



**ALÜMİNYUM MATRİSLİ MALZEMELERİN
MİKRODALGA FIRINDA SİNERLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Görkem ŞANAN

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Ziya Özgür YAZICI

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Mayıs 2019

Bu tez çalışması 16.FENBİL.20 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ MALZEMELERİN MİKRODALGA
FIRINDA SİTERLENMESİ**

Görkem ŞANAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ziya Özgür YAZICI

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Mayıs 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Görkem ŞANAN tarafından hazırlanan “Alüminyum Matrisli Malzemelerin Mikrodalga Fırında Sinterlenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 09/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr.Öğr.Üy. Ziya Özgür YAZICI

Başkan : Doç.Dr. Aytekin HİTİT
..Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr.Öğr.Üy. Ziya Özgür YAZICI
.. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr.Öğr.Üy., Fatih ÇOLAK
..Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

İmza



Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09/05/2019

Görkem ŞANAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM MATRİSLİ MALZEMELERİN MİKRODALGA FIRINDA SİNERLENMESİ

Görkem ŞANAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ziya Özgür YAZICI

Bu çalışmada, yeni bir metalik cam takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretmek için, mikrodalga hızlı sinterleme yöntemi ve yüksek sertliğe sahip $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ metalik cam partiküllerinin avantajları birleştirilmiştir. Metalik cam takviyeli alüminyum matrisli kompozit numuneleri, hava koşullarında ve takviye partiküllerinin kristalleşmesini önleyen bir sıcaklıkta mikrodalga sinterlemeyle hazırlanmıştır. %5-20 metalik cam takviyeli kompozit tozlar, yüksek hızlı bilyalı değirmen ile hazırlanmış ve 500°C 'de 30 dakika boyunca mikrodalga ısıtma yöntemiyle sinterlenmiştir. Mikroyapısal özellikler, X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mekanik özellikleri, basma testleri ve Vickers sertlik ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Sinterleme çalışmaları, mikrodalga ısıtma işlemi gerçekleştirildiğinde, metalik cam partiküllerinin belirli bir sıcaklığın üzerinde ($>500^\circ\text{C}$) yardımcı ısıtma elemanından bağımsız olarak etkileşime girdiğini göstermiştir. Bu durum, sinterleme sıcaklığının seçimi için belirleyici olmuştur. İyi dağıtılmış takviyeler içeren bu numunelerin mikroyapıları üzerinde yapılan incelemeler, takviye ve matris arayüzleri arasında intermetalik faz oluşmadığını ortaya koymuştur. Sonuçlar, 2 saat süreyle öğütülmüş kompozit örneklerin, alüminyuma kıyasla büyük oranda yüksek basma dayanımı ve sertlik değerleri sergilediğini göstermiştir.

2019, x + 60 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metalik Cam, Alüminyum Kompozit, Mikrodalga Sinterleme

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**SINTERING OF ALUMINUM MATRIX MATERIALS BY MICROWAVE
FURNACE**

Görkem ŞANAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ziya Özgür YAZICI

In this study, the advantages of $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ metallic glass particles having high hardness and microwave fast sintering method were combined to produce a new metallic glass reinforced aluminum matrix composite. Composite specimens of metallic glass reinforced aluminum matrix are prepared by microwave sintering at a temperature that prevents crystallization of the reinforcing particles. 5-20% metallic glass reinforced composite powders were prepared by a high-speed ball mill and sintered at 500°C for 30 minutes by microwave heating. Microstructural properties were investigated by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. In addition, the mechanical properties of the samples were evaluated by compression tests and Vickers hardness measurements. The sintering studies showed that when microwave heating was performed, the metallic glass particles interacted with microwaves at certain temperatures (above 500°C), causing excessive heating independently from the susceptor heating element. This was decisive for the selection of the sintering temperature. Investigations on the microstructures of these samples containing well-distributed reinforcements revealed that the intermetallic phase did not occur between the reinforcement and matrix interfaces. The results showed that the samples milled for 2 hours exhibited significantly higher compressive strength and hardness values compared to pure aluminum.

2019, x + 60 pages

Keywords: Metallic Glass, Aluminum Matrix Composite, Microwave Sintering

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım 16.FENBİL.20 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Üniversiteme verdiği destekten dolayı teşekkür ederim.

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamalarında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr.Öğr.Üy. Ziya Özgür YAZICI'ya, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Görkem ŞANAN
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	3
2.1 Kompozit Malzemeler Tanımı ve Yapısı.....	3
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları	6
2.4 Metal Kompozitlerde Kullanılan Matrisler	8
2.5 Takviye Elemanları.....	11
2.5.1 Cam Fiberler ve Cam Partiküller.....	13
2.5.2 Metalik Cam Takviyesi.....	15
2.6 Partikül Takviyeli Kompozit Mikroyapısı	17
2.7 Matris-Seramik Arayüzeyi	19
2.8 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	21
2.8.1 Toz Metalurjisi ve Tozların Özellikleri	22
2.8.2 Toz metalurjisi ve Sinterleme İşlemi.....	24
2.8.3 Mikrodalgalar ve Mikrodalga Sinterleme İşlemi	26
2.8.4 Mikrodalga-Isı Dönüştürücü (Susceptor) Malzemeler ve Hibrit Isıtma	28
2.8.5 Metal Tozlarının Mikrodalga ile Sinterlenmesi	29
2.8.6 Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mikrodalga ile Sinterlenmesi	30
3. MATERYAL ve METOT	35
3.1 Kullanılan Hammaddeler	35
3.2 Metalik Cam Tozlarının Üretimi	36
3.2.1 Kompozit Toz Bileşenlerinin Karıştırılması ve Öğütme İşlemleri.....	37
3.2.2 Şekillendirme ve Mikrodalga Fırın Sinterleme İşlemleri	39
3.2.3 Mikroyapısal Analizler ve Yoğunluk Ölçümleri.....	40

3.2.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	40
4. BULGULAR.....	42
4.1 Mikrodalga Fırın Sinterleme Haznesinin Tasarımı	42
4.1.1 Mikrodalga Sinterleme Haznesindeki Sıcaklık Ölçümleri	43
4.1.2 Sinterleme Sıcaklığının Tespitine Yönelik Çalışmalar.....	45
4.1.3 Mikroyapısal İncelemeler ve Değerlendirmeler.....	46
4.1.4 Kompozit Numunelerin Mekanik Özellikleri	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	51
6. KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ.....	60



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

γ_{sg}	Katı-gaz arasındaki arayüzey enerjisi
γ_{lg}	Sıvı-gaz arasındaki arayüzey enerjisi
γ_{sl}	Katı-sıvı arasındaki arayüzey enerjisi
W_{ad}	Islatma enerjisi açısından adhezyon işi
d_{50}	Ortalama partikül boyutu
Hv	Vickers mikrosertliği
Θ	Teta açısı
D_f	Islatma için itici güç

Kısaltmalar

DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
HEM	Yüksek enerjili öğütme
HV	Vickers mikro sertlik değeri
M_0	Kuru ağırlık
M_1	Su emmiş ağırlık
M_2	Su içindeki ağırlık
MID	Mikrodalga ısı dönüştürücü
MMK	Metal matrisli kompozit
MPa	Mega paskal
TM	Toz metalurjisi
XRD	X-ışınları kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin en yaygın kullanılan alaşımlar ile şematik olarak kıyaslanması.	4
Şekil 2.2	Matris malzemelerinin metal matrisli kompozitlerdeki kullanım oranları	9
Şekil 2.3	Başlıca takviye elemanlar ve metal matrisli kompozitlerdeki kullanım hacimleri.....	11
Şekil 2.4	Cam elyafın üretim ergitme ve üretim süreci.	14
Şekil 2.5	Farklı partikül takviyeli kompozitlerin tipik yapılarının düzenlenmesi, (a) SiC partikül takviyeli alüminyum (kalıp döküm), (b) SiC partikül takviyeli alüminyum (döküm), (c) SiC partikül takviyeli alüminyum (ekstrüde toz karışım), (d) SiC-parçacık takviyeli alüminyum (döküm ve ekstrüde)	18
Şekil 2.6	Katı, sıvı ve gaz fazları arasında oluşan temas açısının şematik olarak gösterimi ve ıslatma açısına göre sıvının görünümü	20
Şekil 2.7	Presleme ve sinterleme işlemlerinin kullanıldığı toz metalurjisi yolu.....	23
Şekil 2.8	Al-Zn (7xxx), Al-Si, saf alüminyum, Al-Cu (2xxx) ve 316 paslanmaz çelik tozları arasındaki sıkıştırılabilirlik kıyaslaması.....	24
Şekil 2.9	(a) Sinterleme aşamaları ve (b) sinterlenme esnasında gözlenen sinterleme mekanizmaları	26
Şekil 2.10	Geleneksel ve mikrodalga ısıtma sırasında bir malzemenin içindeki ısı dağılımı ve geleneksel fırın-mikrodalga fırın kıyaslaması	27
Şekil 2.11	Mikrodalga ile malzeme üretimindeki karakteristikler.....	28
Şekil 2.12	SiC çubuklarının MID olarak kullanılması durumunda ZnO malzemelerinin sinterleme profili.....	29
Şekil 2.13	Mikrodalga enerji absorpsiyon elektriksel iletkenliğin bir fonksiyonudur	30
Şekil 2.14	(a) Sıcak presleme işlemi sonrası üretilen numunelerin XRD desenleri, (b) 400oC’de sıcak preslenmiş numunelerdeki takviye faz miktarına göre yoğunluk ve sertlik değerlerindeki değişim	32
Şekil 2.15	(a) Vakum indüksiyon ısıtmalı fırında 823 K’de ve 400 MPa basınç altında üretilmiş alüminyum kompozitin mikroyapısı ve (b) kompozitin basma yüklemesi altındaki davranışı.....	33

Şekil 2.16	Zr-esaslı metalik cam fiber takviyeli Al7075 alaşımının yükleme altındaki davranışı ve mikroyapısı.	33
Şekil 3.1	Ticari saflıktaki alüminyum ve kobalt esaslı metalik cam tozlarının XRD desenleri	35
Şekil 3.2	Ticari saflıktaki alüminyum tozları ve kobalt esaslı metalik cam tozlarının tane boyut analizleri.....	36
Şekil 3.3	Üretilen toz karışımlarının (Al+%5 metalik cam) partikül boyut analizine bir örnek	38
Şekil 3.4	Sinterleme haznesinde oluşturulan ısıtma rejimi.....	39
Şekil 4.1	Çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan sinterleme haznesi	42
Şekil 4.2	Mikrodalga sinterleme sistemi ve ısıtma haznesinin fırın içerisine yerleştirilmiş hali	42
Şekil 4.3	Azot ve hava ortamlarında grafit yardımcı tozları ile yapılan sinterleme haznesindeki numuneler için ölçülen T-t grafikleri.....	44
Şekil 4.4	Sinterleme işlemleri 450°C ve 550°C’de gerçekleştirilen kompozit numunelerin XRD paternleri	45
Şekil 4.5	%10 takviye fazı içeren alüminyum kompozitinin mikroyapısı	47
Şekil 4.6	Ham numuneler ve 500°C’de mikrodalga sinterlenmiş numunelerin yoğunluk kıyaslamaları	48
Şekil 4.7	Sinterlenmiş numunelere ait (a) XRD ve (b-d) mikroyapı kıyaslamaları....	48
Şekil 4.8	Kompozit numunelerin gerilim-gerinim grafikleri	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Kompozit malzemelerin uygulama alanları.....	5
Çizelge 2.2 Demir/dışı matrisli kompozitlerin potansiyel uygulama alanları.....	7
Çizelge 2.3 Takviye olarak kullanılan malzemelerden beklenen özellikler	11
Çizelge 2.4 Seramik takviyelerin özellikleri	13
Çizelge 2.5 Fiziksel değişikliklere göre sinterlemenin aşamaları	25



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Alüminyum matrisli (a) piston kolu, (b) fren parçaları, (c) kardan mili	10
Resim 3.1 Döküm işlemlerinde kullanılan bakır bakıplar ve üretilen amorf $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşım numuneleri.....	37
Resim 3.2 Kompozit tozların işlem gördüğü yüksek devirli bilyalı öğütme cihazı.....	38
Resim 3.3 Deneyisel çalışmalarda kullanılan hidrolik pres, şekillendirme kalıbı ve üretilen numuneler	39
Resim 3.4 Basma dayanımı ve Vickers mikrosertlik testlerinin yapıldığı cihazların görüntüsü.....	41

1. GİRİŞ

Uzay, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan nakliye malzemeleri için, alüminyum alaşımları ve kompozitlere olan ilgi, uygun elastik katsayısı, belirli mukavemet, aşınma ve korozyon direnci gibi kullanışlı mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Unal ve Diler 2018). Kullanılan kısımdaki düşük yoğunluğu nedeniyle ağırlık azaltıcı malzeme olarak rol oynasa da, alüminyum nispeten zayıf bir metaldir. Bu nedenle, alüminyum, mukavemeti arttırmak için kompozit malzeme formuna getirilir. Ardından, alüminyum kompozitlerin yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, ulaştırma sektöründe enerji ve yakıt tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunabilir (Mallick 2010). Geleneksel alüminyum matris kompozitlerinde (AMC) güçlendirme, matristeki homojen dağılmış kendiliğinden (in-situ) çökelti elde etmek için uygun yaşlandırma ısı işlemleriyle veya oksitler (Torralba *et al.* 2003, Rostami and Tajally 2017) (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2) veya karbürler (Vani and Chak 2018, Wang *et al.* 2018) (SiC , TiC , B_4C , CNT) gibi seramik partikül takviyelerinin dışarıdan ilavesiyle gerçekleştirilebilir. Toz metalurjisi uygulamaları, düşük maliyetli ürünler, daha yüksek üretim hızı, düzgün şekillendirme ve amaçlanan özellikler (Manohar *et al.* 2018), için tekrar üretilebilirlik koşulları gibi önemli avantajlar sağlayabildiğinden, araştırmacılar, dışarıdan takviye katkı maddelerine odaklanmıştır. Bununla birlikte, seramik katkı maddeleri ile metal matris arasındaki ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğu ve parçacık-matris arayüzündeki ıslanma sorunları gibi problemler, ortaya çıkan yapının mekanik davranışları üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Dash *et al.* 2013). Seramik takviyeli kompozitlerde gözlemlenen problemleri aşabilmek için, metalik takviyeler, metal matris ile arayüz uyumluluğu sağlamak üzere yeni bir takviye bileşeni olarak kabul edilmiştir (Dudina 2019). Matrisle uyumlu olduğu kabul edilen umut verici takviye elemanlarının bir sınıfı, amorf alaşım grubudur. Yavaş soğutma işleminden farklı olarak, erimiş alaşımlar kristalleşme için gereken süreden çok daha hızlı soğutulursa, kristalleşmek için yeterli termodinamik ve kinetik koşullara ulaşamaz. Sonuç olarak, rastgele düzenlenmiş atomlardan oluşan amorf yapılar matrisi, kristalimsi noktalarda gözlenen kusurlar olmaksızın oluşturulur. Metalik cam (MG) olarak da bilinen bu yaklaşımla üretilen amorf alaşımlar, yüksek sertlik, mekanik mukavemet ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptir. Lee vd. (2004), tarafından Nikel esaslı MG parçacıklarının eklenmesinin, nihai AMC'nin akma ve kırılma mukavemetini saf

alüminyumdan yaklaşık %69 daha yüksek elastik modülle arttırmada çok etkili olduğu bildirilmiştir (Yu *et al.* 2006). Yine, Zheng vd. (2014), demir esaslı MG takviyeli Al-2024 matris kompozitlerini mekanik alaşımlama ve sıcak ekstrüzyon ile başarıyla üretmiş ve MG partiküllü AMC'nin yüksek mukavemet (660 MPa) ve iyi kırılma plastisitesi (% 12) kombinasyonu ile önemli mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Rezai vd. (2016) ve Scudino vd. (2008), ayrıca daha yüksek basınç mukavemet değerine sahip kompozit malzemelerin, kompozitin yoğunluğunda hafif bir artışa neden olan Alüminyum bazlı MG partiküllerinin eklenmesi ile üretilebileceğini de göstermiştir. Kobalt bazlı metalik camlar (CoMG), seramik kadar yüksek mekanik özellikleriyle dikkat çekiyor. Örneğin, sıkıştırma altında yaklaşık 5185 MPa gücünde $\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{31.5}$ alaşımı, MG ailesi arasında en yüksek mukavemet değerine sahip alaşımdır (Inoue 2004). $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşımı da sırasıyla yaklaşık 1200 Hv ve 4000 MPa sıkıştırma altında yüksek sertlik ve mukavemet ortaya koyar (Yazici 2016). Bu nedenle, aynı zamanda yüksek elastik katsayılı olan bu alaşımlar, alüminyum kompozitlerde takviye edici bir bileşen olarak kabul edilebilir. Geleneksel ısıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kompozitlerin mikrodalga sinterlenmesi; enerji verimliliği, daha hızlı ısıtma hızları, hacimsel ısıtma, daha verimli sinterleme işlemi ve mikroyapıda daha yüksek yoğunlaşma gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Rajkumar and Aravindan 2009, Jayalakshmi *et al.* 2018), Bu çalışmada, saf alüminyumun mukavemetini artırmak ve yeni bir CoMG takviyeli AMC üretmek üzere, hava atmosferinde hızlı sinterleme yöntemi için mikrodalga teknolojisini ve $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ MG partiküllerinin bir takviye elemanı olarak avantajları birleştirilmiştir. Kompozit örneklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzemeler Tanımı ve Yapısı

Kompozit malzemeler, en az iki farklı bileşenin, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en üstün özelliklerini makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılır. Terim olarak yeni olsa da, ilk olarak Sümerler tarafından kullanılmaya başlanmış kerpiç, günümüzde de kullanılarak önemini yitirmemiş tam bir kompozit malzemeye örnektir (Parlak 2006). Kompozit malzemeler sınırsız sayıda metalik, organik, ve inorganik bileşiklerden oluşabilir. İçyapıları incelendiğinde yapıyı oluşturan bileşenler gözlenerek ayırt edilebilir. Yapılarında çok fazla sayıda fazın bulunduğu klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskopik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir (Güneş 2010). Kompozit malzemeler özgül mukavemetlerinin yüksek olması sebebi ile ilk olarak uçak ve uzay endüstrisinde kullanım alanı bulmuştur (Chung 2003). Mukavemetleri yüksek olan kompozit malzemelerin üretimi ile aşağıdaki özelliklerden biri ya da birkaçı geliştirilmesi amaçlanarak üstün malzemelerden yapılan cihaz ve techizatların üretimi mümkün olmaktadır. Bu özellikler aşağıdaki gibidir:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| - Yüksek dayanım | - Yüksek sıcaklık kapasitesi |
| - Yüksek rijitlik | - İyi korozyon direnci |
| - Yüksek yorulma dayanımı | - İyi termal ısı iletkenliği |
| - Mükemmel aşınma direnci | - Düşük ağırlık |
| - Çekicilik ve estetik görünüm | |

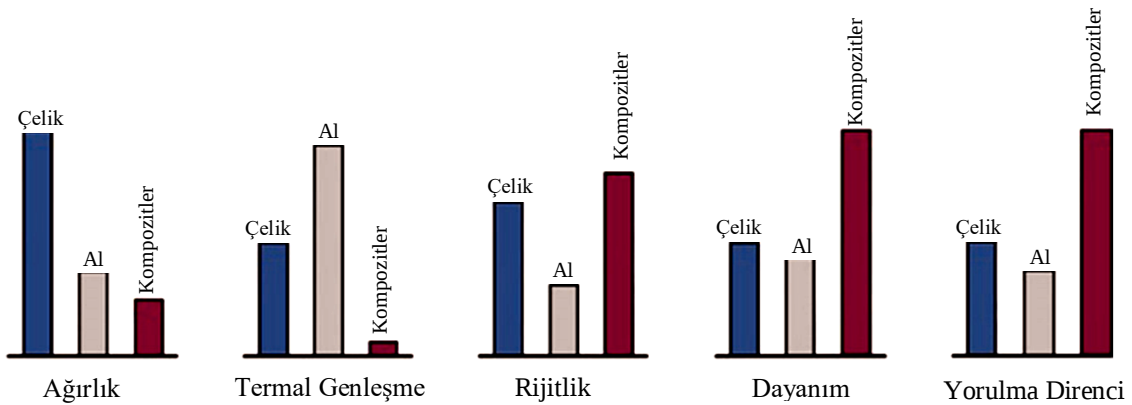
olarak verilebilir. Şekil 2.1’de (Haghshenas 2016) çelik ve alüminyum gibi sıkça kullanılan alaşımlara kıyasla kompozitlerin çeşitli özellikleri kıyaslanmıştır. Kompozitler, bahsedilen avantajlarının yanı sıra çeşitli dezavantajlar da sergilerler. Bunlar, üretim güçlüğü, kırılma/kopma uzamasının az oluşu ve diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün zor oluşu gibi dezavantajlardır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin kullanıldığı alanların başlıcaları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Genel olarak kompozit malzemeler üç gruba ayrılabilir. Bunlar takviye elemanına göre şöyle sıralanabilir (Parlak 2006);

1. Elyaf katkılı kompozit malzemeler
 - a. Sürekli elyaf katkılı kompozitler
 - b. Kesikli elyaf katkılı kompozitler
 - c. Rasgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler
2. Parçacık katkılı kompozit malzemeler,
 - a. Parçacık katkılı kompozitler
 - b. Dispersiyonla dayanımı arttırılmış kompozitler
3. Tabakalı kompozit malzemeler

Elyaf, uzunlukları kalınlıklarına göre büyük olan malzemelerdir. Elyaf, değişik malzemelerden meydana gelmiş kompoziti meydana getiren elemanlardan birisidir. Cam, grafit ve organik elyaf, en çok kullanılan ve en yaygın olanlarıdır. Kendine göre değişik karakterleri olan elyaf, insan yapımıdır. Elyafı meydana getiren malzemelerin kütsel formlarından farklı olduğu gibi içinde bulunan malzemelerin kendi içindeki özellikleri de farklılık gösterir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin en yaygın kullanılan alaşımlar ile şematik olarak kıyaslanması.

Çizelge 2.1 Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Şahin 2000).

Endüstrisi	Uygulama alanları	Kullanılan kompozit malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B7AL, SiC _w /AL, GR/AL, Cam/epoksi, Kevlar/epoksi, Süperalaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	AL ₂ O ₃ /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, AL ₂ O ₃ /Al, SiC _w /Al
Uzay	Uzay yapıları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, Ön ve arka paneller, Aks mili, Yaylar, İtme çubukları ve piston kolları	Kevlar epoksi SiC _p /Al SiC _w /Al SiC _w /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi Gemi güvertesi	Kevlar/epoksi, Cam/epoksi
Kimya	Borular, Basıncılı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi, C/epoksi
Spor	Tenis racketleri, oltalar, bisiklet ve motosiklet gövdesi	B/epoksi, C/epoksi, B/Al, Gr/Al, SiC _w /Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, AL ₂ O ₃ /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, Protezler ve tekerlekli sandalye	SiC/Al, B/Al
Uçak-uzay	Uçak frenleri, roket nozulları, türbin parvaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/karbon kompozit
Diğer	Makina yatakları	C/Pb, AL ₂ O ₃ /Pb

Örnek göstermek gerekirse ince bir tabaka cam, çok az bir gerilme altında kırılırken, cam elyaf, bu gerilmenin binlerce katı gerilmeye karşı koyabilir (Chung 2003). Kalın kesitli malzeme yapısındaki malzeme hataları elyaflardaki malzeme hatalarına oranla çok fazla olması bunun en büyük sebebidir. Parçacık katkılı kompozitler bir matris malzeme içerisinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde dağıtılması ile elde edilir. Çoğunlukla bağlayıcılar sayesinde, soğuk preslenmesi ve sonrasında sıcak presleme veya sinterleme işlemleri ile difüzyon kontrollü olarak gözenekler giderilir. Parçacık katkılı kompozitlerin diğer kısmı dağılım (dispersiyon) sertleşmesi mekanizması oluşturacak şekilde üretilirler. En az iki farklı levha şeklindeki malzemelerin tabakalar ve katmanların üst üste dizilmesi ile tabakalı (lamine) kompozit malzemeleri meydana getirir. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin aşınmaya karşı direnci, rijitliği, korozyona karşı direnci, mukavemeti, termal izolasyonu tabakalama işlemi ile artırılabilir (Şahin 2000).

2.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, istenen özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha çok malzemelerin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni özelliklere sahip malzemelerdir (İnt.Kyn.4). Matris malzemesi olarak metallerin seçilmesinin birçok avantajı vardır. Yüksek sıcaklıklara çıkabilmeleri, yüksek basma, çekme ve eğme dayanımlarına sahip olmaları, yüksek yoğunluk/dayanım ve tokluklarının iyi olması, termal genleşme ve yorulma dayanımı gibi özelliklere sahip olmaları sonucu ortaya çıkan metal matrisli kompozitlerin son yıllarda bu malzemelere olan ilgiyi ve MMK'ler üzerine yapılan araştırmaları arttırmıştır (Rosso 2006). Metal matrisli kompozitler (MMK) toz metalürjisi (TM), sıvı faz (döküm), vakum infiltrasyon, dağılım (dispersiyon) ve basınçsız infiltrasyon gibi farklı yöntemler ile üretilmektedirler. En çok tercih edilen yöntem ise toz metalürjisidir (TM) (Unlu 2008). Malzeme sarfiyatının düşük olması, nihai ürüne yakın üretime imkân sağlaması, otomasyona uygunluğu gibi avantajları TM yöntemini MMK üretiminde öne çıkarmaktadır (Groover 2010). Metal matrisli kompozit malzemeler uçak iniş takımlarını meydana getiren parçalarda, uzay ve havacılık alanında platform taşıyıcı aksamaları, fren diskleri, motor parçaları, mil ve şaft gibi parçalarda tercih edilmektedir (Şahin 2000).

Metallerin yüksek süneklik, seramiklerin yüksek elastik modül özelliklerini birleştiren bu malzemeler geniş kullanım alanına sahiptir. Metal matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklardaki performansları açısından cam fiber takviyeli plastikler ile kıyaslandığı zaman çok daha üstün oldukları görülmektedir. Sürekli fiber takviyeli kompozitler, üzerinde ilk çalışma yapılan MMK çeşididir (Güneş 2010). Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretimi maliyetli ve üretim aşamaları kompleks olmasından dolayı fabrikasyon seri üretimlerini zorlaştırmış, maksimum performans alınamamıştır. Bu tip problemlerden dolayı sürekli fiberlerin yerine alternatif olarak süreksiz fiberler ve viskerler ticari olarak kullanmaya başlanmıştır.

Çizelge 2.2 Demir/dışı matrisli kompozitlerin potansiyel uygulama alanları (Şahin 2006).

Kompozit Türü	Uygulama alanı	Bazı ayırt edici özellikleri
Aluminyum-grafit	Yataklar	Daha ucuz, daha hafif, kendi kendine yağlama, Cu,Pb,Sn,Zn tasarrufu
Aluminyum-grafit, Aluminyum- α -Al ₂ O ₃ , Aluminyum-SiC/Al ₂ O ₃	Otomobil pistonları, silindir gömlekleri, biyel kolları	Aşınma direnci, soğuk çalıştırma, hafiflik, yakıt tasarrufu
Bakır - grafit	Kaymalı elektriksel kontaklar	Mükemmel iletkenlik, yapışmama özelliği
Aluminyum - SiC	Turbosarj pervaneleri	Yüksek sıcaklık kullanımı
Aluminyum-cam veya karbon mikrobalonları	Turbosarj pervaneleri	Ultra hafif malzemeler
Magnezyum- karbon fiber	Uzay yapıları için boru şeklindeki kompozitler	Sıfır ısı genleşme, yüksek sıcaklık mukavemeti, iyi özgül mukavemet ve modül
Aluminyum- zirkon, Aluminyum- SiC, Aluminyum- silika	Kesici takımlar, makine örtüleri, pervaneler	Sert, abrasif ve aşınma dirençli malzemeler
Aluminyum-kömür, Aluminyum-kil	Düşük maliyetli ve düşük enerjili malzemeler	Sert, abrasif ve aşınma dirençli malzemeler

Partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler yüksek mukavemet, elastik modülü, yüksek aşınma direnci, üretimi kolay, düşük maliyetli ve çeşitli olarak üretilmeleri sonucu bu konu üzerinde çalışmalarda önemli hale gelmişlerdir. Geniş

Çalışma alanına sahip olmalarının başlıca sebebi de partikül takviye çeşidinin fazla olması ve üretim yöntemlerinin çok çeşitli olmasıdır (Yılmaz 2007).

Bütün bu olumlu özelliklerin her biri aynı anda oluşması güçtür. Çizelge 2.2’de belirtilmiş ayırt edici özellikler için gerekli şartlar, üretim tekniğı, takviye eleman çifti, optimizasyonu ve uygun matris ve bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliğı elde etmek mümkün olacaktır. Takviye, matris elemanı seçiminin sistemde mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi büyük olmaktadır (Zhang *et al.* 1999). Kompozitlerden iyi verim sağlamak için iyi matris ve takviye seçilmesi gerekmektedir. Avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır bunlar aşağıdaki gibidir (Guo and Derby 1995);

- Üretiminin zor olması
- Pahalı oluşu,
- İşlenmesinin güç olması ile birlik maliyetin yüksek olması,
- İstenen yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Bunlar haricindeki malzemeler gibi dönüşü olamayışıdır

2.4 Metal Kompozitlerde Kullanılan Matrisler

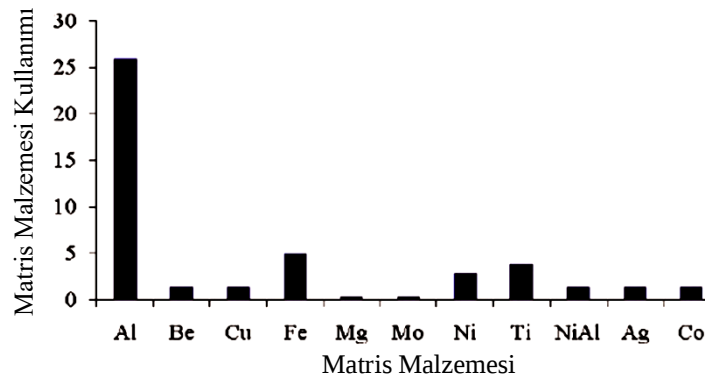
Kompozit bünyesinde kullanılacak olan metal matrisin seçimi çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi ve uygulama alanı için aranan kriterlerin göz önünde bulundurulması ile yapılır. Kısaca, matris bileşenden süneklik, şekillendirilebilirlik, termal iletkenlik gibi belirli fiziksel ve mekanik özellikleri sergilemesi beklenir (Haghshenas 2016). Matris fazı kompozit bünyede kesintisiz bir şekilde takviye fazlarını saran ana fazdır ve kompozite uygulanan yükleri takviye fazı ile birlikte paylaşan bileşendir. Bununla birlikte, takviye fazı ile birlikte matris fazı kompozitin performansını (Haghshenas 2016);

- Fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri
- Bileşenlerin boyut ve dağılımı
- Bileşenlerin morfolojisi
- Bileşenler arasındaki arayüzey özellikleri,

gibi çeşitli özellikleri ile belirler. Dolayısıyla bileşenlerin seçimi de yukarıda listelenen özelliklere göre yapılır.

Matris fazının görevi, takviye bileşenleri bir arada tutmak (bağlayıcılık), yüklerin takviye bileşenlere transferi ve ayrıca çevresel faktörler, taşıma işlemleri gibi çeşitli sınırlayıcılara karşı takviye elemanlarını korumaktır. Kesintisiz bir faz olarak matris, kompozitin enlemesine olan özelliklerini, interlaminer dayanımını ve yüksek sıcaklık dayanımını kontrol eder. Bununla birlikte, matris, dış kuvvetlerden takviye elemanlara etkin yük transferi sağlayarak takviyelerin tam potansiyellerinde kullanılmalarına olanak sağlar. Metal matrisli kompozitler matris malzemesine bağlı olarak farklı guruplarda sınıflandırılabilir. Bunlardan bazıları (Haghshenas 2016);

- Alüminyum esaslı kompozitler (AlMgSi, AlMg, AlCuSiMn, AlZnMgCu, AlCu, AlSiCuMg vb.)
- Magnezyum esaslı kompozitler
- Titanyum esaslı kompozitler
- Bakır esaslı kompozitler
- Süper alaşım esaslı kompozitler

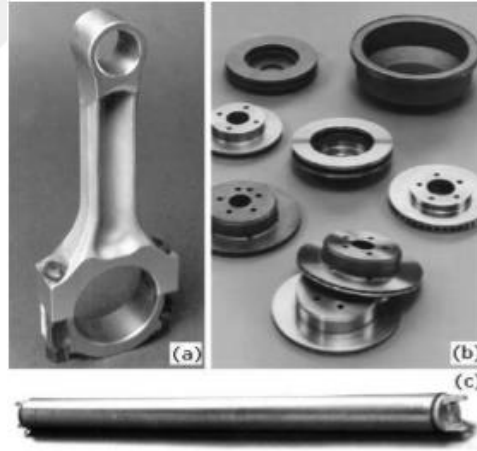


Şekil 2.2 Matris malzemelerinin metal matrisli kompozitlerdeki kullanım oranları (Haghshenas 2016).

Son yıllarda, metal matrisli kompozitlerin yapımında matris malzemesi olarak hafif metallere olan ilgi artmıştır. Özellikle otomotiv ve havacılık-uzay uygulamalarında en yaygın kullanılan kompozitlerdendir (Resim 2.1). Bu sektörlerde alüminyum-matris kompozitlerin kullanımı için itici güç, performans, ekonomik ve çevresel açıdan

düşünülen faydalardır. Örnek olarak, alüminyum esaslı metal kompozitlerinin ulaştırma sektöründeki en önemli faydaları daha düşük yakıt tüketimi, daha az gürültü ve daha düşük emisyon değerleridir (Haghshenas 2016). Bu alaşımların kullanılmasının başlıca sebepleri olarak; yüksek spesifik dayanım, gelişmiş rijitlik, indirgenmiş yoğunluk, gelişmiş sıcaklık özellikleri, kontrollü termal genleşme ve gelişmiş aşınma dayanımı sayılabilir (Haghshenas 2016, Hull and Clyne, 1996). Bu nedenle matris malzemesi olarak alüminyum ve alaşımları ilk akla gelen malzemeler arasındadır (Şekil 2.2) (Haghshenas 2016).

Bu alaşımların kullanılmasının başlıca sebepleri olarak düşük ergime sıcaklığı, düşük yoğunluk ve birçok takviye elemanını kolaylıkla ıslatabilmeleri verilebilir (Hull and Clyne 1996). Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilir.



Resim 2.1 Alüminyum matrisli (a) piston kolu, (b) fren parçaları, (c) kardan mili.

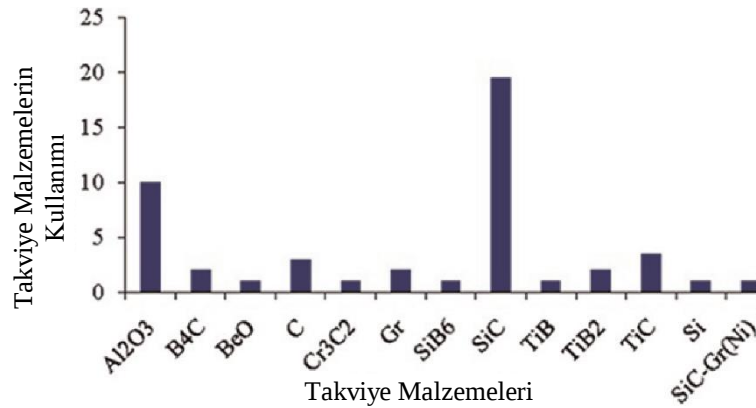
Bununla beraber, günümüze kadar MMK üretiminde alüminyumun dışında, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Fakat sadece Ti, Al ve Mg alaşımları en yaygın olarak kullanılanlarıdır (İnt.Kyn.4). Kullanılan matrisler dayanım ve iyi özgül ağırlık oranlarının olmasından dolayı hafif yapı konstrüksiyonlarında tercih edilir. Korozyon dayanımlarının çok yüksek olması da karakteristik özelliklerinden birisidir (Parlak 2006).

2.5 Takviye Elemanları

Takviye bileşenler metal matristen daha dayanıklıdır ve bu nedenle takviye fazı olarak adlandırılırlar. Takviye bileşenlerden genellikle Çizelge 2.3'te verilen özelliklere sahip olması beklenir (Chawla 2012). Genel olarak, metal olmayan inorganik bileşenler (seramik partiküller, karbon fiberler) bu özelliklerin birkaçının kombinasyonlarını sağlayabildikleri için sıkça tercih edilmektedirler.

Çizelge 2.3 Takviye olarak kullanılan malzemelerden beklenen özellikler (Haghshenas 2016).

Takviye Bileşen Özellikleri
Düşük yoğunluk
İyi mekanik ve kimyasal uyumluluk
İyi termal kararlılık
Yüksek Young Modülü
Yüksek basma ve çekme dayanımı
İyi işlenme kabiliyeti
Ekonomik verimlilik



Şekil 2.3 Başlıca takviye elemanlar ve metal matrisli kompozitlerdeki kullanım hacmi (Haghshenas 2016).

Takviye elemanları, kompozitin üzerindeki yükün büyük kısmını taşıyan, rijitliği sağlayan kompozit malzemeyi oluşturan en önemli elemanlardan birisidir. Mühendislik malzemesi olarak kullanılan takviye elemanlarının çoğu elyaf şeklinde üretilmeleri sebebi ile dayanım ve rijitlikleri katı hallerindekinden yaklaşık 30-50 kat daha dayanıklı

ve 3 kat daha rijit olduklarından kütle halinde gösterdikleri özelliklerinden çok daha üstün performans sergilerler. Örnek olarak: karbon elyaf, kütle haldeki grafitten yaklaşık 50 kat fazla mukavemete sahip olur. Elyafların çapları genel olarak 5-20 μm dir (Şahin 2000). Bunun dışında elyafların şekli, boyu, yönlendirilmeleri matrisin mekaniksel özellikleri ile yeterli elyaf/matris ara yüzey bağına sahip olmaları da gerekmektedir. Fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması yükün elyaflara iletilebilmesinde önem arz eder. Kalıcı yapısal gerilmelerin oluşabilmesi için matris ile takviye elemanı ısı genleşme katsayıları arasındaki uyum büyük önem taşır. Kompozit üretimi için seçilen takviye elemanı, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği kompozitin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler.

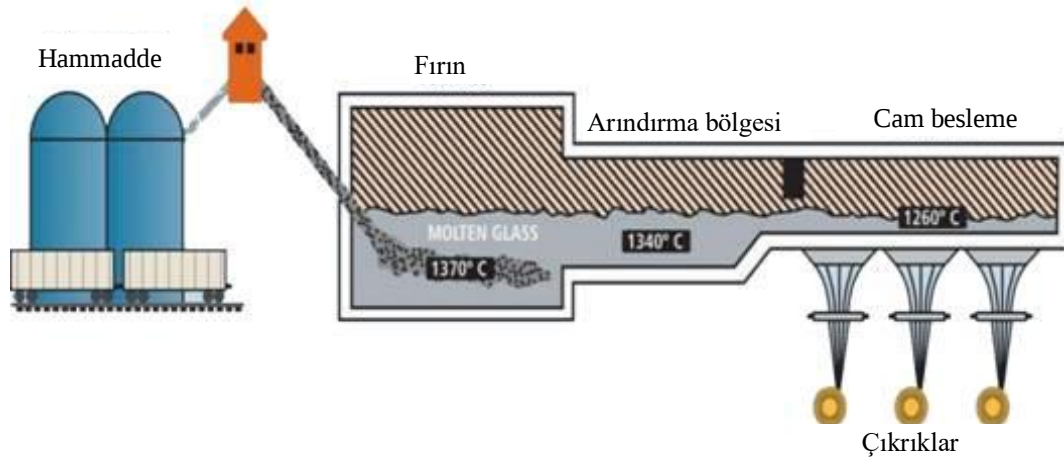
Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde, matris olarak Al, Mg, Zn, Cu ve Ni gibi malzemeler kullanılırken, takviye olarak silisyum karbür, borür, grafit, alüminyum oksit, tungsten ve molibden gibi değişik sürekli, kılcal kristalli veya parçacıklı elyaflar kullanılır (Güneş 2010). Maksimum özellikler, bağların sadece uygulanan yük doğrultusunda uzandığı zaman elde edilebilir. Bütün bağlar üniform şekilde yüke maruz kaldığında birlikte kırılır. Takviye elemanı olarak kullanılan seramiklerin başlıcaları (Şekil 2.3); cam, karbon, karbürler, borürler, Al_2O_3 ve SiC'dür. Çizelge 2.4'te yaygın kullanılan seramik takviyelerin bazı özellikleri verilmiştir (İbrahim *et al.* 1991). Son yıllarda, yüzey ıslatma ve termal genleşme uyumsuzluğu gibi problemlerin yaşandığı seramik partiküllere alternatif olarak, metalik takviye elemanların üzerindeki çalışmalar üzerinde de çalışmalar devam etmektedir. Bunlara örnek olarak üstün özelliklere sahip olan metalik cam alaşımları verilebilir. Metalik camlar ile ilgili detaylı bilgiler sonraki bölümler altında anlatılmıştır. Seramik tozların çoğu doğal olarak bulunabilmektedir. Bunlar uygun zenginleştirme ve boyutsal olarak sınıflandırma işlemleri sonrasında kompozit malzemelerin üretiminde direkt olarak kullanılabilir. Ancak istenilen partikül şekline sahip sert malzemeler sentetik olarak üretilmektedir. Bunlar genellikle karbürleşmiş (SiC, TiC), nitrürleşmiş (Si_3N_4) veya oksitlenmiş (Al_2O_3 , TiO_2) metalik bileşenlerden sentezlenmektedir. Partikül, visker veya fiber formunda olabilen bu bileşenlerin şekilleri itibarıyla kompozit bünyedeki etkileri de farklı olabilmektedir (Hort and Kainer 2006).

2.5.1 Cam Fiberler ve Cam Partiküller

Günümüzde polimer matrisli kompozitlerde sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak, dayanıklı olmalarının yanında kolay bulunabilirlikleri ve maliyet açısından avantajlı olmalarıdır (Şahin 2006). Cam elyafın ana bileşenini silis-kum (SiO_2) meydana getirmekle birlikte çeşitli oranlarda sodyum, alüminyum, bor, kalsiyum ve demir gibi elementlerin oksitlerini de içermektedir. Fiber yapısından kullanılan tiplerden E-Camı boro-silikat bileşimlidir ve iyi elektrik yalıtım özellikleri için geliştirilmiştir. Magnezyum ve alüminyum silikat ihtiva eden S-camı ise daha pahalı fakat daha yüksek modüle sahiptir. Korozyon direnci açısından nispeten daha iyi olan C-camının mekanik özellikleri daha düşüktür (Şahin 2006).

Çizelge 2.4 Seramik takviyelerin özellikleri (İbrahim *et al.* 1991).

Seramik	Yoğunluk (10^{-3} kg/m^3)	Genleşme ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Dayanım (MPa)	Elastik Modülü (GPa)
Al_2O_3	3.98	7.92	221(1090 $^\circ\text{C}$)	379(1090 $^\circ\text{C}$)
AlN	3.26	4.84	2069(24 $^\circ\text{C}$)	310(1090 $^\circ\text{C}$)
BeO	3.01	7.38	24(1090 $^\circ\text{C}$)	190(1090 $^\circ\text{C}$)
B_4C	2.52	6.08	2759(24 $^\circ\text{C}$)	448(24 $^\circ\text{C}$)
C	2.18	- 1.44	-	690
CeO_2	7.13	12.42	589(24 $^\circ\text{C}$)	185(24 $^\circ\text{C}$)
HfC	12.20	6.66	-	317(24 $^\circ\text{C}$)
MgO	3.58	11.61	41(1090 $^\circ\text{C}$)	317(1090 $^\circ\text{C}$)
MoSi_2	6.31	8.91	276(1090 $^\circ\text{C}$)	276(1260 $^\circ\text{C}$)
Mo_2C	8.90	5.81	-	228(24 $^\circ\text{C}$)
NbC	7.60	6.84	-	338(24 $^\circ\text{C}$)
Si	2.33	3.06	-	112
SiC	3.21	5.40	-	324(1090 $^\circ\text{C}$)
Si_3N_4	3.18	1.44	-	207
SiO_2	2.66	< 1.08	-	73
TaC	13.90	6.46	-	366(24 $^\circ\text{C}$)
TaSi_2	-	10.80	-	338(1260 $^\circ\text{C}$)
ThO_2	9.86	9.54	193(1090 $^\circ\text{C}$)	200(1090 $^\circ\text{C}$)
TiB_2	4.50	8.28	-	414(1090 $^\circ\text{C}$)
TiC	4.93	7.60	55(1090 $^\circ\text{C}$)	269(24 $^\circ\text{C}$)
UO_2	10.96	9.54	-	172(1090 $^\circ\text{C}$)
VC	5.77	7.16	-	434(24 $^\circ\text{C}$)
WC	15.63	5.09	-	669(24 $^\circ\text{C}$)
WSi_2	9.40	9.00	-	248(1090 $^\circ\text{C}$)
ZrB_2	6.09	8.28	-	503(24 $^\circ\text{C}$)
ZrC	6.73	6.66	90(1090 $^\circ\text{C}$)	359(24 $^\circ\text{C}$)
ZrO_2	5.89	12.01	83(1090 $^\circ\text{C}$)	132(1090 $^\circ\text{C}$)



Şekil 2.4 Cam elyafın üretim ergitme ve üretim süreci (İnt.Kyn.2).

Bu fiberler, camların 1200-1500 °C'deki fırınlarda ergitilerek potalardan fiberler halinde üretilmesi sonucu elde edilirler. Üretim süreci şematik olarak Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Literatür araştırmalarından, SiO₂ esaslı cam fiberlerin polimer kompozitlerdeki kullanımı yaygın olduğu görülmeye rağmen, alüminyum matrisli kompozit bünyelerine dahil edildiği çalışmaların daha az olduğu görülmektedir. Kammer vd. (2012) ve Kumar vd. (2011) E-cam ve uçucu kül katkılarıyla AL7075 ve AL6061 alaşımlarını takviye ederek mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında ergitme yöntemini kullanan araştırmacılar, kırık cam fiber ve uçucu kül takviyelerinin belirli oranlarının alaşıma çekme ve basma dayanımı üzerindeki gelişmeye neden olduğuna dikkat çekmişlerdir. (Kammer *et al.* 2012, Arun Kumar and Swamy 2011). Kammer vd. (2012), %2-8 aralığındaki sabit uçucu kül katkısı ile %1-5 aralığındaki E-cam fiber takviyelerinin beraber kullanıldığında, kompozitin çekme dayanımını 94.67 N/mm²'den 198.98 N/mm²'ye, basma dayanımı değerlerini ise 605.56 N/mm²'den 954.65 N/mm²'ye artırdığını bildirmişlerdir. Arun Kumar vd. (2011), ise çekme ve basma dayanımındaki gelişmenin yanında setlik değerlerindeki belirgin yükselişi (50'den 100 VHN'ye) incelemişlerdir. Diğer bir çalışmada, Anilkumar vd. (2011) yüksek SiO₂ içerikli (%59.96) uçucu kül takviyesi ile AL6061 alaışımını incelemişler ve kompozitin çekme dayanımının %15'e kadar takviye ile arttığını göstermişlerdir (Anilkumar *et al.* 2011). Fiber yapılı takviyelerden başka, sertlik ve

mekanik dayanım üzerinde olumlu etkilere sahip SiO₂ esaslı cam partikül takviyesi ile ilgili literatürdeki bilgiler de oldukça kısıtlıdır. (Madhukumar 2018).

2.5.2 Metalik Cam Takviyesi

Geleneksel metalik alaşımların düşük yükler altında kolay deforme olabilmeleri ve bu alaşımların bazı uygulamalar açısından yetersiz özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkarak, geleneksel metalik malzemelerin dayanımını geliştirmek için çeşitli çalışmalara yönelinmiştir. Çalışmalar genel olarak hata yoğunluğunun veya malzeme tane boyutunun kontrol edilmesi ile dayanımın artırılması üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Fakat daha yüksek dayanımın ihtiyaç duyulduğu durumlar için, kayma deformasyon oluşumunu azaltmak amacı ile kristal yapının düzensizleştirilmesi ile yeni alaşımlar üretilmiştir. Sonuç olarak hızlı soğutma işlemlerinin kullanılarak üretildiği amorf yapıli metal alaşımları keşfedilmiştir (Fan *et al.* 2008, Yazıcı 2011).

Diğer adıyla metalik cam alaşımları, kristallenme esnasında çekirdeklenme ve büyümesinin engellenmesi amacı ile eriyik metalin oldukça yüksek hızlarda soğutulması yolu ile sentezlenir. Yüksek soğutma hızları vasıtasıyla uzun mesafede atomik düzenden yoksun amorf yapı meydana gelmektedir. Metalik camın üstün özellikleri de (yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci, uygun manyetik özellikler vb) bu malzemeler üzerindeki ilgiyi artırmış ve sonuçlar geniş bir araştırmacı kitlesi tarafından araştırılmaya başlamıştır (Yazıcı 2011). Metalik camların kristal karşılıkları ile kıyaslandığındaki gözlenen davranışlar şöyledir (Yazıcı 2011):

- 1- Çekme mukavemeti kristal alaşımlarinkine göre yaklaşık 3 kat daha yüksektir.
- 2- Camsı alaşımların Young modülleri kristal alaşımlara kıyasla üçte biridir (mukavemet değeri aynı olması şartı ile).
- 3- Çekme mukavemeti ve Young's Modülü arasında tam lineer bir davranış mevcuttur ve bu doğrusal ilişkinin eğimi elastik uzama limitine; yaklaşık % 2'ye, karşılık gelir. Kristalin alaşımlar ile karşılaştırıldığında üç kat daha büyüktür.

4- Tane sınırı içermedikleri için korozyon dirençleri yüksektir (Telford 2004).

Bununla birlikte, seramik ve cam malzemelere benzer şekilde metalik cam alaşımları oldukça gevrek davranış sergiler. Ancak, yüksek sıcaklıklarda termoplastik olarak şekillendirilebilirler (Telford 2004). Togashi vd. (2008), Zr-, Ni-, ve Fe-esaslı metalik camların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Buna göre Fe-esaslı metalik camların aşınma dayanımının diğerlerine göre çok üstün olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuç, Fe-esaslı metalik camların sertlik değerlerinin yüksek olması ile de desteklenmektedir. Çalışmaya göre, geleneksel çelik dişli 8 saat içinde %60 deforme olurken, Ni- esaslı metalik camdan yapılan dişli 2500 saat çalışmış ve sonunda %3 lük aşınma gözlemlenmiştir. Sonuç metalik cam malzemenin aşınma direncinin farkını açıkça ortaya koymaktadır (Togashi *et al.* 2008). Metalik camların, kristal karşıtlarına göre diğer bir üstünlüğü de korozyon direnci ve elektriksel iletkenliklerinin de yüksek olmasıdır. Ancak termal iletkenlik değerleri oldukça düşük değerlere düşebilmektedir (Umetsu *et al.* 2012).

Metalik camların üretiminde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, kalın kesitli parçaların üretiminin sınırlı olmasıdır. Alaşım kompozisyonuna göre kritik döküm kalınlıkları mikron seviyesinden santimetreler seviyelerine kadar değişebilmektedir. Termodinamik olarak daha kararlı kristal fazların oluşumunun engellemesi amacıyla bu alaşımların döküm işlemlerinde yeterince hızlı soğutma hızları gereklidir. Cam oluşumu için gereken yüksek soğutma hızını elde etmek için uygun döküm teknikleri gerekli olduğu için kalın kesitli metalik cam alaşımlarının kritik döküm kalınlıkları sınırlıdır (Das *et al.* 2003). Bu da büyük ölçekteki endüstriyel uygulamalarını kısıtlamaktadır. Santimetre seviyesinde kritik döküm kalınlığına sahip belirli alaşım kompozisyonları olmasına rağmen (Gilbert *et al.* 1997), amorflaştırılabilen diğer sistemlerin çoğu milimetre seviyelerinde kalmıştır. Bununla birlikte, deformasyon sertleşmesinin olmaması nedeniyle, amorf alaşımlar genellikle mekanik yükleme altında ani kırılma gösterirler. Kısaca, gevrek davranış sergilemeleri diğer bir sınırlayıcı faktördür. Bu nedenle, yapısal malzeme olarak kullanılmak üzere diğer uygulama alanlarını bulma girişimleri başlamıştır. Seçeneklerden birisi, metalik camları metal matrisli kompozitlerde takviye bileşen olarak kullanımıdır. Son yıllarda

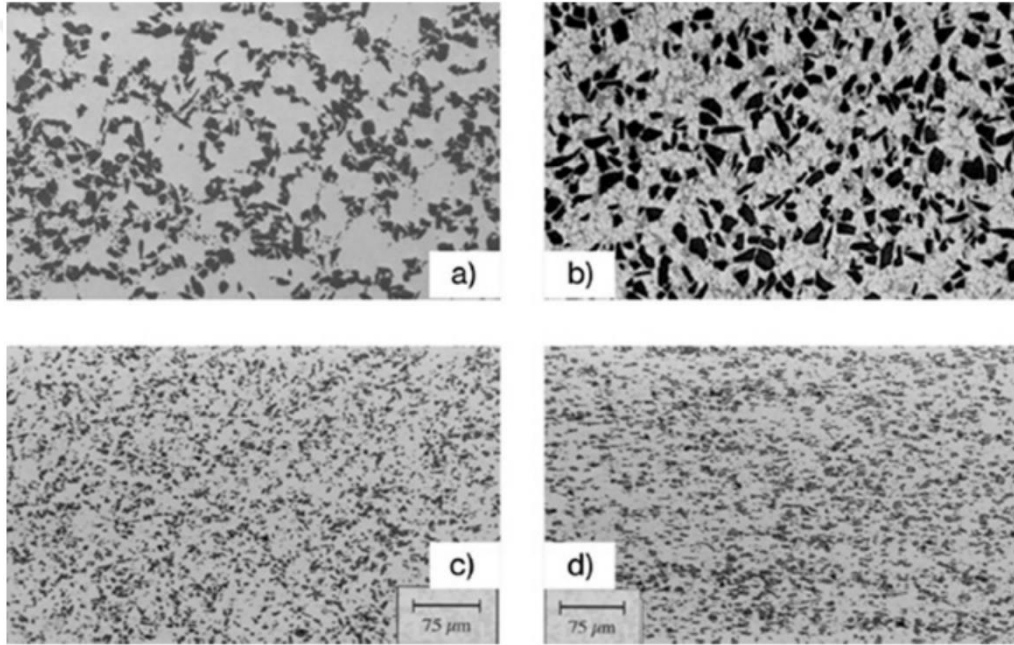
metalik camların üstün özelliklerinin kullanılması amacıyla takviye partikül olarak metal matrisler içerisindeki davranışlarının incelendiği görülmektedir. Metal matris ve seramik takviye arayüzey problemlerinin çözümüne bir karşılık olabileceği düşüncesiyle, Yu vd. (2006), Lee vd. (2004), ve Scudino vd. (2008) metalik cam partiküllerinin metal matris içerisinde kullanımının kapısını açmışlardır. Çalışmalarında metalik cam partiküllerinin kristallenme sıcaklığının altındaki sıcaklıkları tercih ederek, metal matrisli kompozitlerin dayanımındaki gelişmeleri göstermişlerdir. Bunlardan başka, Zheng vd. (2014) demir esaslı metalik cam partiküllerini alüminyum matris içerisinde mekanik alaşımlama ve sıcak ekstrüzyon yöntemiyle değerlendirerek, yüksek dayanım (660 MPa) ve iyi kırılma plastizitesi (%12) kombinasyonu ile dikkat çekici mekanik özelliklere ulaşılabildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, Rezai vd. (2016) nispeten yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip kompozit numunelerin, numunelerin yoğunluğunda hafif bir artışa yol açan alüminyum esaslı metalik cam partiküllerinin eklenmesi ile üretilebileceğini bildirmişlerdir.

Kobalt esaslı metalik camlar, neredeyse basma yüklemesi altındaki seramikler kadar yüksek kırılma dayanımı değerleri gösterir. Örneğin, yaklaşık 5185 MPa kırılma dayanımına sahip $\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{31.5}$ alaşımı, metalik cam ailesi içindeki en yüksek mukavemet değerine sahip alaşımdır (Inoue *et al.* 2004). Diğer bir örnek olan $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşımı yaklaşık 1200 Hv yüksek sertlik değeri ve 4000 MPa dayanım (basma yüklemesi) sergiler (Yazici *et al.* 2016). Bu alaşımlar aynı zamanda yüksek elastik bir modüle sahiptirler. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşımından üretilen amorf partiküller alüminyum matrisli kompozitler için takviye bileşen olarak düşünülmüştür.

2.6 Partikül Takviyeli Kompozit Mikroyapısı

Bir MMC'nin mikro yapısı, matris ve takviye yapısından ibarettir. Kompozit bir malzemedeki matris ve takviye arasındaki etkileşimden kaynaklanan mikroyapısal özellikler anahtar özelliklerdir. Bunlar genellikle ikincil takviye fazlarının tipi (Adamiak 2012), boyutunu ve dağılımını (Advesh 2011), matris tane boyutu, matris ve ikincil faz arayüzey özelliklerini ve çeşitli mikroyapısal kusurlardır (Haghshenas 2016). Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri de bu faktörlerden güçlü bir şekilde

etkilenir. Örnek olarak, Al-MMC'lerin mekanik özellikleri, takviye parçacıklarının doğasına ve dağılımına yakından bağlıdır. Gelişmiş özelliklere ulaşmak için homojen ve intragranüler dağılım tercih edilir ve daha da önemlisi, sıcak ekstrüzyon işlemi arzu edilen dağılıma elde etmede yardımcıdır. Buna aksine, önceki çalışmalar Al matrisinde takviye partiküllerinin aglomerasyonunun mekanik özelliklerin bozulmasına yol açtığını göstermiştir. Yapıdaki boşluklar boyunca takviye faz kümeleşmesinin önceden var olan mevcut çatlaklar gibi davrandığı için, deformasyon işlemi sırasında yumuşak matristen sert faz partiküllerine stres transferini sınırlamaktadır (Matli, *et al.* 2017).



Şekil 2.5 Farklı partikül takviyeli kompozitlerin tipik yapılarının düzenlenmesi, (a) SiC partikül takviyeli alüminyum (kalıp döküm), (b) SiC partikül takviyeli alüminyum (döküm), (c) SiC partikül takviyeli alüminyum (ekstrüde toz karışım), (d) SiC-parçacık takviyeli alüminyum (döküm ve ekstürüde) (Haghshenas 2016).

Şekil 2.5 farklı parçacık takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin tipik mikro yapılarını göstermektedir. Görüldüğü gibi, işleme yöntemlerine bağlı olarak, güçlendirilmiş parçacık dağılımları değişmektedir.

2.7 Matris-Seramik Arayüzeyi

Matris ve seramik takviye arasındaki arayüzey ve bu bölgenin karakteristikleri yükleme transferi ve deformasyon esnasında kompozitin çatlak direncinin karakteristiklerini belirlediği için araştırmacıların yoğunlaştığı yerlerden birisidir. Yaygın olarak kompozitteki arayüzey bağlanma dayanımını yükseltmek için, ıslatma özelliklerinin geliştirilmesi, kimyasal etkileşimlerin kontrol edilmesi ve oksit oluşumunun en aza indirgenmesi gerektiği bilinmektedir. Etkileşim matris ve takviye fazlar arasındaki kimyasal bağlanma veya mekanik kenetlenme şeklinde olabilir. Sıvının yüzey gerilimi arayüzey bağlanma dayanımını aştığı zaman, metal ile sıvı arasında ıslatma meydana gelir. Islatabilirliğin ölçüsü katı ve sıvı arasında oluşan temas açısının (Θ) ölçülmesiyle elde edilebilir (Eustathopoulos 2015, Ibrahim *et al.* 1991). İlişkinin şematik gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir.

$$\gamma_{sg} = \gamma_{lg} \cos\Theta + \gamma_{sl} \quad (1)$$

γ_{sg} , γ_{lg} , ve γ_{sl} katı-gaz, sıvı-gaz ve katı-sıvı arasındaki arayüzey enerjileridir. Islatma enerjisi açısından, adhezyon işi (W_{ad}) katı-sıvı arayüzeyinin birim alanını ayırmak için gerekli enerji olarak ifade edilir (Eustathopoulos 2015, Ibrahim *et al.* 1991):

$$W_{ad} = \gamma_{lg} (1 + \cos\Theta) \quad (2)$$

Bu nedenle, ıslatma $\Theta < 90^\circ$ (yani $\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$ olduğunda) veya ıslatma için itici güç sıvı arayüzey enerjisini aştığı zaman (yani $D_f > \gamma_{lg}$) elde edilir. D_f değeri, sıvının yüzey gerilimine ve sıvı-katı ara yüzün mukavemetine bağlıdır; bu da, yüzey özellikleri, ara yüzey reaksiyonları, oluşma ısısı, değerlik elektron konsantrasyonu, sıcaklık ve zaman tarafından etkilenir. Eriyik metaller ile ilişkili yüksek yüzey gerilimi nedeniyle eriyik metal-seramik sistemlerinde ıslatmanın sağlanması zordur (Ibrahim *et al.* 1991).

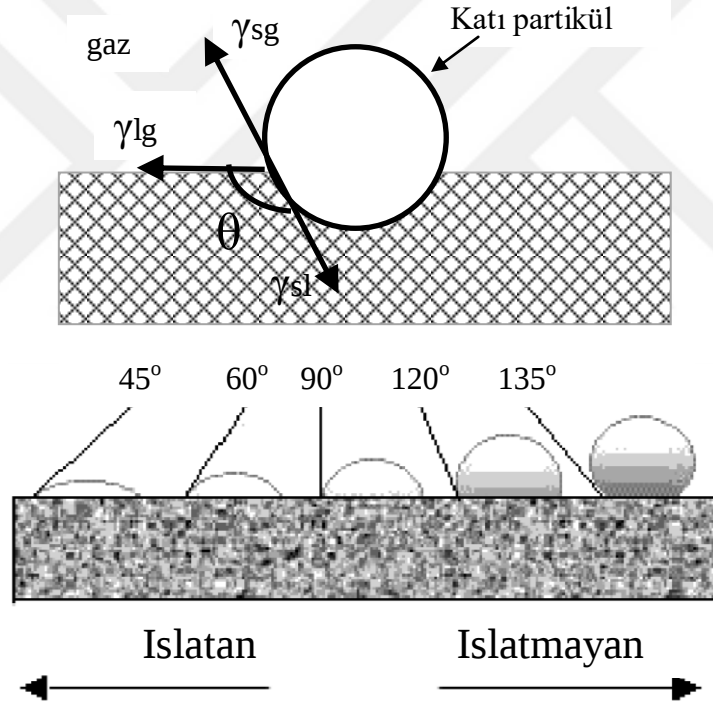
Örnek olarak, karbon, SiC, B₄C ve Al₂O₃’ün alüminyum ve alaşımları tarafından ıslatılması ölçülmüş ve 950 °C’de zayıf olduğu bulunmuştur. Yine de, temas açısındaki düşüş sağlanarak bu sistemlerde ıslatma aşağıda verilenlere bağlı olarak etkilenebilir (Ibrahim *et al.* 1991):

- Katının yüzey enerjisini artırmak,
- Katı-sıvı arayüzey enerjisini azaltmak ve/veya,
- Sıvı metalin yüzey gerilimini azaltmak.

Pratikte bunlar (Ibrahim *et al.* 1991);

- Seramik partiküllere metalik kaplama uygulanması
- Matris alaşımının reaktif malzemelerle alaşımlanması
- Seramik partiküllere ısıtma işlemi uygulanması

ile elde edilebilmektedir. Seramik partiküllere nikel ve bakır gibi metalik kaplamaların uygulanması, arayüzeyin doğasını metal-seramik'ten metal-metal'e değiştirerek partiküllerin tüm yüzey enerjisini artırır.



Şekil 2.6 Katı, sıvı ve gaz fazları arasında oluşan temas açısının şematik olarak gösterimi ve ıslatma açısına göre sıvının görünümü (Ibrahim *et al.* 1991, Viskova 2015).

Bunun sonucu olarak, ıslatma matris ve takviye arasındaki arayüzeydeki güçlü etkileşimi etkileyerek elde edilir (Ibrahim *et al.* 1991). Bu yaklaşım Al-Al₂O₃ sisteminde Al₂O₃ tozlarının Ti-Ni ve Ni ile kaplanması ile başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Li, Mg, Ca, Ti, Zr ve P gibi reaktif elementlerin matris malzemesine katılması metal-seramik sistemlerinin ıslatma karakteristiklerini aşağıdaki maddeler

yolu ile geliştirmektedir (Ibrahim *et al.* 1991):

- a) Eriyiğin yüzey gerilimin indirgenmesi
- b) Eriyiğin katı-sıvı arayüzey enerjisinin indirgenmesi
- c) Arayüzeyde kimyasal bir reaksiyonun indüklenmesi

Seramik partiküllerine ısıı ışlem uygulanması, seramik yüzeylerinden adsorbe gazların desorpsiyonu yolu ile metal matrisli kompozitlerdeki ıslatmayı geliştirmede etkili bir şekilde kullanılmıştır. Oksijen varlığında, oksit oluşum yüksek serbest enerjili metaller arayüzeydeki etkileşim seviyesini düşüren etkili difüzyon bariyerleri olarak rol oynayan kararlı oksitler oluştururlar. Dolayısıyla, oksitin eriyik metal tarafından nfz edebileceği belirli bir sıcaklık eşiğine ulaşmadığı sürece, eriyik metallerin bu oksitleri ıslatabilirlikleri düşüktür (Ibrahim *et al.* 1991).

2.8 Metal Matrisli Kompozitlerin retim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitler çok çeşitli yöntemler vasıtasıyla üretilmektedir. Takviye bileşenlerin formu ve cinsi kadar, süreç ve bitirme işlemleri gibi imalat yöntemini değiştirerek, bileşenlerin aynı kompozisyonlu ve aynı miktarları olsa da, farklı karakteristik profillerin elde edilmesi mümkündür. Genel olarak, üretimde kullanılan süreçler aşağıdaki gibidir (Kainer 2006):

- a) Metalürjik ergitme işlemleri
 - Kısa fiber, partikül veya hibrit durumların infiltrasyonu
 - Fiber veya partiküllerin reaksiyon infiltrasyonu
 - Metalik eriyik içerisinde partiküllerin karıştırılması ve dökümü
- b) Toz metalürjisi süreci
 - Presleme ve sinterleme
 - Metal-takviye karışımlarının ekstrüzyonu
- c) Toz karışım ve fiber tertibatın sıcak preslenmesi
- d) Ergitme metalürjisinden gelen prekürsör malzemenin tikso-forming ve ekstrüzyonu
- e) Yarı mall ürünlerin kaynaklanması veya birleştirilmesi

f) Metal tellerin kombine deformasyonu

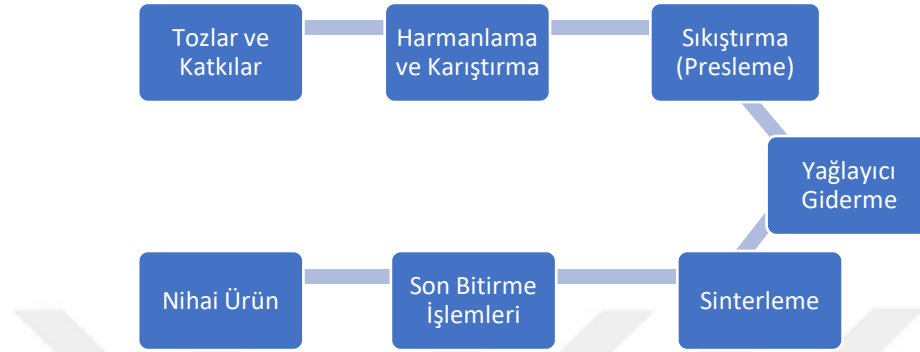
Alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi yolu veya ergitme/döküm yolu ile üretilir. Toz metalurjisi yolunun diğer yöntemlere göre çeşitli avantajları vardır. Örnek olarak düşük sıcaklıkların kullanılabilmesi nedeniyle, matris ve takviyeler arasında kimyasal reaksiyon yoktur veya oldukça azdır (Cheng *et al.* 2008, Ozdemir *et al.* 2008). Yüksek seviyede dispersiyona sahip kompozit tozlar, birinci işlem olan öğütme aşamasında üretilir ve daha sonra ikinci aşamada şekillendirme ve partiküllerin birbirine yaklaştırılması amacıyla sıkıştırılır. Öğütme ve karıştırma özellikleri açısından yüksek enerjili öğütme (HEM) yolu, homojen kompozit tozların üretimi için uygun bir yöntemdir (Nestler *et al.* 2011).

2.8.1 Toz Metalurjisi ve Tozların Özellikleri

Toz metalurjisi tozların karıştırılması, soğuk karışımın istenilen şekle sıkıştırılması ve sonrasında parçanın istenilen özellikler elde etmek ve temas eden partikül yüzeylerinin bağlanması için kontrollü bir atmosferde bunların ısıtılması veya sinterlenmesi ile metal parçaların üretilmesi işlemidir (İnt.Kyn.1). Toz metalurjisi işlemi (1) erimiş metalin taşınmasını gerektirmeyen, (2) nadiren müteakip işleme veya bitirme işlemlerini gerektiren, (3) çeliğin ve diğer yüksek erime metal parçaların hassas ölçekli kalıplar içerisinde hızlı seri üretimi sağlayan benzersiz bir süreçtir. Ayrıca, (4) berilyum, tungsten ve molibden gibi çalışılması ekonomik olmayan veya pratik olmayan metaller ile çalışmasını sağlar. Bundan başka, (5) birbirinden farklı metaller, metalik olmayan ve geniş çapta farklılık arzeden karakteristiklere sahip malzemeler de dahil olmak üzere başka bir yolla üretilmeyen malzemelerin birleştirilmesine izin veren bir üretim şeklidir. Bu üretim sürecinin diğer bir üstün yanı ise yoğunluk veya gözenekliliğin tam olarak kontrol edilebilmesiyle arzu edilen özelliklere ulaştırabilmesidir (İnt.Kyn.1). Şekil 2.7’de presleme ve sinterleme yolunu kullanan toz metalurjisi akım şeması verilmiştir.

Toz metalurjisinde kullanılan tozlar öğütme veya atomizasyon yöntemleri ile üretilirken, alüminyum tozları çoğunlukla hava atomizasyon tekniği ile üretilmektedir.

Tozların üretiminde kullanılan teknik toz karakteristiklerini (partikül şekli, boyutu ve dağılımı) direkt olarak etkilemektedir. Dolayısıyla presleme ve sinterleme süreçleri de toz karakteristiklerinden etkilenmektedir. Tek eksenli presleme yöntemi presleme ve sinter toz metalurjisindeki standart sıkıştırma tekniğidir.



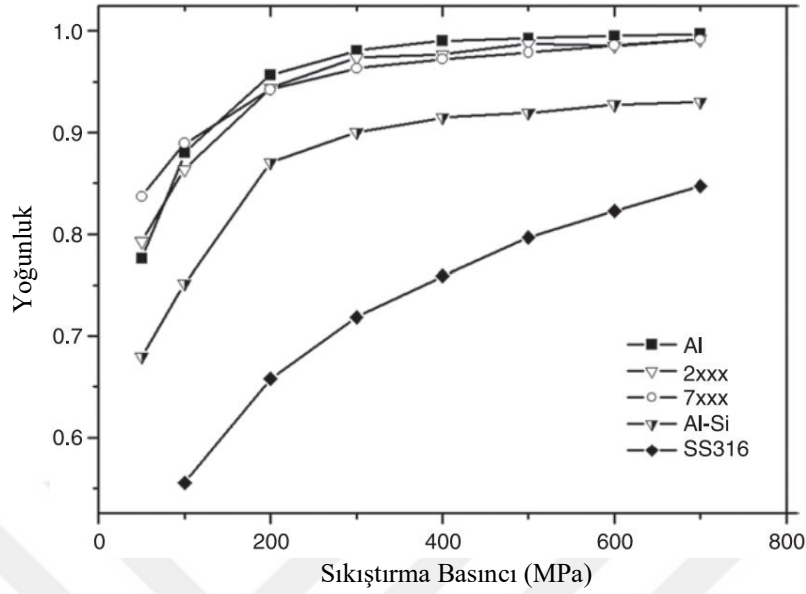
Şekil 2.7 Presleme ve sinterleme işlemlerinin kullanıldığı toz metalurjisi yolu.

Tipik olarak, gevşek ve bağımsız tozlar bir kalıp boşluğuna doldurulur, üst ve alt punçlar vasıtasıyla tozlara basınç uygulanarak ham şekillendirilmiş mamuş üretilir. Bu süreç esnasında, eşdeğer olmayan sıkıştırma basınçları, kalıp duvarı sürtünmesi ve/veya presleme esnasındaki iç gerilimler sıkıştırılmış malzemede ham yoğunluk farklılıklarına neden olabilir. Sonuçta bu durum sinterlenen ürün içerisindeki hem yoğunluk farklılıklarına, hem boyutsa ve mekanik özellik varyasyonlarına neden olacaktır. Bu nedenle ham yoğunluk gradyanları parça ve kalıp tasarımı ve ayrıca yağlayıcı kullanımı ile en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Sıkıştırma süreci esnasında meydana gelen aşamalar (Huo *et al.* 2011) ;

- Partiküllerin düzenlenmesi
- Lokal plastik deformasyon
- Homojen plastik deformasyon
- Toplu sıkıştırma

olarak verilebilir. Plastik deformasyon aşamaları partikül temaslarının düzleşmesine ve temas noktalarına komşu bolukların doldurulmasıyla sonuçlanır. Örnek olarak alüminyum tozlarının mükemmel sıkıştırılabilirliği Şekil 2.8’da verilmiştir (Huo *et al.*

2011).



Şekil 2.8 Al-Zn (7xxx), Al-Si, saf alüminyum, Al-Cu (2xxx) ve 316 paslanmaz çelik tozları arasındaki sıkıştırılabilirlik kıyaslaması (Huo *et al.* 2011).

Hava atomizasyonu ile üretilmiş alüminyum tozları yaklaşık 165 MPa’da %90 teorik yoğunluğa sıkıştırılabilirken, bu durum demir tozlarında benzer yoğunluk için 700 MPa civarındadır. Bu sayede daha küçük kapasiteli preslerin kullanımına imkan verirken, kalıp ve punçların aşınma miktarları minimuma indirilebilir. Parçaların preslenmesi esnasında yağlayıcı maddelerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Tipik olarak steatik asit esaslı kullanılan yağlayıcı türleri %0.5 ve 1.5 civarında tozlarla karıştırılarak kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddeler sinterleme öncesindeki ön ısıtma işlemlerinde uzaklaştırılmaktadır (Huo *et al.* 2011).

2.8.2 Toz metalurjisi ve Sinterleme İşlemi

Toz metalurjisi yoluyla bir ürün üretmek için genel olarak, karıştırma ile farklı partiküllerin bir araya getirilmesi, daha sonra öğütme ve homojenleştirme işlemi, presleme vasıtasıyla ham kompakt malzemenin şekillendirilmesi ve ardından sinterleme adı verilen yüksek sıcaklık yoğunlaştırma işlemleri gerçekleştirilir. Bu nedenle, toz partiküllerinin boyutu ve morfolojisi, karıştırma işlemleri, presleme ve sinterleme süreçleri genel parametreler olarak kabul edilir. Hem partikül boyut dağılımı hem de partikül şekli, paketlenme yoğunluğunu etkiler. Genellikle, nihai üründe mukavemet ve

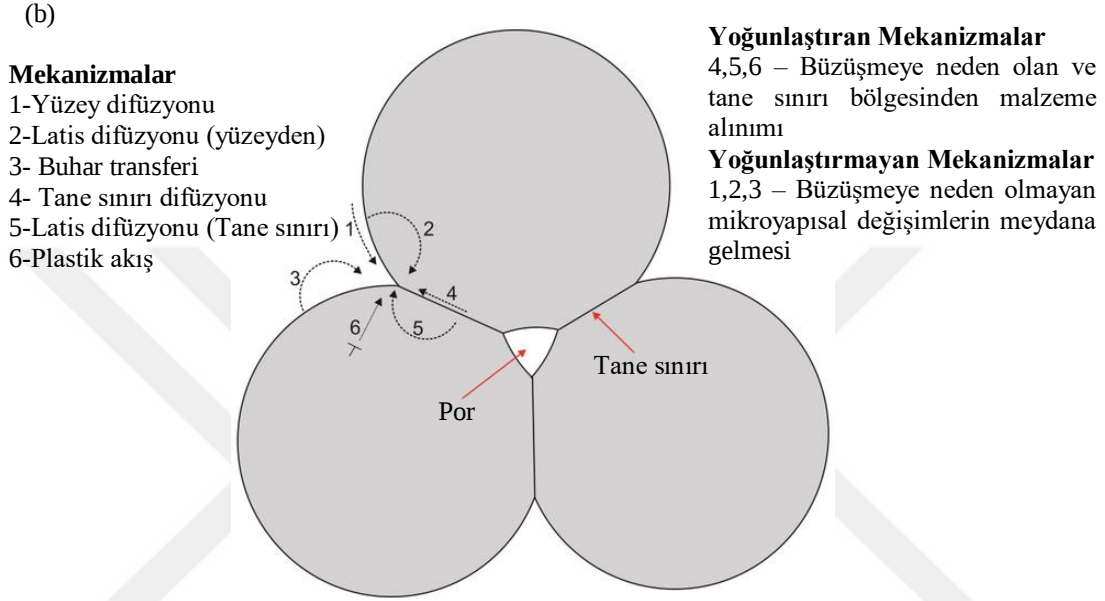
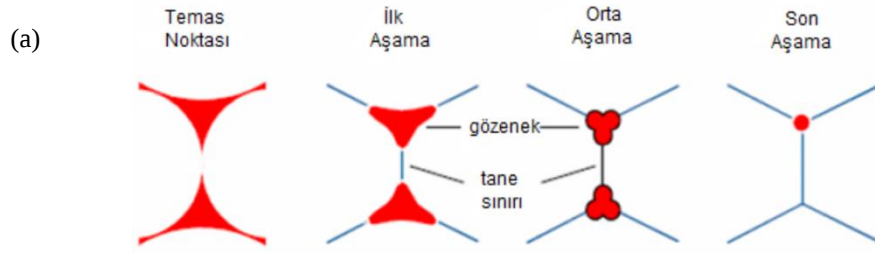
homojenliği sağlamak için yüksek paketleme yoğunlukları aranır. Tozların sinterleme için normal olarak daha yüksek yüzey alanı istenir. İnce boyutta tercih edilen partiküllerden daha yüksek nihai yoğunluk elde edilir. Yoğunluğu etkileyen belki de en önemli faktör ise presleme işlemidir. Çünkü başlangıç paketlenme oranı ne kadar yüksek ise sinterleme sonunda kalıntı porozite miktarı da o kadar düşük olacaktır. Bu nedenle (Huda 1991):

- a) Partiküller arasındaki boşlukları azaltma ile artırılmış yoğunluk,
- b) Mekanik kilitleme, partiküllerin birbirine yapışması vb.
- c) Sinterleme esnasında yeniden kristallenme için tozların plastik deformasyonu
- d) Plastik deformasyon ile partiküller arasındaki temasın artırılması

önemlidir. Sinterleme işlemi, tozdan yapılan kompakt malzemenin ısı enerjisi ile yoğunlaştırıldığı ve sonuçta yapının güçlendirildiği toz metalurjisi yolunun en önemli adımı olarak kabul edilebilir. Korumalı bir atmosfer altında ergime sıcaklığının yarısından daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılan paketlenmiş toz partikülleri sinterleme işlemi ile birbirine yapıştırılır. Sinterleme işlemi genellikle yüksek sıcaklıklar tarafından uyarılan atomik hareketin sonucudur. Dolayısıyla, Sinterleme, partiküller birbirine bağlandıkça ve gözeneklilik kayboldukça meydana gelen fiziksel değişikliklere göre aşama aşama düşünülür. Bu aşamalar Çizelge 2.5'te ve Şekil 2.9a'da verilmiştir (Richerson 1992). Şekil 2.9b'de ise sinterleme işleminde etkin olan mekanizmalar şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Fiziksel değişikliklere göre sinterlemenin aşamaları.

1nci Aşama	2nci Aşama	3ncü Aşama
Yeniden düzenlenme	Boyun büyümesi	Daha fazla tane büyümesi
Boyun oluşumu	Tane büyümesi	Süreksiz por fazı
	Yüksek büzüşme oranı	Tane sınırı porlarının giderilmesi
	Sürekli gözenek fazı	



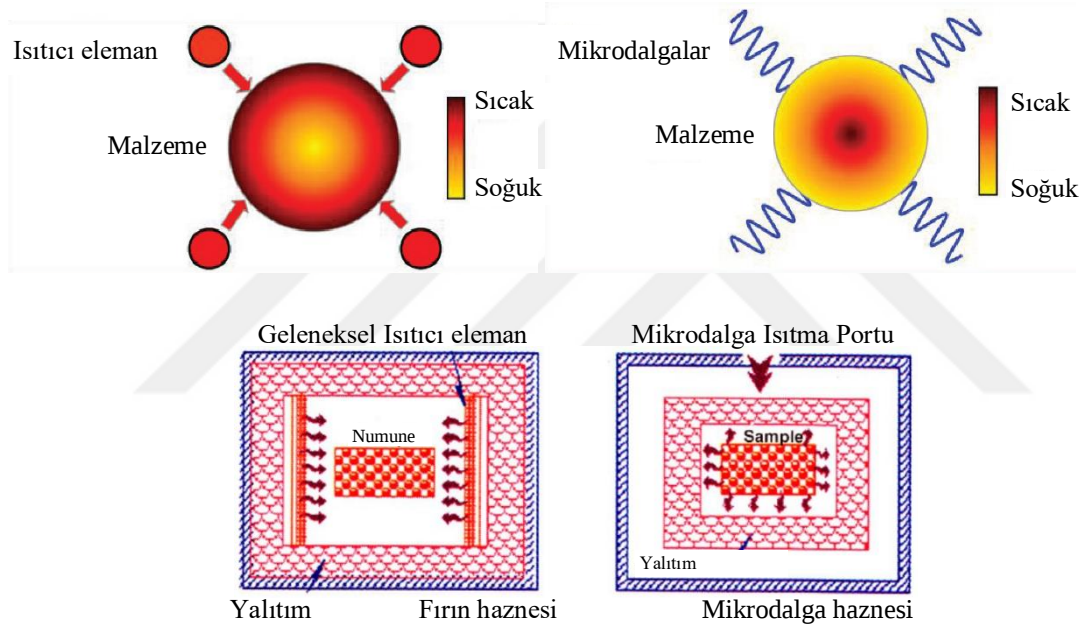
Şekil 2.9 (a) Sinterleme aşamaları ve (b) sinterlenme esnasında gözlenen sinterleme mekanizmaları (İnt.Kyn.5).

2.8.3 Mikrodalgalar ve Mikrodalga Sinterleme İşlemi

Mikrodalgalar, 300 MHz ve 300 GHz arasındaki elektromanyetik radyasyon spektrumunun, serbest uzayda 1 mm ila 1 m arasında değişen dalga boylarına sahip kısmını işgal eder. Malzemelerin işlenmesi için mevcut olan frekanslar 24.124 GHz, 5.8 GHz, 2.45 GHz ve 915 MHz olmasına rağmen, genellikle 915 MHz ve 2.45 GHz'de gerçekleştirilir. Genellikle, 9.15 ve 2.45 GHz endüstriyel ekipmanlar da yaygın olarak kullanılır (Suton 1989, Sutton 1993). Ev tipi mikrodalga fırınlar, çoklu düzlem dalgaların yüke (ısıtılacak malzeme) farklı yönlerden çarptığı çok modlu hazneye sahiptir. Mikrodalga radyasyonu ve ısıtma son yıllara kadar çeşitli malzemelerin imalatına uygulanmıştır.

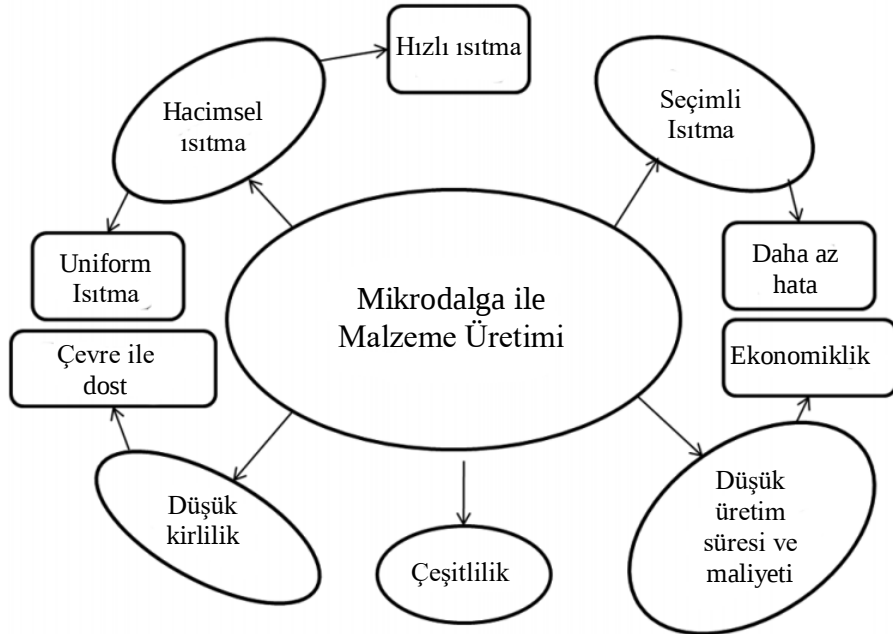
Mikrodalga ısıtmanın karakteristiği geleneksel ısıtma işlemlerinden farklıdır.

Geleneksel ısıtmada ısı üretimi için harici bir ısıtma elemanı kullanılır. Daha sonra ısı konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon yoluyla ısıtılan malzemeye aktarılır. Mikrodalga ısıtmada ise, ısı dış kaynaklardan difüzyonla alınma yerine, mikrodalga frekanslarında dipollerin hızlı salınımı ve böylece malzemenin iç kısımlarından dışarıya doğru ısınmanın meydana gelmesi yolu ile oluşturulur. Isıtma, konvansiyonel ısıtmadaki enerjinin transferi yerine, bundan farklı olarak enerjinin dönüşümü nedeniyle çok hızlı ve hacimseldir (Matli *et al.* 2017). Şekil 2.10’da bu durum şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Geleneksel ve mikrodalga ısıtma sırasında bir malzemenin içindeki ısı dağılımı ve geleneksel fırın-mikrodalga fırın kıyaslaması (Matli *et al.* 2017, Agarwal 2006).

Mikrodalga ısıtmanın, maliyet ve enerji tasarrufu ve işlem süresinde önemli azalma dahil olmak üzere geleneksel ısıtmaya göre birçok avantajı vardır (Oghbaei and Mirzaee 2010). Mikrodalga enerjisini bir ısıtma kaynağı olarak kullanarak, istenen sıcaklıkta kısa sinterleme süresi, özellikle sinterleme sırasında kabalaşan mikroyapıyı kontrol etme, mükemmel mekanik özelliklerin elde edilmesi imkanlarını sunar (Roy *et al.* 1999). Mikrodalga vasıtasıyla yapılan üretimlerde gözlenen avantajlar Şekil 2.11’de şematik özet olarak verilmiştir.

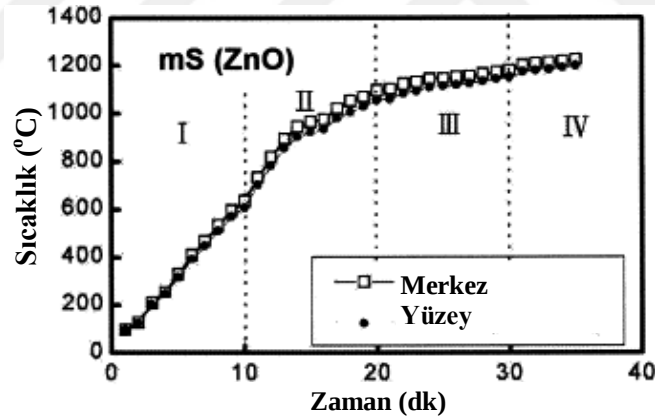


Şekil 2.11 Mikrodalga ile malzeme üretimindeki karakteristikler (Singh *et al.* 2016).

2.8.4 Mikrodalga-Isı Dönüştürücü (Susceptor) Malzemeler ve Hibrit Isıtma

Her ne kadar iç ısınma ve mikrodalga malzeme etkileşimi işlem süresini önemli ölçüde azaltabilse de, örneğin seramiklerin mikrodalga destekli katı hal işleminde, çoğu seramik ile oda sıcaklığında mikrodalga fırınlar ile iyi bir şekilde etkileşmediğinden, genellikle zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu tür malzemelerin mikrodalga işlemi, malzemenin etkileşme sıcaklığına ulaşmadan önce uzun bir ısınma süresi gerektirir. uzun ısınma süresi de plazma oluşumu riskine yol açar. Herhangi bir malzemenin belirli bir sıcaklığın üzerinde (sıcaklıkla artan mikrodalga-malzeme etkileşimi sayesinde) mikrodalgayla etkileşebileceği bilinmektedir. Örneğin, alümina, 900°C'nin üzerindeki mikrodalgalarla etkileşebilirken, zirkonya 400°C'nin üzerinde etkileşir. Bu nedenle, ısıtma süresini azaltmak için yardımcı bir mikrodalga-ısı dönüştürücü (MID) malzeme kullanımı başlatıldı ve seramiklerin katı hal mikrodalga işlemlerinin ayrılmaz bir parçası haline geldi (Bhattacharya and Basak 2017). Susceptor adı ile anılan MID malzemeler düşük sıcaklıklarda mikrodalga enerjisini emerek ısı enerjisine dönüştürür ve yüksek sıcaklıklara ulaşabilir. Daha sonra bu ısıyı yayarak geleneksel transfer yolları ile etrafındaki malzemeleri ısıtır. (Kuşoğlu 2011).

MID malzemeler, oda sıcaklığında bile mikrodalgalarla etkileşebilen SiC, grafit (karbon), MoSi_2 gibi yüksek kayıplı malzemelerdir. MID malzemeler genellikle numunelerin etrafına toz, çubuk, plaka veya tüp şeklinde yardımcı ısıtma elemanları olarak dahil edilir. Destek plakaları veya numune potası da MID olarak rol oynayabilir. MID'ler mikrodalgalar tarafından hızlı bir şekilde ısıtıldıkları için, geleneksel modlar yoluyla numunelere ilk ısıtmayı sağlarlar. Sonuç olarak sıcaklıktaki artış mikrodalga-malzeme etkileşimini artırır ve etkileşme sıcaklığına ulaşıldığında mikrodalgalar numuneyi daha fazla ısıtmaya başlar. Böylece hibrit ısıtma oluşturulur. Hibrit ısıtmada, hem yardımcı MID ile ısıtma sağlanırken, hem de mikrodalga etkileşimi ile ısıtma sağlanır. Ayrıca, hibrit ısıtmada MID ile ısıtılan numunelerin soğumaya açık dış yüzeyleri ve mikrodalga ile ısıtılan iç bölgeler arasındaki ısı dağılım farkının az olduğu düşünülmektedir (Lin *et al.* 2001). Şekil 2.12'de bu ZnO ile ilgili yapılan bir örnek verilmiştir.

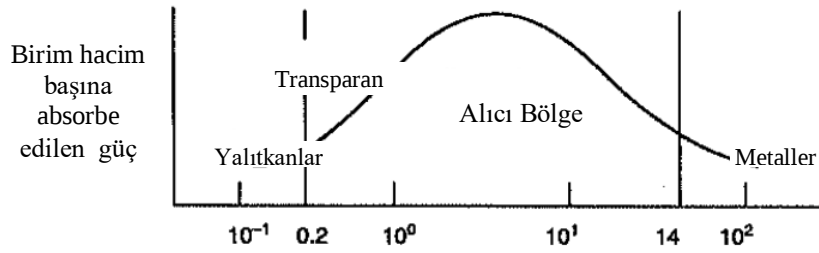


Şekil 2.12 SiC çubuklarının MID olarak kullanılması durumunda ZnO malzemelerinin sinterleme profili (Lin *et al.* 2001).

2.8.5 Metal Tozlarının Mikrodalga ile Sinterlenmesi

Yakın zamana kadar, malzemelerin mikrodalga işlemesi çoğunlukla seramikler, yarı metaller, inorganik ve polimerik malzemelerle sınırlıydı. Metalik malzemelerin mikrodalga işlenmesinin zor olduğu ifade edilmekteydi. Metallerin mikrodalgada ısıtılması/sinterlenmesi kapsamında yapılan çalışmalarda, tüm metallerin mikrodalgaları

yansıttığı ve/veya plazma veya ark oluşumuna neden olduğu ve bu nedenle mikrodalga alanında ısıtılmaması gibi bildirimler mevcuttur. Bu gözlem, Şekil 2.13'te verilen, değişken elektriksel iletkenliğe sahip katı malzemelerdeki mikrodalga emilim grafiğinden açık olarak anlaşılmaktadır (Agrawal 2010).



Şekil 2.13 Mikrodalga enerji absorpsiyonunun elektriksel iletkenliğe göre değişimi (Agrawal 2010).

Bundan, yalnızca yarı iletkenlerin iyi mikrodalga sever olabildiği, seramikler/yalıtkanlar mikrodalgalara karşı saydam davrandığı açıkça anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bu ilişki sadece sinterlenmiş veya kalın kesitli malzemeler için oda sıcaklığında geçerlidir ve toz halindeki malzemeler ve/veya kalın kesitli metaller için yüksek sıcaklıklarda geçerli değildir (Agrawal 2010). Artık, toz formundaki tüm metal malzemelerin oda sıcaklığında mikrodalgaları absorbe edebildiği, ve kalın kesitli metallerin bile en az 400 °C'ye ön ısıtılmış olması durumunda, mikrodalga alanıyla etkileşmeye başladıkları ve hızlı bir şekilde ısıtılabilir oldukları (hatta eritilebildikleri) kanıtlanmıştır (Agrawal 2010). Bununla birlikte bir önceki bölümde bahsedilen MID malzemeler vasıtasıyla da metal parçaların ısıtma veya ergitme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

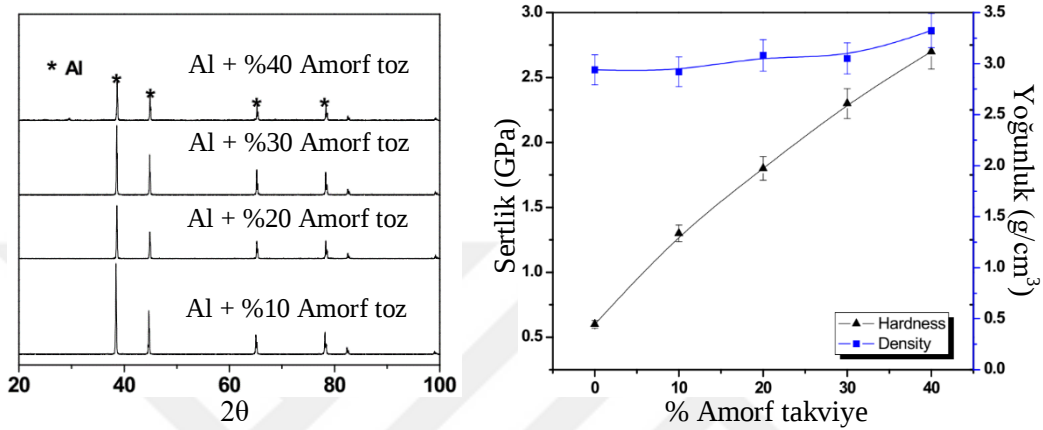
2.8.6 Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mikrodalga ile Sinterlenmesi

Penchal vd. (2017) yaptıkları çalışmalarında SiC, Al₂O₃, Si₃N₄ takviyelerini kullanarak mikrodalga sinterleme işlemi ile alüminyum matrisli kompozit numuneler üretmişlerdir. Çalışmalarında %1.5 SiC, %1.5 Si₃N₄ ve %15 Al₂O₃ takviye katkısı ile saf alüminyumu ergitme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda sinterledikten sonra, sıcak ekstrüzyona maruz bırakılan numuneler üzerinde çalışmışlardır. Üretim sonrasında faz karakterizasyon analizlerinde kompozit numunelerin yapısından ekstra faz oluşumu gözlenmediğini

bildirmişlerdir. Oldukça homojen mikroyapıya sahip numunelerinde az miktarda gözledikleri aglomerasyonun takviye faz ve alüminyumun yoğunluk farkından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Üretim sonrası mikroyapısal incelemelerinde kuvvetli matris/partikül arayüzey entegrasyonunun olduğunu ve takviye faz miktarının kompozit numunelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu doğrulamışlardır. %1.5 SiC, %1.5 Si₃N₄ ve %15 Al₂O₃ takviye katkısı ile hazırlanan numunelerin sertlik değerlerinin sırasıyla 82±4, 101±3, and 92±5 HV olduğunu göstermişlerdir. Burada kullanılan takviye partiküllerinin boyutlarının önemi büyüktür. Matli (2017), çalışmasında %1.5 SiC katkılı numunenin basma yüklemesi altında akma ve maksimum dayanımlarının 114 ve 392 MPa olduğunu ifade ederken, %1.5 %1.5 Si₃N₄ için ise aynı değerlerin 142 ve 412 MPa'a yükseldiğini bildirmiştir. SiC ve Si₃N₄ nano seviyedeki tozlardan seçilmesi bu değerlerin ölçülmesinde katkısı büyüktür. Bununla birlikte mikron seviyedeki Al₂O₃ (%15) kullanıldığında ise akma ve maksimum dayanım değerlerinin 136 ve 338 MPa ölçüldüğü görülmektedir (Matli 2017). Referans çalışma, hem yaygın olarak kullanılan takviye seramik tiplerinin kıyaslanmasında örnek olmanın yanında, bu partiküllerin boyutlarının mikrodalga sinterleme üzerindeki etkilerini göstermesi açısından önemlidir.

Metal matris içerisinde seramik partiküllerin kullanımının kompozit yapının özelliklerini oldukça tatmin edici değerlere getirmesine rağmen, seramik partiküller ile ilgili çeşitli matris arayüzey problemleri nedeniyle alternatif takviyeler üzerindeki çalışmalar artmıştır. Son yıllarda, literatürdeki çalışmalar metal takviye tozlarının da alüminyum matris içerisinde değerlendirilebileceği konusunda bilgiler vermektedir. Bununla ilgili örneklerden birisi Yadav vd. (2010) yaptığı çalışmadır. Sürtünmeli karıştırma prosesi ile nikel partiküllerini 1050 alüminyum alaşımındaki oluğa; bozucu Al₃Ni intermetalik fazı oluşmadan, geçmesini sağlayarak, çekme testi dayanımı değerlerindeki gelişmeye dikkat çekmişlerdir (Yadav and Bauri 2010). Bundan başka, Fathy vd. (2015) toz metalurjisi yolu ile alüminyum içerisinde demir partiküllerini değerlendirerek, sertlik ve basma dayanımı değerlerinde kompozitin deformasyon davranışında dikkat çekici (%65) bir değerle artırılabilirdiğini bildirmişlerdir (Fathy *et al.* 2015). Takviye bileşen olarak kristal metal partiküllerinin kullanılması yaklaşımdan başka, nispeten daha yüksek dayanıma, oldukça iyi aşınma ve korozyon direncine sahip

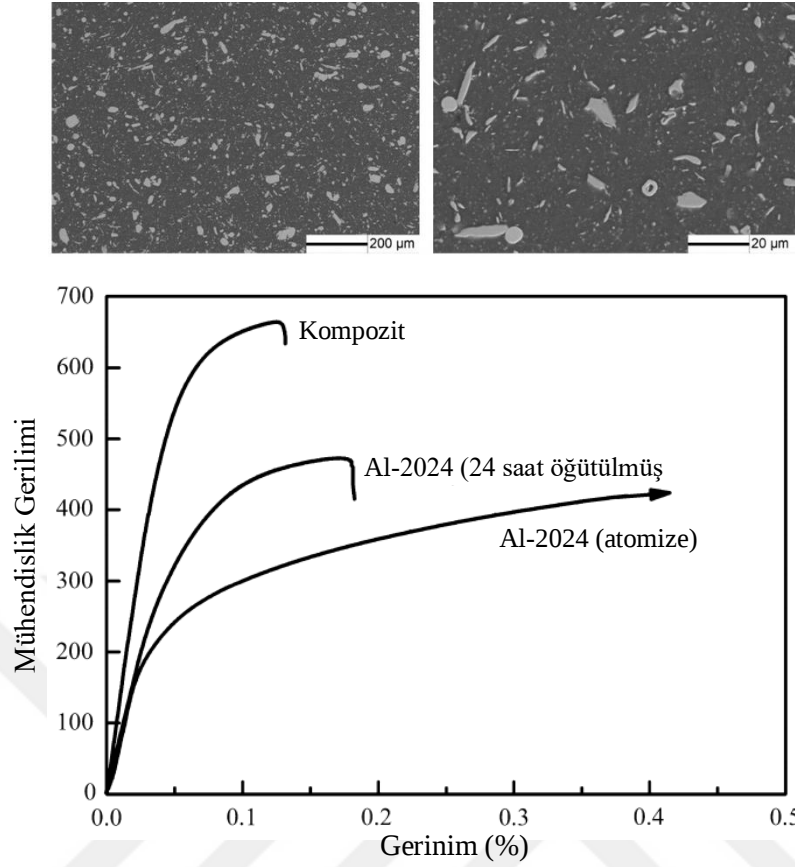
metalik camların da alüminyum kompozitlerinde uygulanabilirliği araştırmacılar tarafından araştırılmaya devam etmektedir. Bununla ilgili olarak, ucuz bileşenlerden üretilen Cu-Zr-Al amorf tozları Hembrom vd. (2016) tarafından üretilerek saf alüminyum matris ile birlikte sıcak presleme yolu ile şekillendirildikten sonra, nihai kompozitin özellikleri incelenmiştir (Hembrom *et al.* 2016).



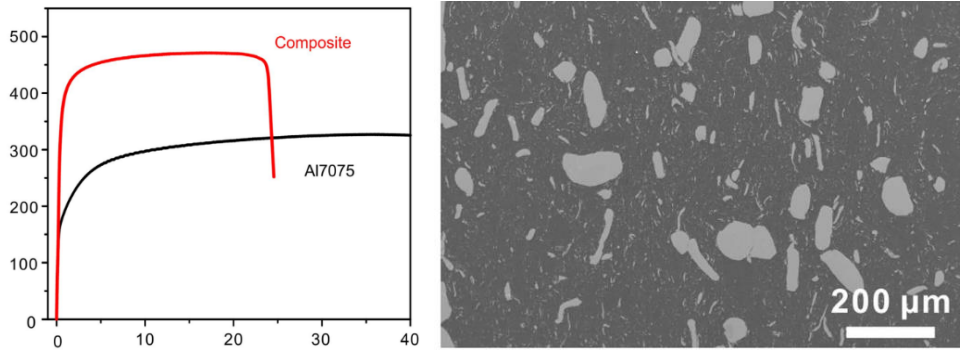
Şekil 2.14 (a) Sıcak presleme işlemi sonrası üretilen numunelerin XRD desenleri, (b) 400°C’de sıcak preslenmiş numunelerdeki takviye faz miktarına göre yoğunluk ve sertlik değerlerindeki değişim (Hembrom *et al.* 2016).

Şekil 2.14a’da 400°C’de sinterlenmiş numunelerin XRD desenleri alüminyum matris içerisindeki amorf Cu-Zr-Al partiküllerinin herhangi bir istenmeyen extra faza neden olmadan üretilebilirliği gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.14b’de ise amorf partikül miktarındaki artışa karşılık kompozit numunelerdeki sertlik değerlerinin de arttığını ortaya koymaktadır. Diğer bir çalışmada Zheng vd. (2014) oldukça düşük gözenek miktarıyla (Şekil 2.15) ürettikleri alüminyum kompozitlerinde demir esaslı amorf partikülleri kullanmışlardır (Zheng *et al.* 2014).

Şekil 2.15a’daki mikroyapılar incelendiğinde mikroyapının gözenek içermediği görülmektedir. Buna ek olarak, başlangıçta küresel morfolojiye sahip metalik cam partiküllerinin hem sıcaklık hem de sıkıştırmanın etkisiyle şekillerinin vizkoz bir akış ile küreselden saptığı dikkat çekmektedir. Zheng vd. (2014) bu mekanizmanın gözeneksiz yapının oluşmasında etkili olduğunu bildirmiştir. Ayrıca Şekil 2.15b’ye göre, ürettikleri kompozitin basma yüklemesi altında 660 MPa’a kadar dayanım ve yaklaşık %12 kırılma deformasyonu sergilediği de görülmektedir.



Şekil 2.15 (a) Vakum indüksiyon ısıtmalı fırında 823 K’de ve 400 MPa basınç altında üretilmiş alüminyum kompozitin mikroyapısı ve (b) kompozitin basma yüklemesi altındaki davranışı (Zheng *et al.* 2014).



Şekil 2.16 Zr-esaslı metalik cam fiber takviyeli Al7075 alaşımının yükleme altındaki davranışı ve mikroyapısı (Wang *et al.* 2016).

Diğer bir örnek ise, Wang vd. (2016) metalik cam fiber takviyesi ile yaptığı çalışmadır. Şekil 2.16’da spark plazma sinterleme yolu ile üretilmiş Zr-esaslı metalik cam fiber

takviyeli Al7075 alaşımının gerilim-gerinim eğrileri ve mikroyapısı verilmiştir. Katkısız alaşıma kıyasla oldukęa etkileyici dayanım artışı (%15 takviye ile 366 MPa) ile metalik cam fiber destekli bir kompozitin üretilebilirliğini açıkęa göstermişlerdir.

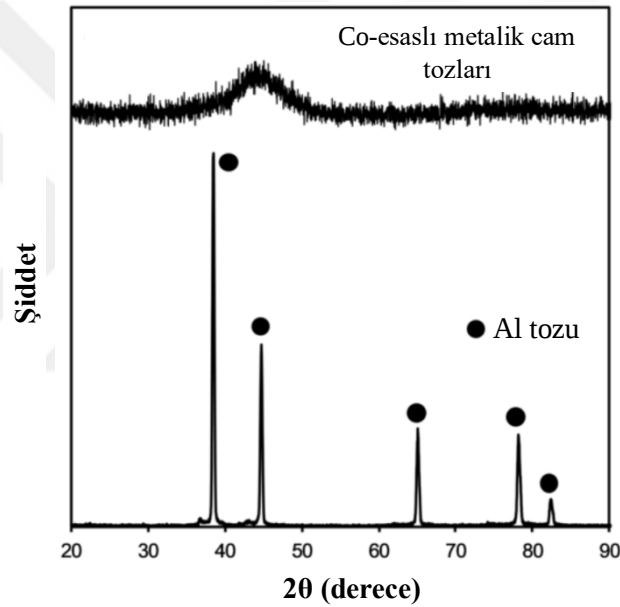
Literatür araştırmaları metalik cam takviyelerinin de seramik takviyeler kadar metal bir matris içerisinde etkili olabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle bu ęalıřmada kobalt esaslı bir metalik camın etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Hammaddeler

Bu araştırmada, ticari saflıkta saf alüminyum tozları (Ege NanoteK, 0-50 μm) ve üretimi bir sonraki başlık altında anlatılan kobalt esaslı metalik cam tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların XRD desenleri Şekil 3.1’de ve tane boyut analizleri ise Şekil 3.2’de verilmiştir. Kullanılan tozların tane boyut analizleri BetterSize BT-9300Z cihazında yapılmıştır.

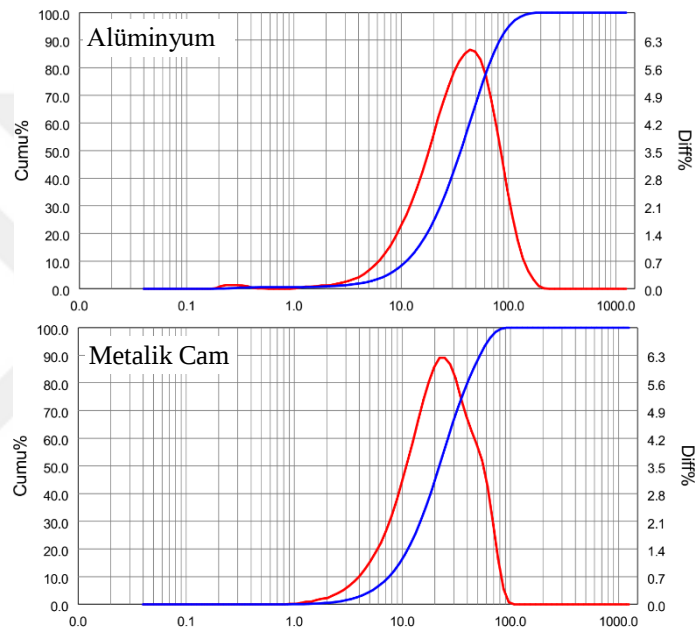


Şekil 3.1 Ticari saflıktaki alüminyum ve kobalt esaslı metalik cam tozlarının XRD desenleri.

Şekil 3.1’de verilen XRD paternleri ticari saflıktaki alüminyumun içerisinde deneysel çalışmalarda kullanılmadan önce de bir miktar impüritenin varlığını göstermektedir. Bununla birlikte kobalt esaslı metalik cam tozlarının tamamen camsı yapıda olduğunun kanıtı olan keskin kristal pikleri içermeyen amorf desen gözlenmektedir. Üretilen amorf tozların boyutları (d_{50}) yaklaşık 20 μm civarındadır. Üretilen amorf partiküllerin üretimi bir sonraki başlıkta detaylı açıklanmıştır. Alüminyum tozlarının ortalama partikül boyutunun ise 30-40 μm arasında olduğu tespit edilmiştir.

3.2 Metalik Cam Tozlarının Üretimi

Nominal kompozisyonu $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşım kompozisyonu yüksek saflıktaki Co, Fe, Cu, Ta, B ve Si elementleri kullanılarak hazırlanmıştır. Alaşım kompozisyonunu oluşturan saf tozlar hassas terazide tartıldıktan sonra, homojenleştirilmek amacıyla belirli bir süre cam beher içerisinde karıştırılmıştır. Homojen şekilde karıştırılan toz haldeki karışım, ergitme işlemi öncesinde tek eksenli hidrolik pres kullanılarak tablet haline getirilmiştir.



Şekil 3.2 Ticari saflıktaki alüminyum tozları ve kobalt esaslı metalik cam tozlarının tane boyut analizleri.

Daha sonra, tablet halindeki tozlar bir ark ocağı yardımıyla ön ergitme işlemine tabi tutulmuştur. Ön ergitme işlemi sonunda tamamen ergitilen bu tozlar 60gr'lık master alaşım haline getirilmiştir. Bunun için, güç kaynağından sağlanan yaklaşık 250 A'lık elektrik arkı altındaki ergitme işlemlerinden faydalanılmıştır. Master alaşım numuneleri, kimyasal homojenliğin sağlanması için, her ergitme sonrasında ters çevrilerek en az 3 kez ergitilmiştir. Ark ergitme işleminde, ergitme haznesi vakuma alındıktan ($P_{\text{vakum}} < 0.1 \text{ mbar}$) sonra Ar gazı ile tekrar doldurulmuştur ($P_{\text{Ar}} \geq 1 \text{ atm}$).

Üretilen master alaşımlardan uygun miktarda parçalar alınarak vakum ark ocağında

tekrar ergitilerek, bu sefer bakır kalıplar içerisine emdirilerek dökülmüş ve metalik cam çubuk numuneleri üretilmiştir. Ark ergitme işleminde kullanılan tungsten uç ergitilen numuneye temas etmemektedir.



Resim 3.2 Döküm işlemlerinde kullanılan bakır kalıplar ve üretilen amorf $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ alaşım numuneleri.

İşlem esnasında sıvı hale gelen akışkan metal eriyik, basınç farkı yardımıyla, hızlı bir şekilde kalıp içerisine emdirilmiştir. Böylece, 2 mm çapında döküm boşluğuna sahip bakır kalıp (Resim 3.1) içerisine emdirilen metal alaşım numunelerinin çok hızlı bir şekilde soğutulması sağlanmıştır. Çubuk numuneler; hızlı bir şekilde soğutulmaları sayesinde, amorf bir yapıya sahip olarak 6-7 cm uzunluğundaki çubuklar halinde üretilmişlerdir (Resim 3.1). Üretilen metalik cam numunelerin cam geçiş ve kristallenme sıcaklığı sırasıyla 623°C ve 671°C 'dir (Yazıcı 2011, Yazıcı *et al.* 2016). Takviye olarak kullanılacak olan bu tozların karakteristik sıcaklıkları sinterleme sıcaklığının tespitinde göz önünde bulundurulmuştur. Bu işlemlerin tekrarlanmasıyla yeterli sayıda döküm yapılarak numune sayısı artırılmıştır. Daha sonra bu numuneler kırma ve ufalama işlemi sonrasında yüksek enerjili öğütücü değirmen vasıtasıyla (SPEX 8000M-Mixer/Mill) ince toz hale getirilmişlerdir. Metalik cam tozları çok yüksek sertliğe (~ 1200 Hv) (Yazıcı 2011, Yazıcı *et al.* 2016) sahip olduğu için öğütme işlemlerinde tungsten karbür hazne ve bilye kullanılmıştır. Elde edilen tozlar $53\ \mu\text{m}$ 'luk açıklığa sahip elekten elendikten sonra metal matrisli kompozit numunelerinin üretiminde takviye eleman olarak kullanılmak üzere biriktirilmiştir.

3.2.1 Kompozit Toz Bileşenlerinin Karıştırılması ve Öğütme İşlemleri

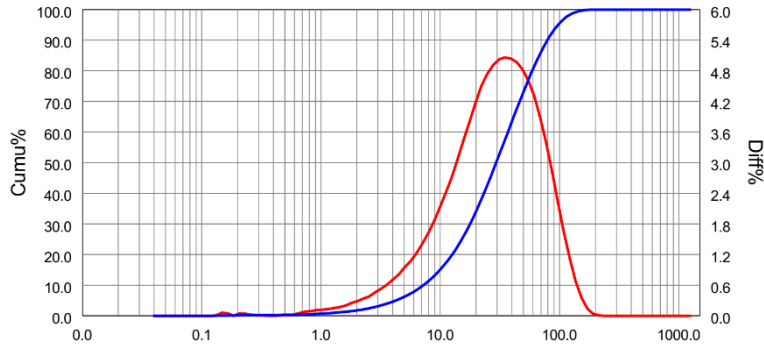
Yüksek devirli öğütme işlemlerinde MatTek-PCF-120 (1200 RPM) model cihaz (Şekil. 3.4) kullanılmıştır. Cihaz hem dönme hem çalkalama işlemi ile çalışmaktadır. Tozların

öğütülmesinde paslanmaz çelik hazne ve Al_2O_3 bilyalar kullanılmıştır. 9.30 mm çapındaki Al_2O_3 bilyalar kullanılmadan önce yüzeyleri fiziksel olarak alüminyum ile kaplanmıştır. Böylece hazne/bilya kirlenme problemi minimuma indirilmiştir. Bilya/toz oranı 1:1 oranı tercih edilmiştir. Öğütme süreci esnasında tozların ısınmasını ve dolayısıyla birbirine soğuk kaynaklanmasını engellemek için öğütücü hazne içine uygun miktarda etanol ilave edilmiştir.



Resim 3.3 Kompozit tozların işlem gördüğü yüksek devirli bilyalı öğütme cihazı.

Daha sonra farklı oranlarda (%5-20) metalik cam partikül içeren alüminyum toz karışımları 2 saat süreyle değirmen yardımıyla öğütülmüştür. Tozların ısınmaması ve öğütme haznesi içerisindeki basıncın artmaması için her öğütme haznesi 5 dakikada bir soğumaya bırakılmıştır. Örnek bir partikül boyut analizi %5 metalik cam partikül takviyeli durum için Şekil 3.3'te verilmiştir.



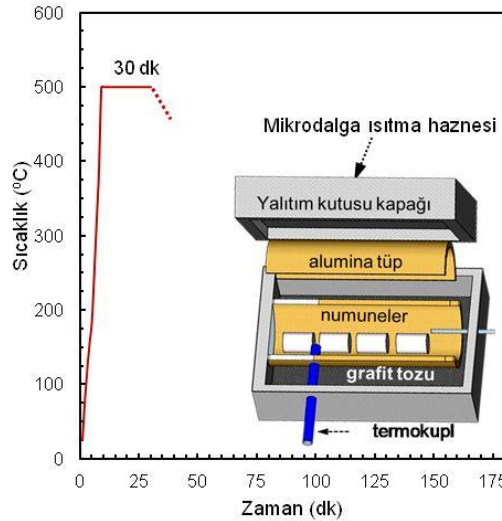
Şekil 3.3 Üretilen toz karışımlarının (Al +%5 metalik cam) partikül boyut analizine bir örnek.

3.2.2 Şekillendirme ve Mikrodalga Fırın Sinterleme İşlemleri

Toz karışımları hazırlandıktan sonra, paslanmaz çelikten bir kalıp ile eşeksenli bir hidrolik pres vasıtasıyla ~200 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirme işlemlerinde kullanılan hidrolik pres, çelik kalıp ve üretilen numuneler Resim 3.3'te verilmiştir. Preslenmiş ham numuneler 6.4mm çapında ve 12-12.4 mm yüksekliğindeki silindirik şekillidir. Şekillendirme işlemlerinde tozlar ve kalıp duvarı arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla magnezyum stearat kullanılmıştır. Magnezyum stearat etanol ile karıştırıldıktan sonra kalıp duvarına uygulanmıştır. Böylece numunelerin kalıptan çıkarma işlemlerinde numunelerin zarar görmesi engellenmiştir.



Resim 3.4 Deneyisel çalışmalarda kullanılan hidrolik pres, şekillendirme kalıbı ve üretilen numuneler.



Şekil 3.4 Sinterleme haznesinde oluşturulan ısıtma rejimi.

Bu çalışmada kullanılan mikrodalga fırın 1200 W giriş ve 800W çıkış gücündeki, 2,45

GHz frekansında çalışan ve 20 litre iç hacme sahip SAMSUNG ME711K model ev tipi bir fırındır. Mikrodalga fırının çalışma süresi saniye cinsinden ve mikrodalga gücü watt cinsinden (100-800 Watt) dijital olarak ayarlanabilmektedir. Mikrodalga fırın, sinterleme işlemleri esnasında 450 Watt ile çalıştırılmıştır. Numunelerin sinterleme işlemleri 500±10°C’de ve 30 dk bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Sinterleme haznesi ve ısıtma koşulları Şekil 3.7’de verilmiştir. Sinterlemede kullanılan haznenin tasarımı ve bu hazne ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleri deneysel bulgular kısmında detaylı açıklanmıştır.

3.2.3 Mikroyapısal Analizler ve Yoğunluk Ölçümleri

Sinterleme işlemi sonrasında numunelerin kesit görünüşleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) (LEO 1430 VP) ile incelenmiştir. Kesit incelemeleri öncesinde numuneler metalografik prosedürlere uygun olarak hazırlanmıştır. Bunun için numuneler uygun bir bölgeden kesildikten sonra soğuk kalıplama ile reçine içerisine alınmıştır. Reçineye alınan numunelerin yüzeyleri 600-1200 P zımparalar ile zımparalandıktan sonra, alümina solüsyon (200 Å) ile parlatılmıştır. Bu işlemler için METKON marka zımparalama cihazı kullanılmıştır. Sinterlenmiş ve ham numunelerin bulk ve bağıl yoğunluk değerleri Arşimet yöntemine göre 0.0001 hassasiyetli dijital terazi ile belirlenmiştir. Yoğunluk değerleri en az 3 numune üzerinden ortalamaları alınarak tespit edilmiştir. Gözenek miktarının tespitinde aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\text{Bulk Yoğunluğu} = \frac{M_0}{(M_1 - M_2)} \quad (3)$$

M_0 : Kuru Ağırlık, M_1 : Su emmiş ağırlık, M_2 : Su içindeki ağırlık

3.2.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Sinterlenmiş numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla basma yüklemesi altındaki kırılma davranışları incelenmiştir. Basma testlerinde Shimadzu-AG-IS-100 kN cihazı (Resim 3.4) kullanılmıştır. Testlerde 6.4x12.4 mm boyutundaki silindirik numuneler kullanılmıştır. Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin birbirine paralel

olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Basma yüklemesi öncesinde basma plakaları ve numune yüzeyleri ince grafit toz ile muamele edilmiş ve olası yapışmalar engellenmiştir.



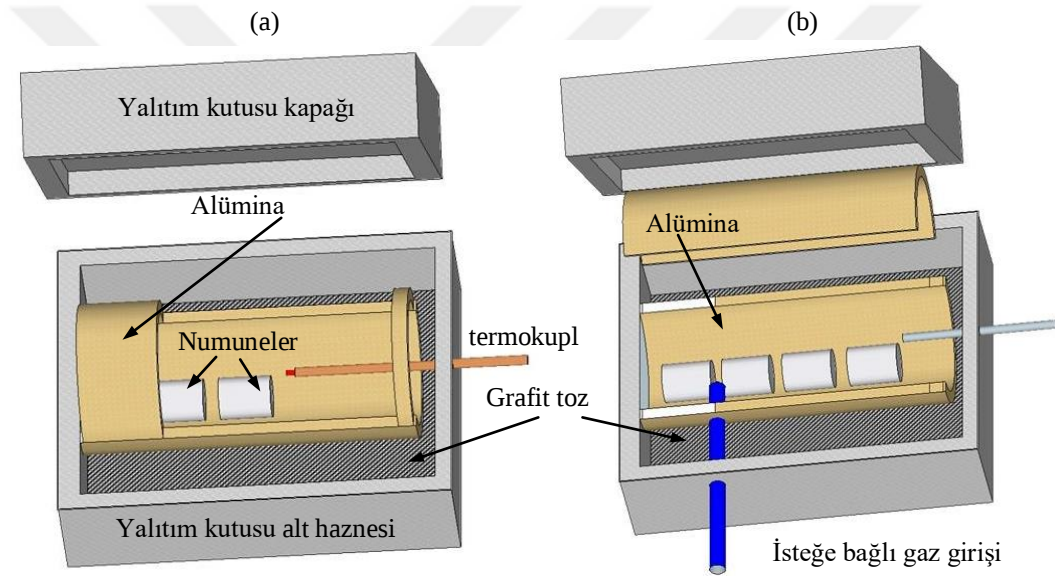
Resim 3.5 Basma dayanımı ve Vickers mikrosertlik testlerinin yapıldığı cihazların görüntüsü.

Bununla birlikte takviye tozların miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerindeki gelişmeler Shimadzu HMV-2L mikrosertlik cihazı ile ölçülmüştür. Bunun için 100 g yük ve 15 sn'lik bekleme şartları kullanılmıştır. En az 5 ölçümün ortalamaları sertlik değeri olarak değerlendirilmiştir.

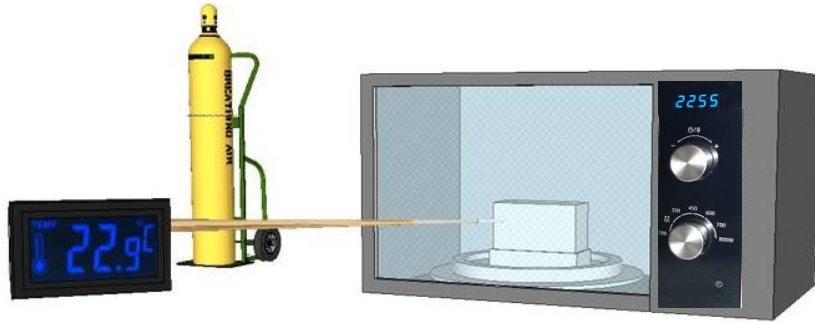
4. BULGULAR

4.1 Mikrodalga Fırın Sinterleme Haznesinin Tasarımı

Mutfak tipi mikrodalga fırınlar ev ve iş yerlerinde kısa süre içerisinde çeşitli gıda malzemelerinin hızlı kurutulması veya ısıtılması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Normal şartlarda bu tip mikrodalga fırınlar düşük sıcaklıklar üretebilmektedir. Bu nedenle, deneysel çalışma kapsamında hedeflenen sıcaklıklara ulaşılabilmesi amacıyla, mikrodalga fırının içerisine konulan bir sinterleme haznesi tasarlanmıştır. Isıtma haznesinin şematik görünümü Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan sinterleme haznesi.



Şekil 4.2 Mikrodalga sinterleme sistemi ve haznenin fırın içerisine yerleştirilmiş hali.

Hazne içerisinde yardımcı ısıtıcı eleman olarak grafit tozları kullanılmıştır. Her sinterleme işleminde belirli miktarda ve yeni tozlar kullanılarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Böylece oluşturulacak ısı enerjisinin ya da hedeflenen sıcaklığın her sinterleme işleminde aynı şekilde elde edilebilmesi sağlanmıştır.

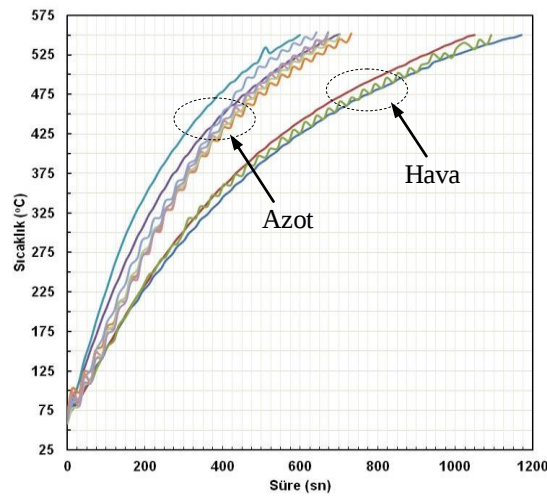
Ayrıca mutfak tipi mikrodalga fırınların sıcaklık göstergelerinin olmamasından dolayı ve sinterleme haznesinde oluşturulan sıcaklıkların izlenebilmesi için fırından bağımsız bir termokupl (TP-01 K tipi) ve veri kaydedici (datalogger) kullanılmıştır. Bundan başka, ısıtma haznesi içerisindeki uygun bölgeye yerleştirilen bir gaz girişi sayesinde gerekli olan durumlarda kullanılmak üzere uygun türde bir koruyucu gaz ortamı oluşturulabilmektedir.

4.1.1 Mikrodalga Sinterleme Haznesindeki Sıcaklık Ölçümleri

Mikrodalga fırının çalıştırılması esnasında meydana gelen ark probleminin giderilmesi için termokupl tellerinin üzeri bir çeşit cam ile kaplandıktan sonra, sıcaklık ölçüm deneyleri yapılmıştır. Deneyler esnasında koruyucu gaz kullanımının çeşitli ark ve plazma oluşumuna neden olabildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle diğer deneysel çalışmalar hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında ark problemi (özellikle koruyucu gaz atmosferindeki) tamamen giderilemese de, kullanılan termokupl uçlarının yüzeyi uygun bir şekilde kaplandıktan sonra ölçümler güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçüm sonuçları her şart için; farklı güç (watt) veya süre (sn) parametreleri ile, en az 20 tekrar yapılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri hazne içerisinde gerçek numunelere eşdeğer niteliklere sahip fedai numuneler varken yapılmıştır. Bu ölçümler 450 Watt'ta gerçekleştirilmiştir.

Sinterlenmesi planlanan numunelerin metal tozlardan imal olması nedeniyle, mikrodalga radyasyonunun metal numunelere nüfuz etme derinliği düşüktür. Bu bilgiye dayanılarak, ön ısıtma işleminin mikrodalgayı absorbe edebilen grafit tozlarından faydalanılarak yapılması planlanmıştır. Bu ısıtma türüne desteklenmiş mikrodalga

ısıtma veya hibrit ısıtma denilmektedir. Ancak üretilen numuneler ince tozların sıkıştırılmasıyla üretildikleri için, bulk metallere kıyasla toz tanecikleri arasında meydana gelebilecek saçınım artışı da hesaba katılarak, ön çalışmalar ısıtıcı-destek malzemesi kullanılmadan da gerçekleştirilmiştir. Fakat yardımcı ısıtma elemanı olmadan (sadece mikrodalgalar ile ısıtma) yapılan ölçümler sonucunda numunelerin 100-170°C civarına kadar ısıtılabilirdiği gözlenmiştir. Daha uzun süreler boyunca yapılan işlemler numunelerin sıcaklığını bir miktar daha artırırsa da, hızlı sinterlemenin amaçlandığı bu çalışmaya uygun olmadığı düşünülmüştür. Göreceli olarak kısa süre içerisinde ısıtma desteği sağlayabilecek malzemeler araştırıldığında, literatürdeki çeşitli çalışmalarda mikrodalga sever malzeme olarak bilinen silisyum karbür (SiC) ön plana çıkmıştır. SiC ile yapılan deneme sonuçları başarılı olsa da, SiC'nin oksijene karşı affinitesi nedeniyle oksitlenerek ısıtma kabiliyetini çabuk kaybettiği gözlenmiştir. Ayrıca SiC tozları Al_2O_3 esaslı sinterleme haznesi ile kontrolsüz bir şekilde etkileşerek sinterleme haznesini deforme edebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı mikrodalga ile ısıtma çalışmalarına mikrodalga emici davranış gösteren farklı tozlar ile de çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bunların arasında etkili ve hızlı bir ısınma davranışına sahip olan grafit ön plana çıkmıştır. Grafit ayrıca ergitme haznesi ile etkileşim sergilememektedir. Böylece uygun süre ve watt değeri ile ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te, işlem süresine bağlı olarak hazne sıcaklığındaki değişim ilişkisi verilmiştir.

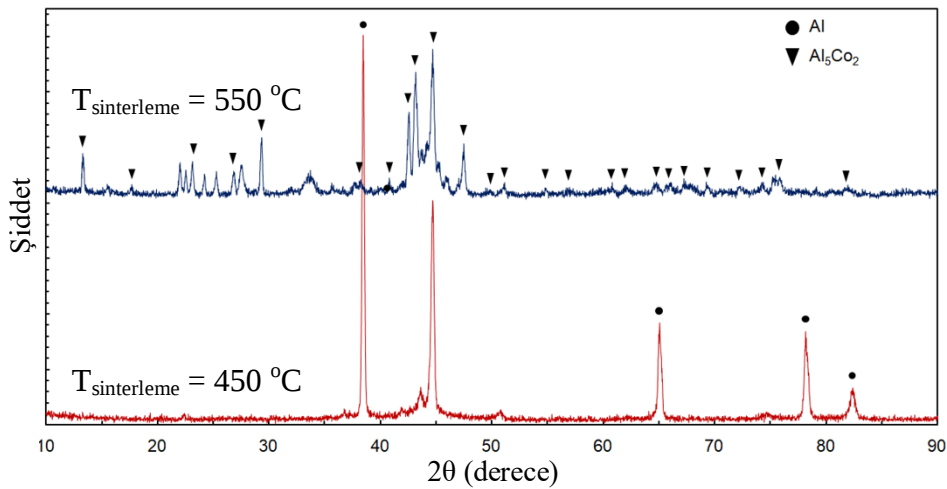


Şekil 4.3 Azot ve hava ortamlarında grafit yardımcı tozları ile yapılan sinterleme haznesindeki numuneler için ölçülen T-t grafikleri.

Azot ve hava ortamında yapılan denemelerde azot gazı ile yapılan ısıtmanın hava ortamına göre nerdeyse iki kat daha hızlı yapılabildiği Şekil 4.3'te verilen grafikten açıkça görülmektedir. Bunun sebebi olarak, azot gazının mikrodalga tutucu grafit tozlarını oksijenden koruyarak (mikrodalga absorpsiyon özelliğini korunmasına) ve böylece daha kısa sürede ısıtmanın sağlanabildiği düşünülmektedir. Fakat azot gazının kullanıldığı deneysel çalışmalarda ark oluşumu problemi oldukça sık yaşanmıştır. Buna bağlı olarak numunelerin kontrolsüz bir şekilde ısındığı ve bazı numunelerin deforme olduğu gözlenmiştir. Geleneksel fırınlara kıyasla, hava koşullarındaki mikrodalga ısıtma sürelerinin oldukça kısa olması düşünülerek, numune üretimlerinde hava ortamının kullanımına karar verilmiştir.

4.1.2 Sinterleme Sıcaklığının Tespitine Yönelik Çalışmalar

Kullanılan takviye tozlarının metalik cam tozları olması nedeniyle sinterleme sıcaklığının hangi sevide olacağı önemlidir. Bu çalışmada, sinterleme sıcaklığının amorf yapıya sahip olan takviye tozların kristalleşmediği ve amorf yapısının korunduğu bir sıcaklıkta sinterleme işlemlerinin yapılması planlanmıştır. Amorf yapıli metalik cam tozlarının cam geçiş ve kristallenme sıcaklığının sırasıyla 623°C ve 671°C olduğu bilinmektedir. Ancak bilindiği üzere DSC analizleri esnasında tespit edilen bu sıcaklıklar ısıtma hızına göre değişebilmektedir. Bu nedenle, ön çalışmalarda sinterleme sıcaklığı olarak 450 ve 550°C sıcaklıkları denenmiştir.



Şekil 4.4 Sinterleme işlemleri 450°C ve 550 °C’de gerçekleştirilen kompozit numunelerin XRD paternleri.

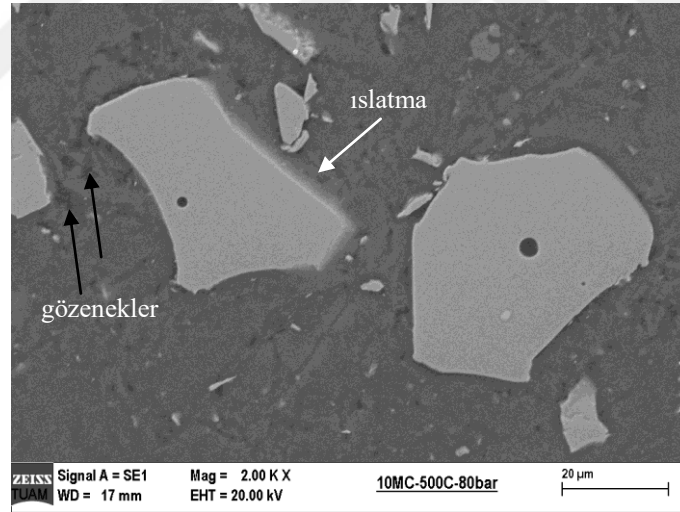
Şekil 4.4'te verilen XRD paternlerinden açıkça görüldüğü gibi, 550°C sıcaklığında bekleme yapılmadan sinterlenen numunenin neredeyse tamamen Al_5Co_2 kristal fazını ve bir miktar amorf fazı içerdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, 550°C sıcaklığında yapılan mikrodalga ısıtma işlemi esnasında amorf takviye toz ve alüminyumun birbiri ile etkileşime girdiğini göstermektedir. Bu nedenle, etkileşimin olmadığı bir sıcaklığın tespiti üzerinde çalışılmıştır. 450°C'de bekleme yapılmadan gerçekleştirilen sinterleme işlemi sonrasında üretilen kompozit numunenin XRD paterni Şekil 4.4'te verilmiştir. Nispeten düşük sıcaklıkta yapılan sinterleme işlemi bu etkileşimin olmasını engellemiştir. Ancak görsel olarak incelenen numunelerin bu sıcaklıkta bekleme yapılmadığı için yeterli dayanıma sahip olmadıkları görülmüştür. Bu nedenle bundan sonraki çalışmalarda sinterleme işleminin 500 °C'ye artırılması ve uygun bir süre bu sıcaklıkta beklenerek yapılmasına karar verilmiştir.

4.1.3 Mikroyapısal İncelemeler ve Değerlendirmeler

500 °C'de hava ortamında sinterlenen numunelere ait mikroyapı görüntüsü (Şekil 4.5) ve yoğunluk ve porozite davranış grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde takviye faz miktarı arttıkça ham numunelerin yoğunluk değerlerinde artış gözlemlendiği dikkat çekicidir. Bu durum, düşük özgül ağırlıklı alüminyum ($\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$) matris içerisine bulunan ve neredeyse 3 kat daha yüksek özgül ağırlığa ($\sim 8.91 \text{ g/cm}^3$) sahip olan metalik cam takviye tozlarından kaynaklanmaktadır. Benzer yoğunluk artışı gözlemleri mikrodalga ile sinterlenmiş ve nispeten yüksek yoğunluğa sahip Fe_3O_4 partikül takviyeli alüminyum kompozit üzerine yapılan bir çalışmada belirtilmiştir (Bayraktar and Katundi 2010). Ayrıca, Zheng vd. (2014) alüminyumdan daha yüksek yoğunluğa sahip demir esaslı metalik cam partiküllerinin kompozit numunelerinin yoğunluk değerlerini artırdığını bildirmişlerdir.

Diğer yandan artan takviye oranına bağlı olarak bağlı yoğunluk değerlerinde düşüş ve bünyede bulunan porozite miktarında ise artış gözlenmektedir. Tespit edilen bu sonuç, plastik olarak sıkıştırılabilirliği yüksek olan katkısız alüminyum tozlarına göre, plastik özelliğe sahip olmayan amorf takviye faz oranındaki artışa bağlı olarak tozların sıkıştırılabilirliğinin daha az olmasıyla açıklanabilir. Böylece, artan takviye faza bağlı

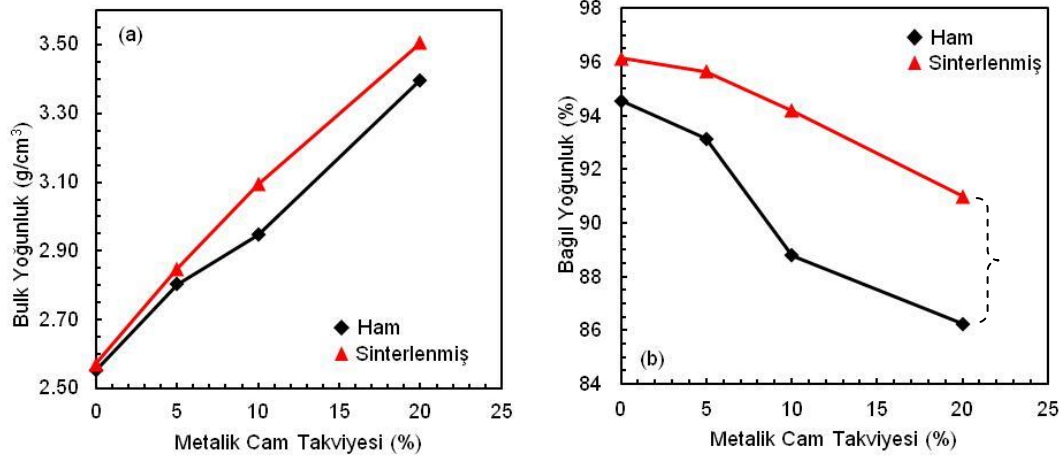
olarak ham numunelerdeki artan gözenekliliğin sinterleme sonrası durumlara da taşındığı görülmektedir. Bu duruma, literatürdeki çeşitli çalışmalarda sinterleme işlemi esnasında aynı zamanda yük uygulanarak (indüksiyon ısıtma ve sıkıştırma, sıcak ekstrüzyon vb), çözüm getirildiği görülmektedir. Ancak mevcut çalışmadaki mikrodalga fırın içerisinde böyle bir uygulama yapılamadığı için, sinterleme sonrasında da belirli miktarda gözenek yapı içerisinde kalmıştır. Bu durum Şekil 4.5'te verilen %10 takviye partikül içeren numunenin SEM mikroyapı fotoğrafında görülebilmektedir. Özellikle birbirine yakın olan takviye partiküller arasında bu gözenekler (siyah ok ile gösterilen) daha fazladır. Bununla birlikte optimum sinterleme işleminin meydana geldiği lokal bölgelerde alüminyum matrisin metalik cam partikülleriyle uyumlu ıslatma (beyaz ok) davranışı sergileyebildiği de tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar esnasında kesin yeri tam olarak belirlenemese de belirli bir sıcaklıktan sonra metalik cam partiküllerinin de mikrodalga ile ısınma davranışına katıldığı gözlenmiştir. Bu durumun numunenin hacimsel olarak ısınmasında fayda sağladığını düşündürmektedir.



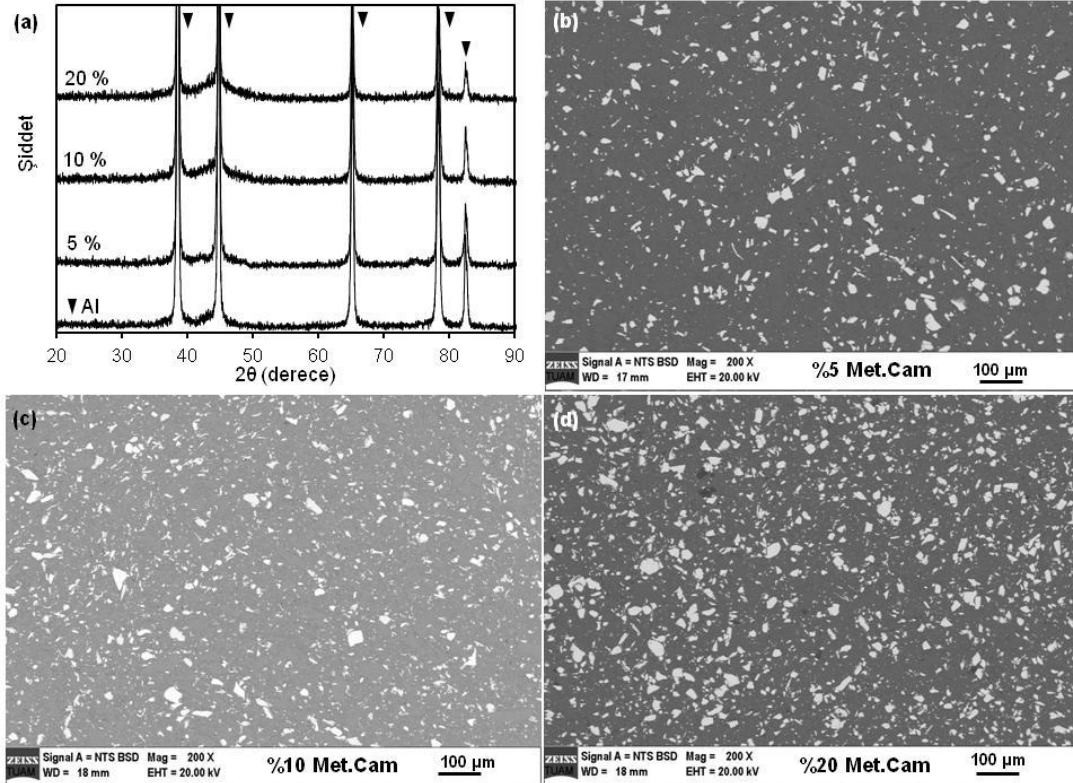
Şekil 4.5 %10 takviye fazı içeren alüminyum kompozitinin mikroyapısı.

Bundan başka, Şekil 4.6'da verilen grafiklerde ham numunelere kıyasla sinterlenmiş numunelerin bağıl yoğunluk değerlerindeki artış (veya gözenek miktarlarındaki azalış), sinterlemenin belirli oranda başarısını göstermektedir. Örnek vermek gerekirse, %20 metalik cam takviyeli ham numunenin bağıl yoğunluk değeri % 86.239 iken, mikrodalga sinterleme sonucunda % 91.5 civarındadır. Ham durumdaki porozite miktarı

% 13.761'den, %8.5 civarında düşmüştür. Kısaca ifade etmek gerekirse, gözenek miktarı mikrodalga sinterleme sonrasında %40 civarında düşüş göstermiştir.



Şekil 4.6 Ham numuneler ve 500°C'de mikrodalga sinterlenmiş numunelerin yoğunluk kıyaslamaları.



Şekil 4.7 Sinterlenmiş numunelere ait (a) XRD ve (b-d) mikroyapı kıyaslamaları.

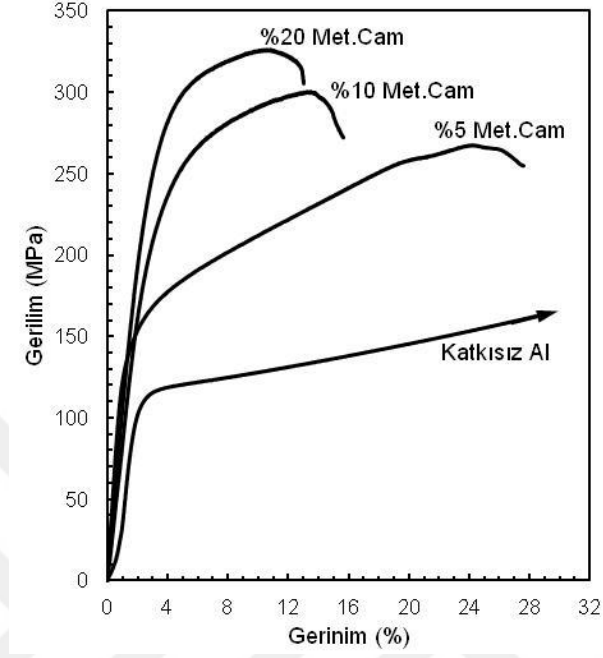
Şekil 4.7’de metalik cam takviyeli kompozitlerin XRD ve SEM mikroyapısal analizleri verilmiştir. XRD analizleri açık olarak alüminyum matrise ait keskin kristal piklerinin varlığını göstermekte, bundan başka ekstra istenmeyen bir etkileşim fazına ait bir bulgu içermediği görülmektedir. Bundan başka, metalik cam takviye miktarındaki artışa bağlı olarak 40-50° 2teta değerlerinde amorf yapının belirtisine ait tümseğin belirginleştiği görülmektedir. Şekil 4.7b, c ve d’de ise %5, 10 ve 20 metalik cam partikülleri içeren kompozit numunelerin mikroyapıları verilmiştir. Genel itibariyle tanecik boyutlarının nano boyutlardan 50 mikrona kadar geniş bir ölçekte yayıldığı söylenebilir. Bununla birlikte önemli miktardaki takviye partikül boyutunun 2-5 µm civarında olduğu mikroyapı incelemelerinde tespit edilmiştir. Mikroyapı fotoğraflarında, takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen sayılabilecek bir dağılımla üretilebildiği söylenebilir. Bununla birlikte, kullanılan metalik cam partiküllerinin bazı bölgelerde kümeleştikleri de görülmektedir. Bu durum, takviye partiküllerinin manyetik özelliğe sahip olması ve serbest tozların çelik kalıba doldurulması esnasında birbirlerini çekerek belirli bölgelerde aglomere olmasından kaynaklanabilir.

4.1.4 Kompozit Numunelerin Mekanik Özellikleri

Şekil 12’de mikrodalga ısıtma ile 500 °C’de 30 dk hava ortamında sinterlenen, %0, 5, 10 ve 20 metalik cam içerikli alüminyum matrisli kompozitlerin basma yüklemesi altındaki davranışları verilmiştir. Üretilen numunelerdeki metalik cam takviye toz miktarının artması ile birlikte, akma dayanımı ve maksimum dayanım değerlerinde gözlenen artış dikkate değerdir. Numunelerin akma dayanımı %5, % 10 ve %20 için sırasıyla 135, 185 ve 234 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, maksimum basma dayanımları ise sırasıyla 267, 301 ve 326 MPa’dır. Dayanımda gözlenen gelişmelere karşın numunelerin gerinim değerlerinin takviye miktarındaki artışla birlikte azaldığı görülmüştür. %20 partikül takviyesi ile üretilen numunenin kırılmadaki plastik deformasyon miktarı %11 civarındadır.

Üretilen numunelerin sertlik değerlerinin de takviye miktarındaki artışla artış sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, 1200 Hv gibi çok yüksek sertliğe sahip metalik cam partiküllerinden kaynaklanmaktadır. Sırasıyla numunelerin ortalama sertlik değerleri, katkısız numune için 67 Hv, %5 katkılı için 73 Hv, %10 katkılı numune için 78 Hv ve

%20 katkılı numune için 87 Hv olarak bulunmuştur.



Şekil 4.8 Kompozit numunelerin gerilim-gerinim grafikleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada $\text{Co}_{42}\text{Cu}_1\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{26.5}\text{Si}_5$ amorf alaşım tozlarının saf alüminyum matris içerisinde takviye bileşen olarak kullanılmasıyla yeni bir metalik cam takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretilmiştir. Takviye oranları %5-20 arasındadır. Kompozit numunelerin sinterleme işlemleri 500°C 'de 30 dk bekleme süresi ile ev tipi bir mikrodalga fırında gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga fırın ısıtma haznesinin sıcaklık ölçümleri güvenilir bir şekilde yapılarak, farklı gaz atmosferlerindeki sıcaklık-süre ilişkisi gözlenmiştir. Metalik cam tozlarının belirli bir sıcaklıktan sonra mikrodalga ile yardımcı elemandan bağımsız ısınabildiği görülmüştür. Kontrol dışı sıcaklık yükselmeleri metalik cam ve alüminyum matrisin etkileşerek neredeyse tek fazlı Al_5Co_2 fazından ibaret bir malzemenin ortaya çıkmasına neden olduğu tespit edilmiştir. 500°C 'de yapılan sinterleme işlemlerinde ham numunelerdeki porozite miktarındaki azalış sinterleme sonrası %40'lara kadar varabilmektedir. Bununla birlikte, sinterleme sonrasında numunelerin basma dayanımları dikkat çekici bir şekilde artışı görülmüştür. Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri takviye partikül miktarı arttıkça artış sergilemiştir.

Kullanılan hammaddelerin tane boyutları ve dağılımları şekillendirme (uygun paketlenme, sıkıştırılabilirlik vb) ve sinterleme performansı açısından önem taşımaktadır. Bundan başka, metalik camlar gevrek tabiatlı olmaları nedeniyle öğütülebilirlik derecelerinin de potansiyel kompozit malzeme hammaddesi olarak ön plana çıkabilir. Bu kapsamda, kompozit numunelerde sinterleme sonrası kalan kalıntı porozite miktarının azaltılması ile, bu kompozitlerin özelliklerinin daha gelişmiş olarak elde edilebileceği düşünülmektedir. Gelecek çalışmalar bu parametrelerin optimum değerleri üzerine yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Adamiak, M. (2012). The effect of TiAl and Ti3Al reinforcement on microstructure changes and properties of aluminium matrix composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, **58**: 55-79
- Advash, B. (2011). Development and Property Evaluation of Aluminum Alloy Reinforced with Nano-ZrO₂ Metal Matrix Composites (NMMCs) for Automotive Applications, PhD Thesis, Deemed University, Maduravoyal, Chennai, India.
- Agarwal, D. (2006). Microwave sintering of ceramics, composites and metallic materials, and melting of glasses. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, **65**: 129–144.
- Agrawal, D. (2010). Microwave sintering of ceramics, composites and metal powders, Editor(s): Zhigang Zak Fang, In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Sintering of Advanced Materials, Woodhead Publishing.
- Anilkumar, H.C., Hebbar, H.S. and Ravishankar, K.S. (2011). Mechanical Properties of Fly Ash Reinforced Aluminium Alloy (Al6061) Composites, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, **6(1)**: 41-45.
- Arun Kumar M.B. and Swamy R.P., (2011). Evaluation of mechanical properties of Al6061, fly ash and e-glass fiber reinforced hybrid metal matrix composites, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, **6(5)**: 40-44
- Bayraktar, E. and Katundi, D. (2010). Development of a new aluminum matrix composite reinforced with iron oxide (Fe₃O₄). *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **38**: 7-14.
- Bhattacharya, M., and Basak T. (2017). Susceptor-Assisted Enhanced Microwave Processing of Ceramics - A Review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **42(6)**: 433-469.
- Chawla, K.K., (2012). Composite Materials: Science and Engineering. New York: Springer Science Media.
- Cheng, N.P., Zeng, S.M. and Liu, Z.Y. (2008). Preparation, microstructures and

- deformation behavior of SiCP/6066Al composites produced by PM route. *Journal of Materials Processing Technology*, **202(1-3)**: 27–40.
- Chung, D.L. (2003). *Composite Materials: Functional materials for modern technologies*. UK: Springer.
- Das, J., Güth, A., Klauss, H-J., Mickel, C., Löser, W., Eckert, J., Roy, S.K., and Schultz, L. (2003). Effect of casting conditions on microstructure and mechanical properties of high-strength Zr_{73.5}Nb₉Cu₇Ni₁Al_{9.5} in situ composites. *Scripta Materialia*, **49**: 1189-1195.
- Dash K, Panda S and Ray BC (2013) Process and progress of sintering behavior of Cu-Al₂O₃ composites. *Emerging Materials Research*, **2(1)**: 32-38.
- Dudina, D.V., Georgarakis, K., Li, Y., Aljerf, M., LeMoulec, A., Yavari, A.R. and Inoue, A. (2009). A magnesium alloy matrix composite reinforced with metallic glass. *Composites Science and Technology*, **69**: 2734-2736.
- Eustathopoulos, N. (2015). Wetting by Liquid Metals-Application in Materials Processing: The Contribution of the Grenoble Group. *Metals*, **5(1)**: 350-370.
- Fan J., Zhang Z., Shen B. and Mao S.X. (2008). Plastic deformation of a Co based metallic glass composite with in situ precipitated dendritic phases, *Scripta Materialia*, **59**: 603-606.
- Fathy, A., El-kady, O. and Mohammed, M.M.M. (2015). Effect of iron addition on microstructure, mechanical and magnetic properties of Al-matrix composite produced by powder metallurgy route. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **25**: 46–53.
- Gilbert, C.J., Ritchie, R.O. and Johnson W.L. (1997). Fracture toughness and fatigue-crack propagation in a Zr–Ti–Ni–Cu–Be bulk metallic glass, *Applied Physics Letters*, **71**: 476.
- Groover, M.P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4th Ed., John Wiley & Sons., USA.
- Guo, Z.X. and Derby, B. (1995). Solid-state Fabrication and Interfaces of Fibre Reinforced Metal Matrix Composites. *Progress in Materials Science*, **39(4-5)**:

411-495.

- Güneş, D. (2010). OAl matrisli SiCp takviyeli kompozit ile Ç1030 çeliğinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Haghshenas, M. (2016). Metal–Matrix Composites. in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, ed. M.S.J. Hashmi, Elsevier. 1-28.
- Hembrom, S., Roy, B.N., Khobragade, N. and Roy, D. (2016). Studies on Amorphous Alloy Dispersed Aluminium Matrix Composite Prepared by High Pressure Torsion. *Journal of Materials Science Research*, **5(1)**: 89-96.
- Hort, N. and Kainer, K.U. (2006). Powder Metallurgically Manufactured Metal Matrix Composites. In: Metal Matrix Composites: Custommade Materials for Automotive and Aerospace Engineering, Ed. by Karl U. Kainer, Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 243-276.
- Huda, M.D. (1991). Optimization of The Sintering Process: Metal Matrix Composites and Zinc Oxide Varistors, PhD Thesis, Dublin City University, Dublin, Ireland.
- Hull, D. ve Clyne, T. W. (1996). An introduction to composite materials (2nd ed.). Cambridge University Press, United Kingdom.
- Huo, S.H., Qian, M., Schaffer, G.B. and Crossin, E. (2011). Aluminium powder metallurgy, Editor(s): Roger Lumley, In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Woodhead Publishing.
- Ibrahim, A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites-a review. *Journal of Materials Science*, **26**: 1137-1156.
- Inoue, A., Shen, B.L., Koshiba, H., Kato, H. and Yavari A.R. (2004). Ultra-high strength above 5000 MPa and soft magnetic properties of Co-Fe-Ta-B bulk glassy alloys. *Acta Materialia*, **52**: 1631-1637.
- Jayalakshmi, S., Singh, A.R. and Gupta, M. (2018). Metallic glasses as potential reinforcements in Al and Mg matrices: A review. *Technologies*, **6**: 40-57.
- Kammer, P., Shivanand, H.K. and Kumar, S.S. (2012). Experimental Studies on

Mechanical Properties of E-Glass Short Fibres and Fly Ash Reinforced Al 7075 Hybrid Metal Matrix Composites. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, **1(4)**: 111-115

Kainer, K.U. (2006). Basics of Metal Matrix Composites, in Metal Matrix Composites: Custom made Materials for Automotive and Aerospace Engineering, Ed. by Karl Ulrich Kainer, Wiley VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

Kuşoğlu, İ.M. (2011). Demir esaslı metal tozlarından geleneksel ve mikrodalga sinterleme yöntemleri ile malzeme üretimi ve özelliklerinin karşılaştırılması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Lee, M.H., Kim, J.H., Park, J.S., Kim, J.C., Kim, W.T. and Kim D.H. (2004) Fabrication of Ni–Nb–Ta metallic glass reinforced Al-based alloy matrix composites by infiltration casting process. *Scripta Materialia*, **50**: 1367–137.

Lin, I.N., Lee, W.C., Liu, K.S., Cheng, H.F. and Wu, M.W. (2001). On the microwave sintering technology for improving the properties of semiconducting electronic ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **21**: 2085–2088.

Madhukumar, U. (2018). Characterization of Glass Particulate Reinforced Aluminium Alloy6061 Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, **5**: 7604-7608.

Mallick, P.K. (2010). Overview. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.

Manohar, G., Dey, A., Pandey, K.M. and Maity, S.R. (2018). Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review. *AIP Conference Proceedings*, 1952: 020041.

Matli, P.R, Shakoor, R.A. and Mohamed, A.M.A. (2017). Development of Metal Matrix Composites Using Microwave Sintering Technique, Sintering of Functional Materials, Igor Shishkovsky, IntechOpen.

Nestler, D., Siebeck, S., Podlesak, H., Wagner, S., Hockauf, M. and Wielage, B. (2011). Powder Metallurgy of Particle-Reinforced Aluminium Matrix Composites (AMC) by Means of High-Energy Ball Milling. In: Fathi M., Holland A., Ansari F., Weber C. (eds) Integrated Systems, Design and Technology 2010. Springer,

Berlin, Heidelberg.

- Ozdemir, I., Ahrens, S., Mücklich, S. and Wielage, B. (2008). Nanocrystalline Al-Al₂O₃p and SiCp composites produced by high-energy ball milling. *Journal of Materials Processing Technology*, **205(1-3)**: 111–118
- Oghbaei, M. and Mirzaee, O. (2010). Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, **494**: 175-189.
- Parlak, Ş. (2006). Çelik talaşları ile takviyeli dökme demir kompozitlerinin işlenebilirliklerin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Rajkumar, K. and Aravindan, S. (2009). Microwave sintering of copper-graphite composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **209(15-16)**: 5601-5605.
- Rezaei, M.R., Razavi, S.H. and Shabestari, S.G. (2016). Development of a novel Al-Cu-eTi metallic glass reinforced Al matrix composite consolidated through equal channel angular pressing (ECAP). *Journal of Alloys and Compounds*, **673**: 17-27.
- Richerson, D.W. (1992). Modern Ceramic Engineering, Properties, Processing and Use in Design, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc., NewYork, USA.
- Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, **175**: 364-375.
- Rostami, R.B. and Tajally, M. (2017) Effect of ZrO₂ on microstructure and wear properties of Al₂O₃/Al–Si composites. *Emerging Materials Research*, **6(1)**: 160-167.
- Roy, R., Agrawal, D. and Cheng, J. (1999). Gedevanishvili S. Full sintering of powdered-metal bodies in a microwave field. *Nature*, **399**: 668-670.
- Scudino, S., Surreddi, K.B., Sager, S., Sakaliyska, M., Kim, J.S., Loser, W. and Eckert, J. (2008). Production and mechanical properties of metallic glass-reinforced Al-based metal matrix composites. *Journal of Materials Science*, **43**: 4518-4526.
- Singh, S., Gupta, D. and Jain, V. (2016). Recent applications of microwaves in materials joining and surface coatings. *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, **230(4)**: 603–617.

Suton, W.H. (1989). Microwave processing of ceramic materials. *American Ceramic Society Bulletin*, **68**: 376-386.

Suton, W.H. (1993). Ceramic transactions microwaves: Theory and applications in materials processing II. *Key Issues in Microwave Process Technology*, **36**: 3-18.

Şahin, Y. (2000). Kompozit malzemelere giriş. Gazi Kitabevi. Ankara.

Telford, M. (2004). The Case For Bulk Metallic Glass. *Materials Today*, **7(3)**: 36-43.

Togashi, N., Ishida, M., Nishiyama, N. and Inoue, A. (2008). Wear resistance of metallic glass bearings, *Review of Advanced Materials Science*, **18**: 93-97.

Torralba JM, Costa CE and Velasco F (2003) P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, **133**: 203-206.

Umetsu, R.Y., Tu, R. and Goto, T., Thermal and Electrical Transport Properties of Zr-Based BulkMetallic Glassy Alloys with High Glass-Forming Ability, *Materials Transactions*, 53, 10, 2012, 1721-1725

Unal TG and Diler EA (2018) Properties of AlSi9Cu3 metal matrix micro and nano composites produced via stir casting. *Open Chemistry*, **16**: 726-731

Unlu, B. S. (2008). Investigation of tribological and mechanical properties Al₂O₃SiC reinforced Al composites manufactured by casting or P/M method. *Materials and Design*, **29**: 2002-2008.

Uygur, I. "Environmentally Assisted Fatigue Response of Al-Cu-Mg-Mn with SiC particulate Metal Matrix Composites." Ph.D.Thesis, University of Wales, Swansea, 1999.

Vani VV and Chak SK (2018) The effect of process parameters in aluminum metal matrix composites with powder metallurgy. *Manufacturing Review*, doi: 10.1051/mfreview/2018001.

Vinson, J.R. and Chou, T.W. (1975). Composite materials and their use in structures, Materials Science Service, Applied Science Publishers, London.

Viskova, A. (2015). Structural changes in porous engineering barrier materials as a

result of long-term interaction with ground water, Lisans Tezi, Masaryk University, Faculty of Science, Brno, Czech Republic.

- Wang, A., Tian, H. and Xie, J. (2018). Preparation of SiCp/Al–Si composites. *Emerging Materials Research*, **7(2)**: 82-88.
- Wang, Z., Georgarakis, K., Nakayama, K.S., Li, Y., Tsarkov, A.A., Xie, G., Dudina, D., Louzguine-Luzgin, D.V. and Yavari, A.R. (2016). Microstructure and mechanical behavior of metallic glass fiberreinforced Al alloy matrix composites. *Nature Scientific Reports*, **6**: 24384.
- Yadav, D. and Bauri, R. (2010). Nickel particle embedded aluminium matrix composite with high ductility. *Materials Letters*, **64(6)**: 664-667.
- Yazıcı, Z.O. (2011). İri Hacimli Metalik Cam Malzemelerin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Yazıcı, Z.O., Hitit, A., Yalcin, Y. and Ozgul, 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.
- Yu, P., Kim, K.B., Das, J., Baier, F., Xu, W. and Eckert, J. (2006). Fabrication and mechanical properties of Ni–Nb metallic glass particle-reinforced Al-based metal matrix composite. *Scripta Materialia*, **54**: 1445-1450.
- Zhang, X. P., Ye, L., Mai, Y. W., Quan, G. F. and Wei, W. (1999). Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC). *Composites Applied Science and Manufacturing Part A*, **30**: 1415-1421.
- Zheng, R., Yang, H., Liu, T., Ameyama, K. and Ma, C. (2014). Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composites reinforced with Fe-based metallic glass particles. *Materials and Design*, **53**: 512-518.

İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

- 1) <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/645456.pdf> (12.03.2019)
- 2) https://www.imagenesmy.com/?d=1ciBHOP_E1z-hqcYAkJTDNWr7eteFWVXY

v6m8sVG7oNRUQGdKeSziHRnPzAJx_2e8en1lhfhPKzaDWok8UDYiEqyEpefh
3iNkIcERr9aqdFYjdN7aFp7iTvGhxDv5zk4vuFAlMua24baG5YMA9CZyzfWTL
aA0ghUtRSUwiyQuvg (03.03.2019)

- 3) <http://www.bilgiustam.com/kompozit-malzemeler-hakkinda-hersey> (20.02.2019)
- 4) http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son.pdf
(26.03.2019)
- 5) https://www.researchgate.net/figure/Schematic-represenation-of-sintering-mechanisms-in-polycrystalline-materials-after_fig1_295682597 (26.03.2019)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : GÖRKEM ŞANAN
Doğum Yeri ve Tarihi : ESKİŞEHİR, 29.04.1985
Yabancı Dili : İNGİLİZCE
İletişim (Telefon/e-posta) : 0555 259 00 33 / gorkemsanan@yahoo.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Atayurt Koleji, (1996-2003)
Lisans :Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Seramik Mühendisliği, (2004-2009)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014-2019)

Çalıştığı Kurum: Vaillant Grup Türk Demirdöküm Fabrikaları (2017, devam ediyor)

Uluslararası Kongre ve Sempozyumlar

Sözlü Bildiri (Özet Basım)

Görkem Şanan, Ziya Özgür Yazıcı, 2018, Production and Properties of Co-based Metallic Glass Reinforced Aluminum Matrix Composites, 5th International Conference On Computational And Experimental Science And Engineering (ICCESN 2018), Bildiri Özetleri Kitapçığı, syf.350, 12-16 Ekim 2018, Antalya-Türkiye

SCI Makaleler

Hakem ve inceleme süreci devam ediyor.

Ziya Özgür Yazıcı, Görkem Şanan, 2019, Production and Properties of Co-based Metallic Glass Reinforced Aluminum Matrix Composites, Emerging Materials Research, ICE Institute of Civil Engineering Publishing.