine ve tribolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Al matris kompozit üretiminde vakum ark ergitme ve emme döküm yöntemi kullanılmıştır. Al matris için öncelikle alüminyum parçaları eritmeye çalışılmış ancak ısı iletkenliğinin yüksek olması dolayısıyla başarılı bir sonuç elde edilememiştir. Bu nedenle, %99,5 saflıkta Al tozu (Alfa Aesar, 7-15 μ m) ile kalsine midye kabuğu tozlarının belirlenen oranlarda karıştırılması yöntemi ile üretime devam edilmiştir. Toz karışımları 18 mm çaplı paslanmaz çelik kalıp içerisinde hidrolik pres cihazı ile 500 psi basınç altında preslenerek pelet oluşturulmuştur.

Elde edilen peletler, Edmund Böhler GmbH marka ark ergitme cihazında (Şekil 6.3) ergitilerek emme döküm yöntemi ile soğutmalı bakır kalıba (Şekil 6.4) dökülmüştür.



Şekil 6.3. Ark ergitme cihazı



Şekil 6.4. Emme döküm yöntemi için kullanılan bakır kalıp

6.1. Karakterizasyon Çalışmaları

6.1.1. Midye kabuğunun karakterizasyonu

6.1.1.1. Tane boyut dağılım analizi

Eleme işlemi sonrasında tozların ortalama boyutları ve boyut dağılımları Mastersizer 2000 (Malvern, UK) cihazı ile yapılan toz boyut dağılım analizi sonucunda tespit edilmiştir.

6.1.1.2. Fourier transform kızılötesi spektrometresi (FTIR)

Kalsinasyon öncesinde ve sonrasında midye kabuklarının moleküllerinin yapısındaki bağların tanınması ve literatürdeki bilgiler ile karşılaştırılması amacıyla Bruker Tensor II (Bruker, Almanya) marka Fourier transform kızılötesi spektrometresi (FTIR) kullanılarak FTIR analizi yapılmıştır.

6.1.1.3. X-ışınları flüoresans (XRF)

Hem kalsinasyon öncesinde hem de kalsinasyon sonrasında midye kabuklarının içeriklerinin tespitinde XRF (ZSX Primus, Rigaku, Japonya) analizinden faydalanılmıştır.

6.1.1.4. X-ışınları kırınım (XRD)

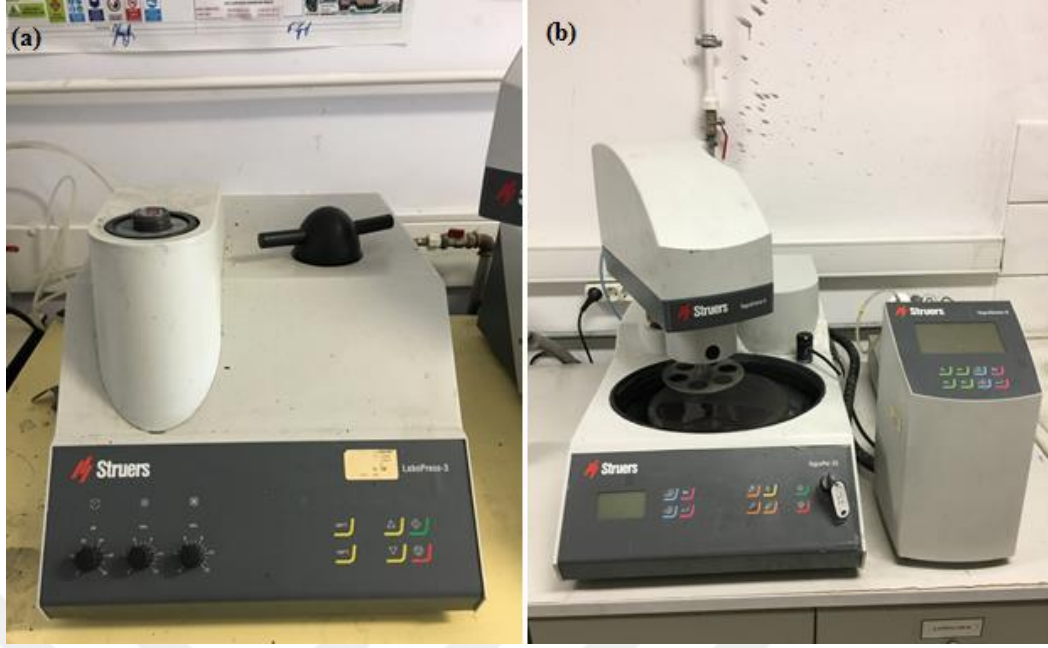
Miniflex600 (Rigaku, Japonya) cihazı ile yapılan XRD analizi ile kalsine edilmemiş midye kabuğu tozlarındaki CaCO_3 'ün, kalsine edilmiş midye kabuğu tozlarındaki CaO 'nun formu belirlenmiştir.

6.1.2. Üretilen kompozitin karakterizasyonu

6.1.2.1. Mikroyapısal karakterizasyon

Üretilen kompozitlerde olası döküm hataları ve midye kabuğu tozlarının matris içerisindeki dağılımının analizinde Zeiss Primotech optik mikroskobu kullanılmıştır. Öte yandan, midye kabuğu tozlarının alüminyum matris içerisindeki dağılımı ve arayüz uyumu EDX eklentili Zeiss Supra 50VP SEM ile incelenmiştir.

Mikroyapısal karakterizasyon için üretilen kompozitlerden alınan kesitler Struers marka (Şekil 6.5a) sıcak kalıplama cihazı ile bakalite alınmıştır. Bakalite kalıba alınan numunelerin yüzeyleri sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh numarasına sahip SiC zımparalar kullanılarak açılmıştır. Ardından Struers marka (Şekil 6.5b) otomatik parlatma cihazı yardımıyla parlatılmıştır.



Şekil 6.5. a) Sıcak kalıplama cihazı b) Otomatik parlatma cihazı

6.1.2.2. Sertlik ölçüm cihazı

Üretilen kompozitlerin sertliği Emcotest (M1C 010) marka mikrosertlik ölçüm cihazında (Şekil 6.6) Vickers sertlik metodu ile ölçülmüştür. Ortalama sertlik değerinin hesaplanmasında minimum 5 ölçümün ortalamasından faydalanılmıştır.



Şekil 6.6. Sertlik ölçüm cihazı

6.1.2.3. Arşimet yoğunluk ölçüm düzeneği

Ark ergitme yöntemiyle üretilen kompozitlerin yoğunlukları 0,0001 gram hassasiyete sahip terazi kullanılarak ölçülmüştür. Arşimet prensibi ile kompozitin yoğunluğunu hesaplamak için numune önce hava ortamında, daha sonra saf su içerine daldırılarak tartılmıştır. Kompozitlerin yoğunluğu Eşitlik 6.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{W_H}{W_H - W_S} \times \rho_{su} \quad (6.1)$$

ρ : yoğunluk, W_H : Kuru numunenin havadaki ağırlığı, W_S : Numunenin su içindeki ağırlığı, ρ_{su} : suyun yoğunluğu

SPS ile üretilen kompozitlerin gözeneklilik ölçümleri ise ksilen kullanılarak yapılmıştır. Arşimet prensibi ile ölçülen gözeneklilik ölçümünde sadece açık gözeneklilik ölçümü yapıldığı için ImageJ yazılımı kullanılarak bu kompozitlerin kesitlerinden alınan SEM görüntülerine ayrıca bir gözeneklilik ölçümü yapılmıştır. Arşimet prensibi ile yapılan ölçümler için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Üretilen kompozitlerin kuru ağırlıkları (W_{kuru}) tartıldı ve kompozitler ksilen içerisine daldırıldı.
- Tüm gözenekleri ksilen ile doldurmak için ksilen solüsyonunda kompozitleri içeren beherlere 1.5 saat vakum uygulandı.
- Yoğunluk ölçüm kitinin ölçüm kabı ksilen ile dolduruldu.
- Kompozitlerin ağırlığı (W_{ksilen}), süspansiyon halindeyken ksilen içinde ölçüldü.
- Kompozitlere, üzerlerindeki fazla ksilen silindikten sonra başka bir ağırlık ölçümü (W_{sol}) uygulandı.

Kompozitlerin yoğunluğu Eşitlik 6.2 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\rho_{kompozit}}{\rho_{ksilen}} = \frac{W_{kuru}}{W_{sol} - W_{ksilen}} \quad (6.2)$$

$\rho_{kompozit}$: Kompozitin yoğunluğu, ρ_{ksilen} : ksilenin yoğunluğu (0,861 g/cm³)

Toplam gözeneklilik ölçümleri ise Eşitlik 6.3 ile hesaplanmıştır.

$$P_{top} = 1 - \frac{\rho_{kompozit}}{\rho_{Al}} \quad (6.3)$$

P_{top} : Toplam gözeneklilik, $\rho_{kompozit}$: Kompozitin yoğunluğu, ρ_{Al} : Alüminyumun yoğunluğu

6.1.2.4. Aşınma test cihazı

Üretilen kompozitlerin kesitlerine CSM Instruments tribometre (Şekil 6.7) ile ball-on-disk yöntemi kullanılarak aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Test 3N yük altında, WC bilyeler ile 16 m mesafe olarak uygulanmış ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 6.7. Aşınma test düzeneği

6.1.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Üretilen kompozitlerin aşınma testi sonrasında aşınma derinlikleri Mitutoyo SJ-400 marka profilometre (Şekil 6.8) ile gerçekleştirilmiştir.



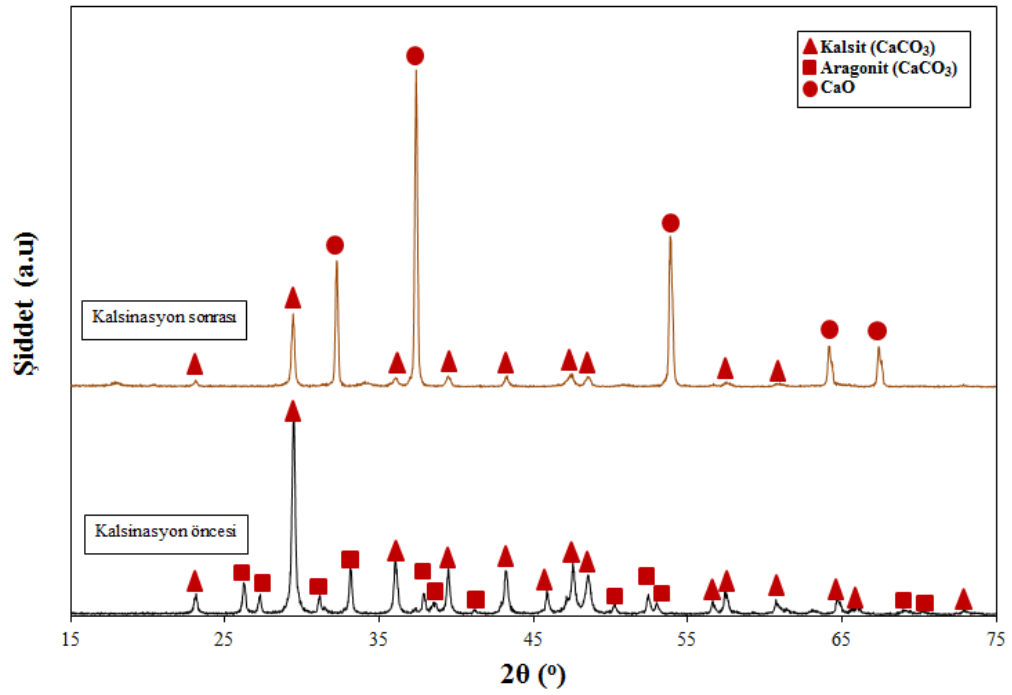
Şekil 6.8. Aşınma derinlikleri ölçümü için kullanılan profilometre

7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

7.1. Midye Kabuğu

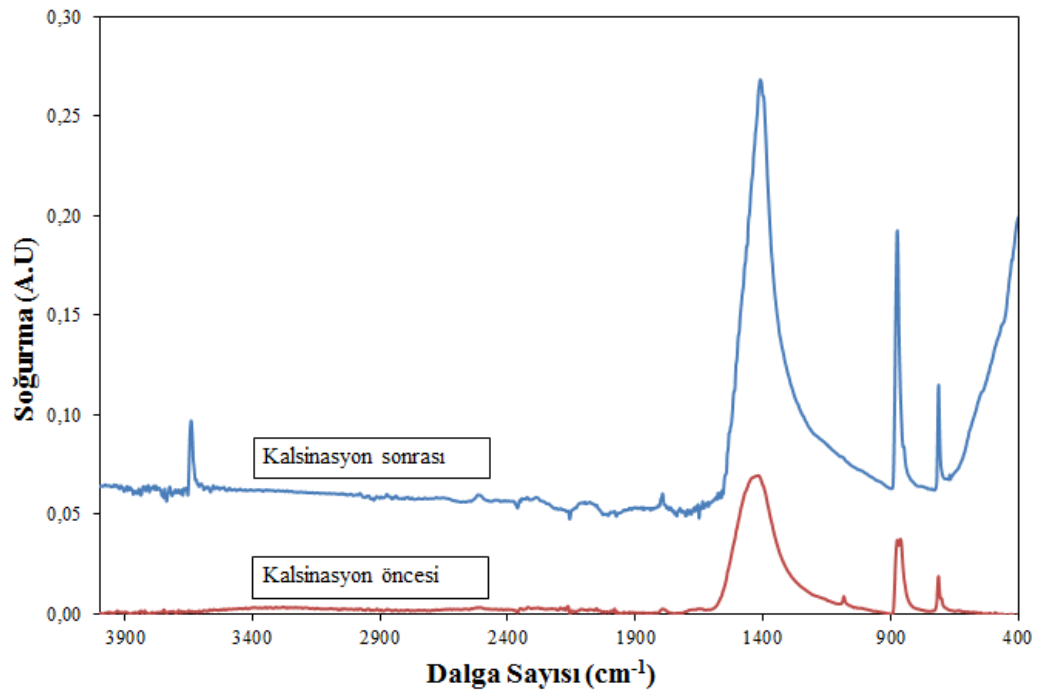
Temin edilen midye kabuklarının kalsinasyon işlemi öncesinde ve sonrasında içeriğinin tayini için XRD ve XRF analizlerinden faydalanılmıştır.

Kalsinasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış midye kabuklarına ait XRD analiz sonuçları Şekil 7.1’de verilmiştir. XRD analizi sonucu midye kabuğu yapısında CaCO_3 ’ün kalsit ve aragonit olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Kalsinasyon işlemi sonrasında analizde gözlenen CaO pikleri kalsinasyon işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak kalsinasyon işleminden sonra da yapıda kalsit fazında CaCO_3 bulunmaktadır.



Şekil 7.1. Midye kabuklarının XRD analizi

Kalsinasyon öncesinde ve sonrasında midye kabuğu tozlarına FTIR analizi (Şekil 7.2) de yapılmıştır. FTIR sonucundaki 1468 cm^{-1} , 1082 cm^{-1} , 857 cm^{-1} ve 712 cm^{-1} civarlarında bulunan pikler karbonat grupları ile alakalı piklerdir [73,74]. Öte yandan, kalsinasyon işlemi sonrasında görülen ve Ca-O bağlarına ait olan 500 cm^{-1} civarındaki yüksek pik kalsinasyon işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca kalsinasyon sonrasında yapılan XRF analizi (Tablo 7.1) de FTIR sonuçlarını destekler niteliktedir. XRF analizi kalsinasyon sonrasında empürite miktarlarında da az da olsa düşüş olduğunu göstermektedir.

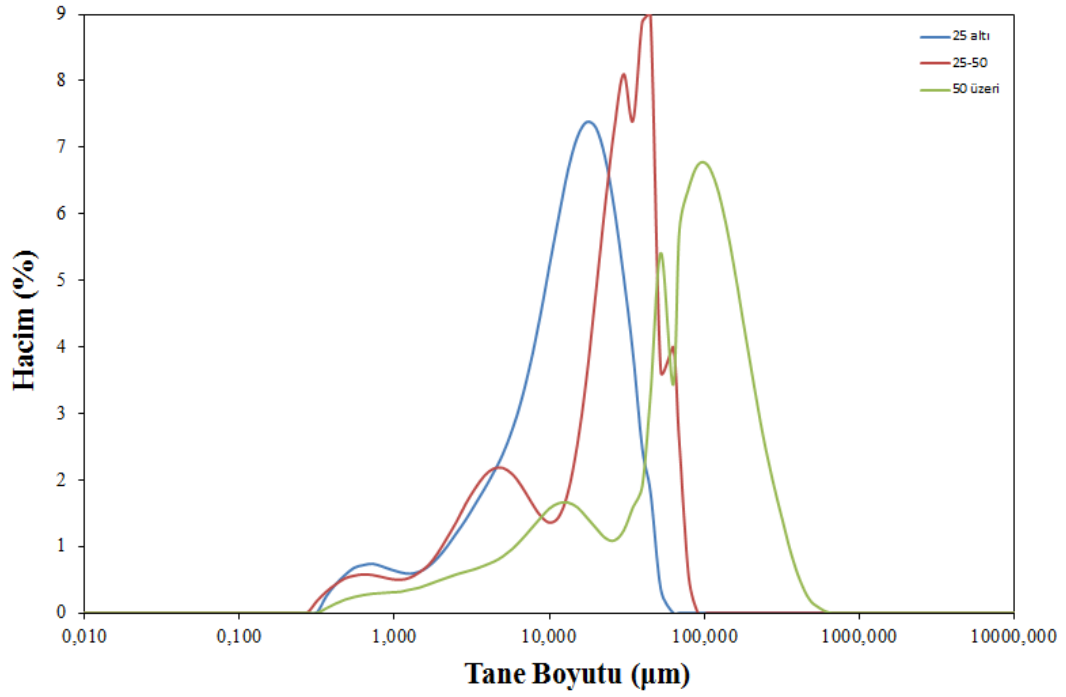


Şekil 7.2. Midye kabuğu FTIR analizi

Tablo 7.1. Kalsinasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış midye kabuklarının XRF analiz sonuçları

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Diğer
Kalsine edilmemiş (%ağr.)	0,641	0,432	0,767	0,344	0,0554	0,103	52,0	0,144	45,5
Kalsine edilmiş(%ağr.)	0,620	0,235	0,582	0,261	0,0478	0,109	59,1	0,119	38,9

Tane boyut dağılım analiz sonuçları (Şekil 7.3) 25 µm altına elenen tozların ortalama tane boyutunun 16,5 µm, 25-50 µm arasında elenen tozların ortalama tane boyutunun 32 µm ve 50 µm’lik elek üzerinde kalan tozların ortalama tane boyutunun 101,6 µm olduğunu göstermektedir.

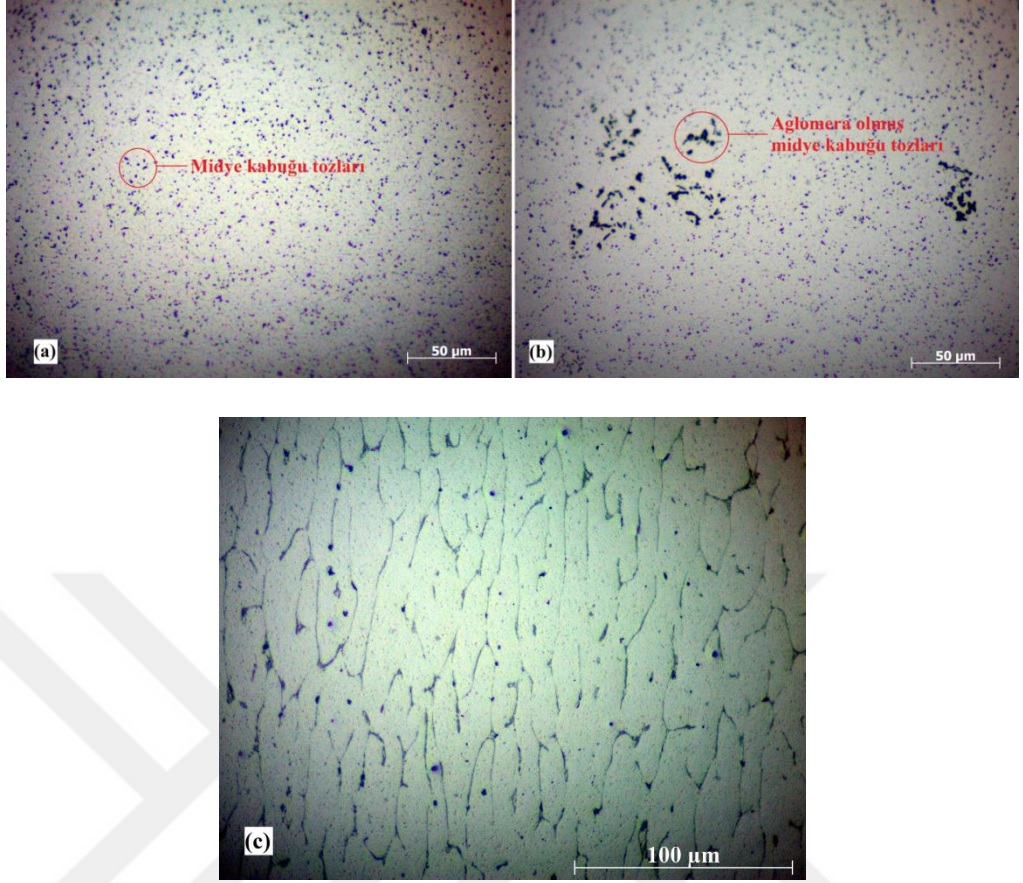


Şekil 7.3. Üç farklı toz boyutu için yapılan tane boyut dağılım analizi

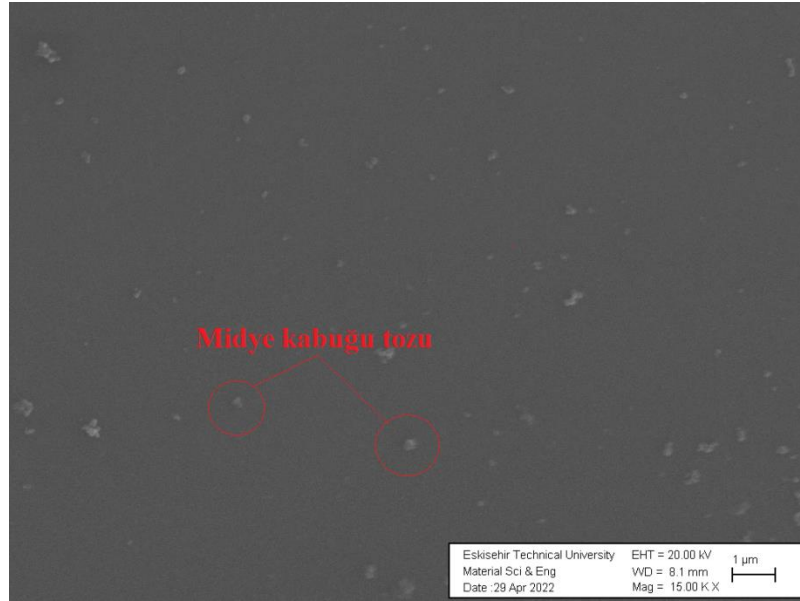
7.2. Kompozit

Farklı tane boyutlarına sahip midye kabuğu takviyeleri ile üretilen kompozitlerin optik mikroskopta alınan görüntüleri Şekil 7.4'de verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde midye kabuğu tozlarının alüminyum matris içinde homojen bir şekilde dağıldığı fakat bazı bölgelerde elle karıştırmadan kaynaklı olarak lokal topaklanmaların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 25 µm'den küçük tozların tane sınırlarında segregasyona uğradıkları dikkat çekmiştir. Segregasyonun malzemenin çekme mukavemeti ve süneklik gibi mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkileri bilindiğinden 25 µm altındaki tozlar kullanılmaktan vazgeçilmiştir [75].

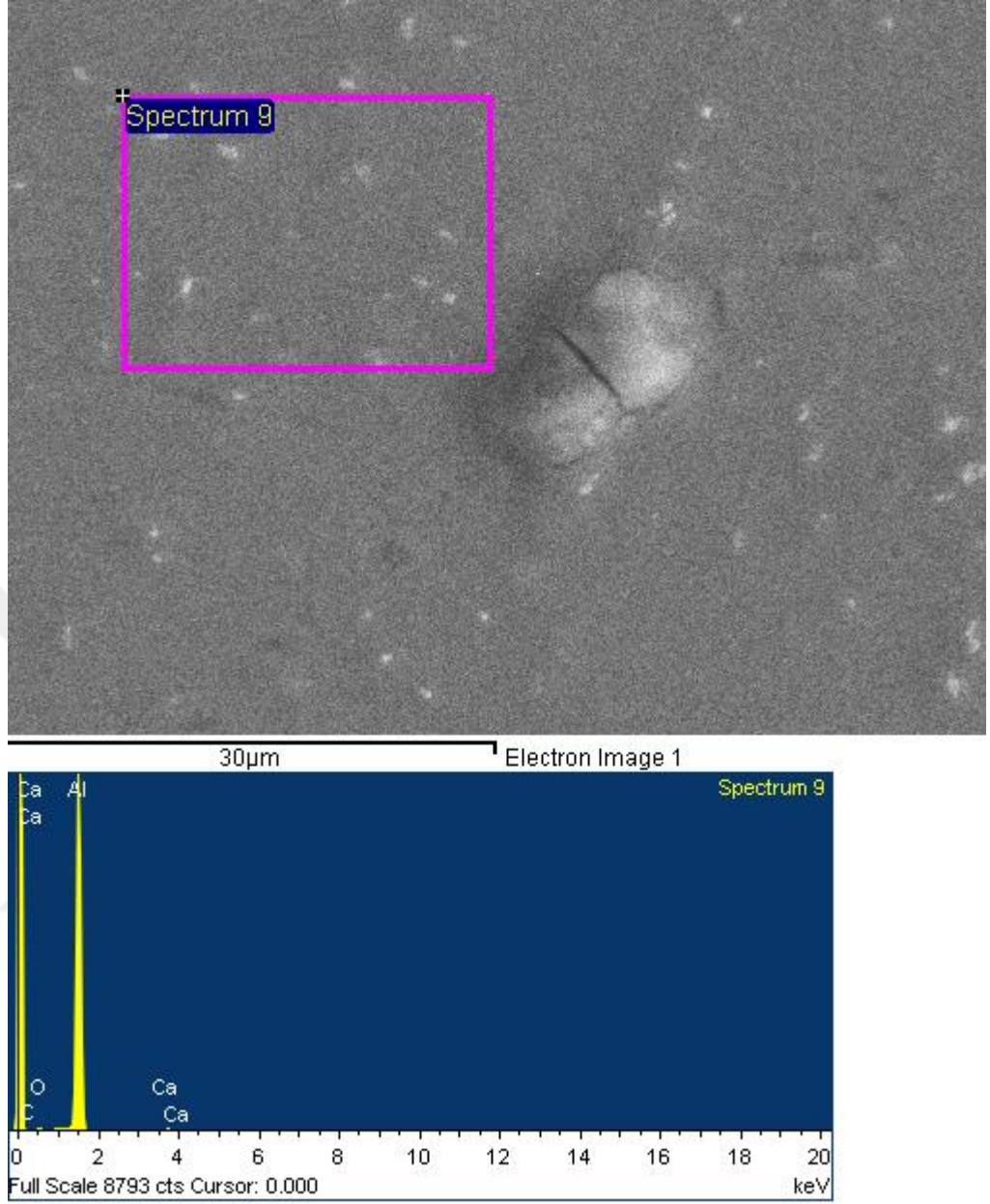
Üretilen kompozitler SEM ile incelendiğinde midye kabuğu tozunun alüminyum matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Ancak ergitme sırasında oluşturulan ark midye kabuğu tozlarında termal şoka bağlı kırılmalara sebep olmuş ve takviye edilen midye kabuğu toz boyutları yaklaşık olarak 1-5 µm aralığına düşmüştür. Üretilen kompozitin SEM görüntüsü Şekil 7.5'da, EDX analizi ise Şekil 7.6'de verilmiştir. EDX analizi sonucu yapıda CaO ve CaCO₃ olduğunu doğrulanmıştır.



Şekil 7.4. Ark ergitme yöntemi ile %5 midye kabuğu takviyesi ile üretilen kompozitlerin 500x büyütmedeki optik mikrografları a) 50 µm'den büyük, b) 50 µm'den büyük, (c)25 µm'den küçük.



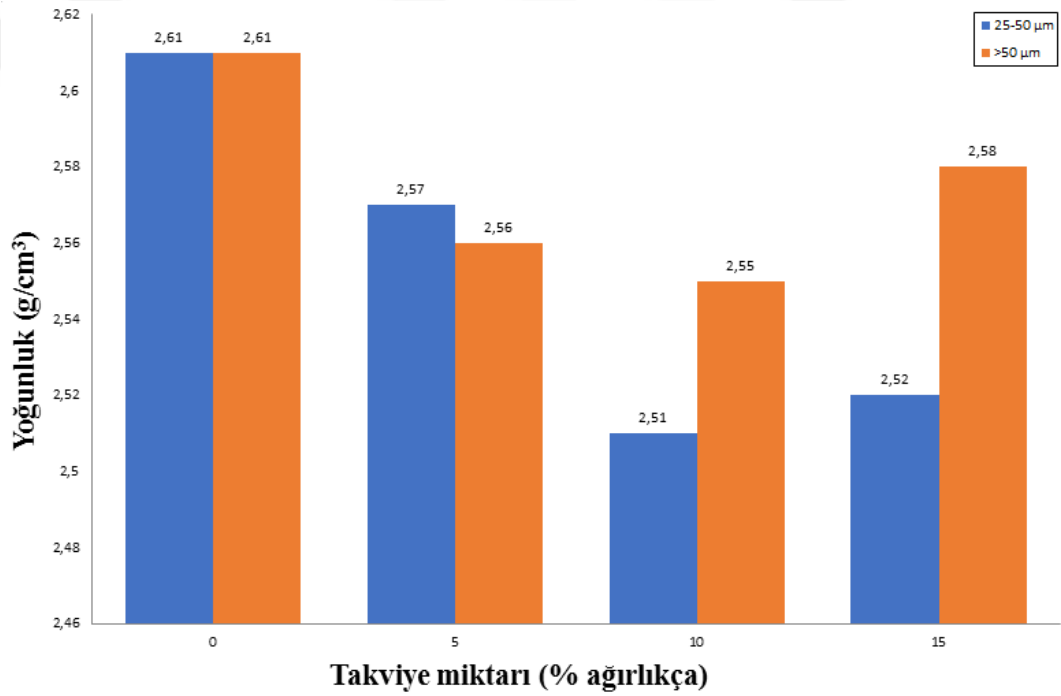
Şekil 7.5. 50 µm üzeri tane boyutlu tozlardan %5 takviye ile üretilen kompozite ait SEM görüntüsü (15000x)



Şekil 7.6. Midye kabuğu takviyeli kompozitin EDX analizi

Farklı boyutlardaki tozlardan çeşitli takviye oranlarına sahip kompozitlere ait yoğunluklar Şekil 7.7’de verilmiştir. Takviyesiz saf alüminyumun $2,61 \text{ g/cm}^3$ ’lük yoğunluğunda artan takviye miktarı ile azalma gözlemlenmiştir. 25-50 μm ve 50 μm üstü boyutlarındaki tozlardan üretilen kompozitlerin her ikisi için de en düşük yoğunluk değeri %10 takviye oranında gözlenirken, her iki boyut için de %10’dan sonra yoğunlukta artış görülmüştür. Ağırlıkça %10’un üzerinde takviye edilen kompozitlerde döküm işlemi sırasında takviyenin matris içerisinde homojen olarak karışmadığı gözlemlenmiştir. Biyo-kabuklardan elde edilen CaCO_3 ’ün yoğunluğunun alüminyumun yoğunluğundan daha düşük olduğu literatürde biyo-kabuklar üzerine yapılan

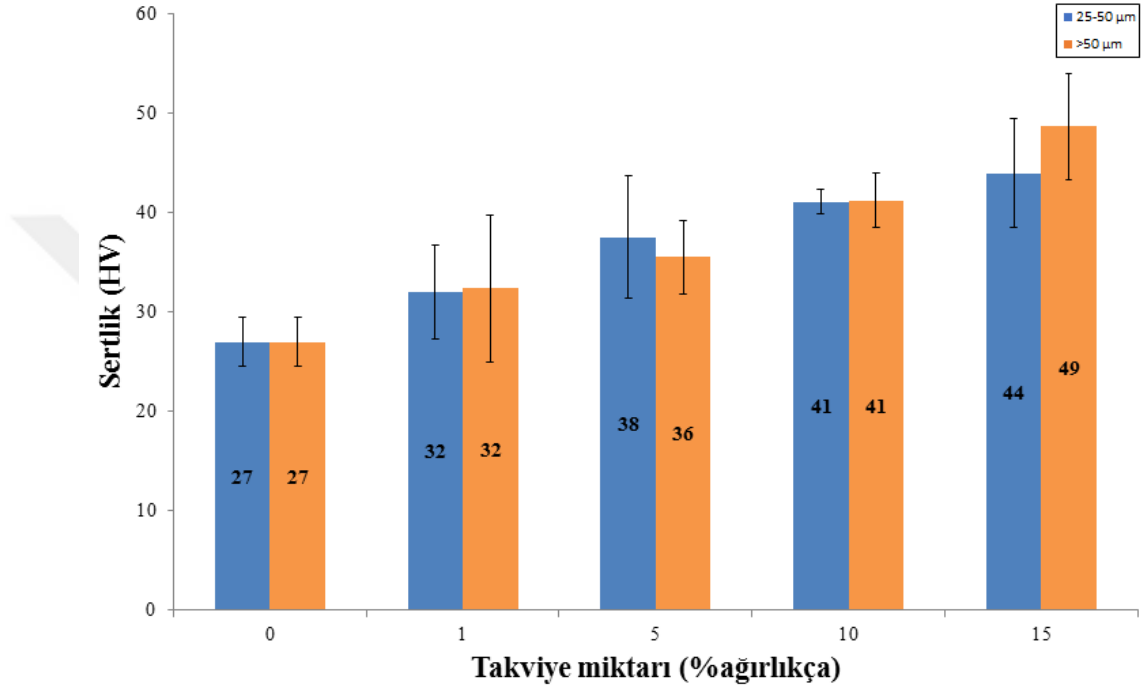
çalışmalardan bilinmektedir [16, 35, 54, 55, 56]. Düşük yoğunlukları nedeni ile ergime işlemi sırasında ergimiş metalin yüzeyine çıkma eğilimde olan takviye malzemelerinin homojenizasyonunun %10 üzerindeki takviye oranlarından sonra mümkün olmadığı görülmüştür. Ayrıca artan takviye miktarı ile takviyelerin bir kısmının cürufa ayrıştığı gözlemlenmiştir. Ark ergitme işlemi ile ergitilen alüminyum/midye kabuğu toz karışımında midye kabuklarının bir kısmı düşük yoğunluklarından dolayı sıvı metal yüzeyine çıkmaktadır. Vakum vanasının açılması ile ergimiş metal/takviye karışımının kalıba emilmesi sırasında alüminyumun düşük vizkozitesinden dolayı kalıba hızlı bir şekilde dolmasından kaynaklı olarak takviye partiküllerinin sıvı metale karışamayarak cürufa ayrıştığı düşünülmektedir.



Şekil 7.7. Farklı tane boyutlarının ve farklı takviye oranlarının yoğunluğa etkisi

Farklı tane boyutları ve farklı takviye oranlarında üretilen kompozitlerin sertlik değerleri Şekil 7.8’de verilmiştir. Sertlik sonuçları incelendiğinde artan takviye miktarı ile kompozitin sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Kompozit en iyi sertlik değerlerine 50 µm üstü toz boyutunda %15 takviye oranında ulaşmıştır. Artan takviye oranına bağlı olarak kompozitin sertliğinde artış gözlenmiştir. 50 µm üstü tane boyutunda %15 takviye oranında en yüksek sertlik değerinin gözlenmesi, Şekil 7.4b’de gösterilen 50 µm üstü tozların aglomera olmasına bağlanabilir. Şekil 7.9’da verilen aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları ile Şekil 7.8’de verilen sertlik sonuçları karşılaştırıldığında en yüksek

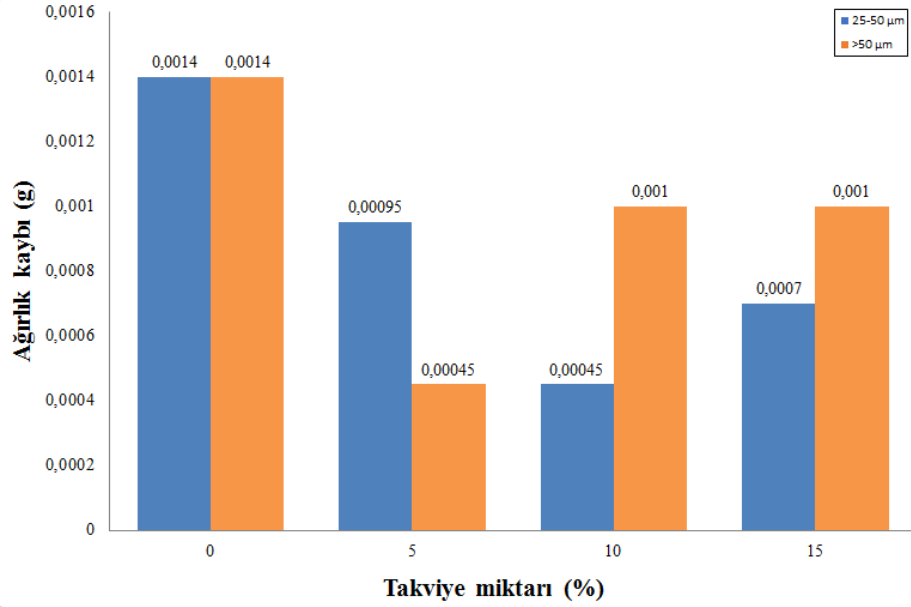
sertlik gösteren kompozitin en fazla aşınma direnci göstermesi; buna bağlı olarak da en az ağırlık kaybı bu kompozitte beklenirken sonuçlar bunu göstermemektedir. Bunun nedeninin lokal olarak gözlenen aglomerasyon olduğu, sertlik ölçümü sırasında bu bölgelerden alınan sertlik ölçümlerinin ortalama sertlik değerini artırdığı fakat aşınma testi sırasında aglomerasyon gözlenmeyen bölgelerde aşınmanın nispeten daha yüksek olmasına bağlı olarak daha fazla ağırlık kaybı olduğu sonucuna varılmıştır.



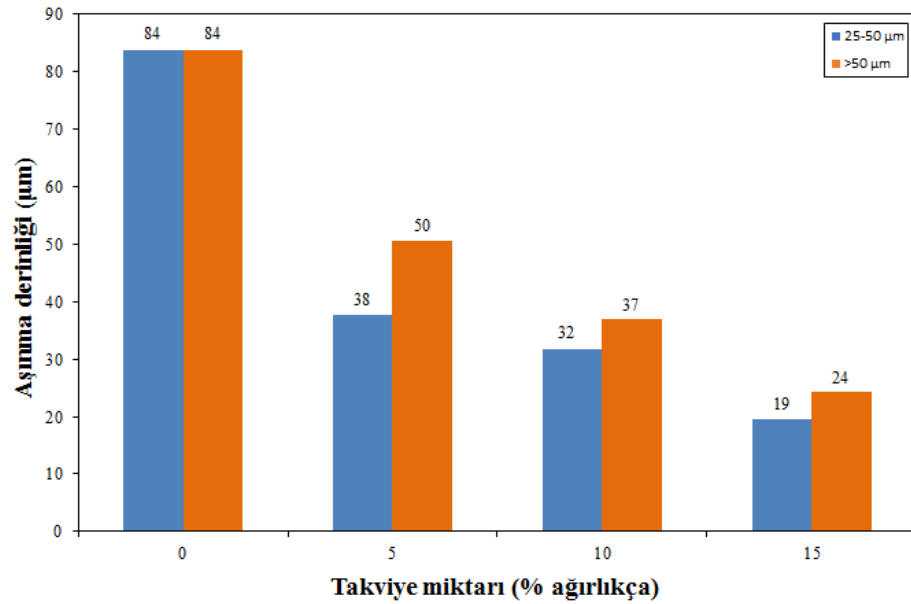
Şekil 7.8. Farklı takviye oranlarında ve farklı takviye tane boyutlarında üretilen kompozitlerin sertlik değerleri

Kompozitlerin Şekil 7.9’da verilen aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları değerleri incelendiğinde 25-50 µm toz boyutuna sahip takviyelerin %10’a kadar artan takviye miktarı ile ağırlık kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber, 50 µm üzeri toz boyutuna sahip takviyelerin ilave edildiği kompozitlerin %5 takviye oranından sonra artan takviye miktarı ile aşınma dirençlerinin düştüğü ve buna bağlı olarak ağırlık kayıplarında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Daha önce de değinildiği gibi ark ergitme sırasında takviye tozlarının cürufa ayrışması ve özellikle yüksek toz boyutunda gözlemlenen homojenize olamama gibi problemler aşınma direncinin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 7.10’da verilen aşınma testi sonrası aşınma derinliklerinin ölçümü bunu desteklemektedir. Kompozitlerin üç farklı bölgesinden alınan aşınma derinliği ölçümlerinin ortalaması olan bu sonuçlar incelendiğinde de en az aşınma derinliği her iki

tane boyutu içinde %15’de takviye oranında en az aşınma derinliği sonucunu vermiştir. Bunun nedeninin her iki toz boyutu için %10 takviyeden sonra gözlemlenen aglomerasyon ve homojenize olamama durumu olduğu düşünülmektedir. Aglomera olan bölgelerde artan sertliğe bağlı olarak kopmaların az olmasının bunun sonucu olarak da aşınma derinliğinin az olmasının ortalama aşınma derinliği boyutunu etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.



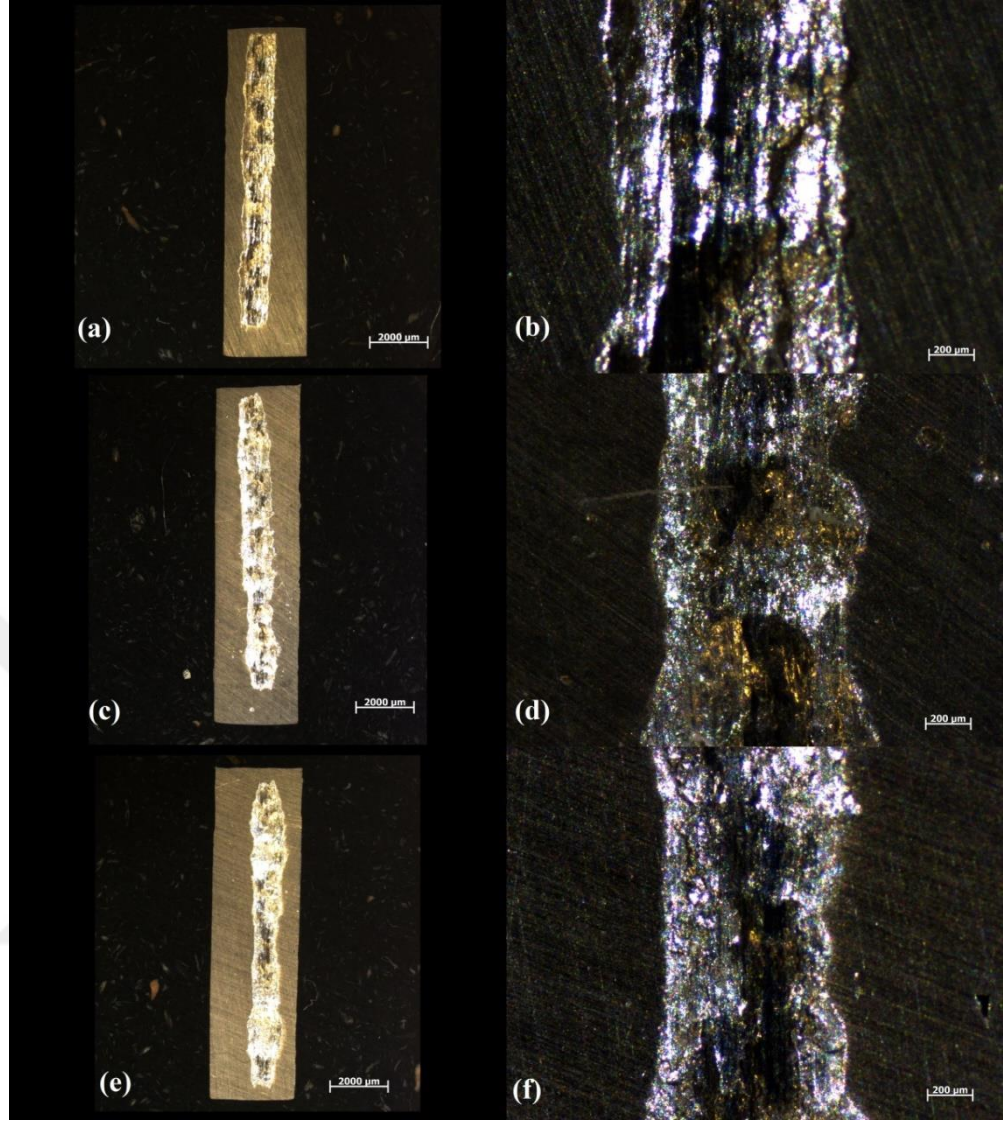
Şekil 7.9. Farklı takviye boyutları ve oranları ile üretilen kompozitin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları



Şekil 7.10. Ark ergitme ile üretilen kompozitlerin aşınma derinlikleri

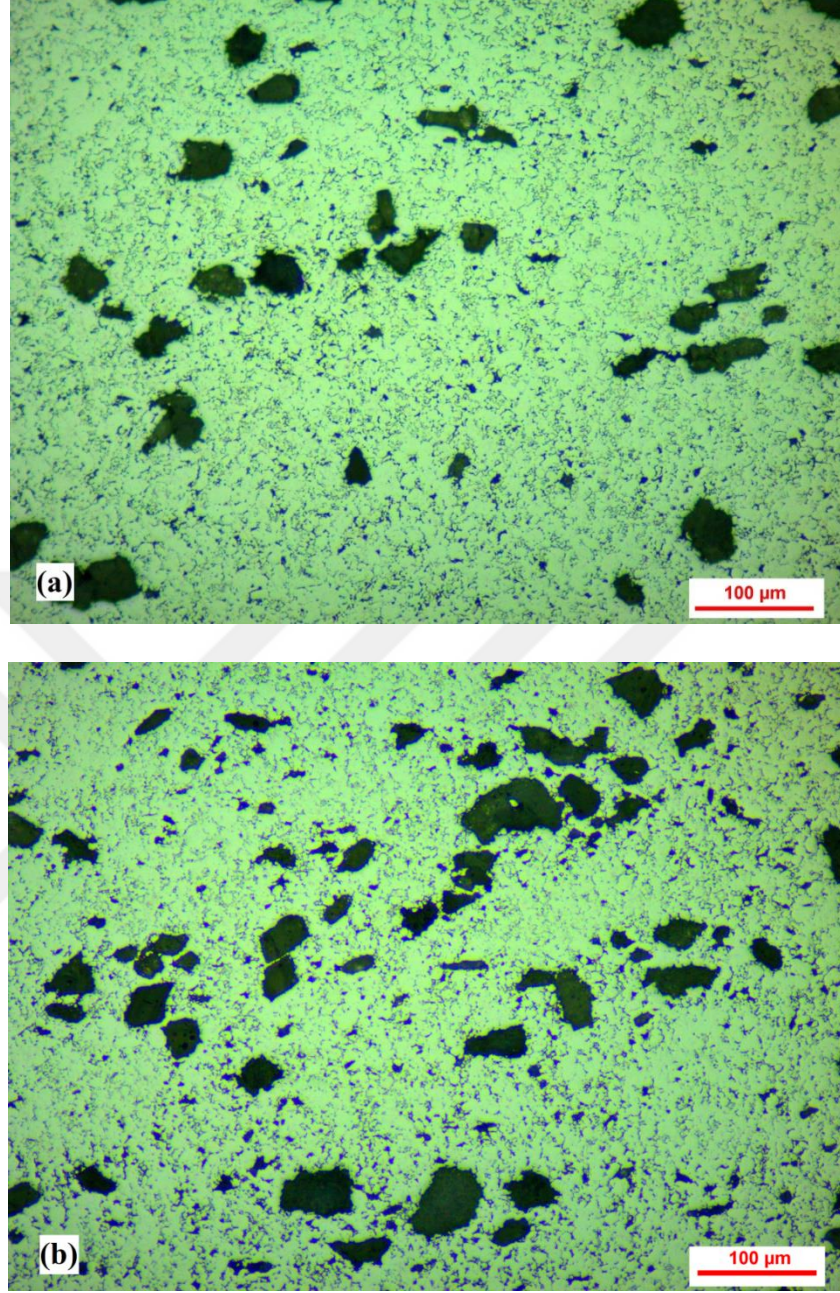
Ark ergitme ve emme döküm yöntemi kullanılarak üretilen, kalsine midye kabuğu takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde gözlemlenen termal şok nedeni ile takviye tozlarının parçalanmasının önüne geçilememiş ve bu durumdan dolayı alternatif üretim yöntemi olarak kıvılcım plazma sinterleme (SPS) ile midye kabuğu takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretimi üzerine de çalışılmıştır.

Ark ergitme ve emme döküm yöntemi ile üretilen kompozitlerden aşınma testi sonrası alınan stereo mikroskop görüntüleri Şekil 7.11’de verilmiştir. Aşınma yüzeyleri genel olarak değerlendirildiğinde artan takviye miktarı ile aşınma genişliğindeki homojenliğin bozulduğu gözlenmektedir. Bunun nedeninin ark ergitme ve emme döküm yönteminde artan takviye miktarı yüzdesine bağlı olarak azalan homojenlik olduğu düşünülmektedir. Takviyelerin aglomera olduğu bölgelerde aşınma ve kopmaların daha az olduğu buna bağlı olarak da aşınma genişliğinin daha dar olduğu sonucu elde edilmiştir.

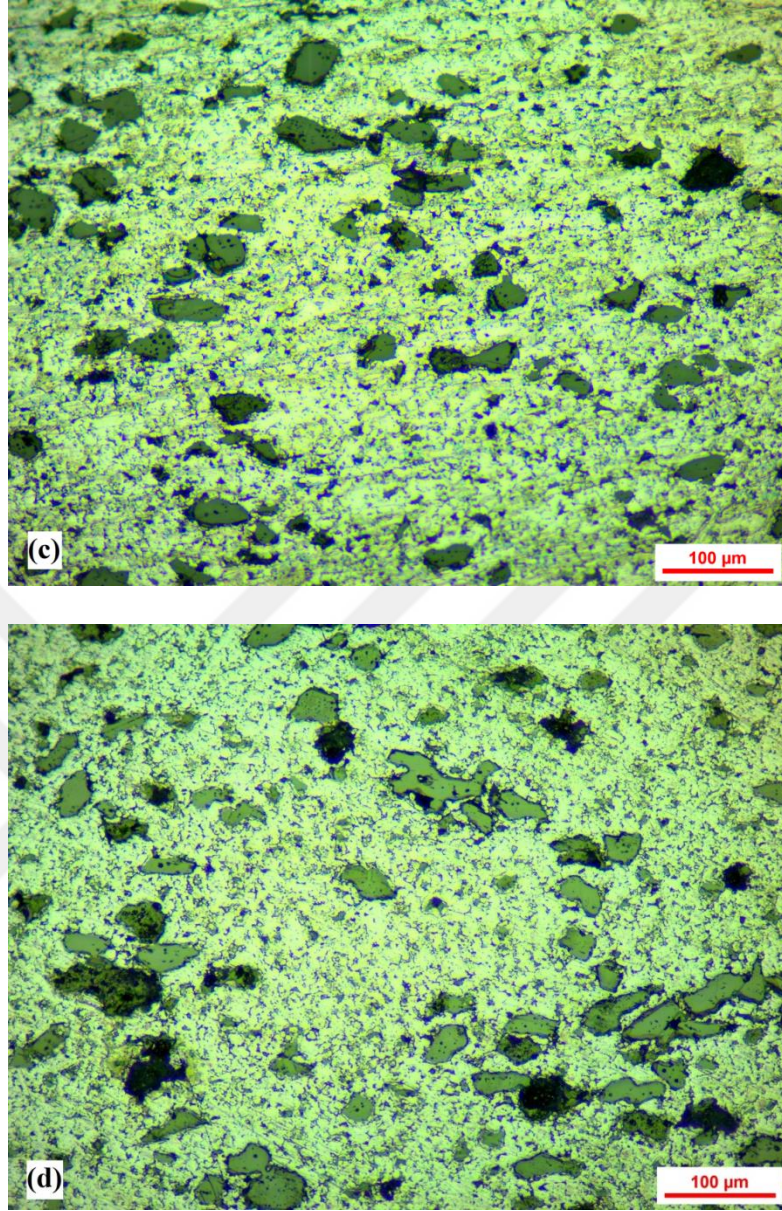


Şekil 7.11. Ark ergitme ve emme döküm yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma yüzeyleri: a, b) %5 c, d) %10 e, f) %15

Ağırlıkça benzer takviye oranlarında (%5, %10, %15 ve %20) üretilen kompozitlerin mikroyapıları optik mikroskop (Şekil 7.12) ve SEM (Şekil 7.13) ile incelenmiştir. Midye kabuğu tozlarının kesit boyunca homojen dağılım gösterdiği ancak lokal konsantrasyon değişikliklerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ark ergitme yönteminde karşılaşılan takviye parçalarının kırılması sorunu SPS yönteminde görülmemiş; böylece bu sorunun önüne geçilmiştir.

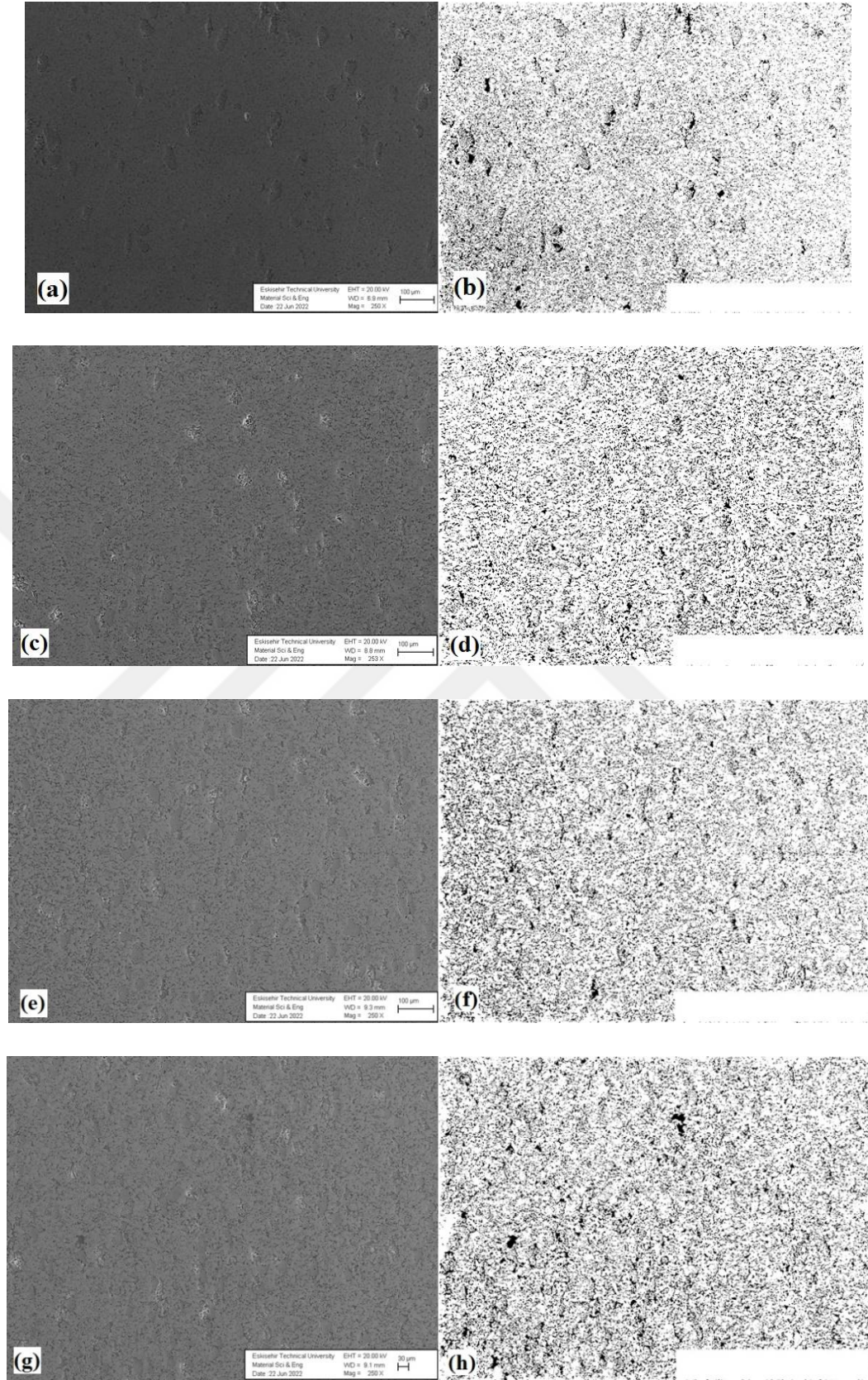


Şekil 7.12. SPS ile üretilen kompozitlerin 200x büyütmedeki optik mikrografları: a) %5, b) %10 takviyeli

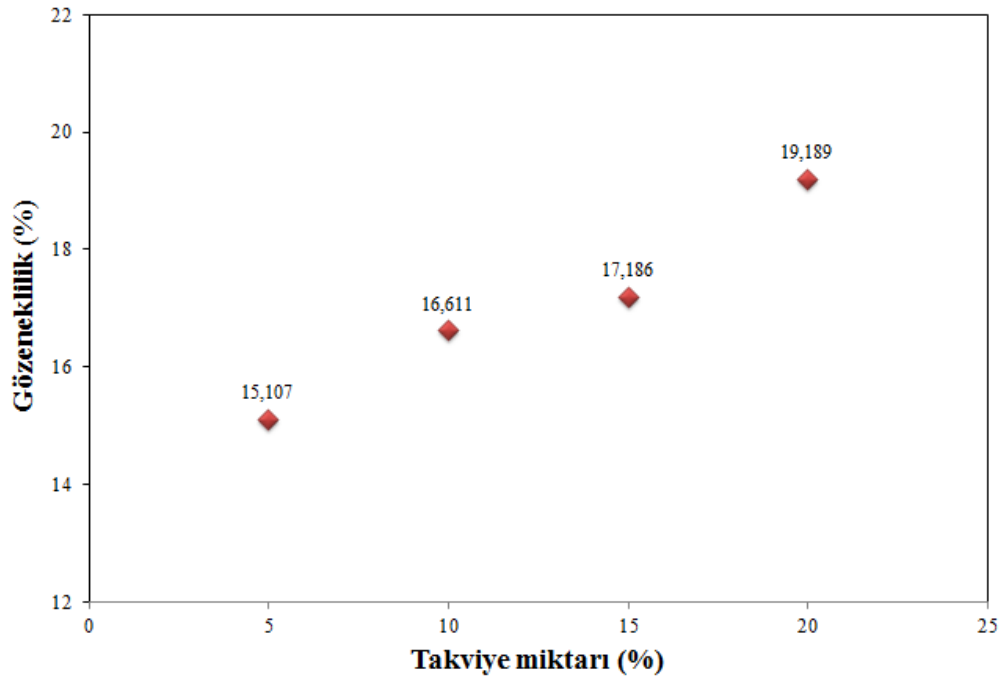


Şekil 7.12. (Devam) SPS ile üretilen kompozitlerin 200x büyütmedeki optik mikrografları: c) %15, d) %20 takviyeli

SEM mikrografları üzerinden ImageJ yazılımı ile yapılan gözeneklilik ölçüm sonuçlarında (Şekil 7.14) artan takviye miktarı ile gözenekliliğin arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin ise sınırlı sinterleme süresinin (1 dakika) artan takviye miktarına bağlı olarak yetersiz gelmesi olabileceği değerlendirilmektedir. Artan takviye oranı ile matris ve takviye arasındaki tutunmanın azalması sonucu metalografik numune hazırlama işlemi sırasında kompozitten takviye tozlarının koptuğu SEM görüntülerinde görülmektedir. Sinterleme süresinin artırılması ile bu problemin önüne geçileceği öngörülmektedir.

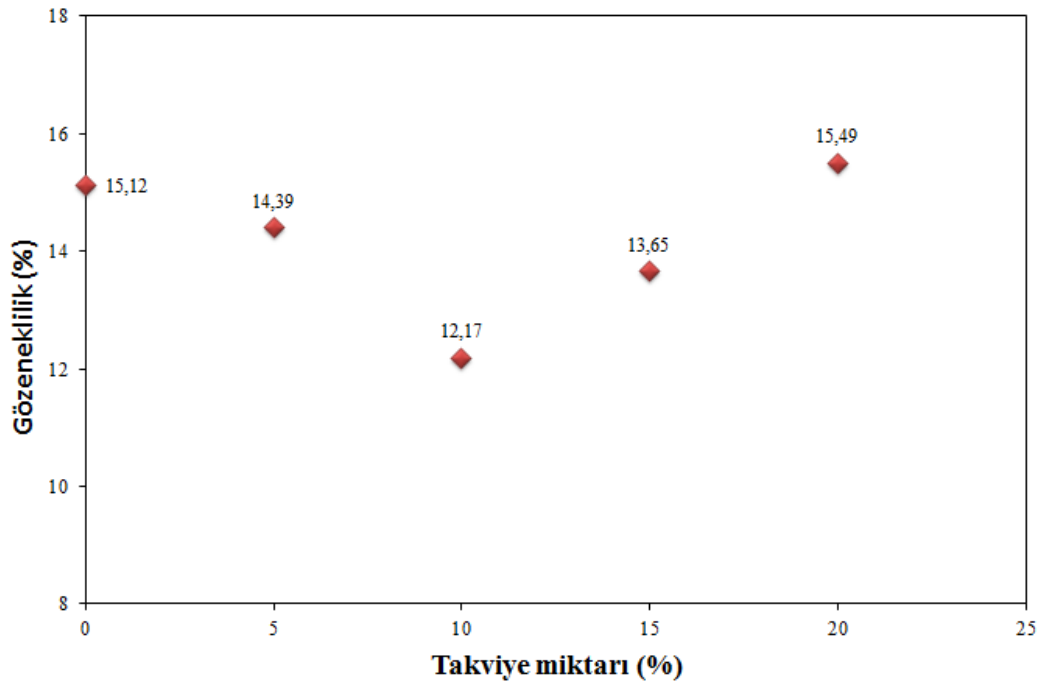


Şekil 7.13. Kompozitlerin sırasıyla SEM görüntüleri ve gözeneklilik haritaları a, b) %5, c,d) % 10, e,f) %15 g,h) %20 takviyeli



Şekil 7.14. Farklı takviye oranları ile üretilen kompozitlerin % gözeneklilikleri (Image J)

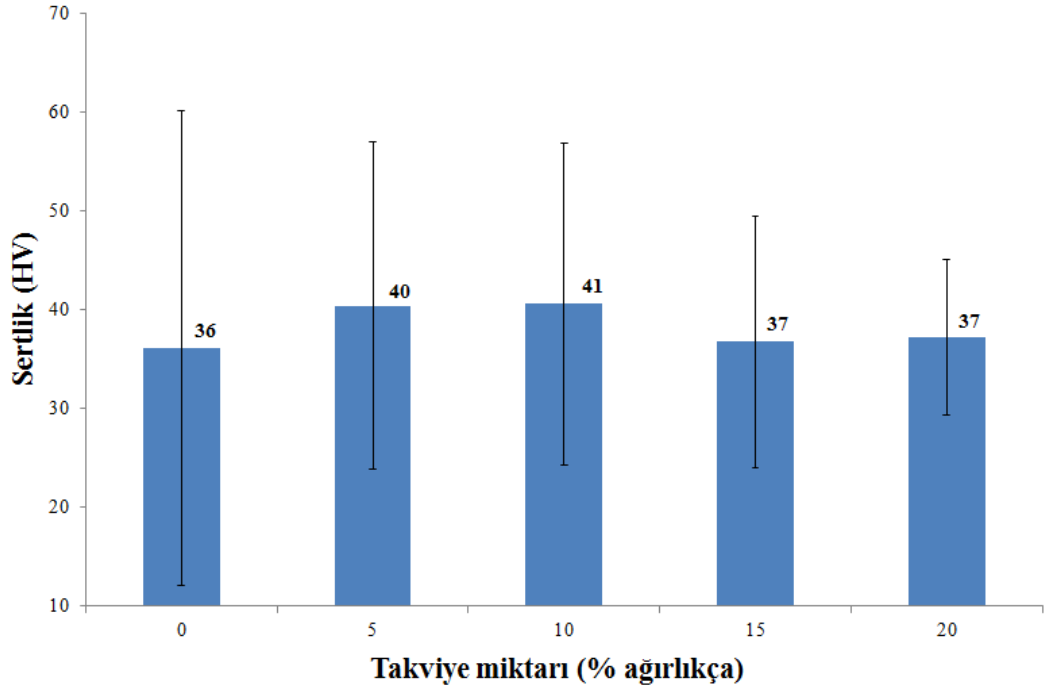
Arşimet prensibi kullanılarak yapılan gözeneklilik ölçüm sonuçları Şekil 7.15’de verilmiştir. Arşimet prensibi ile elde edilen sonuçlar ile kesitten alınan SEM görüntülerine ImageJ yazılımı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yazılım ile elde edilen sonuçların Arşimet prensibi ile ölçülen sonuçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, Arşimet prensibi ile yapılan ölçümde kapalı gözeneklilik ölçümü yapılmaması sadece açık gözeneklere ksilen emdirilerek ölçüm yapılmasından kaynaklanmaktadır. Arşimet prensibi ile yapılan ölçümlerin sonuçlarındaki tutarsızlık da bu duruma bağlanmıştır.



Şekil 7.15. Arşimet prensibi ile ölçülen gözeneklilik değerleri

SPS ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin sertlik değerleri Şekil 7.16’da verilmiştir. Ortalama değerlere bakıldığında %10’un üzerindeki midye kabuğu eklentisinin sertlikte düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Bu durum artan gözeneklilik sonucunda takviye-matris arayüzündeki tutunmanın azalmasına bağlanabilir. Ancak sapma değerleri dikkate alındığında, takviye miktarının sertlik değerine etkisinin çok da belirgin olmadığı görülmüştür. Bu durum, gözenekliliğe ve takviye oranının lokal olarak değişmesine bağlı olarak ölçülen değerlerdeki sapmanın yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Benzer bir durum aşınma testi sonucundaki ağırlık kayıplarında (Şekil 7.17) da görülmüştür. %5 ve %15 takviyeli kompozitlerin aşınma miktarlarının alüminyumunkinden daha fazla olduğu görülmüştür. Öte yandan, %20 takviyeli kompozit, düşük sertlik değerine sahip olmasına rağmen diğerlerine nazaran daha iyi aşınma direnci sergilemiştir.



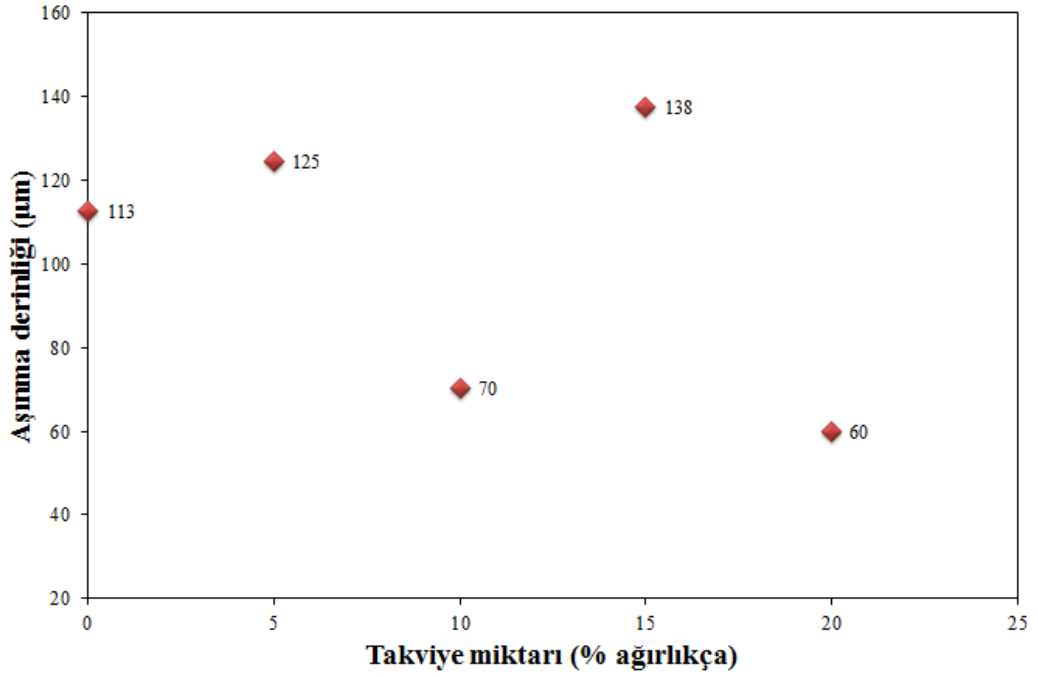
Şekil 7.16. SPS ile üretilen farklı takviye oranına sahip kompozitlerin sertlikleri



Şekil 7.17. SPS ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları

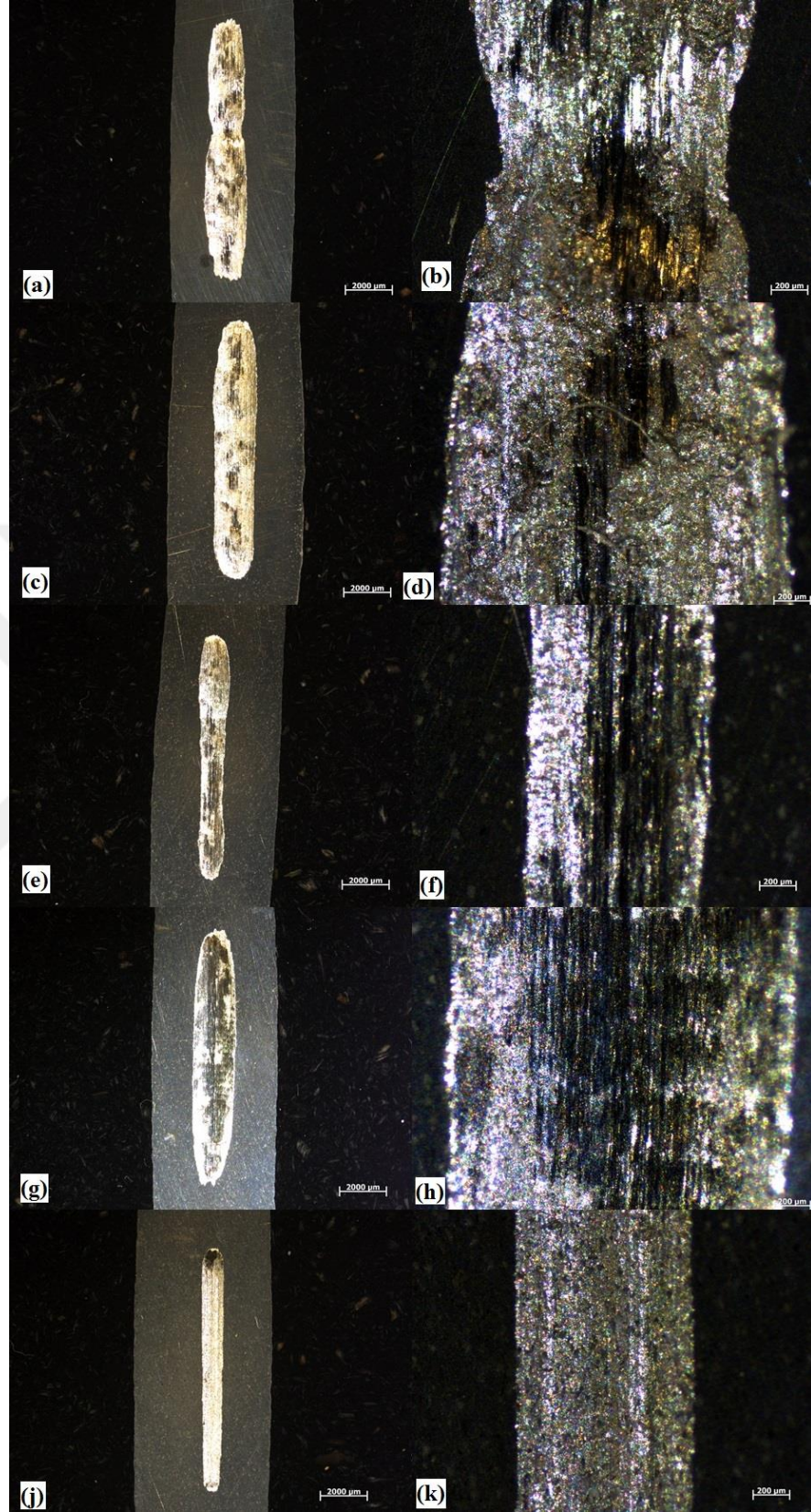
SPS ile üretilen numunelerin aşınma derinlikleri Şekil 7.18’de verilmiştir. Aşınma derinliği sonuçları ağırlık kayıpları ile paralel sonuçlar vermiştir. En az aşınma

derinliğinin en az ağırlık kaybı gösteren ve aşınmanın homojen olarak gerçekleştiği %20 takviyeli kompozitte olduğu gözlenmektedir.



Şekil 7.18. SPS ile üretilen kompozitlerin aşınma derinliği sonuçları

Aşınma testi sonrasında alınan stereo mikroskop görüntülerinde (Şekil 7.19) de en az ve homojen aşınmanın %20 takviyeli kompozitte gerçekleştiği görülmektedir. Aşınma yüzeyleri genel olarak değerlendirildiğinde artan takviye miktarı ile aşınma genişliğinin azaldığı görülmektedir. Bu duruma uymayan tek örnek %15 katkıli kompozittir. Ağırlık kaybı miktarları değerlendirildiğinde de benzer bir sapma görülmektedir. SPS sırasında termokupl ile sıcaklık kontrolünün sağlanması ve sinterleme süresinin artırılması ile üretim sürecinin standardize edilmesi sonucunda daha tutarlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 7.19. SPS ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin aşınma yüzeyleri: a, b) takviyesiz c, d) %5 e, f) %10 g, h) %15 j, k) %20 takviyeli kompozitler

Ark ergitme-emme döküm ve SPS yöntemleri ile üretilen kalsine midye kabuğu takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiştir. Her iki metod ile üretilen kompozitlerin sertlik değerleri kıyaslandığında ark ergitme ile üretilen kompozitlerin sertlik değerlerinin SPS ile üretilen kompozitlere nazaran daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin SPS ile üretilen kompozitlerdeki gözeneklilik olduğu düşünülmektedir. Aşınma testi sonrası ağırlık kayıplarına bakıldığında ark ergitme-emme dökümde 25-50 µm toz boyutuna sahip takviyelerin %10 takviye edilmesi ile en az ağırlık kaybı değeri gözlenirken SPS’de %20 takviye değeri ile en az ağırlık kaybı değerine ulaşılmış ve bu iki değer birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. SPS yönteminde optimum üretim parametrelerinin sağlanması ile ark ergitme-emme döküm yöntemine göre daha iyi sertlik ve aşınma değerleri gösteren kompozitler üretileceği düşünülmektedir.

Maliyet bazlı bakıldığında yapılan piyasa incelemesinde 1 kg CaCO_3 ’ün yaklaşık 55 TL, 1 kg CaO ’nun ise yaklaşık olarak 225 TL olduğu bilgisi elde edilmiştir. Laboratuvar araştırmalarında kullanılacak tozlar için bu fiyatlar çok yüksek olmasa da kompozit üretiminde seri üretime geçen bir fabrika için artan toz miktarına bağlı olarak maliyet artacaktır. Örneğin 1 ton CaCO_3 55000 TL, 1 ton CaO 225000 TL civarında alış fiyatına sahip olacaktır. Fakat yapısında yaklaşık olarak %95 oranında CaCO_3 bulunduran midye kabukları laboratuvar çalışmaları için anlaşmalı midyeciden ücretsiz olarak temin edilmiştir. Atık midye kabuklarının geri dönüşümü ile ücretsiz olarak CaCO_3 kaynağı elde edilebilir.

Midye kabuğundan CaO üretimi incelendiğinde 1 kg midye kabuğundan yaklaşık olarak 751 gram CaO elde edildiği görülmüştür. Laboratuvar ölçekli kalsinasyon fırınımızın kapasitesi ve kullandığı enerji düşünüldüğünde 1 kg CaO elde etmek için yaklaşık 17,7415 TL elektrik enerjisi kullanmaktadır. CaO ’nun 225 TL’lik kilogram fiyatı ile kıyaslandığında %92,4 oranında daha ucuza CaO elde edilmektedir. Fabrika bazlı üretim düşünüldüğünde artan fırın kapasitesi ile elde edilecek CaO oranı da artacağı için bu oranın daha da artması beklenmektedir. Ayrıca gerek fırınların kullanım kolaylığı gerekse kalsinasyon işleminin tamamlanma süresi göz önüne alındığında bu işlem için kalifiye personele gerek duyulmamaktadır

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ark ergitme-emme döküm ve SPS yöntemi ile üretilen kalsine midye kabuğu takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Farklı toz boyutlarının kompozitin özelliklerine etkisini incelemek için üç farklı toz boyutu kullanılmış ve en iyi sonuçların 25-50 μm 'lik toz aralığında elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Ark ergitme-emme döküm yönteminde peletleri ergitmek için kullanılan ark midye kabuğu tozlarında termal şok yaratmış ve tozlarda parçalanmalara neden olmuştur.
- Ark ergitme-emme döküm yönteminde takviye ve matris arayüzeyinde tozların birbirine iyi tutunduğu gözlemlenmiştir. Fakat SPS yönteminde artan takviye oranından kaynaklı olarak sinterleme süresi yetersiz gelmiş ve takviye oranı arttıkça takviye ve matris arayüzeyindeki tutunmaların azaldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak metalografik numune hazırlama işlemleri sırasında yüzeyden takviye parçacıklarının koptuğu SEM görüntülerinde görülmüştür.
- Yoğunluk ölçümü sonuçlarına göre %10 takviye oranına kadar yapılan takviyelerde yoğunluğun düştüğü ve %10'dan fazla takviye oranlarında yoğunlukta artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Artan takviye oranlarına bağlı olarak kompozitlerin sertliğinde artış sağlanmıştır. Saf alüminyumun 27 HV olarak ölçülen sertlik değeri ark ergitme-emme döküm yönteminde 50 μm üzeri toz boyutuna sahip takviyelerin %15 ilavesi ile 49 HV'ye artarak yaklaşık %81, SPS yönteminde ise takviyesiz alüminyumun 36 HV çıkan sertlik değeri 41 HV'ye yükseltilerek yaklaşık %14'lük artış sağlanmıştır.
- SPS yönteminde sertlik ve aşınma testi sonuçlarında çıkan tutarsızlığın sinterleme süresi ve sıcaklığına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Ark ergitme-emme döküm yönteminde beklenildiği gibi en yüksek sertliği veren kompozitin en az aşınma göstermemesi, en az ağırlık kaybı gösteren kompozitin 25-50 μm toz boyutuna sahip %10 takviyeli kompozit olması,

%15 takviyede takviye tozlarının homojenize olamama ve cürufa karışma probleminin ispatını yapmıştır.

- SPS yönteminde ise aşınma sonuçlarındaki tutarsızlığın sinterleme parametrelerinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Analiz sonuçlarında görülen tutarsızlıkların giderilmesi ve elde edilen kompozitin özelliklerinin iyileştirilmesi için çalışmalara devam edilecektir. Bu amaçla, öncelikle SPS ile kompozit üretiminde sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi parametrelerin optimum değeri bulunacak; akabinde üretilen kompozitlerin karakterizasyon sonuçları ark ergitme-emme döküm yönteminde ulaşılan sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Böylece alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi için hangi yöntemin daha elverişli olduğu sonucuna ulaşılarak geleneksel metal matrisli kompozit üretim yöntemlerine alternatif bir metot geliştirilebilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Arık, H. (2019). Investigation of wear properties of Al-SiC composite materials produced by powder metallurgy method. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (3), 741-754.
- [2] Asi, D. (2018). *Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması*. Doktora Tezi. Uşak: Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Şenel, M.C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışlarının incelenmesi, 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedings, www.ismsitconf.org
- [4] Hull, D. Clyne T.W. (1996). *An introduction to composite materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Uygur, İ. ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174.
- [6] Şenel, M.C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018). SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 13 (2), 122-133.
- [7] Purohit, R., Rana, R.S. ve Verma, C.S. (2012). Fabrication of Al-SiCp composites through powder metallurgy process and testing of properties. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2 (3), 420-437.
- [8] Dhanasekaran, S., Sunilraj, S., Ramya, G., Ravishankar, S. (2016). SiC and Al₂O₃ reinforced aluminium metal matrix composites for heavy vehicle clutch applications. *Trans Indian Inst Met*, 69 (3), 699-703.
- [9] Korkut, M.H. (2004). Effect of particulate reinforcement on wear behaviour of aluminium matrix composites. *Materials Science and Technology*, 20 (1), 73-81.
- [10] Kumar, G.B.V., Panigrahy, P.P., Suresh, N., Pramod, R., Rao, C.S.P. (2019). Assessment of mechanical and tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. *Composites Part B*, 175 (2019).

- [11] Kumar, B.P. ve Birru, A.K. (2017). Microstructure and mechanical properties of aluminium metal matrix composites with addition of bamboo leaf ash by stir casting method. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 27 (2017), 2555-2572.
- [12] Agunsoye, J.O., Talabi, S.I., Bello, S.A., Awe, I.O. (2014). The effects of cocos nucifera (coconut Shell) on the mechanical and tribological properties of recycled waste aluminium can composites. *Tribology in Industry*, 36 (2), 155-162.
- [13] Sarkar, S., Bhirangi, A., Mathew, J., Oyyaravelu, R., Kuppan, P., Balan, A.S.S. (2018). Fabrication characteristics and mechanical behavior of rice husk ash-silicon carbide reinforced Al-6061 alloy matrix hybrid composite. *Materials Today: Proceeding*, 5 (2018), 12706-12718.
- [14] Shivaprakash, Y.M., Sarkar, A., Jha, S., Singh, M., Bangera, S. (2018). Experimental studies on SiC and rice husk ash reinforced Al alloy composite. *MATEC Web of Conferences* 144,02002 (2018).
- [15] Hassan, S.B. ve Aigbodian, V.S. (2013). Effects of eggshell on the microstructures and properties of Al-Cu-Mg/eggshell particulate composites. *Journal of King Saud University*, 27(2015), 49-56.
- [16] Kolawole, M.Y., Aweda, J.O. ve Abdulkareem, S. (2017). Archachatina marginata bio-shells as reinforcement material in metal matrix composites. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14 (1), 4068-4079.
- [17] Dwiwedi, S.K., Srivastava, A.K. ve Chopkar, M. (2019). Fabrication and dry sliding wear study of Al6061/mussel-shell particulate composites. *SN Applied Science*, 1 (721), <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0767-y>.
- [18] Basar, Z.S. (2020). *Titanyum, zirkonyum ve bor katkılı A356 alaşımlarının termal iletkenliklerinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Gökçe, A., Fındık, F. ve Kurt, A.O. (2017). Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemi. *Mühendis ve Makine*, 58 (686), 21-47.

- [20] Solakoğlu, S. (2021). *Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen uçucu kül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Karabük: Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Öksüzoğlu, S. (2018). *Al-Si-Mg alaşımlarında tane inceltme işleminin mekanik özellik ve mikro yapı üzerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Karabük: Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] Büyükdoğan, S. (2011). *Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Karabük: Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Kılıç, Ö. (2020). *Alüminyum alaşımlarının dökümünde yörengesel çalkalanmanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] Bakkal, M., Osmanoğlu, H. ve Bodur, M.S. (2022). Effect of surface treatments on the interfacial strenght for metal/composite hybrid joints. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 1033-1045.
- [25] Chawla K.K. (2006). Metal matrix composites in ground transportation. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67-70, DOI: 10.1007/s11837-006-0231-5 .
- [26] Salur, E., Aslan, A., Kuntoğlu, M., Güneş, A., Şahin, Ö.S. (2020). Kompozit malzemelerin tornalanması esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin optimizasyonu. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8 (3), 423-431.
- [27] Surappa, M.K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28 (1), 319-334.
- [28] Mazlumdar, S.K. (2001). *Composite manufacturing materials, product and process engineering*. United States of America: CRC Press
- [29] Semerciöz, S.M. (2021). *Bor fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi*.Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [30] Ha, J. (1991). *Toughening mechanisms in weak matrix ceramic composites*. Doktora Tezi. Amerika: University of Missouri-Rolla.
- [31] Yaman, B. (2009). *Seramik matrisli kompozit malzemelerin elektrik akımı destekli senterleme (SPS) yöntemi ile tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi*. Doktora Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [32] Altuner, H.M. (2011). *Partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin difüzyonla birleştirilmesi*. Doktora Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] Şanlı, P. (2019). *Farklı oranlardaki takviye elemanlarıyla katkılandırılmış metal matrisli kompozit malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Kütahya: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34] Varol, T. (2012). *AA2024 matrisli B₄C takviyeli metal matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [35] Tok, A. (2017). *Geleneksel ve atık takviyeli metal matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Bartın: Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [36] Arunachalam, R., Krishnan, K.P. ve Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting – furnace design, properties, challenges and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 213-245.
- [37] Kabil, A. (2020). *Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretimi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] Kandpal, B.K., Kumar, J. ve Singh, H. (2018). Manufacturing and technological challenges in stir casting of metal matrix composites- a review. *Materials Today: Proceedings*, 5 (1), 5-10.

- [39] Soltani, S. Khosroshahi, R.A., Mousavian, R.T., Jiang, Z.Y., Boostani, A.F., Brabazon, D. (2017). Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites. *Rare Metals*, 36 (7), 581-590.
- [40] Kumar, A., Singh, R.C. ve Chaudhary, R. (2020). Recent progress in production of metal matrix composites by stir casting process: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 21 (3), 1453-1457.
- [41] Ghomashchi, M.R. ve Vikhrov, A. (2000). Squeeze casting: An overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 101 (1-3), 1-9.
- [42] Tzimas, E. ve Zavaliangos, A. (2000). A comparative characterization of near-equiaxed microstructures as produced by spray casting, magnetohydrodynamic casting and the stress induced, melt activated process. *Materials Science and Engineering A*, 289 (1-2), 217-227.
- [43] Satyanarayana, K.G., Ojha, S.N., Kumar, D.N.N., Sastry, G.V.S. (2001). Studies on spray casting of Al-alloys and their composites. *Materials Science and Engineering: A*, 304-306 (2001), 627-631.
- [44] Dong, X., He, T., Huo, Y. Sun, A. (2020). Experimental preparation of short carbon fiber reinforced Al-5Cu matrix composites using vacuum suction casting. *Materials and Technology*, 54 (5), 613-619.
- [45] Yazıcı, Z.Ö., Hitit, A., Yalçın, Y., Özgül, M. (2016). Effects of minor Cu and Si additions on glass forming ability and mechanical properties of Co-Fe-Ta-B bulk metallic glass. *Metals and Materials International*, 22 (1), 50-57.
- [46] Saheb, N., Iqbal, Z., Khalil, A., Hakeem, A.S., Aqeeli, N.A., Laoui, T., Qutub, A.A., Kirchner, R. (2012). Spark plasma sintering of metals and metal matrix nanocomposites: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-13.
- [47] Shen, Z., Johnsson, M., Zhao, Z., Nygren, M. (2002). Spark plasma sintering of alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 85 (8), 1921-1927.
- [48] Bhandare, R.G., ve Sonawane, P.M. (2013). Preparation of aluminium matrix composite by using stir casting method. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3 (2), 61-65.

- [49] Foltz, J.V. (1990). Metal matrix composites. *ASM Handbook Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 2, 903-912.
- [50] Altuner, S. (2011). *Y₂O₃ kaplanmış Al₂O₃ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve aşınma davranışlarının karakterizasyonu*. Doktora Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [51] Asafa, T.B., Durowoju, M.O., Oyewole, A.A., Solomon, S.O., Adegoke, R.M., Aremu, O.J. (2015). Potentials of snailshell as a reinforcement for discarded aluminium based materials. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 84 (1), 1-8.
- [52] Olawuni, E.O., Drowoju, M.O., Asafa, T.B., Mudashiru, L.O. (2018). Production of piston material from discarded aluminum piston reinforced with alumina and snailshells. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, 5 (1), 788-799.
- [53] Prabhu, M.S., Perumal, A.E., Arulvel, S., Issac, R.F. (2019). Friction and wear measurements of friction stir processed aluminium alloy 6082/CaCO₃ composites. *Measurement*, 142 (2019), 10-20.
- [54] Owuamanam, S. ve Cree, D. (2020). Progress of bio-calcium carbonate waste eggshell and seashell fillers in polymer composites: A review. *Journal of Composites Science*, 4 (70), 2-22.
- [55] Dwivedi, S.P., Sharma, S. ve Mishra R.K. (2016). Characterization of waste eggshells and CaCO₃ reinforced AA2014 green metal matrix composites: A green approach in the synthesis of composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17 (10), 1383-1393.
- [56] Dwivedi, S.K., Srivastava, A.K., Sugimoto, K., Chopkar, M. (2018). Microstructural and mechanical characterization of chicken eggshell-reinforced Al6061 matrix composites. *Open Journal of Metal*, 2018 (8), 1-13.
- [57] Chaithanyasai, A., Vakchore, P.R. ve Umanaskar, V. (2014). The microstructural and mechanical property study of effects of egg shell particles on the aluminium 6061. *Procedia Engineering*, 97 (2014), 961-967.

- [58] Puspitasari, P., Safarudin, R.A., Sasongko, M., Achyarsyah, M., Andoko. (2019). Analysis of mechanical and physical properties of Al-Si (Al-Si) casting alloys reinforced with various eggshell nanopowders. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515 (2019), 1-7.
- [59] Kolawole, M.Y., Aweda, J.O., Abdulkareem, S., Bello, S.A., Ali, A., Iqbal, F. (2020). Influence of calcined snail shell particulates on mechanical properties of recycled aluminium alloy for automotive application. *APTEFF*, 1 (206), 163-180.
- [60] Umunakwe, R., Olaleye, D.J., Oyetunji, A., Okoye, O.C., Umunakwe, J. (2017). Assessment of some mechanical properties and microstructure of particulate periwinkle shell-aluminium 6063 metal matrix composite (PPS-ALMMC) produced by two-step casting. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 36 (2), 421- 427.
- [61] Garcia, C.M., Fonteboa, B.G., Abella, F.M., Lopez, D.C. (2016). Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. *Construction and Building Materials*, 139 (2017), 570-583.
- [62] Sainudin, M.S., Othman, N.H. ve Shahidan, S. (2019). Performance of concrete containing mussel shell (*perna viridis*) ash under effect of sodium chloride curing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 601 (2019), doi:10.1088/1757-899X/601/1/012033
- [63] Garcia, C.M., Fonteboa, B.G., Lopez, D.C., Ordonez, J.L.P. (2020). Mussel shells: A canning industry by-product converted into a bio-based insulation material. *Journal of Cleaner Production*, 269 (2020).
- [64] Cheah, L., Evans, C., Bandivadekar, A., Heywood, J. (2009). Factor of two: Halving the fuel consumption of new u.s. automobiles by 2035. No.9, 49-71.
- [65] Srivivas, P.D. ve Charoo, M.S. (2019). Application of hybrid aluminium matrix composite in automotive industry. *Materials Today: Proceedings*, 18 (2019), 3189-3200.
- [66] Stojanovic, B. ve Ivanovic, L. (2015). Application of aluminium hybrid composites in automotive industry. *Technicki Vjesnik* 22,1 (2015), 247-251.

- [67] Anthony, M., Schultz, B.F. ve Rohatgi, P. (2012). Metal matrix composites offer the automotive industry an opportunity to reduce vehicle weight, improve performance. *Advanced Materials & Processes*, 19-23.
- [68] Herling, D.R. (2004). Low-cost cast aluminium metal matrix composites. *Automotive Lightweighting Materials*, U.S Department of Energy FY 2004 İlerleme Raporu.
- [69] Kevorkijan, V. (2002). Development of Al MMC composites for automotive industry. *JOM*, 8 (1), 285-286
- [70] Chawla, N. ve Clawla K.K. (2006). *Metal matrix composites*. USA: Springer.
- [71] Shakesheff, A.J. ve Purdue, G. (1998). Designing metal matrix composites to meet their target: Particulate reinforced aluminium alloys for missile applications. *Materials Science and Technology*, 14 (9-10), 851-856.
- [72] Rawal, S. (2001). Metal matrix composites for space applications. *JOM*, 53 (4), 14-17.
- [73] Ghafar, S.L.M.A., Hussein, M.Z. ve Zakaria, Z.A.B. (2017). Synthesis and characterization of cockle shell based calcium carbonate aragonite polymorph nanoparticles with surface functionalization. *Journal of Nanoparticles*, 2017, 1-12
- [74] Ruiz, M.G., Hernandez, J. Banos, L., Montes, J.N., Garcia, M.E.R. (2009). Characterization of calcium carbonate, calcium oxide, and calcium hydroxide as starting point to the improvement of lime for their use in construction. *Journal of Materials and Civil Engineering*, 21 (11), 1-19.
- [75] Vsianska, M. ve Sob, M. (2011). The effect of segregated sp-impurities on grain boundary and surface structure, magnetism and embrittlement in nickel. *Progress in Materials Science*, 56 (6), 817-840.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0003-1768-2637

Adı Soyadı : Onur VARSOYOĞLU

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı :

Eğitim:

- 2020-2022, Yüksek Lisans, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı
- 2015-2019, Lisans, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği