



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM VE BAKIR ESASLI
YENİLİKÇİ MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ İLE
ÜRETİMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Gökçe BORAND

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

TEMMUZ 2023

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM VE BAKIR ESASLI
YENİLİKÇİ MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ İLE
ÜRETİMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Gökçe BORAND
(161080402)
ORCID:**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Deniz UZUNSOY
ORCID:
Eş Danışman: Doç. Dr. Nazlı AKÇAMLI KAYA
ORCID:**

TEMMUZ 2023

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 161080402 numaralı Doktora Öğrencisi Gökçe BORAND, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM VE BAKIR ESASLI YENİLİKÇİ MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİMİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY**
Bursa Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Nazlı AKÇAMLI KAYA**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sebahattin GÜRMEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Süleyman Can KURNAZ
Sakarya Üniversitesi

.....
Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yunus KAYA
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 25.07.2023



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 190D002 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, 119M011 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, 118M185 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gökçe BORAND

İmzası :

X X X X



Soluk mavi noktaya,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli fikir ve deneyimlerini esirgemeyen, motive edici görüşleriyle, özverili ve titiz bir şekilde tezimin tamamlanmasını gerçekleştiren, danışmanım sayın Prof. Dr. Deniz UZUNSOY'a, bana kattıkları ve göstermiş olduğu desteği ve aynı zamanda sabrı için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tecrübeleriyle ve yardımlarıyla fikirlerini paylaşan ve tezimin şekillenmesine katkıda bulunan, eş danışmanım sayın Doç. Dr. Nazlı AKÇAMLI KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan, fikir ve önerileriyle tezimin gelişmesine yardımcı olan, sayın hocalarım Prof. Dr. Sebahattin GÜRMEN ve Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamda toz malzemelerin mekanik alaşımlama ve kompozitlerin üretim kısmında desteklerini ve değerli görüşlerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım; Arş. Gör. Berk ŞENYURT, Arş. Gör. Burak KÜÇÜKELYAS ve Arş. Gör. Cantekin KAYKILARLI'ya sabırları ve aynı zamanda motive edici muhabbetleri için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca, gergin zamanlarımda bile güzel ve her daim motivasyon artırıcı muhabbet ve destekleriyle mahrum etmeyen, bana karşı sabırlarımı koruyan, değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Hurşit Sefa AYDIN'a, Arş. Gör. Cansu ÇELTİK'e ve Arş. Gör. Nilay KAÇAR'a teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca fikirlerini ve önerilerini esirgemeyen, bana karşı desteklerini ve yardımlarını her daim gösteren Dr.Öğr.Üyesi Fatma Nur PARIN'a, Arş. Gör. Neriman SİNAN TATLI'ya ve Arş. Gör. Ayten Nur YÜKSEL YILMAZ'a ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığımız günden beri desteğini ve muhabbetini esirgemeyen, her canımız sıkıldığında birbirimizi bir şekilde bulduğumuz, doktora sürecim boyunca da yanımda olan değerli arkadaşım yüksek malzeme mühendisi Melike ARSLANHAN'a, projemiz boyunca birlikte çalıştığım, yardımlarını ve muhabbetini esirgemeyen yüksek metalurji ve malzeme mühendisi Özberk ÖZTÜRK'e ve doktora sürecinde tanıştığım neşesiyle desteğini esirgemeyen yüksek polimer mühendisi Hazal YILMAZ DOĞAN'a, bu gergin dönemde sabırları için de ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı 190D002 nolu proje ile destekleyen Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne, 119M011 ve 118M185 no'lu projelerle destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür ederim.

XRD ve SEM analizlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan BTÜ – MERLAB çalışanları Öğr. Gör. Dr. Murat EROĞLU ve Öğr. Gör. Olcay SEVERGÜN'e, Raman analizlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Koç Üniversitesi-KUYTAM çalışanları Dr. Barış Yağcı ve Dr. Gülsu ŞİMŞEK'e ve toz malzemelerin TEM analizinde yardımcı olan Bayburt Üniversitesi-BUMER çalışanı öğretim görevlisi

Süleyman TEKMEK'e ve FDM'lerin TEM analizinde yardımcı olan ODTÜ-MERLAB çalışanı Araş. Gör. Seçkin ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

"Lise arkadaşlıkları her zaman başkadır.." diyerek, yıllarca arkadaşlığımızı sabırla, itinayla ördüğümüz, her zaman birbirimize gülümsemeyi bir borç bildiğimiz değerli arkadaşım Hatice İNAN'a, doktora sürecim boyunca desteği ve motivasyonu için teşekkürlerimi sunarım.

Doğduğum gün sevinip, lisedeki arkadaşlarına beni anlattığı hikayelerini çok dinlediğim, bugüne kadar yaptığım her tercih için beni destekleyen, tezim boyunca fikirlerini paylaşan canım ağabeyim Bahadır BORAND'a ve muhabbetiyle, desteğiyle her zaman beni tebessüm ettiren değerli eşi Nurhan Yılmaz BORAND'a, doğdukları günden beri beni motive etmeyi bilen, güzel yeğenlerim Doğa ve Deniz BORAND'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İlkokula başladığım gün, sınıfa girmediğim için üç teneffüs zili ağlayarak ortalığı ayağa kaldırırken *"Bu kız okumayacak sanırım."* diye elini kavuşturarak dertlenip, daha sonra yıllarca derslerimle tek tek ilgilenen, özlemle andığım, adı gibi her zaman neşeli olan rahmetli babam Mesut BORAND'a ve o gün dördüncü derse okul bahçesindeki herkesin gözü önünde beni sürükleyip sınıfa götürmeyi bir zaferle anıp, yıllarca okulda sadece beni değil, bütün çocukları koruyup kollayan canım annem Ümran BORAND'a, bugüne kadar bana karşı göstermiş oldukları sabır, emek ve hiç esirgemedikleri o güzel sevgileri için teşekkürü borç bilirim.

Temmuz 2023

Gökçe BORAND
(Yüksek Malzeme Bilimi Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xii
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxxii
SUMMARY	xxxiv
1. GİRİŞ... ..	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Grafen.....	3
1.2.1 Grafen üretim yöntemleri.....	5
1.2.1.1 Eksfoliasyon.....	6
1.2.1.2 Kimyasal sentez	8
1.2.1.3 Epitaksiyel büyütme.....	9
1.2.1.4 Kimyasal buhar biriktirme	10
1.2.1.5 Diğer yöntemler	10
1.3 Metal Matris Kompozitler.....	16
1.3.1 Alüminyum matrisli kompozitler.....	18
1.3.1.1 Alüminyumun yapısal özellikleri.....	18
1.3.1.2 Alüminyum alaşımları.....	19
1.3.2 Bakır matrisli kompozitler	23
1.3.2.1 Bakırın yapısal özellikleri	23
1.3.3 Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemi	24
1.3.4 Grafen takviyeli metal matrisli kompozitlerin güçlendirme mekanizmaları	31
1.3.4.1 Tane boyutu küçültme.....	31
1.3.4.2 Yük aktarımı.....	31
1.3.4.3 Orowan döngüsü	32
1.3.4.4 Termal uyumsuzluk mekanizması	33
1.4 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	34
1.4.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sınıflandırılması	37
1.4.2 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları.....	38
1.4.3 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri.....	39
1.5 Toz Metalurjisi	43
1.5.1 Toz morfolojisi.....	48
1.5.2 Mekanik alaşımlama	48
1.5.3 Şekillendirme	52
1.5.4 Sinterleme	55

1.6 Literatür Araştırması	60
1.6.1 Elektrik ark deşarj yöntemi ile grafen üretimine yönelik çalışmalar	60
1.6.2 Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar	61
1.6.3 Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli bakır esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar	65
1.6.4 Toz metalurjisi ile üretilen Al esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere yönelik çalışmalar	71
2. MALZEME VE YÖNTEM	74
2.1 Malzemeler	74
2.2 Yöntem	74
2.2.1 Birkaç katmanlı grafenin elektrik ark deşarj (EAD) yöntemi ile üretimi ..	74
2.2.2 Grafen takviyeli alüminyum ve bakır matrisli kompozit tozlarının mekanik alaşımlama ile üretimi	76
2.2.3 Grafen katkıli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimi	81
2.2.4 Grafen katkıli alüminyum ve bakır matrisli kompozitlerin üretimi	85
2.3 Karakterizasyon	88
2.3.1 Partikül boyutu ölçümü	88
2.3.2 Yüzey alanı ölçümü (BET)	88
2.3.3 Raman analizi	89
2.3.4 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi	90
2.3.5 X - Işınları difraktometresi (XRD) analizi	91
2.3.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	91
2.3.7 Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) analizi	92
2.3.8 Yoğunluk tayini	93
2.3.9 Mikroyapı incelemesi	94
2.3.10 Sertlik ölçümü	96
2.3.11 Aşınma testi	97
2.3.12 Basma testi	98
3. BULGU VE TARTIŞMA	100
3.1 Elektrik Ark Yöntemi ile Üretilen Birkaç Katmanlı Grafen Tozlarının Karakterizasyonu	100
3.2 Başlangıç Tozlarının Karakterizasyonu	104
3.3 Mekanik Alaşımlanmış Tozların Karakterizasyonu	107
3.3.1 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının partikül boyutları	107
3.3.2 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının yüzey alanı (BET) ölçümleri	113
3.3.3 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının Raman analizi ..	114
3.3.4 Mekanik alaşımlama ile elde edilen alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozlarının XRD analizi	118
3.3.5 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının DSC analizi ..	131
3.3.6 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının SEM analizi ..	138
3.3.7 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının TEM analizi ..	156
3.4 Sinterlenmiş Numunelerin Karakterizasyonu	160
3.4.1 Yoğunluk tayini	160
3.4.1.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin yoğunluk tayini ..	160
3.4.1.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin yoğunluk tayini	161
3.4.1.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin yoğunluk tayini	163

3.4.2 XRD analizi.....	164
3.4.2.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin XRD analizi	164
3.4.2.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin XRD analizi	168
3.4.2.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin XRD analizi	172
3.4.3 Mikroyapı incelemesi.....	173
3.4.3.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin mikroyapısal karakterizasyonu	173
3.4.3.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu	195
3.4.3.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu	217
3.4.4 Sertlik ölçümü	222
3.4.4.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin sertlik ölçümleri .	222
3.4.4.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı alaşım ve kompozitlerin sertlik ölçümleri	226
3.4.4.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik ölçümleri.....	231
3.4.5 Aşınma testi.....	233
3.4.5.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin aşınma özellikleri	233
3.4.5.2 FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin aşınma özellikleri.....	241
3.4.5.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin aşınma özellikleri.....	246
3.4.6 Basma testi	248
3.4.6.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin basma testi sonuçları	248
3.4.6.2 FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin basma testi sonuçları....	255
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	261
KAYNAKLAR	266
EKLER.....	287
ÖZGEÇMİş.....	313

KISALTMALAR

Ağ.	: Ağırlıkça
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CNT	: Karbon nanotüp
COF	: Sürtünme katsayısı
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DSC	: Diferensiyel taramalı kalorimetre
EAD	: Elektrik ark deşarj
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
FDM	: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler
FLG	: Birkaç katmanlı grafen
GNP	: Grafen nanoplaka
GO	: Grafen oksit
HAADF	: Yüksek açılı açısız karanlık alan
HRTEM	: Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
IFFT	: Ters hızlı Fourier dönüşüm
MA	: Mekanik alaşımlama
MMK	: Metal matris kompozit
ROM	: Karışımlar kuralı
Sa	: Saat
SAD	: Seçilmiş alan kırınımı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SWOT	: Strengths,Weakness,Opportunities,Threats
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
TG	: Ticari grafen
T/M	: Toz metalurjisi
XRD	: X-Işınları difraktometresi

SEMBOLLER

Al	: Alüminyum
cm³	: Santimetreküp
Cu	: Bakır
g	: Gram
HV	: Vickers sertlik
K	: Kelvin
KV	: Kilovolt
m²	: Metrekare
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
ρ	: Yoğunluk
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
Zn	: Çinko
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Grafen üretimi için kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.....	13
Çizelge 1.2 : Alüminyumun genel özellikleri.....	18
Çizelge 1.3 : Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	20
Çizelge 1.4 : Bakırın genel özellikleri	24
Çizelge 1.5 : MMK üretimi için kullanılan genel yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.	29
Çizelge 1.6 : FDM'lerin bazı üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları....	42
Çizelge 1.7 : Toz metalurjisinde kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.	46
Çizelge 2.1 : FLG üretim parametreleri.....	76
Çizelge 2.2 : Al-4,5Cu esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının kompozisyonu.....	77
Çizelge 2.3 : Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının kompozisyonu.....	77
Çizelge 2.4 : Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozları için MA parametreleri.....	77
Çizelge 2.5 : Al-7,5Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn kompozit tozlarının kompozisyonu.....	79
Çizelge 2.6 : Al-7,5Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozlar için MA parametreleri.	80
Çizelge 3.1 : Şekil 3.4(c)'deki işaretli bölgelerin EDS sonuçları.....	103
Çizelge 3.2 : Başlangıç tozlarının ortalama partikül boyutu sonuçları.....	106
Çizelge 3.3 : FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı bazı kompozit tozlarının yüzey alanı ölçümleri.	114
Çizelge 3.4 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.52(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	140
Çizelge 3.5 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.54(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	141
Çizelge 3.6 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.56(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	143
Çizelge 3.7 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.58(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	144
Çizelge 3.8 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.60(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	145

Çizelge 3.9 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.62(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	146
Çizelge 3.10 : Harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.64(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.....	148
Çizelge 3.11 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.66(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	149
Çizelge 3.12 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.68(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	151
Çizelge 3.13 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.69(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	151
Çizelge 3.14 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozlarına ait Şekil 3.71(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	153
Çizelge 3.15 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.72(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	153
Çizelge 3.16 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin teorik ve relatif yoğunlukları.	160
Çizelge 3.17 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin teorik ve relatif yoğunlukları.	161
Çizelge 3.18 : Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.	161
Çizelge 3.19 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.	162
Çizelge 3.20 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.	163
Çizelge 3.21 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.....	164
Çizelge 3.22 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'e ait Şekil 3.104(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	183
Çizelge 3.23 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'e ait Şekil 3.107(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.....	185
Çizelge 3.24 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'e ait Şekil 3.110(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.....	187
Çizelge 3.25 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'e ait Şekil 3.113(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.	188
Çizelge 3.26 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'e ait Şekil 3.116(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.	190
Çizelge 3.27 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'ye ait Şekil 3.119(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları. ...	192
Çizelge 3.28 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı harmanlanmış kompozite ait Şekil 3.134(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.....	206

Çizelge 3.29 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozite ait Şekil 3.137(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	209
Çizelge 3.30 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozite ait Şekil 3.140(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	211
Çizelge 3.31 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozite ait Şekil 3.142(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	212
Çizelge 3.32 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.145(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	214
Çizelge 3.33 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.148(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.	216
Çizelge 3.34 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.152(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.	219
Çizelge 3.35 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.155(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.	221
Çizelge 3.36 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM numunelerinin katmanlar boyunca sertlik değerleri (HV).	223
Çizelge 3.37 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM numunelerinin katmanlar boyunca sertlik değerleri (HV).	224
Çizelge 3.38 : Al-7,5Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).	227
Çizelge 3.39 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).	228
Çizelge 3.40 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).	230
Çizelge 3.41 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.	231
Çizelge 3.42 : FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin bölgesel olarak COF değerleri.	237
Çizelge 3.43 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-xFLG (x: ağ. %0, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.	242
Çizelge 3.44 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG (x: ağ. %0, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.	243
Çizelge 3.45 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG (x: ağ. %0, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.	245
Çizelge 3.46 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerleri.	247
Çizelge A.1 : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.	288
Çizelge A.2 : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.	296
Çizelge B.1 : Raman spektrumlarının hesaplanan sonuçları.	303
Çizelge E.1 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'e ait Şekil E.4(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.	309

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : (a) Grafit ve (b) Grafitten tek katmanlı grafen yapısının şematik gösterimi.....	4
Şekil 1.2 : Web of Science veri tabanından 'grafen' anahtar kelimesi kullanılarak elde edilen, 2013–2023 yılları arasında yayınlanan grafenle ilgili makalelere ilişkin istatistiksel veriler.....	5
Şekil 1.3 : “Aşağıdan yukarı” ve “yukarıdan aşağı” grafen üretiminin şematik görünümü.	6
Şekil 1.4 : Grafen üretiminde kullanılan yöntemler.....	6
Şekil 1.5 : Grafenin mekanik eksfoliasyon ile üretiminin şematik gösterimi.....	7
Şekil 1.6 : Kimyasal eksfoliasyonun şematik gösterimi.	7
Şekil 1.7 : Grafitin elektrokimyasal eksfoliasyon mekanizmasının şematik gösterimi.....	8
Şekil 1.8 : Brodie, Staudenmaier ve Hummer yöntemleri kullanılarak kimyasal oksidasyon yoluyla GO sentezinin şematik gösterimi... ..	9
Şekil 1.9 : Si süblimleşmesinden sonra bir SiC altlığı üzerinde epitaksiyel büyütmenin gösterimi.....	9
Şekil 1.10 : Hidrokarbon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen KBB yöntemi ve büyüme mekanizmasının şematik görünümü.	10
Şekil 1.11 : Islak bilyalı öğütme kullanılarak çok katmanlı grafitten grafen oluşturulması: (a) Dağılmış grafen tabakalarının, öğütme işleminde öğütücü bilyalar tarafından ayrıştırılması, (b) Grafen tabakalarının çözücü içinde kendiliğinden oluşması	11
Şekil 1.12 : Ark deşarj yönteminin şematik gösterimi.	12
Şekil 1.13 : MMK'larda matris malzemelerinin kullanımı	16
Şekil 1.14 : MMK'larda takviye malzemelerinin kullanımı	17
Şekil 1.15 : “Web of Science” veri tabanından 'grafen takviyeli metal matris kompozitler' anahtar ifadesi kullanılarak elde edilen, 2013–2023 yılları arasında yayınlanan ilgili makalelere ilişkin istatistiksel veriler	17
Şekil 1.16 : Alüminyumun YMK yapısı.....	18
Şekil 1.17 : Bakırın YMK yapısı	23
Şekil 1.18 : MMK'ların üretim yöntemi.....	24
Şekil 1.19 : Difüzyonla bağlanma prosesi	25
Şekil 1.20 : Karıştırmalı döküm prosesi	26
Şekil 1.21 : (a) İnfiltrasyon, (b) Basınçlı infiltrasyon prosesi.....	27
Şekil 1.22 : Fiziksel buhar biriktirme prosesi.....	27
Şekil 1.23 : Sprey (püskürterek) biriktirme prosesi.....	28
Şekil 1.24 : MMK'ların üretim yöntemleri üzerine 2018 yılından önceki son 10 yılda gerçekleştirilen araştırmalar	28

Şekil 1.25 : Grafenin metal matrisinde dağılım modelleri: (a) yatay, (b) eğimli, (c) dikey.....	32
Şekil 1.26 : Orowan döngüsü güçlendirmesinin şematik gösterimi: (a) başlangıç dislokasyon; (b) dislokasyonun engellenmesi; (c) dislokasyon döngüsü oluşumu.	33
Şekil 1.27 : Derecelendirmeye sahip doğal FDM örnekleri; (a) Dinozor kemiğinin, (b) Bambu ağacının, (c) Dişin, (d) İnsan derisinin kesit alan görüntüleri	35
Şekil 1.28 : FDM’ler için tasarım şablonu.....	35
Şekil 1.29 : FDM’lere doğru uzanan malzeme gelişimi.	36
Şekil 1.30 : Malzemelerin özelliklerinin geleneksel kompozitlerde ve FDM’lerde değişimi.	36
Şekil 1.31 : FDM’lerin sınıflandırılması; (a) gözeneklilik oluşumuna, (b) mikroyapısına ve (c) kompozisyonlarına göre.	37
Şekil 1.32 : (a) Adım adım derecelendirilmiş, (b) Sürekli derecelendirilmiş FDM. .	38
Şekil 1.33 : FDM’lerin çeşitli uygulama alanları.	39
Şekil 1.34 : FDM’lerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması.	39
Şekil 1.35 : T/M ile üretilen FDM’lerin genel akış şeması.....	41
Şekil 1.36 : Toz metalurjisi prosesinin genel akış şeması	43
Şekil 1.37 : Toz metalurjisi prosesinin kavramsal akış şeması	44
Şekil 1.38 : Kompozisyon, toz karakteristikleri, proses değişkenleri ve nihai ürün performansını içeren tetrahedron ilişkisi.....	45
Şekil 1.39 : Partiküllerin olası morfolojik şekil ve adlandırılmaları	48
Şekil 1.40 : MA sırasında toz karışımının bilya-toz-bilya çarpışması.....	49
Şekil 1.41 : Yüksek enerjili atritör tipi bilyalı değirmenin şematik gösterimi	50
Şekil 1.42 : Yüksek enerjili bir gezegensel bilyalı değirmenin şematik gösterimi ...	51
Şekil 1.43 : Yüksek enerjili bir titreşimli karıştırıcı bilyalı değirmenin şematik gösterimi.....	52
Şekil 1.44 : Toz enjeksiyon kalıplama proses aşamaları	52
Şekil 1.45 : Boru, çubuk gibi ürünlerin şekillendirilmesinde kullanılan ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi	53
Şekil 1.46 : Slip döküm prosesinin şematik gösterimi.	54
Şekil 1.47 : Geleneksel presleme aşamaları	55
Şekil 1.48 : Farklı sinterleme mekanizmalarının gösterimi.....	56
Şekil 1.49 : Katı hâl sinterleme mekanizması	57
Şekil 1.50 : Sinterleme sırasında gözenek yapısındaki değişiklikleri ifade eden sinterleme aşamasının gösterimi.	58
Şekil 1.51 : Sıvı hâl sinterleme mekanizması.....	59
Şekil 1.52 : Sıvı faz sinterlemesinde ıslatma açısının gösterimi.	59
Şekil 2.1 : FLG üretiminin gerçekleştirildiği reaktör.	75
Şekil 2.2 : FLG üretim sisteminin şematik görünümü.....	75
Şekil 2.3 : (a) Sırasıyla kullanılan ticari grafit elektrot, tüketilen katot ve anot, (b) Elde edilen FLG.....	76
Şekil 2.4 : Tozların inert ortamda hazırlanması için kullanılan kapalı ortam kutusu (glove box).	78
Şekil 2.5 : Öğütme işlemlerinin yapıldığı gezegensel tipli bilyalı öğütücü.....	78
Şekil 2.6 : Toz karıştırma cihazı.	79
Şekil 2.7 : SPEX tipi yüksek enerjili bilyalı öğütücü.	80
Şekil 2.8 : MSE marka manuel pres.	81

Şekil 2.9 : FLG takviyeli (a) Al-4,5Cu, (b) Al-4,5Cu-1,5Mg, (c) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn alaşım esaslı FDM'lerin tasarımı.	82
Şekil 2.10 : FLG takviyeli (a)Al-6Zn, (b) Al-6Zn-2Cu, (c) Al-6Zn-2Cu-2Mg alaşım esaslı FDM'lerin tasarımı.	82
Şekil 2.11 : Şekillendirilmiş Al-4,5Cu-FLG FDM numunesi.	83
Şekil 2.12 : Bağlayıcı giderme işleminin yapıldığı MSE T-1600-74-450 marka tüp fırın.	83
Şekil 2.13 : FDM'lere uygulanan bağlayıcı giderme işleminin fırın kademesi.	84
Şekil 2.14 : Sinterleme işleminin yapıldığı Protherm PZF12-105-900 marka tüp fırın.	84
Şekil 2.15 : FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lere uygulanan sinterleme işleminin fırın kademesi: (a) 590°C (b) 600°C.	85
Şekil 2.16 : FDM'lerin genel üretiminin şematik görünümü.	85
Şekil 2.17 : Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitler için sinterleme işlemi fırın kademesi: (a) Al-Zn, (b) Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu...	86
Şekil 2.18 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin (a) bağlayıcı giderme, (b) sinterleme işlemi fırın kademesi.	87
Şekil 2.19 : Al-Zn alaşım ve FLG ile takviye edilen Al-Zn ve Cu esaslı kompozitlerin genel üretiminin şematik görünümü.	87
Şekil 2.20 : Malvern Mastersizer 3000 model partikül boyut cihazı.	88
Şekil 2.21 : Micrometrics™ Tristar II marka yüzey alanı ve gözenek boyutu analiz sistemi.	89
Şekil 2.22 : Renishaw InVia marka Raman spektroskopisi cihazı.	89
Şekil 2.23 : Linseis Sta Pt 1600 marka diferansiyel termal analiz cihazı (DTA).	90
Şekil 2.24 : Bruker AXS/Discovery D8 marka X - Işınları difraktometresi.	91
Şekil 2.25 : Carl Zeiss / Gemini 300 marka taramalı elektron mikroskopu.	92
Şekil 2.26 : (a) FEI TALOS F200S - 200 kV, (b) JEOL JEM-2100 - 200kV marka geçirimli elektron mikroskopu.	92
Şekil 2.27 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM için; (a), (b) Ham HRTEM görüntüleri, (c) (b)'den elde edilen FFT görüntüsü, (d) (c)'den elde edilen IFFT görüntüsü, (e) (d)'den elde edilen mesafeye göre çevrim sayısı ($d_{Al_4C_3} = 0,83 \text{ nm} = 10,75/13$).	93
Şekil 2.28 : Arşimet ölçüm kiti.	94
Şekil 2.29 : Sinterlenen numuneler için; (a) Struers marka kesme cihazı, (b) Metkon Ecopress 100 marka bakalite alma cihazı, (c) yarı-otomatik ATM Saphir 520 marka zımparalama-partlatma cihazı.	95
Şekil 2.30 : 600°C'de 3 sa boyunca sinterlenmiş olan; (a) Al-6Zn-FLG FDM, (b) kesiti alınmış Al-6Zn-FLG FDM.	95
Şekil 2.31 : Nikon Eclipse marka optik mikroskop.	96
Şekil 2.32 : Qness Q10M marka sertlik cihazı.	96
Şekil 2.33 : FDM'lerin sertlik ölçümlerinin numune üzerindeki şematik gösterimi.	97
Şekil 2.34 : Bruker UMT 2 marka aşınma cihazı.	97
Şekil 2.35 : FDM'lerin aşınma ölçümlerinin numune üzerindeki şematik gösterimi.	98
Şekil 2.36 : Leica/DM2500 marka stereo mikroskop.	98
Şekil 2.37 : (a) Shimadzu™ AG-X marka mekanik test cihazı, (b) basma testi numunesi.	99
Şekil 3.1 : FLG'nin piknometre yoğunluk ölçüm değerleri.	100
Şekil 3.2 : FLG'ye ait XRD paterni.	101

Şekil 3.3 : FLG'nin Raman analiz sonuçları.	102
Şekil 3.4 : FLG'ye ait (a),(b)farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri; (c) EDS için seçilen bölgelerin SEM görüntüsü, (d) (c)'de belirtilen bölgelerin EDS analiz spektrumu.	103
Şekil 3.5 : FLG'ye ait farklı büyütmelerdeki (a), (b) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (c), (d) HRTEM görüntüsü.	104
Şekil 3.6 : Başlangıç tozlarının XRD paternleri: (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e) Mn.	105
Şekil 3.7 : Başlangıç tozlarının partikül boyut dağılımı: (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e)Mn.	106
Şekil 3.8 : Başlangıç tozlarının SEM görüntüsü (2000X): (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e)Mn.	107
Şekil 3.9 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu; (b) Al-4,5Cu +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	108
Şekil 3.10 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu-1,5Mg; (b) Al-4,5Cu-1,5Mg +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu-1,5Mg + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu-1,5Mg + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	108
Şekil 3.11 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn; (b) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	109
Şekil 3.12 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn; (b) Al-6Zn +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-6Zn + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	110
Şekil 3.13 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn-2Cu; (b) Al-6Zn-2Cu +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-6Zn-2Cu + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn-2Cu + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	110
Şekil 3.14 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn-2Cu-2Mg; (b) Al-6Zn-2Cu-2Mg +ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-6Zn-2Cu-2Mg+ ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn-2Cu -2Mg + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	111
Şekil 3.15 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Cu ; (b) Cu+ağ. % 0,1 FLG; (c) Cu+ ağ. %0,3 FLG ve (d) Cu+ ağ. %0,5 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	112
Şekil 3.16 : 7 sa MA ile elde edilen (a) Cu ; (b) Cu+ağ. % 0,1 FLG; (c) Cu+ ağ. %0,3 FLG ve (d) Cu+ ağ. %0,5 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	113
Şekil 3.17 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. (a) %0,1 ve (b) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi.	113
Şekil 3.18 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. (a) %0,1 ve (b) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi.	114
Şekil 3.19 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları.	115
Şekil 3.20 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları.	116

Şekil 3.21 : (a) 0, (b)2, (c)4 ve (d) 8 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları.....	117
Şekil 3.22 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları.....	118
Şekil 3.23 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7. ..	119
Şekil 3.24 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.....	119
Şekil 3.25 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3, (d) %0,7.....	120
Şekil 3.26 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7. ..	121
Şekil 3.27 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7. ..	121
Şekil 3.28 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.....	122
Şekil 3.29 : Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	123
Şekil 3.30 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	124
Şekil 3.31 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	124
Şekil 3.32 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	125
Şekil 3.33 : Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.	126
Şekil 3.34 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	126
Şekil 3.35 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	127
Şekil 3.36 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	127
Şekil 3.37 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.	128
Şekil 3.38 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	129
Şekil 3.39 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	129
Şekil 3.40 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.....	130
Şekil 3.41 : Takviyesiz Cu (a) ve ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin (b) 5 ve (c) 7 sa MA süresine bağlı olarak XRD paternleri.	131

Şekil 3.42 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların DSC eğrileri.	132
Şekil 3.43 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG içeriğine sahip Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların DSC eğrileri.....	132
Şekil 3.44 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların DSC eğrileri.....	133
Şekil 3.45 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı tozların DSC eğrileri.	134
Şekil 3.46 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı tozların DSC eğrileri.....	135
Şekil 3.47 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı tozların DSC eğrileri.....	135
Şekil 3.48 : 0 ve 8 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının DSC eğrileri.....	136
Şekil 3.49 : 0 ve 2 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının DSC eğrileri.....	137
Şekil 3.50 : 0 ve 8 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının DSC eğrileri.....	137
Şekil 3.51 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.....	139
Şekil 3.52 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	140
Şekil 3.53 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.....	140
Şekil 3.54 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	141
Şekil 3.55 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.....	142
Şekil 3.56 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.....	142
Şekil 3.57 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.....	143
Şekil 3.58 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	144
Şekil 3.59 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.....	144
Şekil 3.60 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	145

Şekil 3.61 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı tozların farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.	146
Şekil 3.62 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	146
Şekil 3.63 : Harmanlanmış Al-7,5Zn tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.	147
Şekil 3.64 : Harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	147
Şekil 3.65 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri: (a) 0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.	148
Şekil 3.66 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	149
Şekil 3.67 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri: (a) 0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.	150
Şekil 3.68 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	150
Şekil 3.69 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	151
Şekil 3.70 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri: (a) 0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.	152
Şekil 3.71 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	152
Şekil 3.72 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	153
Şekil 3.73 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozların farklı öğütme sürelerine bağlı olarak SEM görüntüleri: (a,c): 5 sa, (b-d) 7 sa.	154
Şekil 3.74 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu kompozit tozlarının (a), (b) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (c), (d), (e) (a)'daki kırmızı kareden elde edilen HRTEM görüntüleri; (f) SAD modeli	157
Şekil 3.75 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg kompozit tozlarının (a), (b) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (c), (d), (e) (b)'deki kırmızı kareden elde edilen HRTEM görüntüleri.	158
Şekil 3.76 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG ile takviye edilen Cu kompozit tozlarının (a) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (b), (c) (a)'daki kırmızı kareden elde edilen farklı büyütme ölçeklerindeki HRTEM görüntüleri; (d) SAD modeli	159
Şekil 3.77 : (a) 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu tozlarının HAADF –STEM görüntüsü; (b) (c) Cu, (d) C ve (e) O elementlerinin üst üste bir şekilde TEM-EDS eşleşmelerinin görüntüsü.	160

Şekil 3.78 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin XRD paterni.	165
Şekil 3.79 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paterni.	165
Şekil 3.80 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin XRD paterni.	166
Şekil 3.81 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin XRD paterni.	166
Şekil 3.82 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin XRD paterni.	167
Şekil 3.83 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paterni.	167
Şekil 3.84 : Al-7,5Zn alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.....	168
Şekil 3.85 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.....	169
Şekil 3.86 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.....	170
Şekil 3.87 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.....	170
Şekil 3.88 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.....	171
Şekil 3.89 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.	172
Şekil 3.90 : (a) Takviyesiz Cu; ağ. %0,5 FLG takviyeli (b) 5 sa ve (c) 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli kompozitlerin XRD paternleri.....	173
Şekil 3.91 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	174
Şekil 3.92 : Ağ. (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	175
Şekil 3.93 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	175
Şekil 3.94 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	176
Şekil 3.95 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	177
Şekil 3.96 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	177
Şekil 3.97 : FLG içeriklerinin Al-6Zn esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	178
Şekil 3.98 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri. ..	179
Şekil 3.99 : FLG içeriklerinin Al-6Zn-2Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	179
Şekil 3.100 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	180
Şekil 3.101 : FLG içeriklerinin Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	181
Şekil 3.102 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	182
Şekil 3.103 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	182
Şekil 3.104 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	183

Şekil 3.105 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.....	184
Şekil 3.106 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	184
Şekil 3.107 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	185
Şekil 3.108 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) Mg, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	186
Şekil 3.109 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	186
Şekil 3.110 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	187
Şekil 3.111 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) Mg, (e) Mn (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	187
Şekil 3.112 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	188
Şekil 3.113 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	188
Şekil 3.114 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	189
Şekil 3.115 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	189
Şekil 3.116 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	190
Şekil 3.117 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Cu, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	191
Şekil 3.118 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	191
Şekil 3.119 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	192
Şekil 3.120 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Cu, (e) Mg (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	192
Şekil 3.121 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin aydınlık alan TEM görüntüleri: (a) Düşük büyütme; (b) ve (c) Yüksek büyütme.....	193
Şekil 3.122 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin aydınlık alan TEM görüntüleri: (a) ve (c) Düşük; (b) (a)'daki kırmızı kareden alınan yüksek büyütme.....	194
Şekil 3.123 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen Al-7,5Zn alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	196
Şekil 3.124 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağı. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	197

Şekil 3.125 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	198
Şekil 3.126 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa; (200X): (e) 0 sa, (f) 2 sa, (g) 4 sa ve (h) 8 sa.....	199
Şekil 3.127 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	200
Şekil 3.128 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	201
Şekil 3.129 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b) 0 sa, (d) 2 sa (f) 4 sa ve (h) 8 sa. ..	202
Şekil 3.130 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b) 0 sa, (d) 2 sa, (f) 4 sa ve (h) 8 sa.....	203
Şekil 3.131 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b) 0 sa, (d) 2 sa, (f) 4 sa ve (h) 8 sa.....	204
Şekil 3.132 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.....	205
Şekil 3.133 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.	206
Şekil 3.134 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	206
Şekil 3.135 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	207
Şekil 3.136 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.	208
Şekil 3.137 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitinin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirlenen noktaların EDS analiz spektrumu.	208
Şekil 3.138 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri.	209
Şekil 3.139 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.	210

Şekil 3.140 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.	210
Şekil 3.141 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 2000X ve (b) 5000X.....	211
Şekil 3.142 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.	212
Şekil 3.143 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	213
Şekil 3.144 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.	213
Şekil 3.145 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.....	214
Şekil 3.146 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg (e) Cu (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	215
Şekil 3.147 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 2000X ve (b) 5000X.....	215
Şekil 3.148 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.	216
Şekil 3.149 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg, (e) Cu, (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	217
Şekil 3.150 : 5 ve 7 sa MA için, sırasıyla, (a-b) ağ. %0,1 (c-d) ağ. %0,3 (e-f) ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri.	218
Şekil 3.151 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 400X (b) 800X.	218
Şekil 3.152 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	219
Şekil 3.153 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı (a) SEM görüntüsü, (b) Cu, (c) C, elementel haritalama analizleri ve (d) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	220
Şekil 3.154 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 400X (b) 800X.	220

Şekil 3.155 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	221
Şekil 3.156 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı (a) SEM görüntüsü, (b) Cu, (c) C, elementel haritalama analizleri ve (d) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	222
Şekil 3.157 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.	223
Şekil 3.158 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.	224
Şekil 3.159 : Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.	227
Şekil 3.160 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.	229
Şekil 3.161 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.	230
Şekil 3.162 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.	232
Şekil 3.163 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	234
Şekil 3.164 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	234
Şekil 3.165 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	235
Şekil 3.166 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	235
Şekil 3.167 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	236
Şekil 3.168 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	236
Şekil 3.169 : FLG takviyeli Al-Cu (a-b), Al-Cu-Mg (c-d) ve Al-Cu-Mg-Mn (e-f) esaslı FDM'lerin aşınma izlerinin elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: (a-c-e) Yüksek FLG, (b-d-f) Düşük FLG içerik bölgesi. ..	237
Şekil 3.170 : FLG takviyeli Al-Zn (a-b), Al-Zn-Cu (c-d) ve Al-Zn-Cu-Mg (e-f) esaslı FDM'lerin aşınma izlerinin elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: (a-c-e) Yüksek FLG, (b-d-f) Düşük FLG içerik bölgesi. ..	238
Şekil 3.171 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM için farklı büyütmelerde aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri: (a-c) Yüksek FLG, (b-d) Düşük FLG içerik bölgesi.	239
Şekil 3.172 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM için farklı büyütmelerde aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri: (a-c) Yüksek FLG, (b-d) Düşük FLG içerik bölgesi.	240
Şekil 3.173 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	241
Şekil 3.174 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağ.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.	242
Şekil 3.175 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn-Mg esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	243

Şekil 3.176 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağ.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.	244
Şekil 3.177 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	244
Şekil 3.178 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağ.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2. .	245
Şekil 3.179 : (a)5 ve (b)7 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	247
Şekil 3.180 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	248
Şekil 3.181 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	249
Şekil 3.182 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	249
Şekil 3.183 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	250
Şekil 3.184 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	250
Şekil 3.185 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	251
Şekil 3.186 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	252
Şekil 3.187 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	252
Şekil 3.188 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	253
Şekil 3.189 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	253
Şekil 3.190 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.	254
Şekil 3.191 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	254
Şekil 3. 192 : Basma testinden sonra FLG takviyeli FDM'lerin gösterimi : (a) FLG takviyeli Al-Cu; (b) FLG takviyeli Al-Cu-Mg; (c) FLG takviyeli Al-Zn-Cu; (d) FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg.	255
Şekil 3.193 : Al-7,5Zn-xFLG-4sa (x=ağ.%0, 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.	256
Şekil 3.194 : Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	257

Şekil 3.195 : Al-7,5Zn2,5Mg-xFLG-4sa (x=ağ. %0; 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.	258
Şekil 3.196 : Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.	258
Şekil 3.197 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG-4sa (x=ağ. %0; 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.	259
Şekil 3.198 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %uzama değerlerinin değişimi.	260
Şekil B.1 : Reaktörün farklı bölgelerinden toplanan FLG’lerin Raman spektrumları.	302
Şekil B.2 : Reaktörün anot bölgesinden toplanan FLG, aseton ve etil alkolde sonikasyona maruz kalan FLG’lerin Raman spektrumları.	302
Şekil B.3 : Reaktörden toplanan FLG ve ticari grafinin Raman spektrumları.	303
Şekil C.1 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al+ağ. % 0,1 FLG; (b) Al+ ağ. %0,3 FLG ve (c) Al + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.	304
Şekil C.2 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al esaslı tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.	304
Şekil C.3 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al esaslı tozların DSC eğrileri.	305
Şekil C.4 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.	305
Şekil D.1 : FLG içeriklerinin Al esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	306
Şekil D.2 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al esaslı FDM’nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	306
Şekil D.3 : FLG takviyeli Al esaslı FDM’nin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.	307
Şekil D.4 : FLG takviyeli Al esaslı FDM’nin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.	307
Şekil D.5 : FLG içerik bölgelerinden Al esaslı FDM’nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	307
Şekil E.1 : TG içeriklerinin Al-4,5Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.	308
Şekil E.2 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin 50X büyütmede optik görüntüleri.	308
Şekil E.3 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1500X.	309
Şekil E.4 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)’da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.	309
Şekil E.5 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin XRD paterni.	309
Şekil E.6 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.	310
Şekil E.7 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’nin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.	310
Şekil E.8 : TG içerik bölgelerinden Al-4,5Cu esaslı FDM’nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.	310

Şekil F.1 : Al-7,5Zn-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.	311
Şekil F.2 : Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.	311
Şekil F.3 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.	312



GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM VE BAKIR ESASLI YENİLİKÇİ MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, elektrik ark deşarj yöntemi (EAD) ile sentezlenen birkaç katmanlı grafenin (FLG), toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı matrise takviye edilip, FLG takviyeli Al-Zn ve Cu esaslı kompozit ve Al-Cu ve Al-Zn esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş yenilikçi malzemelerin üretimi, bu malzemelerin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, öncelikle grafenin birkaç katmanlı ve yüksek saflıkta EAD ile üretimi sağlanmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan FLG, belirli oranlarda (ağ. %0-0,1-0,2-0,3-0,5-0,7) Al-Cu ve Al-Zn esaslı matrise mekanik alaşımlama (MA) yoluyla ilave edilmiştir. Üretilen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompozit tozlar artan FLG içeriğine göre altı katman olacak şekilde tasarlanmış, tek eksenli pres yardımıyla istiflenerek sıkıştırılmış ve ardından sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Relatif yoğunlukları %96 ile %98 arasında değişen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM), artan FLG içeriğine göre, ilk katmandan son katmana doğru sertlik değerlerinde %50'ye varan oranlarda artış görülmüştür. Ayrıca, FLG içeriğinin yoğun olduğu bölgelerde, grafenin yağlayıcı etkisine bağlı olarak sürtünme katsayısında (COF) iyileşmeler tespit edilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin; optik mikroskop (OM), taramalı (SEM) ve geçirimli elektron (TEM) mikroskopuyla gerçekleştirilen mikroyapısal incelemelerinde ve X-ışını kırınım (XRD) analizlerinde tespit edilen Al_4C_3 fazının matris yapısında homojen dağılımı matristen yük aktarımı sağlayarak mekanik özelliklerde iyileşmeye sebep olduğu düşünülmüştür. Ayrıca, her katman boyunca artan sertlik değerlerinin, sünek faza takviye edilen FLG'nin dislokasyon yoğunluğunun ve tane boyutu küçültmesinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

EAD ile sentezlenen FLG, belirli oranlarda (ağ.%0-0,5-1-2) Al-Zn esaslı matrislere harmanlanmış (as-blended) ve farklı sürelerde (2, 4 ve 8 sa) gerçekleştirilen MA yardımıyla takviye edilmiş ve bu tozlar tek eksenli pres yardımıyla sıkıştırılarak, sinterleme işlemine maruz bırakılmıştır. Relatif yoğunlukları öğütme sürelerine göre %88 ve %99 arasında değişen FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin, OM ve SEM ile gerçekleştirilen mikroyapısal incelemelerinde FLG'nin matris yapısında homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak, 4 sa MA ile üretilen ağ.%2 FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozit için 155 HV sertlik değerine ulaşılmış ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımına kıyasla sertlik değerinde %63,15 oranında artış görülmüştür.

EAD ile sentezlenen FLG, belirli oranlarda (ağ.%0,0,1-0,3-0,5) Cu esaslı matrise farklı sürelerde (5 ve 7 sa) gerçekleştirilen MA yardımıyla takviye edilmiş ve bu tozlar tek eksenli pres yardımıyla sıkıştırılarak, sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Relatif yoğunlukları %88 ile %94 arasında değişen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin, OM ve SEM ile gerçekleştirilen mikroyapısal incelemelerinde basınçsız sinterlemeye bağlı olarak porozite tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 5 sa MA sonrası matris

yapısında deformasyonla göze çarpmıştır. Mevcut bu deformasyonun, matris yapısında FLG'nin aglomerasyonundan kaynaklı olabileceği üzerinde durulmuştur. En yüksek sertlik değerine (101 HV) 7 sa MA sonrası ağ. %0,1 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitle ulaşılmıştır. Ayrıca takviyesiz Cu ile karşılaştırıldığında, 7 sa MA sonrasında sinterlenmiş olan ağ. %0,3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerinde yaklaşık %31,8 oranında bir artış elde edilmiştir. Fakat, artan FLG içeriği ile Cu ve FLG arasındaki bağın zayıflığı ile ilgili olduğu düşünülen, ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu kompozitlerin sertlik değerinde önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinde azalma gözlenmiştir. Grafenin yağlayıcı etkisinden dolayı, Cu esaslı kompozitlerin aşınma özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum ve Alaşımları, Bakır, Metal Matris Kompozitler, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler, Grafen, Toz Metalurjisi



DEVELOPMENT OF GRAPHENE-REINFORCED ALUMINUM AND COPPER BASED INNOVATIVE MATERIALS PRODUCTION BY POWDER METALLURGY

SUMMARY

In this study, it is aimed that few-layered graphene (FLG) synthesized by electric arc discharge (EAD) was reinforced to Al-Cu, Al-Zn and Cu based matrix by powder metallurgy (P/M) and FLG reinforced Al-Zn and Cu based composites and Al-Cu and Al-Zn based functionally graded innovative materials, investigating the structural, mechanical and tribological properties of these materials.

For this purpose, firstly, graphene was produced with few layers and high purity by EAD. The FLG, which is used as a reinforcement material, is added to Al-Cu and Al-Zn based matrix at various amounts (0-0.1-0.2-0.3-0.5-0.7 wt%) by mechanical alloying (MA). The produced FLG reinforced Al-Cu and Al-Zn based composite powders were designed to be as six layers according to the increasing FLG content, were compacted by stacking via an uniaxial press and, then subjected to sintering process. The relative density of the FLG reinforced Al-Cu and Al-Zn based functionally graded materials (FGM) changes from 96% to 98% and these FGMs showed an increase up to 50% in hardness values from the first layer to the last layer according to the increasing FLG content. Moreover, in regions with high FLG content, improvements in the coefficient of friction (COF) were determined due to the lubricating effect of graphene. The homogeneous distribution of the Al_4C_3 phase detected in the microstructural examinations performed by optical (OM), scanning (SEM) and transmission electron (TEM) microscopy and X-ray diffraction (XRD) analyzes in the matrix structure was considered to cause an improvement in mechanical properties by providing load transfer from the matrix. In addition, it was determined that increasing hardness values along each layer caused an increase in dislocation density and grain size reduction of the FLG reinforced to the ductile phase.

FLG synthesized by EAD was reinforced to the Al-Zn based matrix via MA with different milling durations (0, 2, 4 and 8 h) performed at various amounts (0-0.5-1-2 wt%) Al-Zn based matrix and these composite powders were compacted by an uniaxial press and then exposed to the sintering process. In the microstructural examinations of FLG reinforced Al-Zn based composites, whose relative density vary between 88% and 99% according to the milling time and it was observed that FLG was homogeneously distributed in the matrix structure. Accordingly, the hardness value of 2 wt% FLG reinforced Al-Zn-Mg-Cu based composite produced with 4h-MA was reached 155 HV and the hardness value increased by 63.15% compared to the Al-Zn-Mg-Cu alloy.

FLG synthesized by EAD was reinforced to the Cu-based matrix at various amount (0,0.1-0.3-0.5 wt%) via MA performed at different milling times (5 and 7 h), and these composite powders were compacted by an uniaxial press and then subjected to the sintering process. The porosity was determined due to pressureless sintering in the

microstructural examinations which was performed by OM and SEM of FLG reinforced Cu based composites with relative density vary on 88% to 94%. Moreover, after 5h-MA, the deformation was observed in the matrix structure. It has been emphasized that this deformation may be caused by the agglomeration of the FLG in the matrix structure. It was achieved the highest hardness value (101 HV) for the 0.1 wt% FLG reinforced Cu-based composite after 7h MA.

Keywords: Aluminum and Aluminum Alloys, Copper, Metal Matrix Composites, Functionally Graded Materials, Graphene, Powder Metallurgy



1. GİRİŞ

Modern teknoloji geliştikçe, malzemeleri anlama ve nihai ihtiyaca yönelik olarak değiştirme kabiliyeti, zamanla bir temele oturmaktadır. Günümüzde araştırmacılar ve mühendisler; maliyet, çevre, raf ömrü gibi etkenleri göz önünde bulundurarak yenilikçi malzemelerin üretiminin ve kullanımının önemi üzerinde durmaktadır. Özellikle geleneksel alaşımlar kullanılarak üretilen mühendislik malzemelerinin daha iyi bir performans gösterebilmesi için, ileri nesil malzemelere yönelik artan bir ihtiyacın mevcut olduğu görülmektedir. Bu süreçte kompozit malzemeler, tüm mühendislik alanların ihtiyaçlarını karşılayarak, önemli bir rol üstlenmektedir (Pasha ve Rajaprakash, 2022). Özellikle kompozitlerde takviye olarak kullanılan nanomalzemelerin keşfiyle birlikte, nihai malzemelerin özellikleri müthiş bir gelişme göstermiştir. Karbon nanotüp (CNT)(Iijima, 1991) ve grafen (Novoselov ve diğ., 2004) gibi karbon yapılı nano malzemeler; üstün mekanik, elektriksel ve termal özelliklerle birlikte malzeme alanında devrim yaratmıştır (Esawi ve diğ., 2009; Morsi ve Esawi, 2007). Bu özellikleri üstünde durularak, kompozit yapılar için ideal bir takviye malzemesi olarak, grafen kullanılmaya başlanmıştır. Grafen takviyeli metal matris kompozitler (MMK), üzerine araştırma çalışmaları, 2011 yılından itibaren etkisini göstermiştir (Bartolucci ve diğ., 2011; Jagannadham, 2011; Singh ve diğ., 2011). Fakat mevcut literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, grafen takviyeli polimer matris esaslı kompozitler kadar detaylı yoğunlukta olmadığı görülmektedir. Özellikle, grafenin metal matris yapısında homojen olarak dağıtılmasına yönelik üretim çalışmalarının daha detaylı bir şekilde geliştirilmesi gerekmektedir (Konakov ve diğ., 2020; Saboori ve diğ., 2018).

MMK'lar, endüstri uygulamalarının gereksinimlerini yeterince karşılamaktadır fakat modern teknolojinin gelişim süreciyle birlikte, malzeme zenginliğinin artması ve müşteri ihtiyaçlarının buna bağlı olarak değişmesi üzerine, malzeme tasarımında artan bir gereksinim mevcuttur (Kawasaki ve Watanabe, 1997). Bu tür durumların üstesinden gelmek için, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) gibi yeni nesil malzeme tasarımları ön plana çıkmaktadır. Farklı FDM'lerin geliştirilmesi, tek bir

malzemede bulunmayan özelliklerin ve bir malzemede geliştirilmesi ihtiyacı ile ortaya çıkmaktadır (Xu ve diğ., 2004). FDM’lerde takviyenin hacmi ve dağılımı en iç kısımdan en dış kısma doğru değişmektedir. Böylece sürekli değişen özellikler ve kontrollü, homojen olmayan bir mikroyapı sağlanmaktadır (Kumar ve diğ., 2021). Bu tür malzeme tasarımına sahip FDM’ler, daha yüksek hacimsel tokluğa ve mekanik özelliklere ihtiyacın olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Melgarejo ve diğ., 2006, 2008; Udupa ve diğ., 2015). Bugünlerde FDM’ler, mühendislik ve bilimin birçok farklı alanında, özellikle otomotiv, uçak ve savunma sanayinde, geniş uygulama yelpazesine sahip en son gelişmiş malzeme sınıfı olarak gün geçtikçe gelişmektedir.

Doğada çok bulunan ve kolayca elde edilebilen, bununla birlikte diğer kolay bulunan ve düşük yoğunluklu alaşımlara (Mg, Be veya Ti alaşımları) kıyasla daha ucuz olan alüminyum (Al) ve Al alaşımları; yüksek rijitlik, süneklik, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek ısı mukavemet, kararlılık, iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi mükemmel ve tercih edilen özelliklerinden dolayı endüstride ve araştırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılırlar (Chen ve diğ., 2018; Md Ali ve diğ., 2021) Al ve alaşımları, otomobil ve uçak endüstrisinde kullanılan temel malzemelerden biridir (Dursun ve Soutis, 2014; Zhang ve diğ., 2018). Al ve farklı Al alaşımları ve kompozitler, kompozit üretimi için en yaygın kullanılan malzemelerdir (Deuis ve diğ., 1997). Otomotiv, uçak gibi uygulamalarda, genellikle, parçalar çeşitli mekanik ve termal yüklere maruz kalmaktadır. Bununla birlikte, özellikle Al esaslı kompozit malzemelerin bu tür yük durumlarında karşılayamadığı gereksinimler için, Al esaslı FDM’ler iyi bir malzeme tercihi olabilmektedir. Farklı tasarımlara sahip Al esaslı FDM’ler, tercih edilen spesifik ihtiyaçlara yönelik olarak, gelecek çalışmalarda potansiyel uygulama alanları doğurma kabiliyeti yüksek yenilikçi malzemelerdir.

Al esaslı MMK ve FDM’lerin üretiminde; katı (toz metalurjisi, SPS), sıvı (döküm, infiltrasyon) ve gaz hâlde (kimyasal/fiziksel buhar biriktirme) gerçekleştirilen birçok yöntem kullanılmaktadır. Toz metalurjisi (T/M), MMK ve FDM üretimi için en elverişli ve en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Özellikle kontrol edilebilir oluşu, takviye malzemelerinin homojen dağılım ve vasyasyonlarını optimize edebilme koşulları ve maliyet açısından bu tür yenilikçi malzemeler için endüstriyel koşullarda ideal bir yöntem olarak düşünülebilir.

1.1 Tezin Amacı

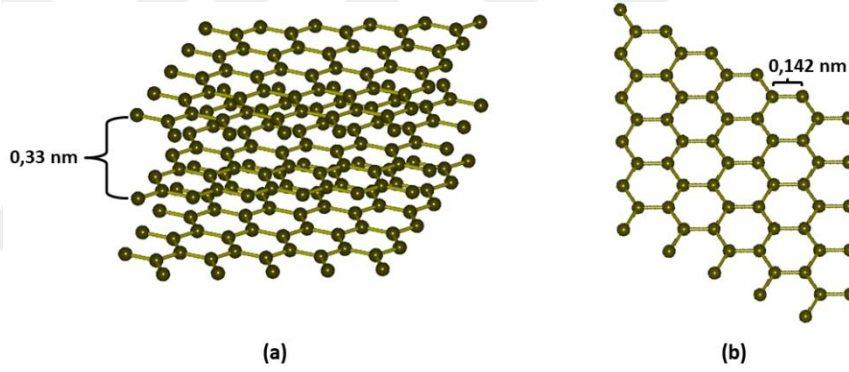
Bu tez çalışmasının amacı; kendi laboratuvarlarımızda elektrik ark deşarj yöntemi (EAD) ile ürettiğimiz yüksek saflıktaki birkaç katmana sahip grafeni, alüminyum (Al) alaşım ve bakır (Cu) esaslı matris yapısına toz metalurjisi yöntemi ile takviye ederek, yeni nesil malzeme tasarımını gerçekleştirmektir. Özellikle, havacılık endüstrisinde uçak gövde yapılarında yaygın olarak kullanılan 2xxx (Al-Cu) ve 7xxxx (Al-Zn) alaşım serileri, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ve kompozit yapılar için matris olarak bu tez çalışmasında seçilmiştir. Bu kapsama yönelik olarak; ilk olarak, EAD yöntemiyle yüksek saflıkta birkaç katmanlı grafen (FLG) üretilmiştir. Daha sonra sentezlenen FLG, belirli oranlarda (ağ.%0-%2), mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile Cu, Al-Cu ve Al-Zn esaslı tozlara takviye edilmiştir. FLG ile takviye edilen kompozit tozlarından, Al-Cu ve Al-Zn esaslı tozları, altı katman olacak şekilde istiflenerek tek eksenli manuel pres yardımıyla şekillendirilmiş ve ardından sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece, artan FLG içeriğine bağlı olarak, FDM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin yapısal ve mekanik özellikleri incelenerek, FDM tasarımıyla birlikte takviye malzemesi olan FLG'lerin matrisle olan etkileşimi belirlenmiştir.

Tez çalışmasının bir diğer kısmında ise, T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-Zn ve Cu esaslı kompozit malzemelerin; yapısal, fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. FLG takviye içeriğinin matriste dağılımı ve MA süresinin bu özellikleri ne şekilde etkilediğine dair çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, belirli oranlarda FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirmek üzerine ön çalışmalar yapılarak, EAD ile üretilen FLG'nin Cu matrisi üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

1.2 Grafen

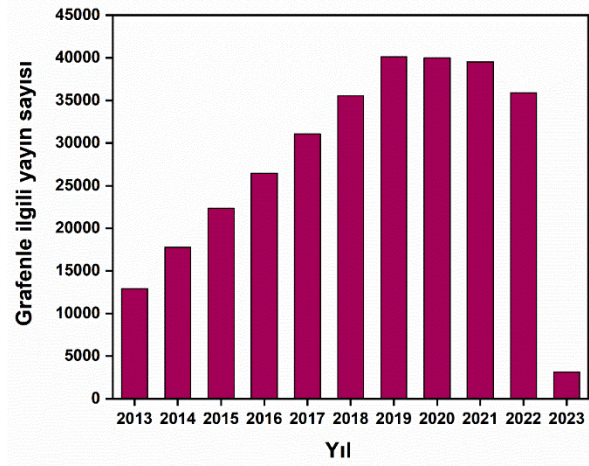
Grafen; iki boyutlu (2D) bir bal peteği kafesine sıkıca paketlenmiş, sp^2 hibritleştirilmiş düz karbon atomlarının tek tabakasına verilen addır. (Edwards ve Coleman, 2013; Geim ve Novoselov, 2010). Grafende, C-C bağ mesafesi yaklaşık 0,142 nm (1,42 Å) ve katman yüksekliği (kalınlığı) yaklaşık 0,33 nm (3,3 Å)'dir (Şekil 1.1) (Adetayo ve Runsewe, 2019). Grafen, gelecekteki uygulamalara yönelik olarak, yüksek özgül yüzey alanı (2630 m²/g)(Zhu ve diğ., 2010), yüksek elastisite modülü modülü(~1

TPa)(Lee ve diğ., 2008), yüksek elektrik iletkenliği ($\sim 6 \times 10^{-5} \text{ S m}^{-1}$) (Castro Neto ve diğ., 2009) ve mükemmel termal iletkenlik ($5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)(Balandin ve diğ., 2008) gibi bir takım benzersiz özelliklere sahiptir. Grafenin kovalent bağlı yapısı; çelikten daha yüksek bir gerilme mukavemetine ve kimyasal reaksiyonlara karşı yüksek bir esneklik ve oksijene karşı fiziksel bir bariyer sağlamaktadır (Banks ve Brownson, 2018). Bununla birlikte, grafenin atomik ince yapısına bağlı olarak; tek katmanlı grafen, %97'lik bir optik şeffaflığa sahipken, birkaç katmana sahip grafenin ise optik şeffaflığı $>80\%$ 'e kadar düşmektedir (Khrapach ve diğ., 2012). Grafen ailesi; tek katmanlı grafen (SLG), iki katmanlı grafen (BLG), birkaç katmanlı grafen (FLG), çok katmanlı grafen (MLG), grafen nanoplakalar (GNP'ler), grafen oksit (GO), indirgenmiş GO (rGO), fonksiyonelleştirilmiş grafen (FG), grafen nano şeritler (GNR'ler) ve GO nano şeritler (GONR'ler) olarak sınıflandırılabilir (Bianco ve diğ., 2013; Johnson ve diğ., 2015; Naseer ve diğ., 2019).



Şekil 1.1 : (a) Grafit ve (b) Grafitten tek katmanlı grafen yapısının şematik gösterimi.

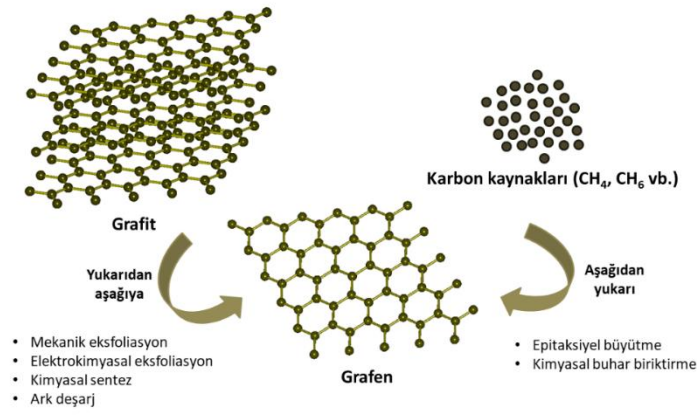
Şekil 2.1; “Web of Science” veritabanında 'grafen' anahtar sözcüğü kullanılarak elde edilen istatistiksel araştırmaya göre, 2013–2023 yılları arasında grafenle ilgili konularda yayınlanan dergi makalelerinin sayısının yaklaşık olarak 300000'i aştığını göstermektedir. Mevcut istatistiksel veride göze çaracak şekilde olan bu mevcut artış, farklı alanlarda grafen ailesine mensup malzemelerle ilgili çalışmalarda önemli ölçüde gelişme olduğunu söylemektedir.



Şekil 1.2 : Web of Science veri tabanından 'grafen' anahtar kelimesi kullanılarak elde edilen, 2013–2023 yılları arasında yayınlanan grafenle ilgili makalelere ilişkin istatistiksel veriler (Arama tarihi: 16 Şubat, 2023).

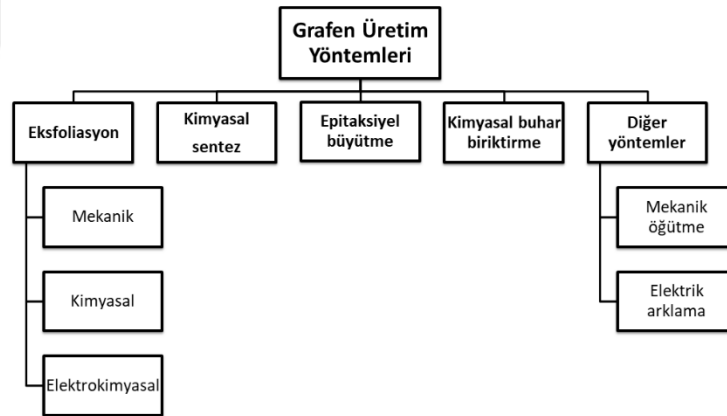
1.2.1 Grafen üretim yöntemleri

Grafen, birçok yöntemle başarılı bir şekilde üretilmektedir. Mikro-mekanik-kimyasal eksfoliyasyon, kimyasal buhar biriktirme (CVD), grafen oksidin sıvı faz indirgenmesi (kimyasal sentez) ve epitaksiyel büyüme, grafenin sentetik üretim yöntemlerindendir. Grafen üretimi, yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya bir yaklaşım olarak gruplanmaktadır (Şekil 1.3). Yukarıdan aşağıya yaklaşımlar, tek grafen tabakaları elde etmek için istiflenmiş grafit katmanlarını ayırmayı içerirken; aşağıdan yukarı yöntemler ise alternatif karbon içeren kaynaklardan grafen sentezlenmeyi kapsamaktadır. Yukarıdan aşağı yöntemler için istiflenmiş tabakaların ayrılması; nispeten düşük tabakalar arası bağlanma enerjisine rağmen tabakaları bir arada tutan Van der Waals kuvvetlerinin üstesinden gelmesidir. Bu alandaki zorluklar, tabakalara zarar vermeden onları etkili bir şekilde ayırmayı ve tabakalar eksfoliye olurken topaklaşmasını önlemeyi içermektedir. Genel olarak, bazı yukarıdan aşağıya yöntemler yüksek oranda ölçeklenebilir ve yüksek kaliteli ürünler üretmektedir, fakat tutarlı özelliklere sahip ürünler oluşturmada güçlükleri mevcuttur. Aşağıdan yukarı yöntemlerde ise, iyi kalitede malzeme üretmek için yüksek seviyelerde grafitizasyon yapılmalıdır; bu nedenle bu yöntemler genellikle yüksek sıcaklık gerektirmektedir. Aşağıdan yukarıya yöntemler, neredeyse hatasız ve geniş yüzey alanına sahip grafen üretebilse de, genellikle yüksek üretim maliyeti ve karmaşık proses kurulumu gerektirmektedir (Edwards ve Coleman, 2013; Lee ve diğ., 2019).



Şekil 1.3 : “Aşağıdan yukarı” ve “yukarıdan aşağı” grafen üretiminin şematik görünümü.

Yukarıdan aşağı olarak; mekanik, kimyasal ve elektrokimyasal eksfoliasyon, kimyasal sentez, ark deşarj yöntemleri ve aşağıdan yukarı olarak ise; epitaksiyel büyüme ve kimyasal buhar biriktirme yöntemi gösterilebilir. Şekil 1.4’de, grafen üretim yöntemleri; eksfoliasyon, kimyasal sentez, epitaksiyel büyüme, kimyasal buhar biriktirme ve diğer yöntemler başlıkları altında sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.4 : Grafen üretiminde kullanılan yöntemler (Mohan ve diğ., 2018).

1.2.1.1 Eksfoliasyon

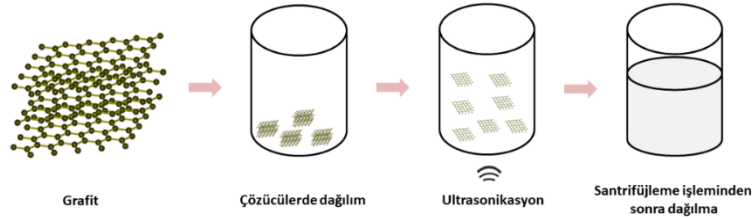
Grafen, mekanik bir şekilde ilk olarak 2004 yılında eksfoliye olmuştur (Novoselov ve diğ., 2004). Mikromekanik yöntemin kendisi oldukça basittir ve herhangi bir özel ekipman olmadan yapılabilmektedir. Şekil 1.5’de görüldüğü üzere, bir yapışkan bant parçası üzerine yerleştirildikten sonra, grafitin yüzeyi soyulur. Banta yapışan grafit tabakaları; kristalin düzlemi boyunca belirli atomik düz yüzeyler bırakarak, düzlemde ayrılmaktadır. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ve taramalı tünelleme mikroskopisinde (TTM) uygun yüzeyler elde etmek için bu yöntem kullanılmaktadır.

Mikromekanik ayrıştırma ile elde edilen ince taneciklerin, birkaç tabakaya ve hatta tek katmanlı grafene kadar, ardışık olarak daha ince numunelere bölünebileceği fark edilmektedir (Whitener Jr ve Sheehan, 2014).



Şekil 1.5 : Grafenin mekanik eksfoliasyon ile üretiminin şematik gösterimi.

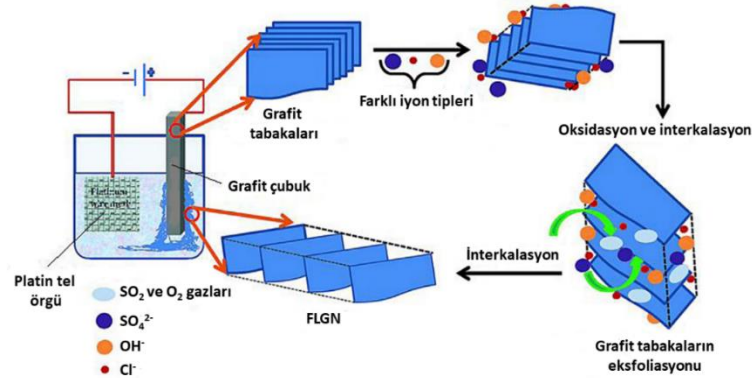
Sıvı fazda gerçekleşen kimyasal eksfoliasyon, farklı sıvı ortamlarında ultrasonikasyon veya tek ve birkaç katmanlı grafen tabakalarını oluşturmak için kesme kuvvetleri yardımıyla grafitin eksfoliasyona uğratılma işlemidir (Şekil 1.6). Grafenin eksfoliasyon olabilmesi için, grafitin sahip olduğu Van der Waals bağlarının üstesinden gelmek gerekmektedir (Parvez ve diğ., 2015). Grafenin yüzey enerjisi $46,7 \text{ mN m}^{-1}$ olarak kabul edilmektedir. Buna göre, grafen katmanı ve çözücüler arasındaki arayüzey gerilimini minimize etmek için, benzer yüzey enerjilerine sahip ortamlar seçilmelidir (Hernandez ve diğ., 2008). Grafenin eksfoliasyonu için kullanılan çözücülerden bazıları, N-metilpirolidon (NMP) ve N,N-dimetilformamidi (DMF) içermektedir (Zhu ve diğ., 2013).



Şekil 1.6 : Kimyasal eksfoliasyonun şematik gösterimi.

Elektrokimyasal eksfoliasyon işlemi; bir elektrik akımı ve sıvı bir çözelti (elektrolit) yardımıyla grafit bir elektrotun tüketilmesini içermektedir. Elektrotlardan biri grafit tabanlıdır ve diğer yardımcı madde genellikle platindir (Şekil 1.7). Eksfoliasyon işlemi, genellikle elektrotlara pozitif akım uygulanarak başlamaktadır. Grafit esaslı elektrot oksidasyona uğramakta ve elektrolitten negatif yüklü iyonlar grafit katmanlarına girmektedir. Eksfoliasyon işlemi kolaylaştırmak için, negatif bir potansiyelin uygulanması, daha sonra uygulanmaktadır (Phiri ve diğ., 2017). Grafen hazırlamak için elektrokimyasal eksfoliasyon işlemi; yüksek kalite ve verimlilik, çevre

dostu olma ve kolay kontrol edilebilirlik gibi avantajlara sahiptir (Han ve diğ., 2021; Zhang ve diğ., 2021).

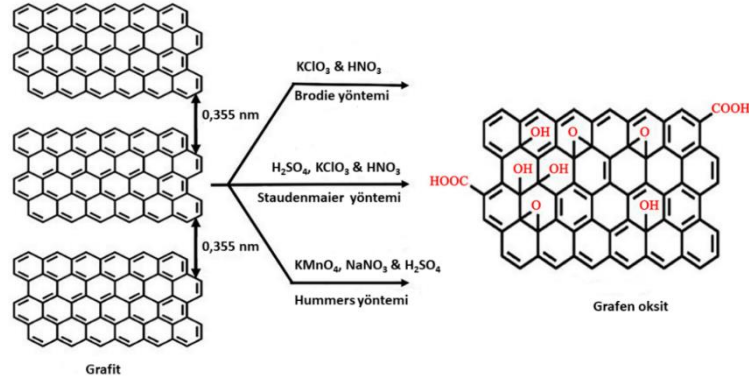


Şekil 1.7 : Grafitin elektrokimyasal eksfoliasyon mekanizmasının şematik gösterimi (Phiri ve diğ., 2017).

1.2.1.2 Kimyasal sentez

Grafit oksidin (GO) kimyasal olarak indirgenmesi, büyük miktarlarda grafen hazırlamanın geleneksel ve etkili yollarından biridir. Grafit oksit, konsantre asitler ve güçlü oksidantlar kullanılarak grafitin oksidasyonu yoluyla sentezlenmiştir (Edwards ve Coleman, 2013). Grafit oksit ilk olarak Brodie tarafından grafit ve nitrik asit (HNO_3) karışımı içinde potasyum klorat (KClO_3) ile grafit oksidasyonu yoluyla hazırlanmıştır (Brodie, 1859). Staudenmaier ise, grafit ve HNO_3 karışımının asitliğini değiştirerek ve karışıma yavaşça potasyum klorat (KClO_3) çözeltisi katarak Brodie'nin çalışmasını daha da genişletti (Staudenmaier, 1898). 1958'de Hummers ve Offeman, grafit ile sodyum nitrat (NaNO_3), sülfürik asit (H_2SO_4) ve potasyum permanganat (KMnO_4) karışımı kullanarak çok daha güvenli bir grafit oksit sentezine öncülük ettiler (Hummers Jr ve Offeman, 1958). GO'nun indirgenmesi için farklı yöntemler mevcuttur ve bu alanda birçok araştırma yapılmaktadır. Yöntemlerden bazıları, termal indirgeme (Larciprete ve diğ., 2011; Xie ve diğ., 2013), elektrokimyasal indirgeme (Hung ve diğ., 2021), fotokimyasal indirgeme (Stroyuk ve diğ., 2012) ve hidrotermal indirgeme (Huang ve diğ., 2018) olarak değerlendirilebilir. Seçilen yöntem üretilen grafenin kalitesini, özelliklerini ve potansiyel uygulama alanlarını etkilemektedir. Grafitin Hummers metodu ile oksidasyonu grafen tabakalarına kusurlar getirmektedir. Bu kusurlardan bazıları indirgenme işlemleriyle kısmen giderilebilmektedir. Fakat mevcut bilinen yöntemlerin hiçbirisi oksidasyonla ortaya çıkarılan tüm grafen kusurlarını tamamen uzaklaştıramamaktadır (Phiri ve diğ., 2017). Şekil 1.8, açıklanan

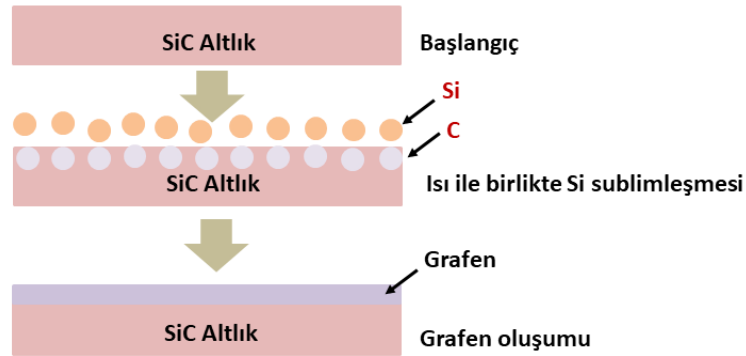
üç yöntemi kullanarak grafit yönteminden GO sentezinin şematik bir diyagramını göstermektedir.



Şekil 1.8 : Brodie, Staudenmaier ve Hummers yöntemleri kullanılarak kimyasal oksidasyon yoluyla GO sentezinin şematik gösterimi (Adetayo ve Runsewe, 2019).

1.2.1.3 Epitaksiyel büyütme

Silisyum karbür (SiC) üzerinde grafen oluşumu (Şekil 1.9); silisyumun SiC yüzeyinden tercih edilerek süblimleşmesi ve ardından geride kalan fazla karbon atomlarının grafitizasyonu ile ilerlemektedir (Edwards ve Coleman, 2013). C-SiC'nin çok kontrollü bir Argon atmosferinde (veya hatta vakumda) yüksek sıcaklıklarda ısıtılmasıyla, yüzeye yakın olan silisyum (Si) süblimleşmektedir. Yeterince yüksek sıcaklıklar için (yaklaşık 1300°C) karbon yeniden düzenlenmekte ve böylece grafitizasyon sağlanmaktadır (Kumar ve Wani, 2017).



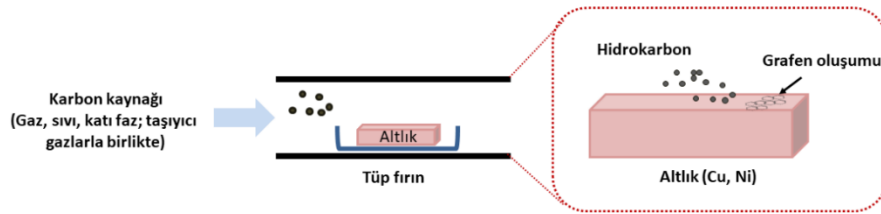
Şekil 1.9 : Si süblimleşmesinden sonra bir SiC altlığı üzerinde epitaksiyel büyütmenin gösterimi.

Epitaksiyel büyütme; yarı iletken endüstrisine, farklı elektronik ağıtlara ve transistörlere kolayca yerleştirilebilmesiyle umut vermektedir. Ayrıca düşük sıcaklıktaki işlemler altındaki grafen standardının, kimyasal buhar biriktirme (CVD)

prosesleri veya geçiş metalllerinde mekanik eksfoliasyon gibi farklı teknolojilere kıyasla, daha da geliştirilmesi gerekmektedir(Kumar ve Wani, 2017).

1.2.1.4 Kimyasal buhar biriktirme

CVD, yüksek yapısal kalitede tek katmanlı grafen hazırlamak için en kullanışlı yöntemlerden biridir. Bir metalin yüksek sıcaklıklarda farklı hidrokarbon başlatıcılarına maruz bırakılmasıyla, geniş alana sahip numuneler hazırlanabilmektedir. Grafen oluşumunun mekanizması, büyüme altlığına bağlıdır; ancak genel olarak, hidrokarbonların ayrışmasından ve çekirdeğin daha sonra büyük alanlara doğru büyümesinden sonra metal üzerinde çekirdeklenen karbon atomlarının büyümesi ile başlamaktadır (Şekil 1.10). Geliştirilen plazma destekli KBB, termal KBB, sıcak / soğuk duvar KBB reaktörleri gibi farklı KBB yöntemleri mevcuttur (Papageorgiou ve diğ., 2017).



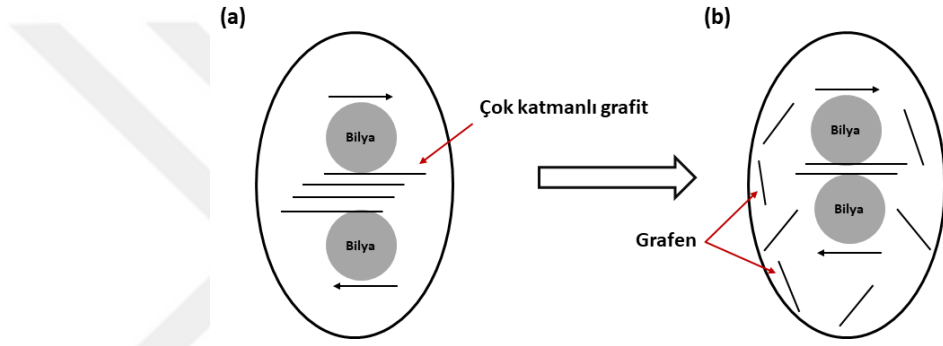
Şekil 1.10 : Hidrokarbon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen KBB yöntemi ve büyüme mekanizmasının şematik görünümü.

KBB grafen büyümesi en çok bakır ve nikel yüzeylerinde termal bir yöntemle yapılmaktadır(Whitener Jr ve Sheehan, 2014). KBB’de kullanılan kimyasal reaksiyonların sayısı oldukça fazladır ve termal ayrışma (piroliz), indirgeme, hidroliz, oksidasyon, karbürizasyon gibi reaksiyonları içermektedir. KBB yüksek kaliteli grafen ürettiği için, genellikle elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır (Kumar ve Wani, 2017).

1.2.1.5 Diğer yöntemler

Mekanik öğütme ile grafitten grafen elde edilme yöntemine dair çalışmalar, literatürde mevcuttur. 60 saat boyunca saf suda dağılmış grafite kesme kuvvetleri uygulayan bir gezegensel değirmende öğütülerek, yüksek en – boy oranına sahip birkaç katmanlı grafen tabakaları üretilmiştir (Antisari ve diğ., 2006). Bununla birlikte birkaç katmanlı grafenin, farklı sıvı ortamlar kullanılarak bir bilyalı öğütme tekniği ile grafitten üretilbildiği üzerine çalışılmıştır (Zhao ve diğ., 2010). Bu tür bir yöntemde üretilen

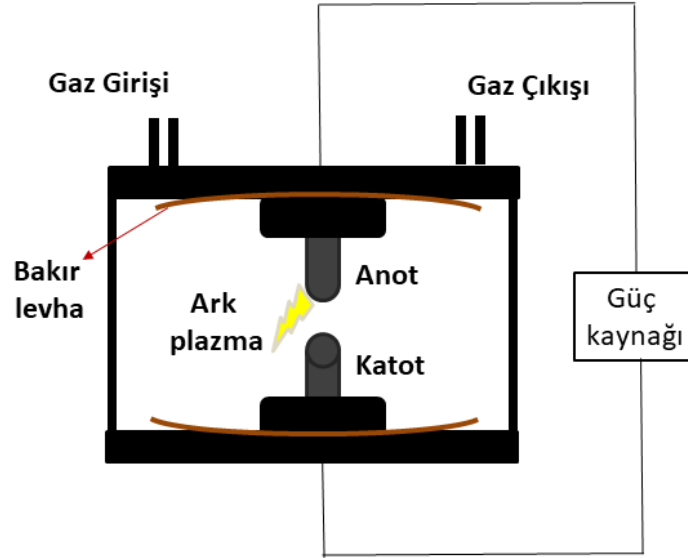
grafen tabakalarının miktarı ve kalitesi; dönme hızı, öğütme bilyasının çapı, öğütme süresi, kullanılan grafit türü, çözücü içindeki grafit konsantrasyonu ve santrifüjleme hızı gibi parametrelere bağlıdır (Phiri ve diğ., 2017). Etanol, formamid, aseton, tetrahidrofuran (THF), tetrametiluren(TMU), N,N-dimetilformamid(DMF) ve N-metilpirolidon (NMP) dahil olmak üzere birçok çeşitli organik çözücüler, grafiti eksfoliasyona uğratmak için bilyalı öğütmede kullanılmıştır (Zhao ve diğ., 2010). Grafit tabakaları arasındaki zayıf Van der Waals bağlarından dolayı grafit içindeki grafen tabakaları, uygulanan kesme kuvvetleri altında birbirlerine göre kolayca kayabilmektedir ve Şekil 1.11'de gösterildiği gibi çözücü ortamında izole edilmiş grafen tabakaları oluşturabilmektedir.



Şekil 1.11 : Islak bilyalı öğütme kullanılarak çok katmanlı grafitten grafen oluşturulması: (a) Dağılmış grafen tabakalarının, öğütme işleminde öğütücü bilyalar tarafından ayrıştırılması, (b) Grafen tabakalarının çözücü içinde kendiliğinden oluşması (Oklar, grafit tabakalara uygulanan kesme kuvvetini göstermektedir.).

Yüksek saflıkta grafit elektrotlar arasında doğru bir akımın geçirildiği ark deşarj yöntemi, fullerenler ve karbon nanotüpler (KNT) dâhil olmak üzere, karbon nanomalzemelerinin sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Edwards ve Coleman, 2013). Ark deşarj yöntemi, ilk kez olarak 1991 yılında Iijima tarafından çok duvarlı KNT'lerin üretiminde kullanılmıştır (Iijima, 1991). Bu yöntemde, inert bir atmosferde tutulan iki elektrot arasında bir plazma arkı üretilir (Şekil 1.12). Elektrotlar arasında oluşan yüksek sıcaklık (3000-4000°C) karbonun süblimleşmesine neden olmaktadır. Süblimleşen grafit, negatif yüklü elektrotta ya da işlemin yapıldığı haznenin duvarlarında birirmektedir (Loos, 2014). Grafenin, elektrik arkla üretimine yönelik çalışmalar zamanla mevcudiyetini arttırmaktadır. Diğer yöntemlere nazaran, daha az maliyetli oluşu önemli bir etkidir. Fakat üretim parametrelerinin değişkenliği; prosesin kontrol edilebilirliğini azaltmakla birlikte, nihai ürünün kalitesini de

etkilemektedir. Sisteme verilen atmosfer ve basınç, uygulanan akım, kullanılan elektrotların özellikleri; grafenin kalitesini etkileyen önemli parametrelerdendir.



Şekil 1.12 : Ark deşarj yönteminin şematik gösterimi.

Keşfedildiği günden beri bilim dünyasının ilgi odağı olan grafenin üretimi için gerçekleştirilen yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri, birbirlerinin tamamlayıcısı olarak mevcut çalışmaları günden güne arttırmakta; bununla birlikte potansiyel uygulama alanlarına yönelik olarak bu yöntemler için iyileştirmeler yapılmaktadır. Çizelge 1.1’de ifade edilen (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats) SWOT analizi, bu iyileştirmelere yönelik olarak, grafen üretim yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

Çizelge 1.1 : Grafen üretimi için kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Mikromekanik eksfoliasyon	- Yüksek kalitede pulsu yapılar - Düşük maliyet - Özel bir ekipmana gereksinim duyulmaması - Hazırlama yönteminin kolay oluşu	- Düşük verim - İş gücünün yoğunluğu - İşlem sürecinin yavaş olması - Pürüzlü film üretimi	- Grafenin temel özelliklerini incelemek için elverişli oluşu - Örnek malzeme tasarımı için uygun oluşu	- Seri üretime uygun olmaması - Kaliteli ürün elde edilmesinin zorluğu - Boyutsal olarak sınırlı uygulama alanı
Kimyasal eksfoliasyon	- Ölçeklendirilebilir - Kontrol edilebilir - Yüksek verim - Düşük maliyet	- sp² benzeri grafen bağlarının kısmen, sp²-sp³ yapılarına parçalanabilmesi - İndirgeme işlemlerinin yetersizliği	- Kompozit malzemelerin üretimi için potansiyel alan - Toz boya, mürekkep ve biyolojik uygulama alanlarında kullanım yaygınlığı - İnce film transistör, şeffaf iletken elektrot gibi özel uygulamalarda kullanım yaygınlığı - Film üretim için elverişli oluşu	Kısmen oksitlenmiş grafen yapılarının elde edilebilme ihtimali
Elektrokimyasal eksfoliasyon	- Düşük maliyet - Yüksek verim - Yüksek işlenebilirlik - Çevreye zararsız - İyi elektriksel özellikler - Büyük boyutlara sahip grafen tabakalarının üretimi	- Oksidasyon mevcudiyeti - Homojen olmayan pulsu yapıların kalınlığı	Büyük boyutlara sahip grafen tabakalarına yönelik elektriksel uygulamalar için elverişli olma ihtimali	- Homojen olmayan pulsu yapılardan dolayı uygulama alanlarının kısıtlanması - Safsızlıklar yüzünden elektrik iletkenliğinin düşme ihtimali

Çizelge 1.1 (devam) : Grafen üretimi için kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

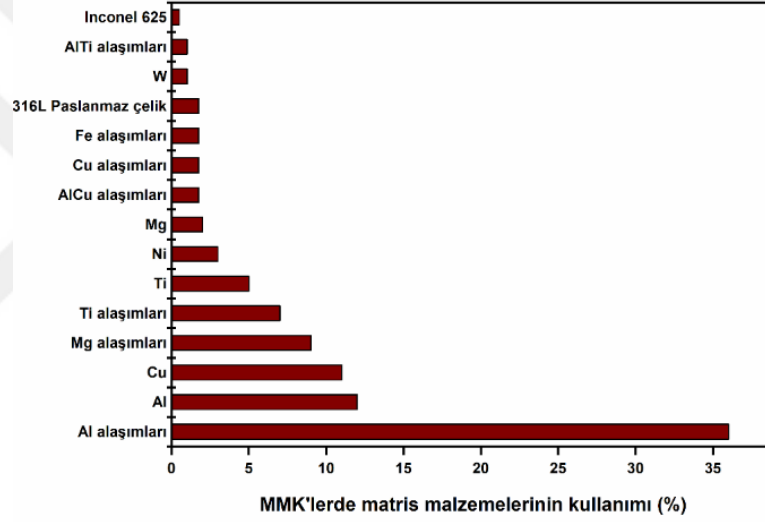
Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Kimyasal sentez	- Yüksek verim - İyi dağılılabile - Nispeten düşük maliyet	- Zayıf elektriksel özellikler - Süreç gerektiren bir işlem - Küçük yüzey alanına sahip yapraksı taneler	Endüstriyel uygulamalara yönelik çalışmaların mevcudiyeti	- Elektronik uygulamalar için uygun olmama ihtimali - Toksik madde kullanımına bağlı olarak çevreye zararlı - Patlama ihtimali olan bir proses mevcudiyeti
SiC üzerinde epitaksiyel büyüme	- Epitaksiyel grafen katmanlarının sayısının kontrol edilebilmesi - Grafen kalitesinin iyi olması	- Yüksek maliyet - Mekanik eksfoliasyondan daha düşük kalite ve kristal boyutu	En zorlu elektronik uygulamalar için potansiyel kullanım alanı	- Yüksek maliyeti nedeniyle, özel uygulamalar dışında talebin düşük olması - İlk grafen katmanı oluştuktan sonra, silisyumun tabakadan uzaklaşmama ihtimali
Kimyasal buhar biriktirme	- Yüksek kalitede grafen üretimi - Proseste istenen düşük işlem sıcaklığı - Bakır altlığın düşük maliyeti	- Özel ekipman ihtiyacı - Transferin grafen tabakasını kirletebilmesi ve zarar verebilmesi	Elektronik ve optik alanlar için potansiyel uygulama alanlarının mevcudiyeti	- Miktar olarak yüksek GNP üretimi için elverişsiz oluşu - Yüksek miktar gerektiren takviyeler için, kompozit malzemelerin üretimine uygun olmama ihtimali

Çizelge 1.1 (devam) : Grafen üretimi için kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Mekanik öğütme	- Kolay bir teknik olması - Kontrol edilebilir proses - Nispeten düşük maliyet	- Uzun süren işlemler - Kusurların mevcudiyeti - Düşük verim - Düşük grafen konsantrasyonu	- Büyük miktarlar gerektiren uygulamalar için kullanılabilir (Kompozit malzeme üretimi vs.) - Seri üretime uygun olması	- Olması muhtemel kusurlarına malzeme kalitesini düşürebilme ihtimali - Kusurlara bağlı olarak potansiyel uygulama alanlarının sınırlı olması
Elektrik ark deşarj yöntemi	- Nispeten düşük maliyet - Yüksek kalitede üretim - Miktar olarak yüksek üretim kolaylığı - Hızlı üretim - Yüksek ısı kararlılık	Proses kontrolünün zor oluşu	- Yüksek üretim miktarına bağlı olarak, özellikle kompozit malzemeler için uygun potansiyel alanlarının mevcudiyeti - Süperkapasitör, Li-iyon pilleri gibi enerji depolama uygulamaları için elverişli olması - Düşük yüzey enerjili kaplamalar, yağlayıcı gibi potansiyel uygulama alanına yönelik çalışmalarda kullanılabilme ihtimali	- Proses kontrolü için üretim parametrelerinin değişkenliğinin potansiyel uygulama alanlarını sınırlandırabilme ihtimali - Seri üretime uygun olmasının zorluğu

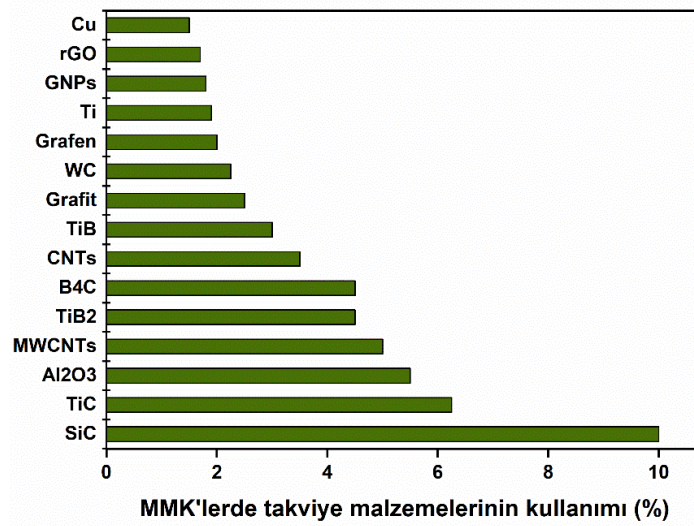
1.3 Metal Matris Kompozitler

Bir kompozit malzeme; matris bileşeni olarak bir metal içerdiğinde, “metal matris kompozit (MMK)” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.13’de araştırma geliştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bazı metal matris malzemeleri gösterilmiştir. Al ve alaşımları, Cu, Mg ve alaşımları, Ti ve alaşımları, Ni genellikle kullanılan metal matrislere örnek verilebilir. Al alaşımları, hafifliği, çevresel direnci ve mukavemet, tokluk, darbe direnci gibi mekanik özellikleri sebebiyle birçok metal matrisi içerisinde en uygun grupların başında gelmektedir. Ayrıca, Al’in ergime noktası birçok uygulama ihtiyacını karşılayacak kadar yüksek ve bazı uygun kompozit prosesleri için de yeterince düşüktür (Natarajan ve diğ., 2014).



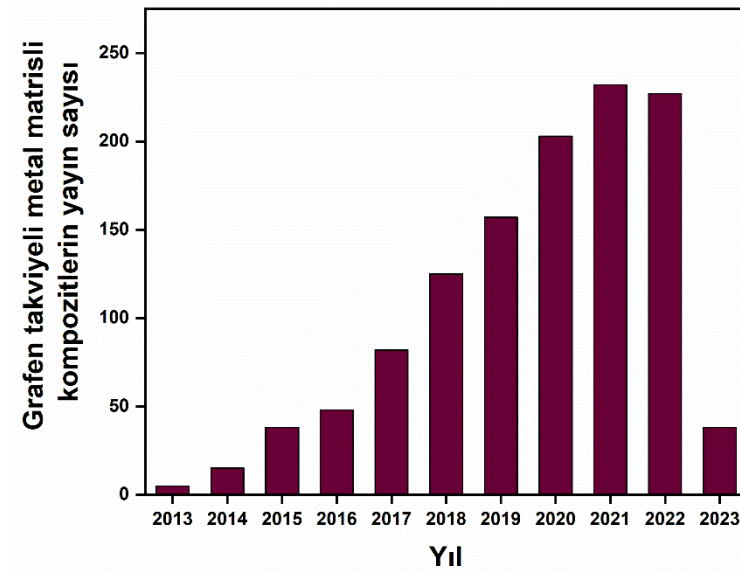
Şekil 1.13 : MMK'larda matris malzemelerinin kullanımı (Mussatto ve diğ., 2021).

Şekil 1.14, MMK’lerde yaygın olarak kullanılan takviye malzemelerin kullanımını göstermektedir. Silisyum karbürün (SiC), yüksek mukavemet, mükemmel ısı direnci, iyi korozyon direnci ve özellikle Al matris ile iyi uyumluluğu, düşük maliyeti nedeniyle en yaygın olarak kullanılan takviyelerden biri olduğu bilinmektedir (Natarajan ve diğ., 2014).



Şekil 1.14 : MMK'larda takviye malzemelerinin kullanımı (Mussatto ve diğ., 2021).

Grafen, eşsiz özelliklerinden dolayı, MMK'lar için tercih edilebilen ideal bir takviye malzemesi olarak son yirmi yılda geniş çapta araştırılmaya başlanmıştır. Şekil 1.15, "Web of Science" veritabanında "grafen takviyeli metal matris kompozitler" anahtar ifadesi kullanılarak elde edilen istatistiksel araştırmaya göre, 2013–2023 yılları arasında grafen takviyeli metal matris kompozitlerle ilgili konularda yayınlanan dergi makalelerinin sayısına ait bilgi vermektedir. 2016-2017 yıllarından itibaren, yayın sayısının yoğun olarak artış gösterdiği görülmektedir. Fakat, mevcut yayın sayılarına göre, grafen üzerine gerçekleştirilen araştırmalar (Şekil 1.2) göz önüne alındığında, hâlâ sınırlı bir sayıda bu konuda çalışmalar gerçekleştirildiği görülmektedir.

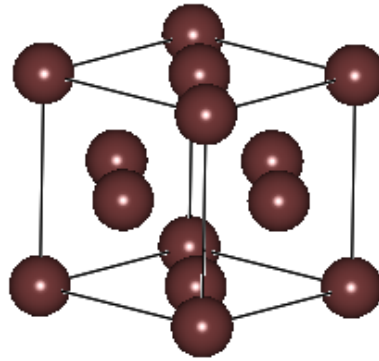


Şekil 1.15 : "Web of Science" veri tabanından 'grafen takviyeli metal matris kompozitler' anahtar ifadesi kullanılarak elde edilen, 2013–2023 yılları arasında yayınlanan ilgili makalelere ilişkin istatistiksel veriler (Arama tarihi: 10 Nisan, 2023).

1.3.1 Alüminyum matrisli kompozitler

1.3.1.1 Alüminyumun yapısal özellikleri

YMK yapısına (Şekil 1.16) ve 0,143 nm atomik yarıçapa sahip olan Alüminyum (Al), yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Düşük yoğunluk, özgül mukavemet, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilirlik, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı ilgi gören hafif bir metaldir (Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020). Al'in bu özellikleri, otomotiv ve uçak endüstrisinde geniş kullanım alanı sağlamakta, yüksek spesifik mukavemetiyle birlikte yakıt tüketimi gibi tasarruflar oluşturmaktadır (Latief ve Sherif, 2012). Çizelge 1.2, Al metalinin genel özelliklerini ifade etmektedir.



Şekil 1.16 : Alüminyumun YMK yapısı (Kafes parametresi : 4,0495 Å).

Çizelge 1.2 : Alüminyumun genel özellikleri (Lampman ve Zorc, 1990).

Özellik	Değer
Atom numarası	13
Ergime noktası (°C)	660
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7
Çekme dayanımı (MPa)	80
Elastisite modülü (GPa)	70
Elektrik iletkenliği (Ω ⁻¹ m ⁻¹)	3,2x10 ⁷
Termal iletkenliği (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	237
Termal genleşme katsayısı (K ⁻¹)	21-24x10 ⁻⁶

Bununla birlikte, Al'in tek başına oldukça zayıf tribolojik özellikleri ve genel olarak düşük mukavemeti sebebiyle, saf Al nadiren kullanılmaktadır. Bunun yerine, Al çeşitli metal elementleriyle alaşımlandırılır veya takviye malzemeleri eklenerek kompozit olarak değerlendirilmektedir.

1.3.1.2 Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları genel olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır: Dövme ve döküm alaşımı. Alüminyum alaşım sistemleri, dört basamaklı şekilde ASM standartlarına göre adlandırılmaktadır. Dövme alaşımı için, ilk basamak ana alaşım elementini ifade etmektedir. Dövme alaşımı için, aşağıdaki gibi dört basamaklı bir sistem kullanılmaktadır:

- 1xxx : Alaşımsız saf kompozisyon (min. %99,00 Al).
- 2xxx : Bakır ana alaşım elementi fakat magnezyum gibi diğer elementlerin de belirlenebildiği alaşım.
- 3xxx : Mangan ana alaşım elementi.
- 4xxx : Silisyum ana alaşım elementi.
- 5xxx : Magnezyum ana alaşım elementi.
- 6xxx : Magnezyum ve silisyum ana alaşım elementleri.
- 7xxx : Çinko ana alaşım elementi fakat bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi diğer elementlerin de belirlenebildiği alaşımlar.
- 8xxx : Kalay ve bazı lityum kompozisyonlarını içeren alaşım.

Döküm alaşımları ise üç basamaklı bir sistemle ve ardından bir ondalık değerle ifade edilmektedir. Birinci basamak ana alaşım elementini, 2. ve 3. Basamaklar ise, özel alaşım elementlerini belirtmektedir. Ondalık basamak ise, eğer “.0” ise parça dökümleri “.1” veya “.2” ise ingotları temsil etmektedir (Lampman ve Zorc, 1990). Döküm alaşımı için, aşağıdaki gibi dört basamaklı bir sistem kullanılmaktadır:

- 1xx.x : Kontrollü alaşımsız bileşimler (min. %99,00 Al).
- 2xx.x : Bakır ana alaşım elementi fakat diğer alaşım elementleri de belirlenebilir.
- 3xx.x : Silisyum ana alaşım elementi fakat bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım elementleri de belirlenebilir.
- 4xx.x : Silisyum ana alaşım elementi.
- 5xx.x : Magnezyum ana alaşım elementi.
- 6xx.x : Kullanılmayan seri.
- 7xx.x : Çinko ana alaşım elementi fakat bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım elementleri de belirlenebilir.
- 8xx.x : Kalay ana alaşım elementi.

Çizelge 1.3, alüminyum alaşımlarının genel olarak sınıflandırılmasını ifade etmektedir.

Çizelge 1.3 : Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması(Lampman ve Zorc, 1990).

Dövme		Döküm	
Alaşım elementi	Seri	Alaşım elementi	Seri
Min. %99,00 Al	1xxx	Min. %99,00 Al	1xx.x
Cu	2xxx	Cu	2xx.x
Mn	3xxx	Si-Cu/Mg	3xx.x
Si	4xxx	Si	4xx.x
Mg	5xxx	Mg	5xx.x
Mg, Si	6xxx	-	6xx.x
Zn	7xxx	Zn	7xx.x
Diğer (Sn, Li vb.)	8xxx	Sn	8xx.x

1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri, ısıtıl işlem uygulanmayan alaşımlardır. Bu seriye ait alaşımların dayanımları; deformasyon, katı çözelti veya dispersiyon sertleşmeleri kombinasyonu ile artırılmaktadır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileri ise, ısıtıl işlem uygulanan alaşım gruplarıdır. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtıl işlemlerin adlandırılması, şu şekilde ifade edilmektedir (Lampman ve Zorc, 1990):

- F : Üretildiği gibi, işlem görmemiş.
- O : Tavlanmış.
- H : Gerinim sertleştirilmesi yapılmış.
- T : Çözelti ısıtıl işlem görmüş.
- T1 : Yüksek sıcaklıkta şekillendirme prosesinden soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.
- T2 : Yüksek sıcaklıkta şekillendirme prosesinden soğutulmuş, soğuk deforme edilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
- T3 : Çözeltiye alınmış, soğuk deforme edilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
- T4 : Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
- T5 : Yüksek sıcaklıkta şekillendirme prosesinden soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış.
- T6 : Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış.
- T7 : Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlandırılmış.
- T8 : Çözeltiye alınmış, soğuk deforme edilmiş ve yapay yaşlandırılmış.
- T9 : Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk deforme edilmiş.

- T10 : Yüksek sıcaklıkta şekillendirme prosesinden soğutulmuş, soğuk deforme edilmiş ve yapay yaşlandırılmış.

Çok sayıda Al döküm alaşımları kullanılmasına rağmen, yedi temel geliştirilmiş alaşım grubu mevcuttur (Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990):

- Alüminyum-bakır (2xx)
- Alüminyum-silisyum-bakır (3xx)
- Alüminyum-silisyum (4xx)
- Alüminyum-silisyum-magnezyum (3xx)
- Alüminyum-magnezyum (5xx)
- Alüminyum-çinko-magnezyum (7xx)
- Alüminyum-kalay (8xx)

Alüminyum-bakır (Al-Cu) alaşımları, mukavemet ve tokluğun gerekli olduğu döküm ve dövme formunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşım grubu, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sertlik göstermektedir. İlk önemli Al döküm alaşımları yaklaşık olarak ağırlık %10'a kadar ulaşan kompozisyonlarda Cu içermektedir. Herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmaksızın, bu alaşım grubu döküm olarak üretildiğinde önemli ölçüde geliştirilmiş mukavemet ve sertlik göstermektedir. Bu alaşım grubu genellikle ağırlık %3 ile %5 arasında Cu içermektedir, genellikle değişen oranlarda Mg elementi ile güçlendirilmiştir. Gümüş eklenmesi ile birlikte, yaşlanmayı olumlu yönde etkilemektedir ve gerilim korozyon riskini azaltmaktadır. Bu tip ısıtma proseslerine maruz bırakılan kompozisyonlar, herhangi bir ticari döküm alaşımına göre daha yüksek mukavemet kazanmaktadır. Bu alaşım grubu, diğer alaşım gruplarına kıyasla iyi bir korozyon direncine sahip değildir ve belirli koşullar altında taneler arası korozyona maruz kalabilirler. Nikel eklenmesiyle birlikte, yüksek sıcaklıklarda, bakır mekanik özellikleri geliştiren birincil alaşım elementidir (Davis, 2001; Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990; Totten ve MacKenzie, 2003).

Alüminyum-silisyum-bakır (Al-Si-Cu), en yaygın kullanılan bir diğer alaşım grubudur. Her iki alaşım elementi ilavesinin miktarları değişkenlik göstermektedir, dolayısıyla, bazı alaşımlarda Cu, diğerlerinde Si daha yoğun olarak kullanılmaktadır. Cu'nun güçlendirici ve işlenebilirlik etkisi baskınken, Si için ise alaşımın dökülebilirliğini artırır. Daha yüksek Si kompozisyonları içeren alaşımlar, normalde

daha karmaşık dökümler ve kalıcı kalıp ile kalıp döküm işlemleri için daha uygundur. ağı. %5,6'dan daha az Cu içeren Al-Si-Cu alaşımları ısıtıl işlem görmektedir fakat yüksek mukavemet ve sertlik ihtiyacı mevcutsa, Mg ilaveleri bu alaşım grubunu ısıtıl işlem görebilir hâle getirmektedir. Birçok ötektik üstü Si alaşımı (ağı. %12 ile %30 Si) ayrıca Cu içermektedir. Birincil Si fazı, mükemmel aşınma direnci sağlamak ve Cu, matrisin sertleşmesine ve yüksek sıcaklık dayanımına katkıda bulunmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990).

Alüminyum-silisyum (Al-Si) alaşım grubu, mükemmel dökülebilirlik, akışkanlık ve korozyon direnci, bunun yanında düşük mukavemet ve zayıf işlenebilirlik göstermektedir. Bu alaşımlar, düşük özgül ağırlık ve termal genleşme katsayılarına sahiptir. Döküm ve ürün performansının iyileştirilmesi açısından, hiperötektik Al-Si (ağı. >%12 Si) alaşımlarında fosfor ilavesi ile birlikte proötektik Si fazının geliştirilmesi gerekmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990).

Alüminyum-silisyum-magnezyum (Al-Si-Mg) alaşım grubunda, Mg ilavesiyle, ısıtıl işleminden sonra mükemmel özellikleriyle birlikte döküm formunu geliştiren önemli ve kullanışlı bir kompozisyon ailesi oluşmaktadır. Korozyon direnci de mükemmel bir alaşım grubudur. Yüksek mukavemete sahip Al-Cu ve Al-Si-Cu alaşımları kadar güçlü olmasa da, çeşitli Al-Si-Mg alaşımları iyi mekanik özellikler sağlamaktadır. Özellikle berilyum ilavesi mukavemeti ve sünekliği artırmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Alüminyum-magnezyum (Al-Mg) alaşım grubunun en önemli karakteristik özelliği, deniz suyu ve atmosferi de dahil olmak üzere korozyon direncine sahip olmalarıdır. Böylece bu özellik ile birlikte, yiyecek ve içecek gibi uygulama alanlarına özgü proseslerde geniş kullanıma sebep vermektedir. Bu alaşım grubu ayrıca, mükemmel kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptir ve genellikle mimari ve diğer dekoratif uygulamalar için uygun kullanıma fırsat vermektedir. Mg, oksidasyon hızını arttırmaktadır. Ergimiş hâlde, Mg kayıpları önemli ölçüde olabilmektedir ve Al ve Mg oksitleri döküm kalitesini etkilemektedir. Al-Mg alaşımlarının nispeten zayıf dökülebilirliği ve Mg'un oksitlenme eğilimi, kullanım zorluklarını ve buna bağlı olarak maliyeti arttırmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990).

Alüminyum-çinko-magnezyum (Al-Zn-Mg) alaşımları, doğal olarak yaşlanmakta ve dökümden sonra oda sıcaklığında 20 ile 30 gün içinde tam mukavemete ulaşmaktadır. İşlenebilirlik ve korozyona karşı direnç genel olarak iyidir. Bu alaşım grubu, genel

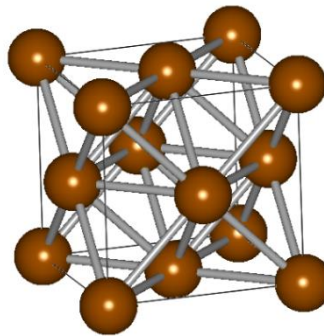
olarak döküm durumunda ortadan iyiye varan gerilme özellikleri göstermektedir. Tavlama ile birlikte kullanımında, iyi boyutsal kararlılık elde edilebilmektedir. Ayrıca, bu alaşımların sertleştirilme sürecini hızlandırmak için, yapay yaşlandırma prosesi uygulanabilmektedir(Kaufman ve Rooy, 2004; Lampman ve Zorc, 1990).

Alüminyum-kalay (Al-Sn) alaşımlarında, rulman uygulamaları için geliştirilmek üzere, ana alaşım elementi olarak alüminyuma kalay eklenmektedir. Ayrıca, işlenebilirliği arttırmak için, bizmut, kurşun ve kadmiyum ile birlikte kullanılmaktadır. ağı. %5,0 ila %7,0 Sn içeren alaşımlar; düşük sürtünme, basma dayanımı, yorulma dayanımı ve korozyon direncinin önemli kriterler olduğu rulmanlarda ve burçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Cu, Ni ve Mg ilaveleri sertlik ve mukavemete katkıda bulunmakta ve dökülebilirliği iyileştirmek, basma ve akma mukavemetini arttırmak için Si ilave edilmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

1.3.2 Bakır matrisli kompozitler

1.3.2.1 Bakırın yapısal özellikleri

YMK yapısına (Şekil 1.17) ve 0,128 nm atomik yarıçapa sahip olan Bakır (Cu), günümüzde endüstriyel koşullarda, demir-çelik ve Al'un ardından üçüncü sırada yaygın olarak kullanılan ticari temel hammaddelerden biri olma özelliği taşımaktadır. Genellikle manyetik özellik taşımayan Cu; mükemmel elektriksel ve termal iletkenlikleri, korozyona karşı olağanüstü dirençleri ve iyi mukavemet ile yorulma dayanımları nedeniyle endüstriyel anlamda potansiyel uygulamaları mevcuttur. Saf Cu'un, genellikle, elektrik akımını geçirmek için ihtiyaç duyulan kablolar ve teller, elektrik kontaktları gibi malzemelerde kullanımı mevcuttur (Davis, 2001b). Çizelge 1.4; bakırın genel özelliklerini ifade etmektedir.



Şekil 1.17 : Bakırın YMK yapısı (Kafes parametresi: 3,628 Å).

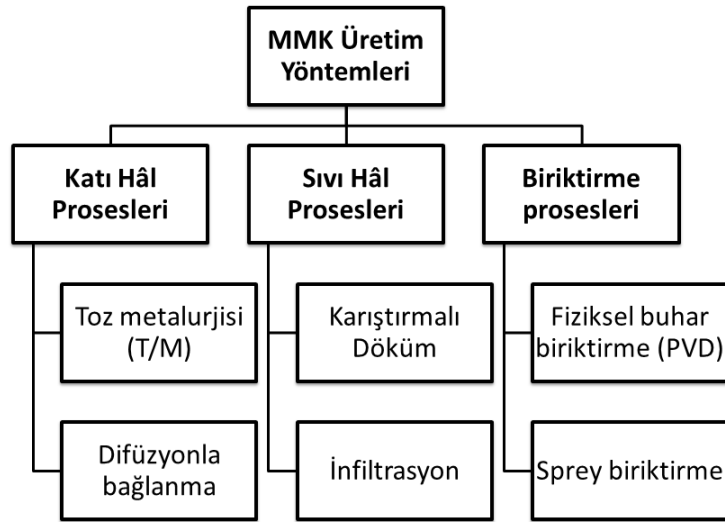
Çizelge 1.4 : Bakırın genel özellikleri (Jones ve Ashby, 2018; Lalet ve diğ., 2014).

Özellik	Değer
Atom numarası	29
Ergime noktası (°C)	1083
Yoğunluk (g/cm ³)	8,96
Çekme dayanımı (MPa)	210
Elastisite modülü (GPa)	110
Elektrik iletkenliği (IACS)	%102
Termal iletkenliği (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	397
Termal genleşme katsayısı (K ⁻¹)	17x10 ⁻⁶

Bakırla birlikte en yaygın şekilde alaşımlama için kullanılan elementler ise; Al, Ni, Si, Sn ve Zn'dir. Korozyon direnci veya işlenebilirlik gibi belirli malzeme özelliklerini geliştirmek için, diğer elementlerle de küçük miktarlarda alaşımlandırılmaktadır (Davis, 2001b).

1.3.3 Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemi

Metal matrisli kompozitler birçok farklı yöntemle üretilmektedir. MMK'lerin üretim yöntemleri, üç temel grupta sınıflandırılabilir: Katı, sıvı hâl ve biriktirme prosesi. MMK'ların genel olarak kullanılan üretim yöntemleri, Şekil 1.18'de gruplandırılarak ifade edilmiştir.

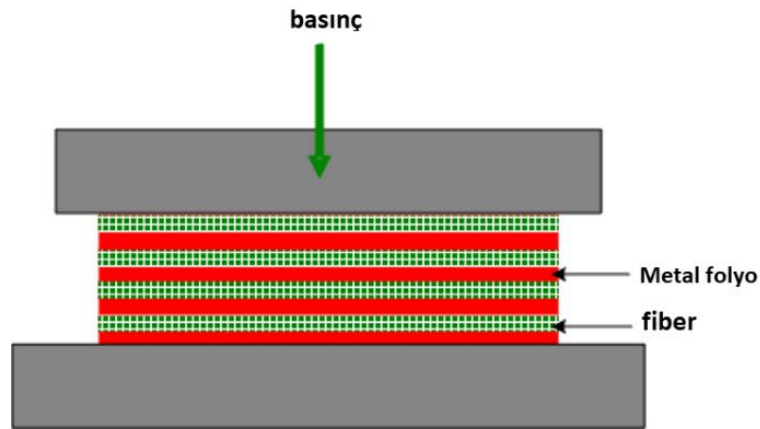


Şekil 1.18 : MMK'ların üretim yöntemi.

Katı hâl prosesi içerisinde, T/M en yaygın olarak kullanılan MMK üretim yöntemlerinden biridir. T/M prosesi, genellikle iki aşamayı içermektedir: toz karıştırma ve yoğunlaştırma. MMK'larda T/M, metalik tozlardan parçaların üretildiği, tozların istenen şekle sıkıştırılarak şekillendiği ve ardından partiküllerin

yoğunlaştırılması için ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta sinterleme adı verilen bir ısıtım işlemi sırasında takip eden metal proses teknolojisidir. T/M prosesinin temel avantajı, matris ve takviye fazının katı hâlde karıştırılmasıdır, böylece takviye ve sıvı metal arasındaki ıslanmama probleminin üstesinden gelinmekte, istenmeyen fazların oluşumu engellenmektedir (Vani ve Chak, 2018).

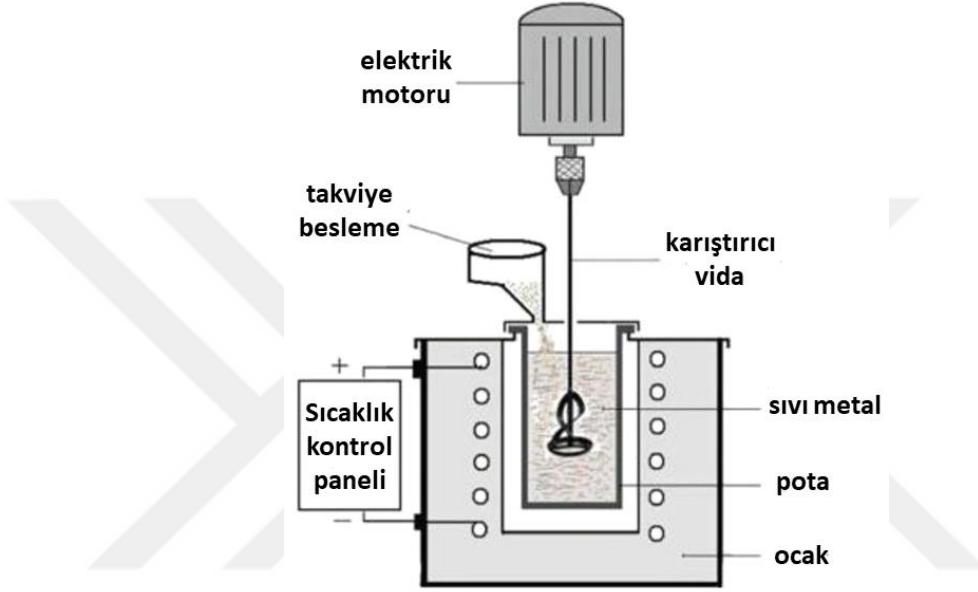
Difüzyonla bağlanma, tek veya çok katmanlı kompozitler üretmeye yönelik olarak, alternatif folyo ve fiber katmanlarını yoğunlaştırmak için kullanılan bir prosesdir (Natarajan ve diğ., 2014). Şekil 1.19, genel olarak difüzyonla bağlanma prosesinin şematik gösterimini ifade etmektedir. Teknik olarak difüzyonla bağlanma, özellikle uzun kompozit fiber için matris ve fiberi sıkıca bağlayacak bir basınç ve yüksek sıcaklığın mekanik olarak uygulanmasından oluşmaktadır. Bu süreçte kontrol edilmesi gereken üç önemli proses parametresi mevcuttur: Bağlanma sıcaklığı ve basıncı, tutma veya bekleme süresi. Bağlanma sıcaklığı, en düşük ergime sıcaklığının veya ana fazın ergime noktasının %50 ile %70 arasında olmalıdır. Bağlanma basıncı, birleşen yüzeyler arasında sıkı bir temas sağlamak, kaynak oluşturan bölgedeki tüm boşlukları doldurmak ve yüzey pürüzlerinin deformasyonuna yardımcı olmak için yeterli olmalıdır. Ayrıca, istenen bağlanma verimini elde etmek ve yakın bir temas oluşturmak için tutma süresi, difüzyon işleminin gerçekleşmesi için optimize edilmelidir (Garg ve diğ., 2019).



Şekil 1.19 : Difüzyonla bağlanma süreci (Garg ve diğ., 2019).

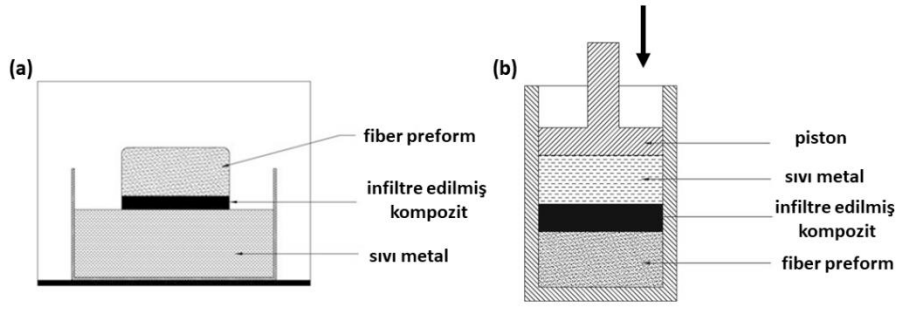
Karıştırmalı döküm süreci, genellikle, seçilen matris malzemesinin eritilmesini, takviye malzemenin bu erimiş metale eklenmesini ve karıştırma ile uygun bir dağılım elde edilmesini içermektedir. Şekil 1.20, genel olarak, karıştırmalı döküm sürecini göstermektedir. Büyük parçalar üretmek için, en ekonomik yöntemlerden biri olarak

değerlendirilen karıştırılmalı dökümün içinde vorteks tekniği en çok kullanılanlardandır. Matriste homojen bir takviye fazı dağılımı elde etmek için; pota boyutu, ergimiş metalin sıcaklığı, takviye besleme hızı, kalıp sıcaklığı, karıştırma hızı gibi birçok kontrol edilmesi gereken proses parametresi mevcuttur. Bu prosesteki en önemli aşılması gereken zorluklar; takviye fazının, genellikle, sıvı metal matrisi tarafından ısıtılmaması ve takviye fazının homojen olarak dağıtılamama ihtimali (Garg ve diğ., 2019).



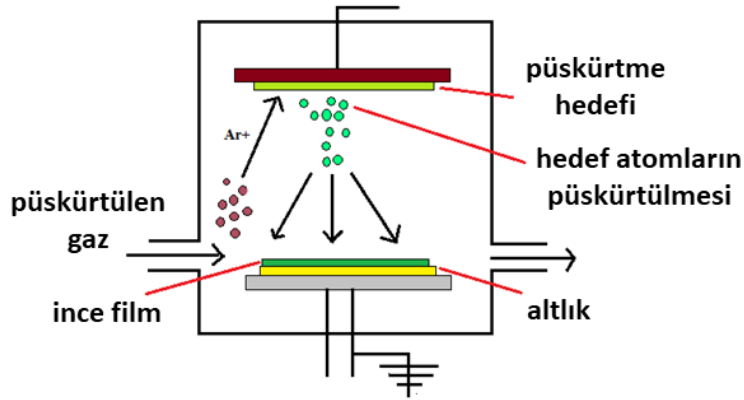
Şekil 1.20 : Karıştırılmalı döküm prosesi (Garg ve diğ., 2019).

İnfiltrasyon prosesi, takviye fazının gözenekli gövdesini bir kalıp içerisinde tutmayı, gözenekleri doldurmak ve bir kompozit üretmek için boşluklardan akan erimiş metalle infiltrasyon etmeyi içermektedir. İnfiltrasyon ve basınçlı infiltrasyon prosesleri, sırasıyla, Şekil 1.21 (a) ve (b)'de ifade edilmiştir. İnfiltrasyon prosesinde temel parametreler; takviyenin başlangıç kompozisyonu, morfolojisi, hacim fraksiyonu ve sıcaklığı ile emdirilen metalin başlangıç kompozisyonu ve sıcaklığı, metale uygulanan kuvvettir (Natarajan ve diğ., 2014).



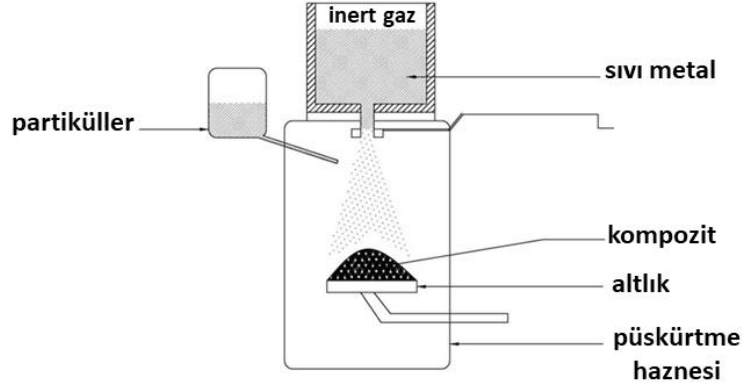
Şekil 1.21 : (a) İnfiltrasyon, (b) Basıncılı infiltrasyon prosesi (Natarajan ve diğ., 2014).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), genel olarak, birkaç nanometre ile birkaç mikrometre aralığında malzemenin ince katmanlarını biriktirmek için kullanılan kolektif ama yavaş süren bir prostestir. 150°C ile 500°C sıcaklık aralığında, yüksek vakum altında gerçekleştirilmektedir. Termal buharlaştırma ve püskürtme en yaygın olarak kullanılan PVD prosesleridir. Termal buharlaştırma, malzemeyi vakumda uygun yöntemler kullanarak ısıtarak kaynak malzemenin buharlaştırılmasına dayanırken, püskürtme, hızlandırılmış gaz halindeki iyonlarla bombardıman yoluyla kaynak hedeften bir buhar oluşturan plazma destekli bir tekniktir (Garg ve diğ., 2019; Kalra ve diğ., 2018). Şekil 1.22; bir PVD prosesinin şematik gösterimini ifade etmektedir.



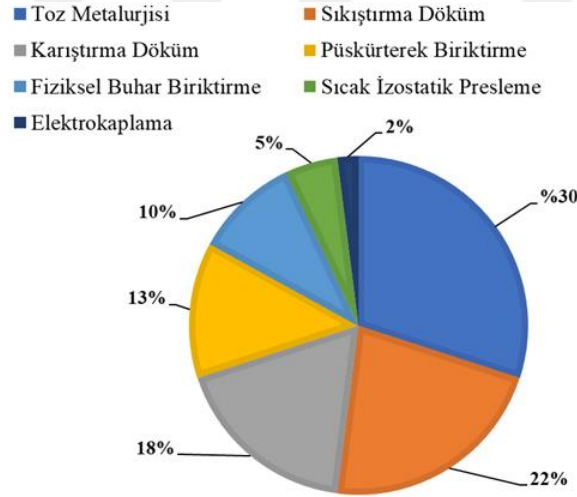
Şekil 1.22 : Fiziksel buhar biriktirme prosesi (Kalra ve diğ., 2018).

Sprey (püskürterek) biriktirme yönteminde, ergimiş metal damlacıkları takviye fazı ile birlikte püskürtülür ve metal katılaşmasının tamamlandığı bir altlık üzerinde toplanmaktadır. Püskürtme prosesindeki etkin parametreler; metal damlalarının başlangıç sıcaklığı, boyut dağılımı ve hızı, takviyenin besleme hızı, sıcaklığı ve malzemeyi toplayan altlığın sıcaklığıdır. Püskürtme prosesinin bir avantajı, elde edilen matris mikroyapılarının ince tane boyutu ve düşük segregasyonudur. Şekil 1.23, spray biriktirme prosesini göstermektedir (Natarajan ve diğ., 2014).



Şekil 1.23 : Sprey (püskürterek) biriktirme prosesi (Natarajan ve diğ., 2014).

MMK’lar için belirli bir yöntemin seçimi, nihai ürünün özelliklerinin gereksinimine, öngörülen uygulamalara ve üretim ekonomisi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Ayrıca benzer kompozisyonlar kullanılsa bile, farklı üretim yöntemlerinin tamamen farklı özelliklere sahip kompozitler elde edebileceği gerçeği mevcuttur. Yaklaşık son on yıl içerisinde MMK’lar için genel olarak kullanılan farklı üretim yöntemlerini, Şekil 1.24 göstermektedir. Bu yöntemler içerisinde, toz metalurjisinin diğer yöntemler arasında kullanılabilirliği açısından daha baskın bir yöntem olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 1.24 : MMK’lerin üretim yöntemleri üzerine 2018 yılından önceki son 10 yılda gerçekleştirilen araştırmalar (Vani ve Chak, 2018).

Çizelge 1.5’de ifade edilen SWOT analizi, MMK üretiminde genel olarak kullanılan üretim yöntemlerini, karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

Çizelge 1.5 : MMK üretimi için kullanılan genel yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Toz metalurjisi	• Ham madde mevcudiyeti iyi • Kontrol edilebilir • Homojen bir yapı elde edilebilir • Düşük maliyet • Daha az ekipman kullanımı	• Karmaşık üretim akışına sahip olması • Nihai ürünün ilk üretim şekliyle sınırlı kalması	• Seri üretime uygun olması	• Nihai ürünün istenilen özellikte elde edilememe ihtimali
Difüzyonla bağlanma	• İyi boyut toleransı	• Maliyeti yüksek • Yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimi • Birkaç saat süren işlemler	• Hassas bazı parçaların üretilebilmesi	• Yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ihtimalinden dolayı nihai üründe bazı problemlerin mevcudiyeti • Büyük miktarlarda üretime uygun olmama ihtimali
Karıştırmalı döküm	• Basit bir proses • Düşük maliyet	• Partiküllerin homojen dağılamama ihtimali • Partikülün sıvı metal ile yeterince ıslatılamama ihtimali	• Büyük miktarlarda üretime uygun	• Nihai ürünün istenilen özelliği gösterememesi

Çizelge 1.5 (devam) : MMK üretimi için kullanılan genel yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Fiziksel buhar biriktirme	• Partiküllerin homojen dağılımı • Kontrol edilebilir	• Yüksek maliyet	• Koruyucu bir film oluşmasıyla birlikte, hasarın mekanik olarak azalması	• Seri üretime uygun olmama ihtimali
İnfiltrasyon	• Düşük maliyet • Kontrol edilebilir	• Takviye elemanlarının homojen dağılamama ihtimali • Malzemelerin bazı bölgelerinde gözeneklilik ihtimali	• Seri üretime uygun	• Nihai ürünün istenilen özellikte olmama ihtimali
Püskürterek (sprey)biriktirme	• Homojen bir mikroyapı • Yüksek üretim hızı	• Maliyeti yüksek • Proses süresi uzun • Büyük miktarlarda uzaklaştırılacak atık toz	• Seri üretime uygun	• Nihai ürünün istenilen özellikte olmama ihtimali

1.3.4 Grafen takviyeli metal matrisli kompozitlerin güçlendirme mekanizmaları

Grafen takviyeli MMK'larda güçlendirmeyi açıklamak için çeşitli mekanizmalar önerilmiştir: (1) MMK'larda tane boyutu küçültme; (2) Arayer karbon (C), oksijen (O) ve azot (N) atomları ile katı çözelti güçlendirmesi; (3) MMK'ların homojen olarak dağılmış grafen ile dispersiyon güçlendirilmesi; (4) matris içinde yerinde oluşturulmuş karbürlerin dislokasyon güçlendirmesi ve (5) Matristen grafene etkili yük aktarma fonksiyonu. Fakat, belirli bir kompozit için kesin güçlendirme mekanizması yapıların doğasına bağlıdır. Dolayısıyla, metal matrislerde takviye olarak yaygın kullanılan grafenin geliştirme mekanizmaları; yük aktarımı, Orowan döngüsü, termal uyumsuzluk mekanizması ve tane boyutu küçültme güçlendirmesidir (Chen ve diğ., 2020).

1.3.4.1 Tane boyutu küçültme

Grafenin geniş spesifik yüzey alanına sahip olması, tanelerin boyutunun küçülmesinde kritik bir rol oynayan sinterleme sırasında, metal matris tanelerin büyümesini etkili bir şekilde önlemektedir. Ayrıca, grafen ve metal matris arasındaki arayüzler, dislokasyon hareketini ve çatlak ilerlemesini engellemektedir (Chen ve diğ., 2020). Tane boyutu küçültme etkisi, Hall-Petch formülasyonu ile (1.1) ifade edilmektedir (Li ve diğ., 2020; Naik ve Walley, 2020; Yan ve diğ., 2014).

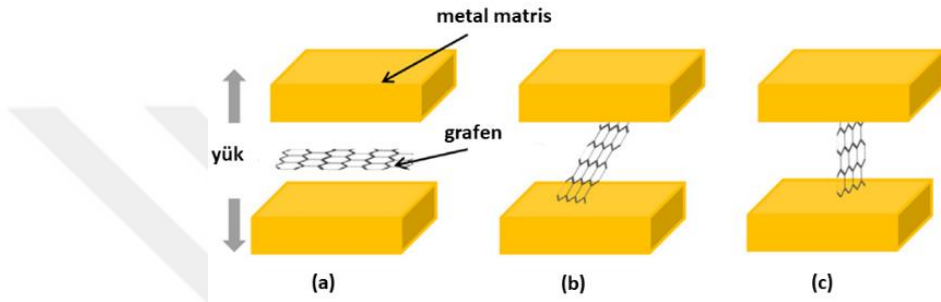
$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (1.1)$$

Formülasyonda; " σ_s " akma dayanımını, " σ_0 " tane içinde dislokasyon hareketine karşı direnci, " k " tane sınırında plastik akışı başlatmak için gereken bölgesel gerilimin ölçüsünü (Armstrong, 2014; Naik ve Walley, 2020) ve " d " matrisin ise tane boyutunu ifade etmektedir (Ghodrati ve Ghomashchi, 2019). Hall-Petch eşitliğine göre, tane boyutu küçüldükçe mukavemet artmaktadır.

1.3.4.2 Yük aktarımı

Grafenin, metal matrisini içinde dağılımı yük aktarımını etkileyen önemli bir faktördür. Şekil 1.25; grafenin metal bir matriste dağılım çeşitlerini göstermektedir. Şekil 1.25(a)'daki gibi grafen matriste yatay olarak dağıldığında, grafenin arayüz boyunca yük transferine katkısı zayıftır, bu durum kompozitin mukavemetini

azaltmaktadır. Çünkü, grafen düzlemleri arasında yüzey enerjisi büyüktür ve grafenin aglomerasiyonuna sebep olmaktadır. Ayrıca, grafen ve metal matris arasındaki arayüz bağlanması yapısal olarak zayıftır ve kompozit arayüzü bir yüke maruz kaldığında kolayca ayrılacaktır. Şekil 1.25(b)'de, grafen matriste belirli bir eğime sahiptir, böylece yük kompozit arayüzüne aktarıldığında, grafen dönecek ve gerilecektir. Bu proses gelişmiş bir yük aktarımı sağlayacaktır. Grafen, Şekil 1.25(c)'deki gibi dikey konumda dağıldığında ise, grafen yük altında gerilecektir. Kompozitler için, yük aktarımının etkisi, bu dağılım koşullarında en fazla olarak gerçekleşmektedir (Chen ve diğ., 2020).



Şekil 1.25 : Grafenin metal matrisinde dağılım modelleri: (a) yatay, (b) eğimli, (c) dikey (Chen ve diğ., 2020).

Arayüzey bağının etkisi, grafen ile takviye edilen metallerde, yük aktarımını ifade eden kayma gecikmesi modeli (1.2) ile açıklanmaktadır (Ghodrati ve Ghomashchi, 2019):

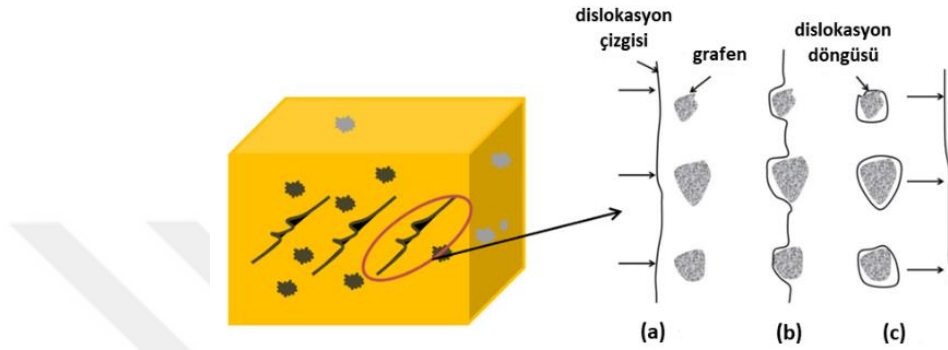
$$\sigma_{SL} = \sigma_m + f_v \sigma_m \left(\frac{S}{2} \right) \quad (1.2)$$

“ σ_{SL} ”, “ f_v ”, “ σ_m ” ve “ S ”, sırasıyla, kompozitin akma dayanımı, grafenin hacim fraksiyonunu, matrisin akma dayanımını ve grafenin en-boy oranını ifade etmektedir. Formülasyona göre, grafenin hacim fraksiyonunu sabit tutup, grafenin en-boy oranı artırıldığında, kompozitin akma dayanımı artmaktadır (Chen ve diğ., 2020; Ghodrati ve Ghomashchi, 2019; Li ve diğ., 2020).

1.3.4.3 Orowan döngüsü

Orowan güçlendirme mekanizması, ince çökeltilerin mevcudiyeti nedeniyle dislokasyonların kısıtlı hareketlerinden kaynaklanmaktadır (Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020). Şekil 1.26; grafenin matris içindeki homojen dağılımına bağlı olarak, Orowan döngüsü güçlendirme mekanizmasının şematik gösterimini ifade

etmektedir. Şekil 1.26(a)'da görüldüğü gibi kompozit malzeme plastik deformasyona uğradığında, dislokasyonlar meydana gelecektir. Şekil 1.26(b)'de gösterilen dislokasyonların hareketi, bu dislokasyonlar grafen ile temas halinde olduğunda engellenmektedir. Dolayısıyla, dislokasyonun grafeni kesmesi ve ardından hareket etmeye devam etmesi için, uygulanan gerilimi daha da artırmak gerekmektedir. Şekil 1.26(c)'de ifade edildiği gibi, grafeni çevreleyen dislokasyon halkaları oluşacaktır (Chen ve diğ., 2020).



Şekil 1.26 : Orowan döngüsü güçlendirmesinin şematik gösterimi: (a) başlangıç dislokasyon; (b) dislokasyonun engellenmesi; (c) dislokasyon döngüsü oluşumu (Chen ve diğ., 2020).

Orowan dislokasyon güçlendirme mekanizması şu eşitlikle (1.3) ifade edilmektedir (Saboori ve diğ., 2018):

$$\Delta\sigma_{\text{Orowan}} = \frac{0,81M.G.b.\ln\left(\frac{dp}{b}\right)}{2\pi\sqrt{(1-\nu)}(\lambda-d_p)} \quad (1.3)$$

“*M*” Taylor faktörünü, “*G*” metal matrisin kayma modülünü, “*b*” metal matrisin Burgers vektörünü, “*ν*” Poission oranını ve “*d_p*” ise ortalama partikül boyutunu ifade etmektedir (Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020). Dolayısıyla, homojen bir dağılımla, matris içindeki grafen plakalar arasındaki boşluğu azaltarak bu mekanizma yoluyla güçlendirme etkisinin önemli ölçüde artacağı fark edilebilmektedir (Saboori ve diğ., 2018).

1.3.4.4 Termal uyumsuzluk mekanizması

Grafen ve matris arasındaki termal genleşme katsayısındaki (CTE) uyumsuzluk nedeniyle, numunelerin soğutulması sırasında, yüksek yoğunlukta dislokasyon oluştuğu genel olarak kabul edilmektedir (Li ve diğ., 2020). Bu mekanizma ile

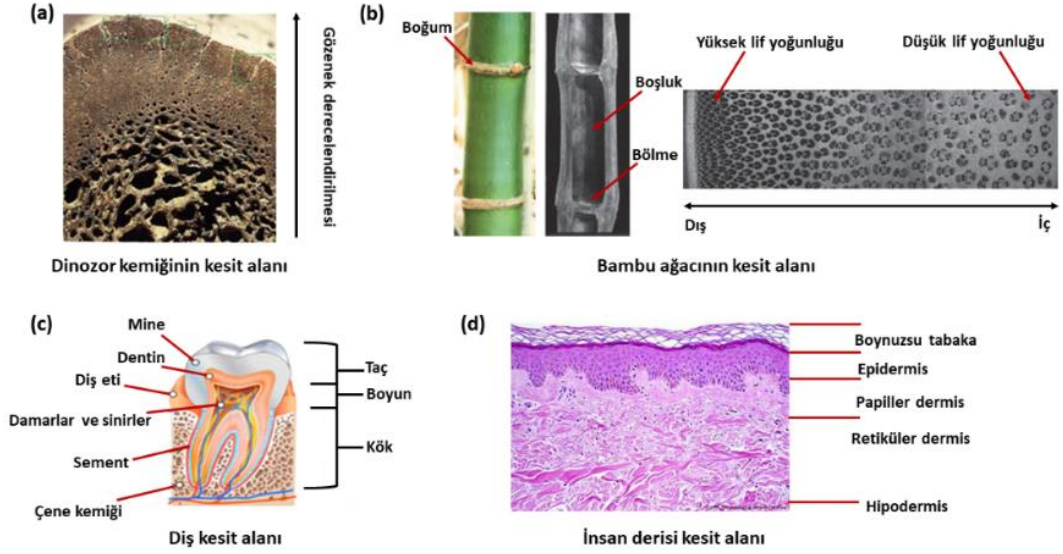
güçlendirilme şu eşitlikle (1.4) sağlanmaktadır (Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020):

$$\Delta\sigma_{CTE} = \alpha G b \sqrt{\frac{12\Delta T \Delta C f_v}{b d_p}} \quad (1.4)$$

“ α ” sabit bir değeri (1,25), “ G ” ve “ b ” matrisin, sırasıyla, kayma modülü ve Burgers vektörünü, “ ΔT ” matris ile grafen arasındaki “ ΔC ” matris ve grafen arasındaki CTE farkını, “ f_v ” grafenin hacim fraksiyonunu ve “ d_p ” ise grafenin ortalama partikül boyutunu ifade etmektedir. Eşitliğe göre, kompozitler yüksek sıcaklıklarda prosese maruz kaldıklarında, CTE uyumsuzluğunun güçlendirmede önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Li ve diğ., 2020; Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020).

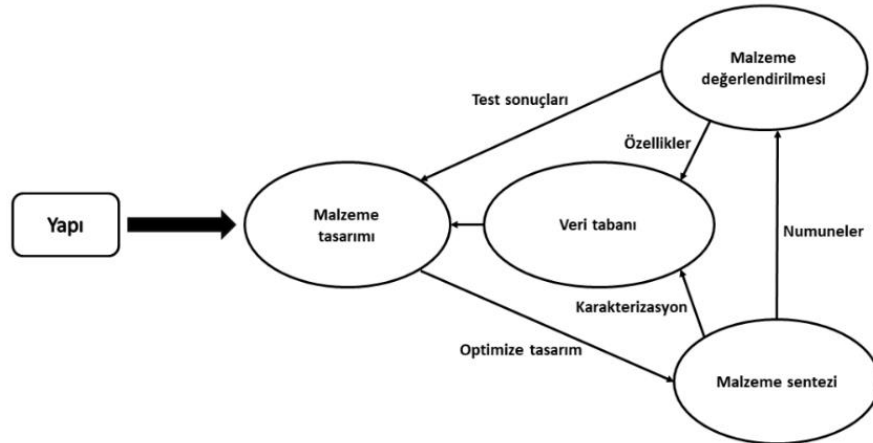
1.4 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), geleneksel kompozit malzemelerin karşılayamadığı yeni nesil özellikleri geliştiren, hacimsel olarak bileşimdeki tercihli konumlarına bağlı farklılıklar ile karakterize edilebilen ve fonksiyonel gereksinimler doğrultusunda, malzeme özelliklerinde değişikliklere katkıda bulunan gelişmiş bir malzeme sınıfıdır (Loh ve diğ., 2018). FDM’ler doğaya baktığımızda, varlığını göstermektedir. Kemik, diş, insan derisi, bambular, ağaç sapları farklı derecelendirilmelere sahip, doğada mevcut olan FDM’lere örnek gösterilebilir (Şekil 1.27). Örneğin, dişin en dış yüzeyinde bulunan mine tabakası, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterirken, iç yüzeyi ise yorulma ve gevreklikten korunacak kadar yüksek sünekliğe sahiptir (Saleh ve diğ., 2020).



Şekil 1.27 : Derecelendirmeye sahip doğal FDM örnekleri; (a) Dinozor kemiğinin (Muñoz-Rojas, 2016), (b) Bambu ağacının (Mannan ve diğ., 2017), (c) Dişin (Saleh ve diğ., 2020), (d) İnsan derisinin kesit alan görüntüleri (Igarashi ve diğ., 2005).

Derecelendirme kavramı ortaya ilk kez 1972’de kompozisyon ve yapısal olarak derecelendirilen polimerik malzemeler için ortaya çıkmıştır (Bever ve Duwez, 1972; Shen ve Bever, 1972). Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş metal/seramik termal bariyer yapısının tasarımı ve başarılı üretimi ise, 1980’lerde malzeme bilimciler tarafından, Japonya’nın Sendai kentinde gerçekleştirilmiştir (Koizumi, 1997). Bu proje üç ana grup tarafından yönetilmekte idi: Malzeme Tasarım Grubu, Malzeme Sentezi Grubu ve Malzeme Değerlendirme Grubu (Niino ve Maeda, 1990). Bu gruplar arasındaki ilişki, Şekil 1.28’de gösterilmiştir. Bu projede uzay mekiği için üretilen nihai malzemenin, 2000 K sıcaklığa dayanması ve iç ile dış yüzey arasında 1000 K sıcaklık farkına sahip olması tasarlanmıştır (Koizumi, 1997).



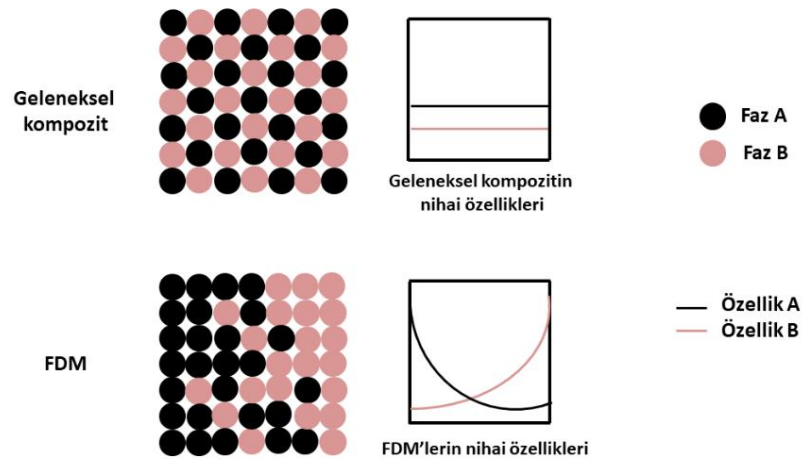
Şekil 1.28 : FDM’ler için tasarım şablonu.

Şekil 1.29, saf metallerden itibaren FDM'ye doğru uzanan malzeme gelişimini göstermektedir.



Şekil 1.29 : FDM'lere doğru uzanan malzeme gelişimi (El-Galy ve diğ., 2019).

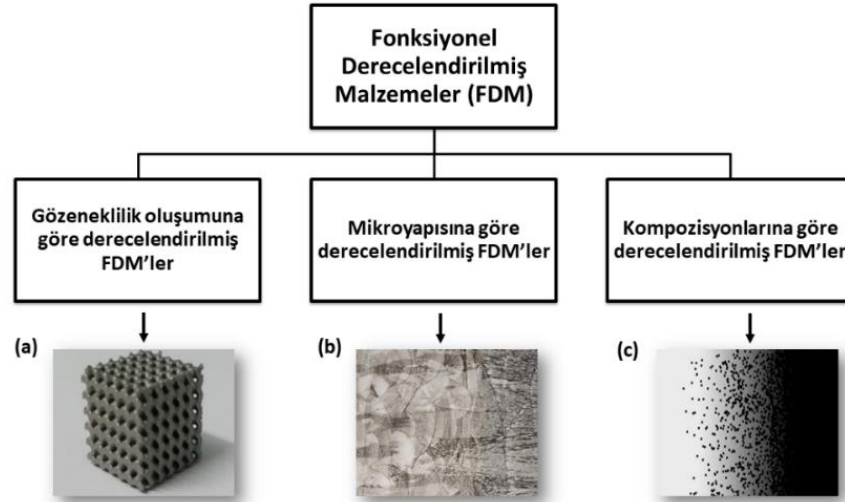
Şekil 1.30, ilgili özelliklerin geleneksel kompozitlerde ve FDM'lerde olan değişimini göstermektedir. FDM'lerde mevcut fazların, geleneksel kompozitlere kıyasla homojen bir şekilde dağılmadığı görülmektedir. Bu homojen olmayan dağılım, nihai malzemenin özelliklerini, kompozitlerde olduğu gibi stabil olarak tutmamaktadır. Fiziksel ve mekanik derecelendirmiş olarak özel morfolojilere ve yapısal yeterliliğe ulaşabilmek, diğer geleneksel kompozitler arasında FDM'lerin en büyük avantajıdır. FDM'lerin, bir malzemede konumsal işlevlere bağlı özellikleri; kimyasal bileşimi, mikro yapıyı ve atomik düzenlemeyi içermektedir(Ebhota ve diğ., 2016). FDM'lerde, diğer geleneksel kompozit malzemelerine kıyasla takviye edilen malzemenin hacmi ve dağılımı en içten en dış kısma değişmektedir. Böylece, tasarlanan malzemede sürekli değişen özellikler ve kontrollü tek tip olmayan mikro yapı sağlanmaktadır (Kumar ve diğ., 2021). FDM'ler; deformasyona, dinamik yüklemeye ve ayrıca korozyon ve aşınmaya karşı, malzemelerin nihai özelliklerini kontrol edebilecek olanaklar sunmaktadır. Ayrıca, FDM'ler iki uyumsuz malzemeyi birbirine bağlamak için, yüksek mukavemetli bir bağlama arayüzü olarak kullanılabilmektedir (El-Galy ve diğ., 2019).



Şekil 1.30 : Malzemelerin nihai özelliklerinin geleneksel kompozitlerde ve FDM'lerde değişimi.

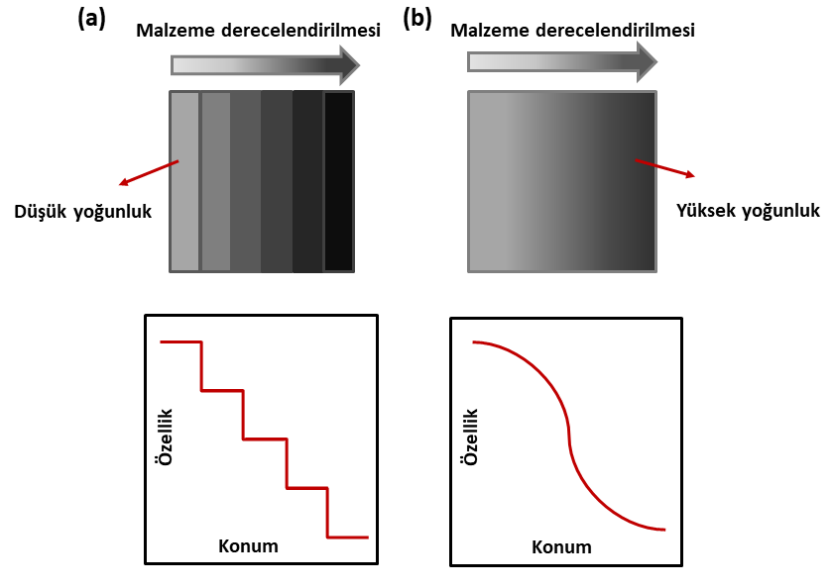
1.4.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sınıflandırılması

FDM'ler temel olarak, üç başlıkta sınıflandırılabilirler: Gözeneklilik oluşumuna, mikroyapısına ve kompozisyona göre derecelendirilmiş FDM'ler (Şekil 1.31).



Şekil 1.31 : FDM'lerin sınıflandırılması; (a) gözeneklilik oluşumuna (Babu ve diğ., 2020), (b) mikroyapısına ve (c) kompozisyonlarına göre (Mahmoud ve Elbestawi, 2017).

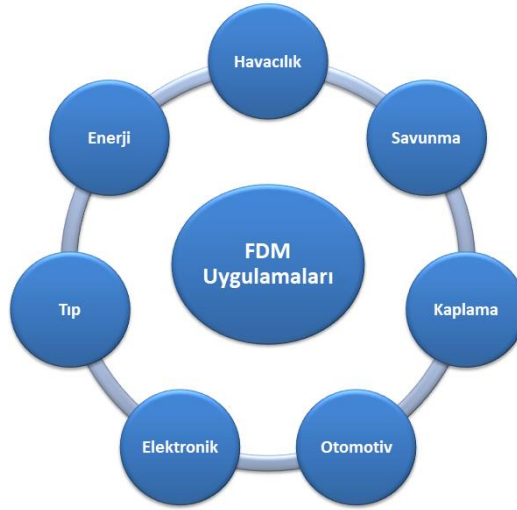
Ayrıca, FDM'ler yapısal olarak iki farklı şekilde sınıflandırılırlar: Adım adım derecelendirilmiş ve sürekli derecelendirilmiş FDM'ler. Şekil 1.32(a), adım adım derecelendirilmiş katmanlı bir FDM yapısını göstermektedir. Koyu gölgeye sahip katmanlar, yüksek konsantrasyona sahip takviye malzemelerinden dolayı yüksek yoğunluklu yapıyı ifade etmektedir. Daha açık renkli gölgeler ise, düşük yoğunluklu yapıyı göstermektedir. Adım adım derecelendirilmiş bir malzemede, kompozisyonlar ve/veya mikro yapılar, genellikle arayüzün varlığıyla kademeli bir modda değişmektedir. Şekil 1.32(b)'de gösterilen sürekli derecelendirilmiş FDM'lerde, ise konuma göre sürekli bir değişim göstermektedir (Zhang ve diğ., 2019).



Şekil 1.32 : (a) Adım adım derecelendirilmiş, (b) Sürekli derecelendirilmiş FDM.

1.4.2 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları

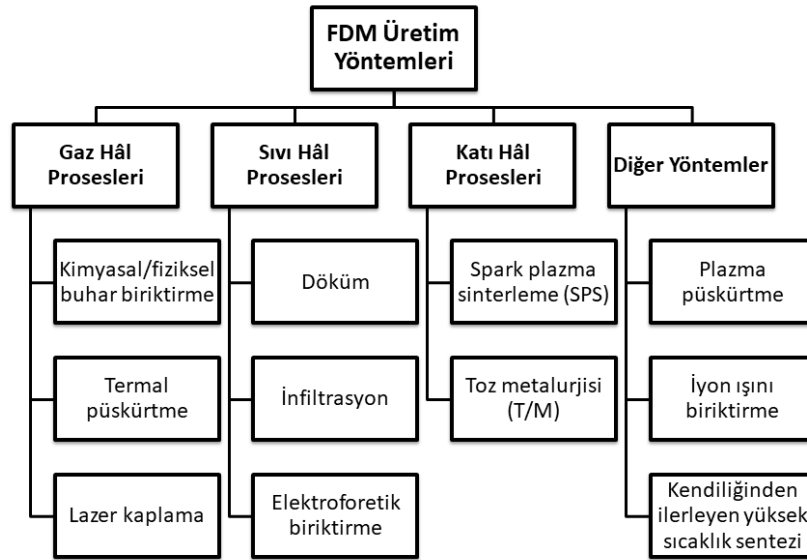
FDM'lerin üretimi ve bunlara yönelik potansiyel uygulama alanlarının mevcudiyeti, günümüz koşullarında giderek artmaya başlamıştır. FDM'lerin mekanik, fiziksel, yapısal, elektriksel, termal uygulamalar gibi malzeme ihtiyaçlarını karşılayacak özellikleri tasarlama kabiliyeti; kompozit, kaplama ve film formundaki birçok nihai ürünün imalatı için, FDM'leri ideal bir malzeme grubu olarak göstermektedir (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016). FDM'lerin mevcut uygulama alanları arasında; havacılık, otomobil, biyomedikal, savunma, elektrik / elektronik, enerji, denizcilik, opto-elektronik ve termo-elektronik bulunmaktadır. Şekil 1.33, FDM'lerin genel olarak çeşitli uygulama alanlarını göstermektedir. FDM gibi katmanlı yapıların üretimi, kompozit malzeme geliştirmede bir sonraki süreç olarak değerlendirilebilir. Özellikle, metal matris esaslı kompozitlerin üretimine yönelik olarak optimizasyon çalışmalarının geliştirilmesi devam ederken, FDM gibi ileri teknolojik malzemelerin ihtiyaçlara yönelik olarak tasarımı gelecekte daha fazla potansiyel uygulama alanını ortaya çıkaracaktır.



Şekil 1.33 : FDM’lerin çeşitli uygulama alanları (Jha ve diğ., 2013; Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

1.4.3 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri

Günümüzde, nihai ürünün gereksinimlerine göre FDM’lerin üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. FDM’lerin üretim yöntemlerini dört ana başlıkta sınıflandırabiliriz: Gaz hâl prosesleri, sıvı hâl prosesleri, katı hâl prosesleri ve diğer yöntemler. Şekil 1.34; genel olarak FDM üretim yöntemlerini göstermektedir.



Şekil 1.34 : FDM’lerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması.

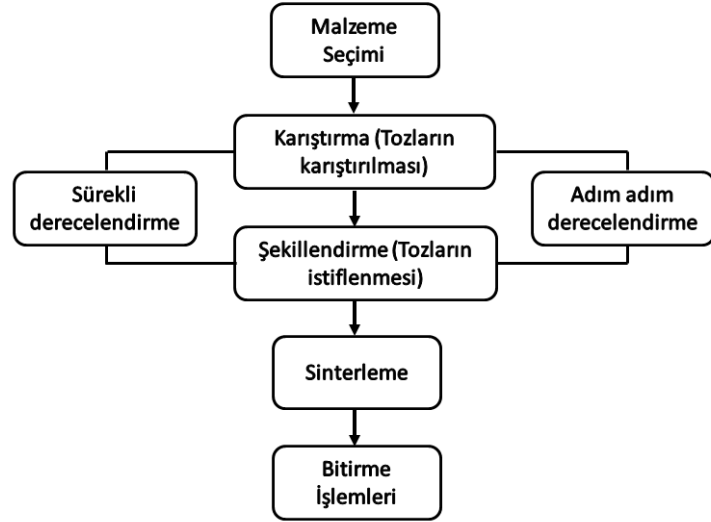
Buhar biriktirme (fiziksel/kimyasal), termal püskürtme, döküm (santrifüj, slip, bant, jel), lazer biriktirme, elektrokimyasal yöntemler ve toz metalurjisi FDM’ler için

genelde kullanılan üretim yöntemlerindendir (Kieback ve diğ., 2003; Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

Santrifüj döküm, basitliği ve diğer birçok benzersiz özelliği nedeniyle, FDM üretmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde merkez kaç kuvveti yardımıyla simetrik ürünler üretilmektedir(Kumar ve diğ., 2021). Santrifüj yönteminde, FDM'lerin üretimi takviye malzemesinin erime sıcaklığına göre iki gruba ayrılmaktadır: Erime noktası proses sıcaklığından önemli ölçüde yüksek ise, takviye malzemesi sıvı bir matris içinde katı halde kalmaktadır. Takviye malzemesinin erime noktası proses sıcaklığından düşük ise, katılaşma sırasında hem takviyeye hem de matrise merkezkaç kuvveti uygulanabilmektedir (Saiyathibrahim ve diğ., 2015). Biriktirme yönteminde, bir ortamdaki bileşen malzemelerin tozlarının bir çözeltisi hazırlanmaktadır. Bu malzemelerin biriktirme işlemi; elektrik, kimyasal veya lazer alanı tarafından başlatılmaktadır. Buna göre yöntemler, elektro biriktirme yöntemi, kimyasal çözelti biriktirme yöntemi veya lazer biriktirme yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Özellikle, elektro kaplama, e-kaplama, elektroforetik kaplama, anodik elektrot pozisyonu, katodik elektrot pozisyonu ve elektroforetik boyama, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Parida ve Jena, 2019). Kimyasal, fiziksel, püskürtme ve plazma ile güçlendirilmiş buhar biriktirme gibi birçok buhar biriktirme yöntemi mevcuttur. Buhar biriktirme yönteminde; buhar halindeki malzemeler, katı bir malzeme oluşturmak için yoğunlaştırma, kimyasal reaksiyon veya dönüştürme yoluyla yoğunlaştırılmaktadır. Bu işlemler; alt tabakaların mekanik, elektriksel, termal, optik, korozyon direncini ve aşınma özelliklerini değiştirmek için kaplamalar oluşturmaktadır. Bu mevcut buhar biriktirme yöntemleri, genellikle, ince yüzey kaplaması için mükemmel mikro yapı sağlayan FDM yüzey kaplamalarını biriktirmek için kullanılmaktadır (Gupta ve Talha, 2015).

Toz metalurjisi (T/M) yöntemi kullanılarak FDM'lerin üretimi; önceden tasarlanmış bir dağılım formülasyonuna göre toz malzemelerin karışımının hazırlanmasını (ıslak, kuru öğütme vb.), istiflenmesini ve son olarak sinterlenmesini (basıncsız sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme) içermektedir. Şekil 1.35; T/M ile üretilen FDM'lerin genel akış şemasını ifade etmektedir. İlk olarak, malzeme kombinasyonunun seçimi ve bu kombinasyona uygun olarak en elverişli dağılım yapılmaktadır. Ardından bu malzeme seçimine uygun olarak, sürekli veya adım adım derecelendirilme ile toz malzemeler karıştırılır ve daha sonra bu tozlar istiflenerek

şekillendirilir. Son olarak, istiflenerek şekillendirilen kompakt malzeme, sinterleme işlemine tabi tutulmaktadır(Parihar ve diğ., 2018). Sıcaklık, zaman ve basınç gibi proses parametrelerinin, T/M yöntemi kullanılarak üretilen FDM'nin özelliklerine önemli bir etkisi mevcuttur (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).



Şekil 1.35 : T/M ile üretilen FDM'lerin genel akış şeması.

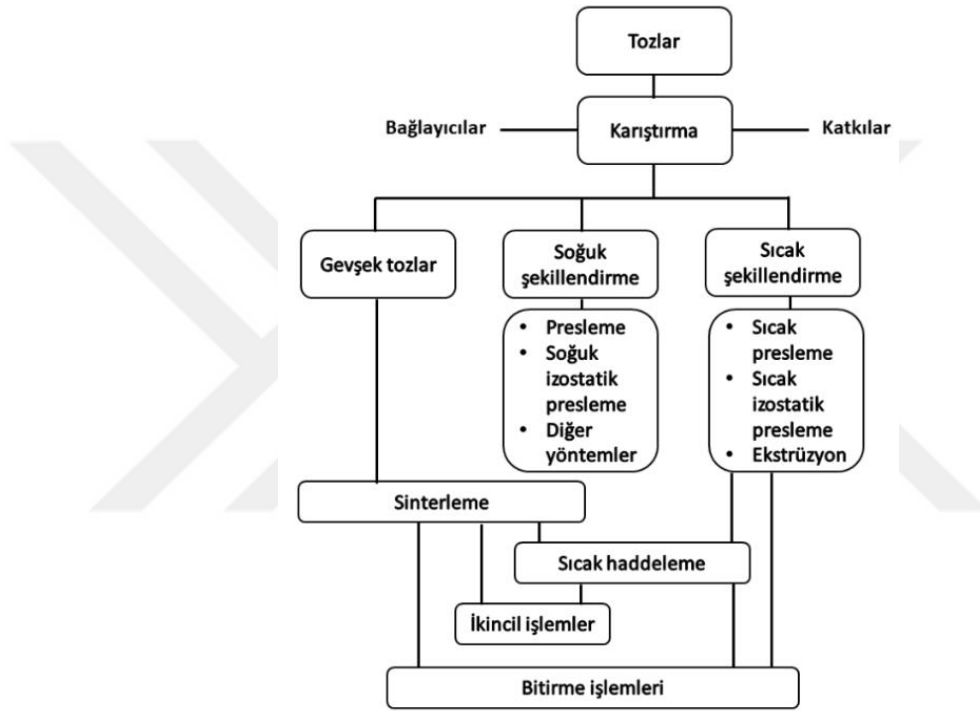
Çizelge 1.6, FDM'lerin genellikle kullanılan bazı üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını ifade etmektedir.

Çizelge 1.6 : FDM’lerin bazı üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları (El-Galy ve diğ., 2019; Gupta ve Talha, 2015).

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Toz metalurjisi	- Geçiş fonksiyonunda proses değişkenliği kontrol edilebilir - Farklı katman ve bileşenlerin üretimi - Üretilen katmanların farklı kalınlıklarda olabilmesi - Yüksek verimlilik - Sinterleme sırasında düşük gerilim	- Geometrik tasarım sınırlı, karmaşık şekillerin üretiminde bazı zorluklar - Nihai üründe yüksek gözeneklilik mevcut olabilir.
Santrifüj döküm	- Sürekli derecelendirme - Hacimsel veya büyük malzemeler için uygun	Geometrik tasarıma sınırlı, sadece silindirik malzeme üretimi
Buhar biriktirme	İyi bağlanma özelliklerine sahip	Yüzey kaplaması için uygun. Hacimsel numuneler üretilemez.
Lazer biriktirme	- Lazer kontrolü ile yüksek doğruluk - Seçilerek biriktirilen malzeme, işlem sonrası prosesi azaltmaktadır.	- Hacimsel FDM için maliyetli - Nispeten artık gerilmeler oluşabilir - Isıl işlem gerekebilir.
İnfiltrasyon	- İnce katmanların üretimi - Mekanik dayanımı iyi - Çok farklı erime noktalarının fazlarını içeren FDM’ler için uygun bir yöntem	- Proses kontrolü zor - Derecelendirilmiş preform yeterli olmalı - Sıvı metalin nüfuz etmesi ve katılaşması için gözeneklilik mevcuttur.

1.5 Toz Metalurjisi

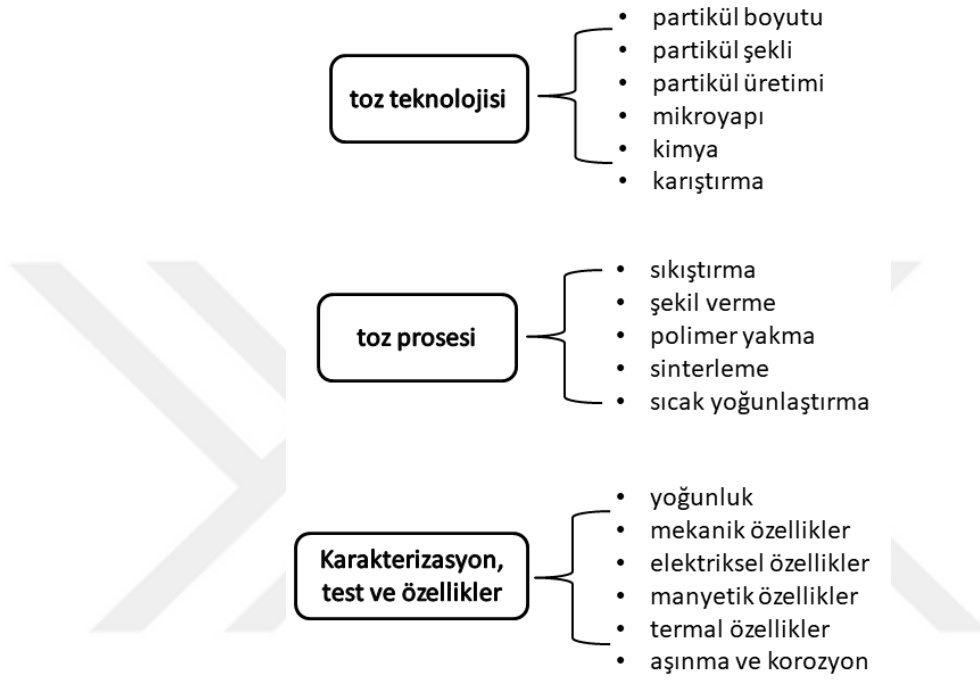
Toz metalurjisi (T/M), genellikle, başlangıç tozlarının karıştırılması, bu karışımın şekillendirilmesi, uçucu kirleticilerin (bağlayıcı, katkılar, yağlayıcı vb.), su buharı ve gazların şekillendirilmiş yapıdan uzaklaştırılması ve bu ham kompakt yapısının doğrudan sinterleme, sıcak izostatik presleme (HIP), sıcak ekstrüzyon gibi farklı yöntemlerle yoğunlaştırılması proseslerini kapsamaktadır (Ceschini ve diğ., 2017). Şekil 1.36; T/M prosesinin genel olarak akış şemasını göstermektedir.



Şekil 1.36 : Toz metalurjisi prosesinin genel akış şeması (Upadhyaya, 1997).

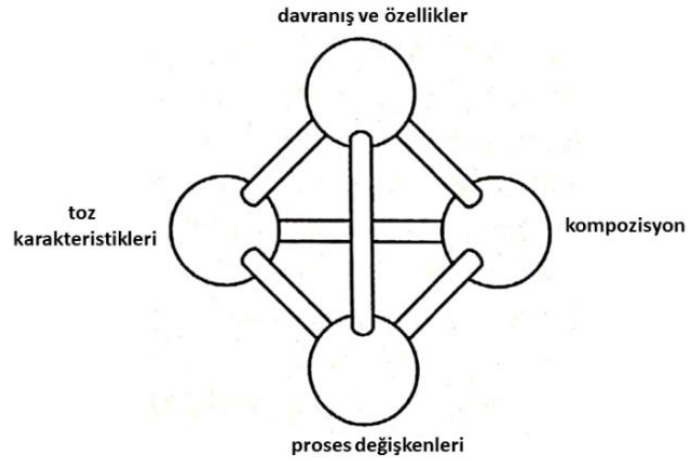
T/M prosesi, tozların kullanışlı mühendislik ve bilimsel alandaki nihai parçalara dönüştürülmesi ile ilişkilidir. P/M prosesine ilişkin üç temel kavramsal adım, Şekil 1.37’de gösterilmiştir. “Toz teknolojisi” olarak adlandırılan ilk kavram, partiküllerin doğası ve şekillendirme prosesi için hammadde hâline getirerek karıştırılması ile ilgilidir. Tozların boyutu ve morfolojisi, toz teknolojisi için üstünde durulması gereken önemli bir konudur. İstenilen özellikteki nihai ürünü elde etmek için; bir tozun yapısı, özellikleri ve şekli kullanılan yöntem tarafından değişir. Yumuşak tozlara neredeyse, tam bir yoğunlukta preslenebilirken, sert tozlar preslemeye karşı direnç gösterirler. Bu yüzden istenilen şekle ulaşmak için, bu tozlara polimerler eklenir. Daha güçlü ve kullanışlı katı yapılar elde etmek için, şekillendirilmiş toz partiküllerinin birbirlerine

bağlanmasının sağlanmasına yönelik olarak uygulanan ısıtım işlemi, sinterlemedir. Şekillendirme ve sinterleme proseslerinden sonra, üstünde durulması gereken konu nihai malzemenin mikroyapısıdır (German, 1984, 2005). T/M prosesi kontrollü aşamalara sahip olduğundan dolayı, istenilen özellikte mikroyapı elde edilmesi diğer yöntemlere kıyasla daha kolay olduğu söylenebilir. Mikroyapı ile birlikte, yoğunluk da nihai malzemenin özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir.



Şekil 1.37 : Toz metalurjisi prosesinin kavramsal akış şeması (German, 1984, 2005).

“Toz teknolojisi”, “toz prosesi” ve “karakterizasyon, test ve özellikler” ana kavram başlıkları birbirleriyle ilişkilidir. Toz morfolojisi ve üretimi ile ilgili belirlenen kararlar; sıkıştırma ve sinterleme proseslerinin verimini etkilemektedir. Bununla birlikte, sıkıştırma da mikroyapıyı etkilemekte ve böylece kompakt yapının özelliklerini tanımlamaktadır. Şekil 1.38’de ifade edilen düzgün dörtyüzlü (tetrahedron); kompozisyon, toz karakteristikleri, proses değişkenleri ve özellikler üzerindeki bu karşılıklı bağıllık hakkında fikir vermektedir (German, 1984, 2005)



Şekil 1.38 : Kompozisyon, toz karakteristikleri, proses değişkenleri ve nihai ürün performansını içeren tetrahedron ilişkisi (German, 2005).

T/M prosesinin; hammadde mevcudiyeti iyi, seri üretime uygun, kimyasal bileşim kontrolüne sahip, gözenekli ve karmaşık şekiller ile birlikte yoğunluk farkı nedeniyle döküm yöntemiyle üretimi oldukça zor olan metal matrisli kompozitlerin üretilmesi, daha homojen bir yapı elde edilebilmesi, daha basit üretim ekipmanı gerektirebilen malzemelerin üretimi, daha az enerji tüketimi ve daha kısa işlem süreleri gibi belirli avantajlara sahiptir (Günay, 2009; Ruiz-Navas ve diğ., 2005; Varol, 2016). Grafen takviyeli kompozit ve FDM'ler için T/M prosesi içerisinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılmalı değerlendirilmesi, SWOT analizi ile Çizelge 1.7'de ifade edilmiştir.

Çizelge 1.7 : Toz metalurjisinde kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Bilyalı öğütme	- Grafen topaklarının elimine edilebilmesi - Düşük maliyet - Kontrol edilebilir - Matris içerisinde homojen dağılım	Grafenin öğütme sırasında hasara uğraması	Kontrol edilebilir bir sürecin mevcut olması ile birlikte optimum üretim koşullarının sağlanabilmesi	Düşük mekanik özelliklere sahip nihai ürün elde edilebilme ihtimali
Islak karıştırma + Ultrasonikasyon	- Kontrol edilebilir - Matris içerisinde mükemmel bir dağılım elde edilebilmesi - Düşük maliyet	- Topaklanma şiddetinin azalmama ihtimali - Kompozit tozlarının nem alma ihtimali	- Seri üretime uygunluğu - Kontrol edilebilirliği sayesinde optimum üretim koşullarının sağlanabilmesi	Mekanik özellikleri düşük nihai ürün elde edilebilme ihtimali
Ultrasonikasyon + bilyalı öğütme	- Üstün homojen dağılım - Düşük maliyet - Kontrol edilebilir	Grafenin kalan nemden dolayı hasara uğrayabilme ihtimali	- Seri üretime uygunluğu - Üretim koşullarının optimize edilebilme ihtimali	Mekanik özellikleri düşük nihai ürün elde edilebilme ihtimali
Mekanik alaşımlama	- Düşük maliyet - Matris içinde homojen dağılım	Yüksek öğütme sürelerinin grafen yapısını bozarak, hasara uğratması	Endüstriyel uygulamalara yönelik çalışmaların mevcudiyeti	Mekanik özellikleri düşük nihai ürün elde edilebilme ihtimali

Çizelge 1.7 (devam) : Toz metalurjisinde kullanılan yöntemlerin SWOT analizi ile değerlendirilmesi.

Yöntem	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
Sıcak ekstrüzyon	Anizotropiyi kontrol edebilme	- Maliyeti yüksek > 500°C'den yüksek sıcaklıklarda karbür oluşumu - Tokluğu azaltma ihtimali	Anizotropiyi kontrol etmesiyle birlikte, nihai ürün için istenilen özelliklerin sınırlandırılabilmesi	- Mekanik özellikleri düşük nihai ürün elde edilebilme ihtimali - Yüksek maliyetinden dolayı, seri üretime uygunluğunun tartışılır olması
Sıcak haddeleme	Nihai ürünün mekanik özelliklerinin iyileştirilme ihtimalinin yüksek olması	- Haddeleme yönüne bağlı değişikliklerin kontrol edilmesinin güç olması - Yüksek maliyet	Endüstriyel uygulamalara yönelik çalışmaların mevcudiyeti	Nihai ürünün istenilen özellikte üretilmeme ihtimali
Spark plazma sinterleme	- Yüksek yoğunluk - Hızlı yoğunlaştırma - Grafenin önemli derecede hasara uğramaması - Düşük tane büyümesi	- Yüksek maliyet - Sonuçların malzemenin iletkenliğine bağlı olarak değişmesi	Nihai ürünün, mekanik özelliklerinin iyileştirilme ihtimalinin yüksek olması	Nihai ürünün istenilen özellikte elde edilememe ihtimali
Sıcak presleme	- Yüksek yoğunluk - Grafenin önemli derecede hasara uğramaması	- Yüksek tane büyümesi - Uzun sinterleme süresi - Yüksek maliyet	Nihai ürünün, mekanik özelliklerinin iyileştirilme ihtimalinin yüksek olması	Seri üretime uygun olmama ihtimali

1.5.1 Toz morfolojisi

Toz metalurjisi prosesi için, nihai ürünün istenen özelliklerde olmasını sağlayan en temel durumlardan biri, başlangıç tozlarının taşıdığı karakterdir. Tüm malzemeler neredeyse toz hâline getirilebilmektedir fakat bir tozun üretilmesi için, seçilen yöntem belirli malzeme özelliklerine bağlıdır (German, 1984). Tozların üretimini ana başlıklar hâlinde şu şekilde sınıflandırabiliriz: Mekanik (öğütme), kimyasal (kimyasal redüksiyon), ve fiziksel (elektrolitik, atomizasyon) yöntemler (Upadhyaya, 1997). Bütün toz üretim yöntemlerinde, yüzey enerjisi oluşturmak için, enerji harcanmaktadır. Fakat proseslerin verimliliği düşüktür, bu nedenle bir tozu oluşturmak için gereken enerji, yeni oluşturulan yüzey enerjisinden çok daha fazladır.

Tozların morfolojisi, tozların üretim yöntemine göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 1.39; partiküllerin olası morfolojik şekil ve adlandırmalarını göstermektedir. Atomizasyon yöntemiyle üretilen partiküller genellikle küresel, yuvarlak ve düzensiz bir morfolojiye sahiptir. Dendritik yapıdaki tozlar ise elektrolitik yöntemiyle üretilmektedir. Mekanik olarak öğütme ile elde edilen tozların yapısı ise, düzensiz veya pulsu bir morfoloji göstermektedir (Upadhyaya, 1997).

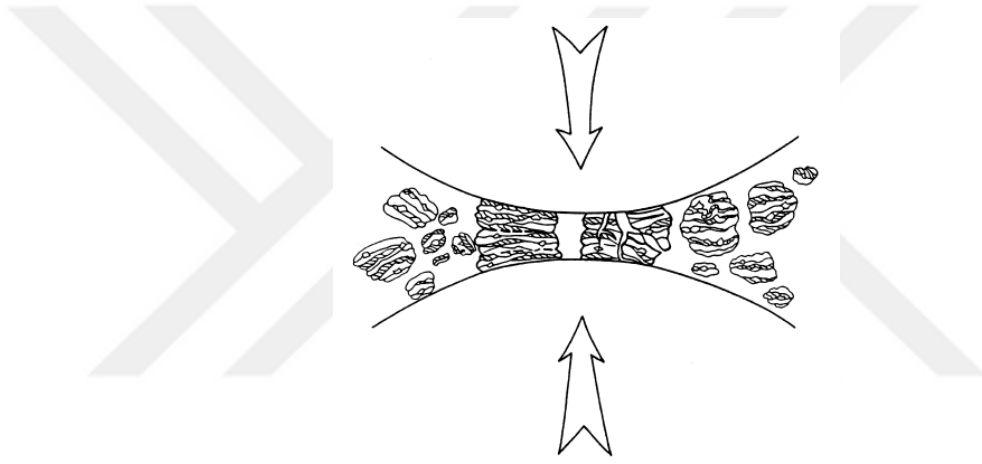


Şekil 1.39 : Partiküllerin olası morfolojik şekil ve adlandırmaları (German, 2005).

1.5.2 Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA), harmanlanmış elementel toz karışımlarından başlanarak homojen malzemelerin üretimini gerçekleştiren bir toz proses tekniğidir. Katı hâl toz

proses tekniklerinden biri olan MA; toz parçacıklarının, yüksek enerjili bir bilyalı değirmende tekrar edilen soğuk kaynaklama, kırılma ve yeniden işlenmesini içermektedir (Nieto ve diğ., 2017; Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013). Şekil 1.40’da ifade edildiği gibi, iki çelik bilya çarpıştığında, aralarında bir miktar toz hapsolmaktadır. Darbenin kuvveti, toz partiküllerini plastik olarak deforme ederek gerinim sertleşmesine ve kırılmasına neden olmaktadır. Oluşturulan yeni yüzeyler partiküllerin birbirine kaynamasını sağlar ve bu da partikül boyutunun artmasına neden olmaktadır (Suryanarayana, 2001). Sünek elemental metal tozları yassılaşıp ve üst üste bindikleri yerde, az önce oluşturulan atomik olarak temiz yüzeyler, aralarında kırılğan tozun ve hapsolmuş partiküllerin bulunduğu kompozit toz katmanları oluşturarak, birbirine kaynak yapmaktadırlar (Upadhyaya, 1997).



Şekil 1.40 : MA sırasında toz karışımının bilya-toz-bilya çarpışması (Suryanarayana, 2001).

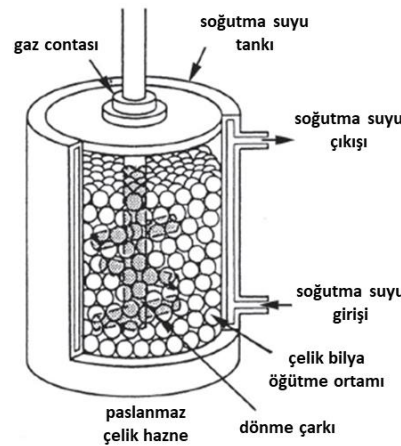
MA işlemi sırasında istenen nihai toz yapısını elde edebilmek için, bazı parametrelerin üstünde durulması gerekmektedir (El-Eskandarany, 2001; Suryanarayana, 2001). Bu parametreler,

- Öğütücü türü (Yüksek enerjili, düşük enerjili)
- Öğütücü kabı (Paslanmaz çelik, seramik vb.)
- Öğütücü atmosferi (Hava, inert gaz vb.)
- Öğütücü hızı
- Öğütme süresi
- Bilya-toz oranı

- Öğütücü kabın doluluk oranı
- Öğütme ortamı (Kuru veya yaş öğütme)
- Proses kontrol ajanı

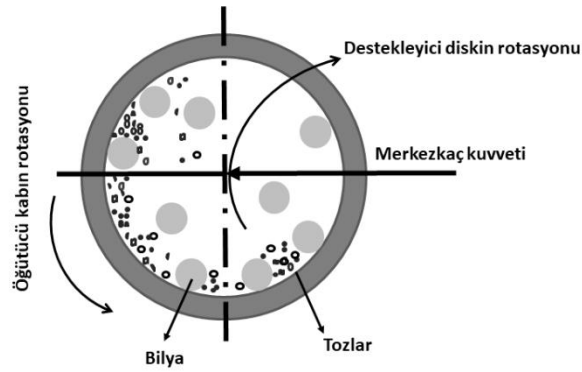
şeklinde belirtilebilir.

MA prosesi için; attritör, gezegensel tipli veya SPEX tipi titreşimli karıştırıcı bilyalı öğütme kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Öğütme tiplerinin çalışma prensipleri aynıdır. Tozlar soğuk kaynaklandığından ve MA sırasında kırıldığından, başarılı bir şekilde alaşım yapmak için bu iki işlem arasında bir denge kurmak çok önemlidir. Tozların soğuk kaynak yapma ve kırılma kabiliyeti, alaşım sistemine ve kullanılan öğütme parametrelerine bağlıdır (Lü ve Lai, 1997). Yüksek enerjili bilyalı öğütücülerden olan attritör değirmenlerde, öğütme prosedürü, yatak kollu dikey dönen merkezi bir mile sahip karıştırıcının, karıştırma eylemiyle gerçekleşmektedir. Şekil 1.41; attritör değirmenin şematik gösterimini ifade etmektedir. Attritör bilyalı öğütme prosesi kolay ve etkili bir yöntemdir. Öğütme etkisi; karıştırıcının hızına, karıştırıcıya ve haznenin geometresine bağlıdır (El-Eskandarany, 2015). Merkezi shaft ile çelik bilyalar ve kap ile çelik bilyalar arasındaki nispeten yüksek sürtünme hareketi, tozun kolayca kirlenmesine neden olabilmektedir. Alaşımlama işlemi sırasında sıcaklıktaki artış orta derecededir ve 100 ile 200°C'den az olduğu tahmin edilmektedir. Öğütme kabı sabit olduğundan su ile kolayca soğutulabilmektedir. Kirlenmeyi azaltmak için; kullanılan öğütme ekipmanları, öğütülecek malzeme ile benzer malzeme ile kaplanabilmektedir (Lü ve Lai, 1997).



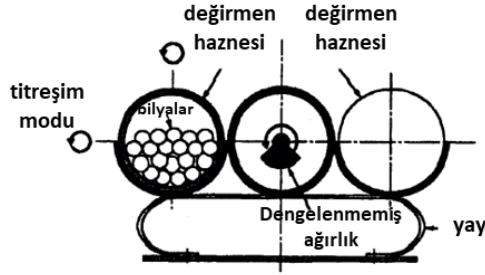
Şekil 1.41 : Yüksek enerjili attritör tipi bilyalı değirmenin şematik gösterimi (El-Eskandarany, 2015).

Şekil 1.42’de gösterilen gezegensel bilyalı değirmen, en yaygın olarak kullanılan MA yöntemidir. Bu tip bir değirmende, öğütme ortamı oldukça yüksek bir enerjiye sahiptir, çünkü öğütülen malzemeler ve bilyalar öğütme haznesinin iç duvarından çıkar ve etkili merkezkaç kuvveti yerçekimi ivmesinin yirmi katına kadar ulaşır (El-Eskandarany, 2001). Destekleyici diskin dönüşü ile birlikte, haznenin kendi eksenini etrafında dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvveti, haznedeki toz karışımına ve öğütme bilyalarına uygulanır. Toz karışımı, yüksek enerji etkisi altında kırılır ve soğuk kaynaklanır. Öğütme bilyalarının darbe enerjisi, farklı disk dönme hızları uygulanarak, değiştirilebilir. Bu tip bilyalı değirmenin avantajı, yalnızca yüksek darbe enerjisinin elde edilebilmesi değil, aynı zamanda MA prosesinin süresini kısaltabilen yüksek darbe frekansıdır. Bilyaların boyutu çok küçükse, alaşımlamanın gerçekleşmesi için darbe enerjisi çok düşük olabilir. Dönme hızını artırmadan darbe enerjisini artırmak için, tungsten gibi yoğunluğu yüksek bilyalar kullanılabilir (Lü ve Lai, 1997).



Şekil 1.42 : Yüksek enerjili bir gezegensel bilyalı değirmenin şematik gösterimi (El-Eskandarany, 2020).

Titreşimli karıştırıcı bilyalı değirmenler, genellikle az miktarda toz karışımını öğütmek için kullanılmaktadır. Bu tür öğütücülerin tipik bir örneği, orijinal olarak spektrografik numuneleri toz haline getirmek için geliştirilmiş olan SPEX 8000'dir. Bu yüksek enerjili bilyalı öğütücü, genellikle 10 g'dan fazla olmayan toz yükünü ve bilyaları karşılıklı üç dikey yönde, yaklaşık 1200 rpm'de karıştırmaktadır. Bilyaların titreşimli bir değirmendeki hareketi çok karmaşıktır, çünkü haznenin üstü ve altıyla doğrudan çarpışmalarla birlikte aynı zamanda, kenarlarla sekerek çarpışmalar da meydana gelmektedir (El-Eskandarany, 2015; Lü ve Lai, 1997). Şekil 1.43, titreşimli karıştırıcı değirmenin şematik görünümünü ifade etmektedir.

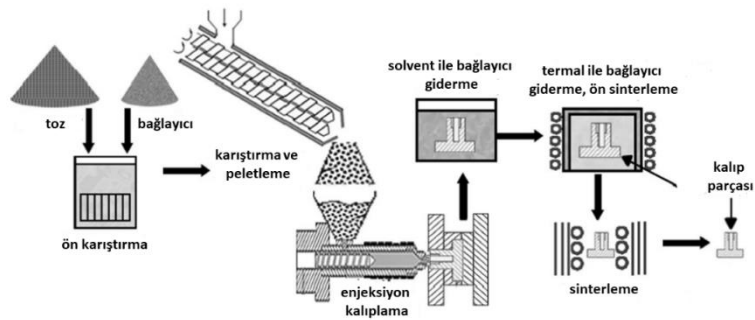


Şekil 1.43 : Yüksek enerjili bir titreşimli karıştırıcı bilyalı değirmenin şematik gösterimi (El-Eskandarany, 2001).

1.5.3 Şekillendirme

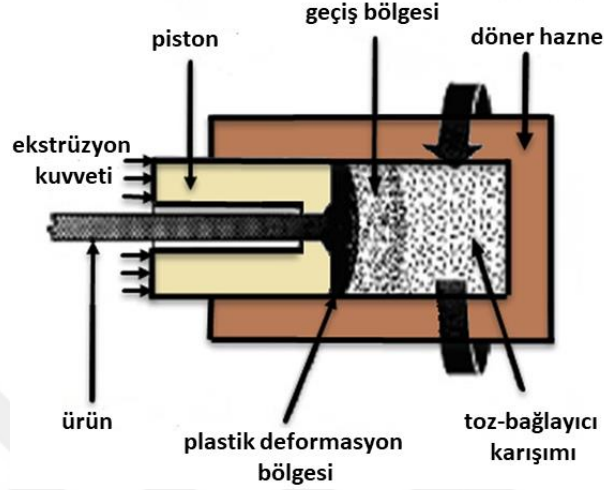
Tozların şekillendirilme işlemi için, birçok yöntem karşımıza çıkmaktadır.. Toz karakteristikleri, bağlayıcı formülasyonları, dispersiyonlar, karışım homojenizasyonu, reoloji ve şekillendirilmedeki proses değişkenlerinin etkisi, yöntemlerin tümünde benzer ihtiyaçlar doğurmaktadır. Enjeksiyon kalıplama, slip döküm, ekstrüzyon ve geleneksel sıkıştırma bu yöntemlere örnek verilebilir (German, 1984).

Enjeksiyon kalıplama, plastiklerin şekillendirilmesinde, düşük maliyeti ve karmaşık şekilleri üretebilme kabiliyeti sebebiyle yaygın olarak kullanılan bir prosestir. Şekil 1.44; toz enjeksiyon kalıplama prosesinin aşamalarını göstermektedir. Proses, toz ve bağlayıcıların karıştırılması ile başlamaktadır. Genellikle ortalama boyutu 20 µm altında küresel şekle sahip partiküller kullanılarak, sinterlemeye yardımcı olmaktadır. Bağlayıcı olarak; polimerler, mumlar, yağlar, yağlayıcılar ve sürfaktanlar içeren termoplastik karışımlar kullanılmaktadır. Toz-bağlayıcı karışımı, peletleme işlemine ve enjeksiyonla kalıplamaya tabi tutulur. Kalıplama işleminin ardından bağlayıcı giderme gerçekleştirilir ve daha sonra sinterleme işlemi uygulanır. Sinterlemeden sonra parçaya, istenirse, ısıl veya bitirme işlemleri uygulanabilir (German, 1984, 2005).



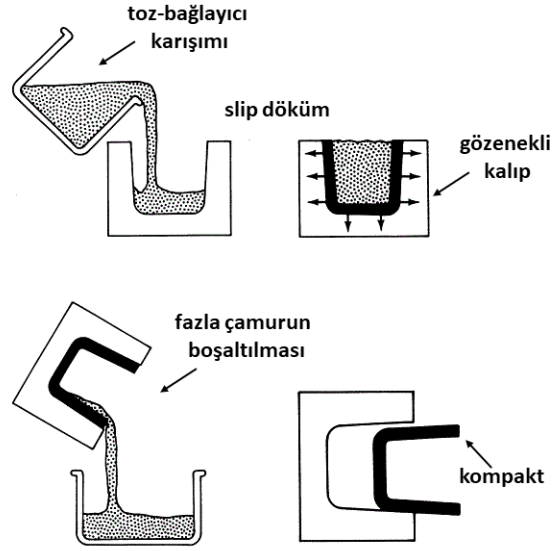
Şekil 1. 44 : Toz enjeksiyon kalıplama proses aşamaları (Basir ve diğ., 2021).

Ekstrüzyon, genellikle, boru ve çubuk gibi uzun, ince yapılar için uygun bir şekillendirme yöntemidir. Şekil 1.45; toz bağlayıcı karışımını kalıp deliğinden geçişini gösteren bir ekstrüzyon işlemini ifade etmektedir. Bir piston veya vida tipi bir nozula yerleştirilen toz-bağlayıcı karışımına kuvvet uygulanır. Bağlayıcı partikülleri işlem sırasında tutmaktadır ve sinterleme öncesi uzaklaştırılmaktadır.



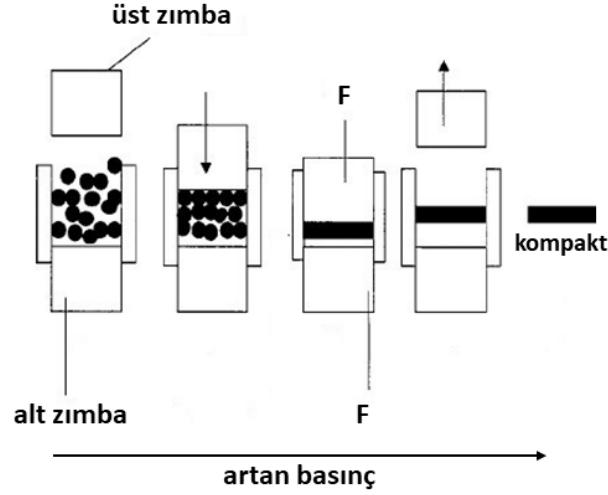
Şekil 1.45 : Boru, çubuk gibi ürünlerin şekillendirilmesinde kullanılan ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi (Tahmasbi ve Mahmoodi, 2018).

Slip döküm, yavaş bir prosestir fakat ekipman gereksinim maliyeti düşük ve geniş nihai parçalar üretilebilmektedir. Şekil 1.46; slip döküm prosesinin aşamalarını göstermektedir. Toz-su-bağlayıcı karışımı, gözenekli kalıba dökülmektedir. Karışımında düşük viskoziteyi sürdürmek için, kendiliğinden düşük viskoziteye sahip bağlayıcılar seçilmelidir. Gözenekli kalıp kullanılarak; bağlayıcı, porların içindeki kapılar etkiyle adsorbe edilmektedir ve karışımın viskozitesi artmaktadır. Döküm işleminin ardından bekletilen kalıp kuruduktan sonra, kompakt ürün kalıptan uzaklaştırılır ve sinterleme işlemine tabi tutulur. Büyük parçalar için, kurutma işlemi birkaç gün sürebilmektedir (German, 1984, 2005).



Şekil 1.46 : Slip döküm prosesinin şematik gösterimi (Souza ve Mansur, 2004).

Karıştırma ve öğütme işlemlerinin ardından, ham bir kompakt hâlde sinterleme öncesi tozların şekillendirilmesi için presleme uygulanmaktadır. Presleme işleminde, tozların şekil alması için yüksek bir basınç uygulanmaktadır. Geleneksel presleme yöntemi, karşılıklı zımbalarla birlikte bir kalıbın içerisinde bulunan tozların sıkıştırılma prosesidir. Preslemeden sonra elde edilen ürün, ham kompakt olarak adlandırılır ve henüz tam olarak işlenmemiş anlamına gelmektedir. Presleme sonucunda elde edilen ham yoğunluk, ham mukavemet kullanımı için yeterlidir fakat sinterlemeden sonra elde edilecek olan yoğunluktan çok daha azdır (Groover, 2020). Şekil 1.47, geleneksel presleme prosesi için genel aşamaları ifade etmektedir. Sıkıştırma işleminin ilk aşamasında, tozun yoğunluğu, yaklaşık olarak görünür yoğunluk olarak değerlendirilir. Partiküllerin arasında boşluklar mevcuttur ve basınç uygulandığında, ilk olarak, partiküller boşlukları doldurmak üzere yeniden düzenlenmeye başlayacaktır. Artan basınç, partiküllerin birbirlerine yeni temasıyla birlikte iyi bir bağlanmayı ve poroziteyi düşürmeyi sağlamaktadır (German, 1984, 2005).



Şekil 1.47 : Geleneksel presleme aşamaları (Sanchez-Castillo ve diğ., 2003).

1.5.4 Sinterleme

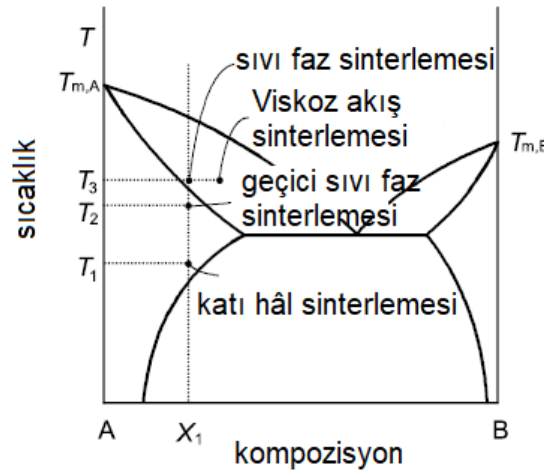
Sinterleme; toz partiküllerini genellikle atomik ölçekte meydana gelen kütle taşınım olayları vasıtasıyla, tutarlı bir katı yapıya bağlayarak yüzey alanını azaltan bir ısıtma işlemidir. Bağlanma; artan mukavemete, boyutsal değişikliğe ve daha düşük sistem enerjisine yol açmaktadır (Castro ve Van Benthem, 2012; Fang, 2010).

Sinterleme prosesi genel olarak, termal olarak aktive edilmektedir, dolayısıyla bu durumda kütle taşınımı için enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Difüzyonla sinterleme, bir boşluk oluşturma enerjisine ve bir atomu bu boşluğa hareket ettirme enerjisine bağlıdır. Arrhenius eşitliği (1.5), aktivasyon enerjisi “Q” tarafından belirlendiği üzere, bir atomun hareket etmek için yeterli enerjiye sahip olma olasılığını belirlemektedir(Fang, 2010):

$$D_v = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1.5)$$

“ D_v ”, hacim difüzyon katsayısını, “ D_0 ” atomik titreşim frekansını, “ T ” mutlak sıcaklık, “ R ” gaz sabiti ve “ Q ” ise, boşluk değişimiyle birlikte atomik difüzyonu başlatmak için gereken enerjisiyi ifade etmektedir. Arrhenius eşitliğine göre, sinterleme, aktif atomların ve uygun boşlukların artmasıyla birlikte yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, sıcaklık, sinterleme için önemli bir parametredir. Diğer önemli faktörler ise, partikül boyutu, uygulanan basınç, sıvı fazın oluşumu, sinterleme süresi, ısıtma hızı ve proses işlemi yer almaktadır (Fang, 2010).

Temel olarak sinterleme prosesi iki kategoride değerlendirilebilir: Katı hâl ve sıvı faz prosesi. Katı hâl sinterlemede, toz kompakt sinterleme sıcaklığında tamamen katı hâlde yoğunlaştığında meydana gelirken; sıvı faz sinterlemede ise, sinterleme sırasında toz kompakt içinde bir sıvı faz mevcut olduğunda meydana gelmektedir(Kang, 2004). Şekil 1.48; iki sinterleme mekanizmasını sistematik olarak faz diyagramı üzerinde göstermektedir. T_1 sıcaklığında X_1 kompozisyonuna sahip A-B toz kompaktta katı hâl sinterleme gerçekleşirken, T_3 sıcaklığında ise, aynı toz kompaktta sıvı faz sinterlemesi meydana gelmektedir.



Şekil 1.48 : Farklı sinterleme mekanizmalarının gösterimi (Kang, 2004).

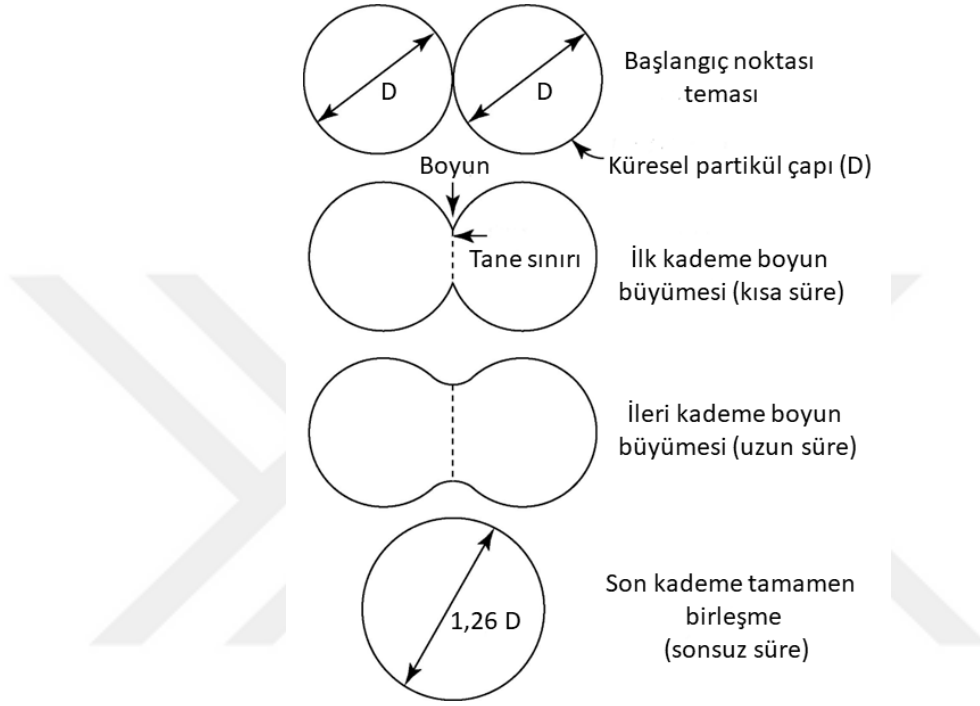
Sinterlemenin itici gücü, partiküllerin yüzey enerjisinin azaltılmasıdır (Fang, 2010; Kang, 2004) Bir toz kompaktın toplam arayüzey enerjisi " γA " olarak ifade edilir. Burada spesifik yüzey (arayüz) enerjisi ve "A" kompaktın toplam yüzey (arayüz) alanıdır. Toplam enerjisinin azalması, denklem 1.6'da gösterildiği üzere şu şekilde ifade edilmektedir (Kang, 2004):

$$\Delta(\gamma A) = \Delta\gamma A + \gamma \Delta A \quad (1.6)$$

Bu eşitlikte, arayüzey enerjisindeki değişim ($\Delta\gamma$) yoğunlaştırmadan, arayüzey alanındaki değişim ise, tane büyümesinden kaynaklanmaktadır. Katı hâl sinterleme için, arayüzey enerjisindeki değişim, katı/buhar arayüzlerinin (yüzey) katı/katı arayüzlerle değiştirilmesi ile ilgilidir (Kang, 2004).

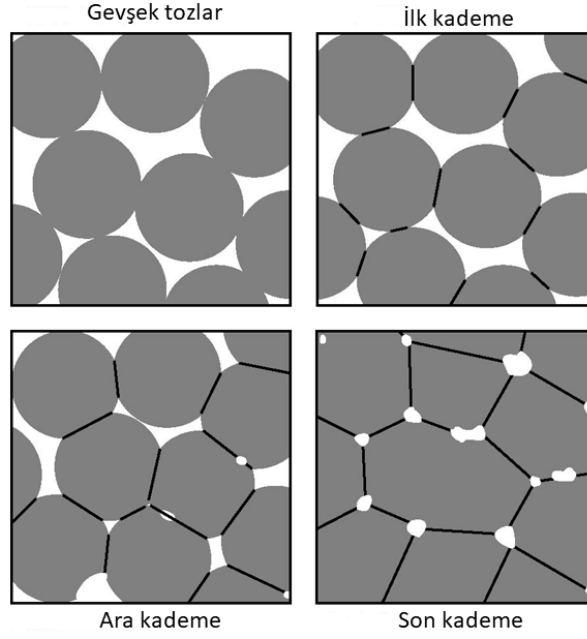
Şekil 1.49; katı hâl sinterleme mekanizmasını ifade etmektedir. Azalan yüzey enerjisiyle birlikte, birbirleriyle temas eden partiküller boyun oluşumuna sebep vermekte ve boyun büyümesi gerçekleşerek tane sınırı oluşmaktadır. Temas eden

partiküller arasındaki bu boyun büyümesi, sinterlemenin açıkça bir ifadesidir (German, 1996). Yeterli süre mevcut olduğu takdirde, iki partikülün arasındaki bağ gittikçe büyümekte ve boyutsal bir değişikliğe yol açmaktadır. Uzun süre sinterleme ile birlikte iki partikül bağlanarak başlangıç partikül çapının 1,26 katı olan tek bir küresel tane oluşmaktadır (Fang, 2010; German, 1984).



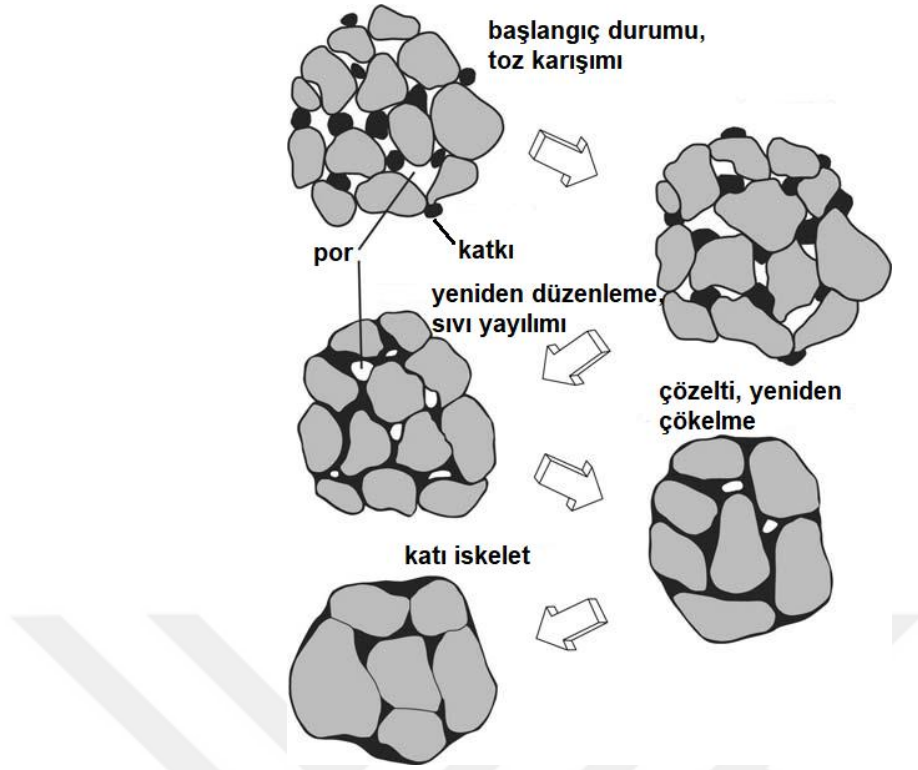
Şekil 1.49 : Katı hâl sinterleme mekanizması (Fang, 2010).

Şekil 1.50; sinterleme sırasında gözenek yapısındaki değişiklikleri göstermektedir. Sinterlemenin ilk aşamasında, birkaç noktada birbirleriyle temas hâlinde olan partiküller arasındaki boyun bölgeleri göze çarpmaktadır. Bu aşamada daha az bir boyutsal değişiklik mevcuttur. Ara aşamada ise, boyunların büyüklüğü, partiküllerin boyutunun yaklaşık üçte birinden daha büyük fakat partikül boyutunun yarısından daha küçük olmasına tekabül etmektedir (Fang, 2010). Bu aşamada gözenekler açıktır ve partiküllerin birbirleriyle olan teması gittikçe artmaktadır. Ayrıca, açık gözenekli boşluklardan gaz geçişi mümkündür (German, 1996). Sinterlemenin son aşamasında ise, gözenekler gittikçe küçülmektedir. Yoğunluk artışıyla birlikte, artık gözenekler yüzeyden bağımsızdırlar. Böylece kapalı gözeneklilik oluşmaktadır (Fang, 2010; German, 1996).



Şekil 1.50 : Sinterleme sırasında gözenek yapısındaki değişiklikleri ifade eden sinterleme aşamalarının gösterimi (Fang, 2010).

Sıvı faz sinterlemesi için, olağan koşullarda, sıvı katıyı ıslatmaktadır ve ayrıca sıvı, katı için bir çözünürlüğe sahiptir. Islatma sıvısı, gözenekliliği ortadan kaldırmak ve arayüzey enerjisini azaltmak için katı partiküller üzerinde etkisini göstermektedir(German ve diğ., 2009). Şekil 1.51; sıvı hâl sinterlemenin aşamalarını göstermektedir. Sıvının katıyı ıslatmasıyla birlikte, yeni oluşan sıvı, katı taneler arasında nüfuz etmekte ve sinter bağlanmasını çözmekte böylece tanelerin yeniden düzenlenmesine sebep olmaktadır. Son aşama genel olarak, katı hâl kontrollü sinterleme olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamada, katı bir iskeletin mevcudiyetinden dolayı yoğunlaşma yavaştır. Katı iskeletin rijitliği, daha fazla yeniden düzenlemeyi engellemekte, fakat mikroyapısal kabalaşma difüzyonla devam etmektedir (German ve diğ., 2009).

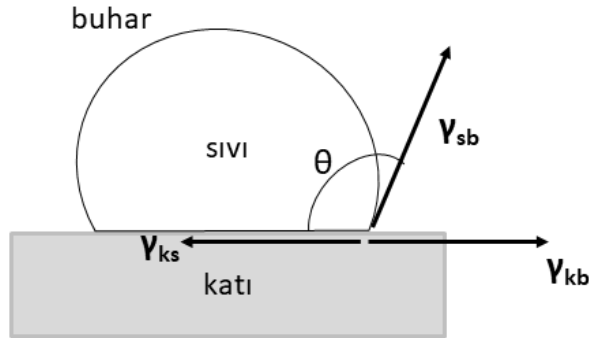


Şekil 1.51 : Sıvı hâl sinterleme mekanizması (German ve diğ., 2009).

Sıvı faz sinterlemesinde en temel faktör, sıvı fazın ıslatma açısıdır. Katı üzerinde sıvı yayılması; katı-buhar arayüz enerjisini (γ_{kb}), katı-sıvı (γ_{ks}) ve sıvı-buhar (γ_{sb}) arayüz enerjileriyle değiştirmektedir (German ve diğ., 2009). Islatma, bir yüzeye yayılan sıvıyı ifade etmektedir. Islatma açısı olarak bilinen temas açısı " θ ", sıvı, katı ve buharın kesiştiği noktada oluşmaktadır (Şekil 1.52). Yatay düzlemde, temas açısı arayüzlerle denklem 1.7’de gösterildiği üzere şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{sb} \cos(\theta) \quad (1.7)$$

Azalan ıslatma açısı ile birlikte, ıslanabilirlik artmasıyla, sıvı faz sinterlemede yoğunlaşma artmaktadır ve bağlanma ilerlemektedir (Kang, 2004).



Şekil 1.52 : Sıvı faz sinterlemesinde ıslatma açısının gösterimi.

Genel olarak; katı hâl sinterlemeye göre sıvı faz sinterleme, mikro yapının kolay kontrolüne ve proses maliyetinin düşürülmesine izin vermektedir, fakat mekanik özellikler gibi bazı önemli özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir(Kang, 2004).

1.6 Literatür Araştırması

1.6.1 Elektrik ark deşarj yöntemi ile grafen üretimine yönelik çalışmalar

Grafenin, elektrik ark deşarj yöntemi ile üretimine yönelik çalışmalar zamanla mevcudiyetini arttırmaktadır. Diğer yöntemlere nazaran, daha az maliyetli oluşu önemli bir etkidir. Fakat üretim parametrelerinin değişkenliği; prosesin kontrol edilebilirliğini azaltmakla birlikte, nihai ürünün kalitesini de etkilemektedir. Sisteme verilen atmosfer ve basınç, uygulanan akım, kullanılan elektrotların özellikleri; grafenin kalitesini etkileyen önemli parametrelerdendir.

Saf grafen sentezinin elde edildiği bir çalışmada, grafit buharlaşmasının doğru akımda ark deşarjı, herhangi bir katalizör kullanılmadan farklı oranlarda H₂ ve He karışımı ile doldurulmuş su soğutmalı bir paslanmaz çelik haznede gerçekleştirilmiştir (Subrahmanyam ve diğ., 2009). H₂ (70 Torr) + He (500 Torr) / H₂ (100 Torr) + He (500 Torr) / H₂ (200 Torr) + He (500 Torr) / H₂ (400 Torr) + He (300 Torr) oranlarında H₂ ve He karışımlarına sahip sistemde; anot 6 mm çapında 50 mm boyunda; katot ise 13 mm çap ve 60 mm boya sahip olmak üzere, iki saf grafit çubuk kullanılmış ve aralarındaki mesafe ise 2 mm'de tutulmuştur. Sistemdeki akım değeri 100-150 A arasında değişmiş ve voltaj değeri de 60 V olarak düşünülmüştür. Nispeten daha az sayıda katmana sahip grafen tabakalarının üretilmesi sağlanmıştır. En verimli grafenin 100 A akımda, 50 V ve üstü voltaj değerinde, 200 Torr basıncındaki H₂ gazı ile elde edildiği belirlenmiştir. Gerçekleştirilen başka bir çalışmada (Chen ve diğ., 2012), 150 A doğru akım (DC) uygulanarak, bir su soğutmalı paslanmaz çelik haznede, 400 Torr'da H₂ ve inert gaz karışımı (H₂ - He, Ar, N₂) kullanılarak grafen tabakaları üretilmiştir. 2 mm'lik sabit mesafeyi korumak için, 10 mm çapında iki saf grafit elektrot çubuk bu çalışmada kullanılmıştır. Üretilen grafen tabakalarının yüksek saflıkta, yeterli termal stabiliteye, geniş yüzey alanına sahip olduğu ve mükemmel Li⁺ depolama performansı gösterdiği de gözlemlenmiştir. Doğru akımda kullanılarak EAD ile grafen üretilen başka bir çalışmada ise, sırasıyla 12 ve 8 mm çapa ve 10 cm boya sahip saflıkları yüksek (%99,99) katot ve anot grafit çubuklar kullanılmıştır (Shen ve diğ., 2012). Akım değeri yaklaşık olarak 140 A'da tutulmuştur. Farklı gazların

etkilerini incelemek için gerçekleştirilen bu çalışmada; sırasıyla He (400 Torr), N₂ (400 Torr), hava (400 Torr), H₂ (400 Torr), H₂ (200 Torr) / He (200 Torr), H₂ (200 Torr) / N₂ (200 Torr) ve H₂ (200 Torr) / N₂ (100 Torr) / He (100 Torr) oranlarında gazlar sisteme verilmiştir. Sonuç olarak, sistemde az katmanlı grafen tabakaları elde etmek için H₂ içeren gazların önemi vurgulanmıştır. Özellikle, H₂-He gazlarında üretilen grafen tabakaları, diğer ortam atmosferine nazaran en iyi kristaliniteyi ve en yüksek spesifik yüzey alanını (85,5 m²/g) göstermektedir. Ayrıca, grafen tabakalarının mükemmel termal stabilite ve dispersiyon kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

Flor katkılı grafen tabakalarının üretimi için de EAD yöntemi kullanılmıştır (Shen ve diğ.,2012). Katot ve anot olarak %99,99 saflıkta grafit çubuklar kullanılmıştır. Haznedeki basınç 1 Pa'ya ulaştığında, hazne H₂ (200 Torr) ve He (200 Torr) ile doldurulmuştur. Deşarj sırasında, akım 140 A'da tutulmuştur. Flor katkılı grafen plakalarının hazırlanması için; anot olarak toz halinde grafit florit (flor içeriği: ağırlık % 60) ile doldurulmuş içi boş bir grafit çubuk kullanılmıştır. Çok katmanlı, saf grafen plakalardan çok daha büyük boyutta ve süper hidrofobik bir malzeme üretilmiştir.

1.6.2 Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar

Alüminyum matris kompozitler; yüksek mukavemet/ağırlık oranı, düşük maliyeti, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi özellikleri sebebiyle yapısal ve fiziksel olarak gereksinimleri karşılayabilecek bir malzeme grubudur(Şenyurt ve diğ., 2022). Karbon esaslı malzemelerin içerisinde grafenin eşsiz özellikleri düşünülerek, alüminyum matrisli kompozitler için ideal bir takviye malzemesi olarak kullanımı, yaklaşık son on beş yıl içinde incelenmektedir(Bartolucci ve diğ., 2011). Alüminyum matrisinde grafen takviyesinin homojen dağılımı, bu kompozitlerin geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir. T/M prosesi için, bu dağılımı geliştirilecek çalışmalar incelenmeye devam etmektedir.

Bartolucci ve diğ. (2011), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, bilyalı öğütme, sıcak izostatik presleme ve ekstrüzyon yardımıyla grafen tabakalarıyla takviye edilen Al esaslı kompozitler üretmişlerdir. Kompozitlerde, alüminyum karbür (Al₄C₃) oluşumu nedeniyle hem sertlikte hem de çekme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Wang ve diğ. (2012), T/M ile üretilmiş ağırlık %0,3 grafen içeren Al esaslı kompozitin, takviyesiz Al'a göre çekme mukavemetinde %62 artış gösterdiğini belirlemiştir. Bastwros ve diğ.

(2014), ağ. %1 FLG takviyeli Al6061 esaslı kompoziti, farklı öğütme süreleri ile grafen dağılımının etkilerini araştırmak için üretmeyi başarmışlardır. 60 ve 90 dk boyunca öğütülen ağ. %1 FLG içeren kompozitin, sırasıyla, eğilme mukavemeti %47 ve %34 kadar artış göstermiştir. Rashad ve diğ. (2014), T/M ile ağ. %0,3 GNP ilavesi ile takviyesiz Al'a göre ağ. %0,3 GNP eklenmiş nano kompozitin akma dayanımı ve maksimum mukavemetinde, sırasıyla, %14,7 ve %11,1 oranında artış tespit etmişlerdir. Yan ve diğ. (2014), GNF takviyeli Al esaslı kompozitleri bilyalı öğütme, sıcak izostatik presleme ve ardından sıcak ekstrüzyon ile başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Ağ. %0,5 GNF takviyeli kompozitin akma dayanımını 214 MPa'da 319 MPa'ya arttırmayı başarmışlardır. Bustamante ve diğ. (2014), Al içerisine ağ. %0,25, %0,5 ve %1 oranlarında GNP ilave ederek, yüksek enerjili bilyalı öğütücüde 1, 3 ve 5 sa MA yaparak, GNP ilavesi ve öğütme süresinin kompozitin üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Takviyesiz Al'ın 5 sa öğütme ve sinterleme sonrası sertliği 79 HV iken; ağ. %1 GNP ilavesi ile aynı koşullarda üretilen numunenin sertliğinin 93 HV'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Öğütme süresinin artışıyla, daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Shin ve Bae (2015), bilyalı öğütme ve sıcak haddeleme ile üretilen FLG takviyeli Al2024 esaslı kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek spesifik yüzey alanına sahip olan matris yapısında dağılmış FLG'lerin mevcudiyeti, kompozitlerin mukavemetini önemli ölçüde arttırmıştır. Hacimce %0,7 FLG içeren kompozitin çekme dayanımı, 700 MPa olarak elde edilmiştir. Rashad ve diğ. (2015b), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, CVD yöntemiyle üretilmiş olan GNP ve saf Al tozu, çözelti bazlı bir T/M yöntemiyle üretmişlerdir. Hem sinterlenmiş hem de ekstrüze hâlde olan ağ. %0,25 GNP'ye sahip kompozitlerin, ağ. %0,5 ve %1 GNP'ye sahip olan kompozitlerden mekanik ve elektrokimyasal özellikler bakımından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Reddy ve diğ. (2015), T/M prosesini kullanarak, arttırılmış termal özelliklere sahip rGO takviyeli Al esaslı kompozitleri üretmeyi başarmışlardır ve ağ. %0,5 rGO içeren Al esaslı kompozitin, sertlik ve termal iletkenlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Shin ve diğ. (2015), T/M yöntemi ile Al matrisi içinde homojen birkaç katlı grafen dağılımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir ve hacimce %0,7 grafen içeriğine sahip kompozitte 440 MPa gerilim mukavemeti elde etmişlerdir. Grafen takviyeli Al esaslı kompozitin akma mukavemetinin, çok duvarlı KNT takviyeli Al'a kıyasla daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Zhang ve diğ. (2016b), GNP takviyeli Al5083 esaslı kompozitleri, bilyalı öğütme, sıcak pres ve ekstrüzyonla üretmeyi başarmışlardır. GNP takviyesi

arttıkça, kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli gelişmeler görülmüştür. Ağ. %1 GNP içeriğine sahip kompozitin, akma ve çekme mukavemeti, sırasıyla, 322 MPa ve 470 MPa'a ulaşmıştır. Kumar ve Xavier (2016), ultrasonikasyonla asetonda dağıtılan grafenleri ağ. %0,2; %0,4 ve %0,6 oranlarında Al6061 alaşımına bilyalı öğütme ile takviye ederek, inert ortamda sinterleyip grafen takviyeli Al esaslı kompozitler üretmişlerdir. Grafen ilavesinin, sürtünmeyi ve aşınma oranını (kütle kaybı) bastırarak kompozitler üzerinde olumlu etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Liu ve diğ. (2016), ağ. %0,3 GO ilave edilen Al esaslı kompozitler için, takviyesiz Al'a göre sertlik değerlerinde %32 kadar bir artış gözlemişler ve 560 MPa'lık maksimum basınçta %88,5 oranında bir yoğunluk elde etmişlerdir. Gao ve diğ. (2016b), GO-Al tozlarını elektrostatik olarak kendiliğinden, setil trimetil amonyum bromür (CTAB) ile kaplayarak ve grafen takviyeli Al esaslı kompozitleri ise, T/M yöntemi ile elde etmişlerdir. GO tabakalarının CTAB ile kaplanmış olan Al tozlarının üzerinde homojen olarak yapıştığı görülmüş ve böylece Al matrisinde homojen bir grafen dağılımı mevcudiyeti tespit edilmiştir. Grafen takviyeli Al esaslı kompozitlerin maksimum çekme dayanımı artmış daha sonra eklenen grafen miktarı arttıkça düşüş göstermiştir. Kopma uzamasının ise grafen içeriği ile birlikte düştüğü gözlemlenmiştir. Akçamlı ve diğ. (2016), GNP içeren Al esaslı kompozitleri, mekanik alaşımlama ve basınçsız sinterleme ile üretmeyi başarmışlardır. Kompozitlerin sertliği ağ. %0,5 ve ağ. %1 GNP ilavesiyle kademeli olarak artarken, GNP miktarının ağ. %2 oranına çıkarılmasıyla olumsuz bir etki gözlenmiştir. Tabandeh-Khorshid ve diğ. (2016), yarı-toz (semi-powder) yöntemi ile ağ. %0,1 ve ağ. %1 GNP takviyeli Al esaslı kompozitler elde etmişlerdir. Ağ. %1 GNP içeriğine sahip kompozitin sürtünme katsayısı, takviyesiz Al'a göre daha iyi bir iyileşme göstermiştir. Ağ. %1 GNP içeriğine sahip kompozitin ise yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür. El-Ghazaly ve diğ. (2017), bilyalı öğütme ve sıcak ekstrüzyon yöntemleriyle birlikte ağ. %5'e varan oranlarda grafen takviyeli AA2124 esaslı kompozit üretmişlerdir. Grafenin, Al alaşım matrisinde homojen dağılımı gözlemlenmiş ve buna bağlı olarak yüksek mekanik özellikler de elde edilmiştir. Ağ. %5 grafen içeriğiyle birlikte grafen kümelerinin toplanması görülmüştür. Aşınmaya karşı en yüksek sert ve dirençli malzeme üretimi, ağ. %5 grafen içerikli AA2124 esaslı kompozitte tespit edilmiştir. Grafenlerin Al matrisinin tane boyutlarında homojen dağılımında düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı; homojen olmayan dağılımda ise grafen tabakalarının sürtünme sırasında soyulması ve ayrılması gözlemlenmiştir. Li ve Xiong (2017), GNS takviyeli Al esaslı

kompozitleri, yüksek enerjili bilyalı değirmen ve vakumlu sıcak presleme yöntemi ile üretmeye çalışmışlardır. GNS miktarı arttıkça Al_4C_3 oluşumu gözlemlenmiştir. Ağ. %0,25 GNS takviye edilen kompozitin; akma ve çekme mukavemetinde, sırasıyla, takviyesiz Al'a göre %38,27 ve %56,19 oranında artış görülürken, ağ. %0,5 üzeri GNS içeren kompozitte ise çekme mukavemetinde düşüş tespit edilmiştir. Kwon ve diğ. (2017), herhangi bir ön GO indirgeme prosesi olmaksızın, ağ. %1 GO takviyeli Al esaslı matris kompozit malzeme elde etmişlerdir. Sertlik değeri, AlMg5 alaşımından iki kat daha iyi olup; maksimum çekme mukavemeti 560 MPa'a kadar ulaşmıştır. Fakat kopma uzamasının %40 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Eğilme mukavemetinin ise AlMg5 alaşımından dört kat daha iyi olduğu görülmüştür. Niteesh Kumar ve diğ. (2017), MLG takviyeli Al esaslı kompozitleri, T/M ve sıcak ekstrüzyon yöntemleriyle üreterek geliştirmeye çalışmışlardır. MLG'lerin matris yapısında homojen dağılımı ve matris ile mükemmel bir ara yüzey oluşturduğu tespit edilmiştir. Ağ. %1 MLG eklenmesiyle, kompozitin sertlik ve çekme mukavemetinin artış gösterdiği görülmüştür. Li ve diğ. (2018b), GNP takviyeli Al esaslı nanokompozitleri soğuk ve vakumlu sıcak preslemeyi içeren iki adımlı yeni bir prosesle üretmişlerdir. GNP'lerin, Al matris yapısında homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Hacimce %0,5; %1 ve %2 GNP içeren Al matrisli kompozitlerin basma mukavemeti 297, 345 ve 527 MPa'a ulaşmıştır. Bhadauria ve diğ. (2018), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, fiziko-kimyasal olarak fonksiyonelleştirilmiş GNP takviyeli Al esaslı nanokompoziti SPS ile üreterek, %99 oranında relatif yoğunluk elde etmişlerdir. Ağ. %0,5 GNP takviyeli Al esaslı kompozitlerin, akma ve çekme mukavemetinin, sırasıyla, %98 ve %63 oranında artmış olduğu görülmüştür. Ağ. %1 GNP içeren kompozitlerde ise, GNP'lerin aglomerasyon eğiliminden dolayı, çekme mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. Jiang ve diğ. (2018), GNS takviyeli Al matris kompozitleri, değişken hızlı bilyalı öğütme (SSBM) ile uzun süreli düşük hızda bilyalı öğütme (LSBM) ve kısa süreli yüksek hızlı bilyalı öğütme (HSBM) ile üretmişlerdir. Hacimce %0,5 GNS takviyeli Al kompozitleri SSBM ve 6 sa LSBM ile yapılan öğütle birlikte Al matrisleri ve GNS arasında iyi bir kombinasyon oluşturulmuş ve böylece GNS'lerin matris yapısında homojen dağılımı sağlanmıştır. GNS takviyeli kompozitte %13,5 oranında süneklik ve 295 MPa mukavemet elde edilmiştir. Zhang ve diğ. (2018c), mekanik öğütme ve sıcak presleme ile GNS takviyeli Al-Si (A355) esaslı kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Hacimce %1 oranında GNS takviyeli kompozitin sertliğinin, takviyesiz Al alaşımından, %115,1 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bhadauria ve diğ. (2019), sodyum

dodesil sülfat (SDS) ile fonksiyonelleştirilmiş GNP takviyeli Al esaslı kompozitleri yüksek enerjili öğütme ve SPS ile üretmeyi başarmışlardır. Takviyesiz Al'a göre, ağ. %0,5 GNP takviyeli Al esaslı kompozit, sırasıyla, akma ve çekme mukavemetinde %85 ve %44 oranında artış sağlamıştır. Akçamlı ve diğ. (2019), GNP takviyeli Al esaslı kompozitleri; MA, soğuk presleme ve basınçsız sinterleme içeren bir T/M yöntemi ile üretmeyi başarmışlardır. Ağ. %2 GNP'ye sahip kompozitte GNP'nin aglomerasyona uğradığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ağ. %0,5 GNP'ye sahip Al esaslı kompozitin sertlik değeri 199,4 HV olarak elde edilmiştir. Xiong ve diğ. (2020), GNP takviyeli Al esaslı kompozitleri, yüksek enerjili bilya ve SPS yöntemi ile elde etmişlerdir. GNP'lerin matris yapısında homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı 600°C'ye çıktığında, relatif yoğunluk %99'a ulaşmıştır. Ayrıca, bu sıcaklıkla üretilen kompozitlerde, düzensiz bir şekilde yapıda dağılmış Al_4C_3 fazına rastlanmıştır. Bu durum, yük transfer verimliliğinde gözle görülür bir artışa ve kompozitin mekanik özelliklerinde iyileşmeye yol açtığı tespit edilmiştir. Raj ve diğ. (2021), MA ve basınçsız sinterleme içeren T/M yöntemi ile grafen takviyeli AA7075 esaslı kompozitler geliştirip, üretmişlerdir. Ağ. %1 grafen içeren kompozit için, en yüksek sertlik değerine (106,4 HV) ulaşmışlardır. Akçamlı ve diğ. (2022), EAD ile sentezlenmiş FLG takviyeli Al-Si (ağ. %10 Si) esaslı kompozitlerin, T/M yöntemi ile başarıyla üretimini gerçekleştirmişlerdir. FLG takviyesi ile, sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 4 sa MA ile elde edilen Al-10Si alaşımı ve ağ. %5 FLG takviyeli Al-10Si esaslı kompozitin sertlik değerleri, sırasıyla, 102 ve 178 HV olarak belirlenmiştir. Ağ. %0,5 FLG ilavesi ile, takviyesiz alaşıma göre basma dayanımı %50 oranında iyileşme göstermiştir. Kaykılarlı ve diğ. (2022), EAD ile sentezlenen FLG takviyeli Al-4Cu esaslı kompozitleri, bilyalı öğütme ve basınçsız sinterlemeyi kapsayan T/M yöntemi ile üretmeyi başarmışlardır. En yüksek sertlik değerine, 7 sa bilyalı öğütme ve ağ. %1 FLG katkılı kompozit ile ulaşmışlardır. Şekil A.1; T/M ile üretilen grafen takviyeli Al esaslı kompozitlere yönelik olarak şu ana kadar incelenmiş mevcut literatür çalışmaları, genel olarak ifade etmektedir (EK A).

1.6.3 Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli bakır esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar

Bakır esaslı kompozitler; yüksek gerilme mukavemeti, yüksek Young modülü, mükemmel aşınma direnci, iyi elektrik iletkenliği ve termal iletkenlik gibi üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı; elektronik paketler, ısı alıcıları ve yakıt

hücresi elektrotu gibi alanlarda kullanılabilecek potansiyel yüksek performanslı malzemeler olarak kabul edilmektedirler (Yue ve diğ., 2017). Saf Cu yüksek sıcaklıklarda zayıf mekanik özelliklere sahiptir (Ayyappadas ve diğ., 2017). Bu nedenle, SiC (Schubert ve diğ., 2007), Al_2O_3 (Rajković ve diğ., 2009) ve TiC (Bagheri, 2016) gibi uygun takviye malzemeleri ile Cu esaslı metal matrisli kompozitler üretilmektedir. Grafen, eşsiz özellikleri bakımından, metal matrisli kompozitler için ideal bir takviye malzemesi olarak düşünüldüğünden dolayı, bugüne kadar mevcut literatür incelendiğinde, T/M yöntemi ile Cu metaline grafen takviyesi yapılan çalışmaların olduğu görülmektedir. Fakat, grafenin homojen dağılımı, grafen ve Cu matrisi arasındaki zayıf ıslanabilirlik nedeniyle zordur (Tjong, 2013). Bu nedenle, grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar detaylandırılmaya çalışılmaktadır.

Hwang ve diğ. (2013), yaptıkları bir çalışmada, Hummers' yöntemiyle elde edilen GO'yu, bakır asetat çözeltisine ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$) ekleyerek $80^\circ C$ 'de ısıtmış ve NaOH çözeltisine eklemiştir. Cu iyonları, CuO 'ya indirgenerek, GO/ CuO nanokompozit tozları üretilmiştir. Grafen/Cu nanokompozit tozlarının oluşturulması için, bu tozlar H_2 atmosferi altında $400^\circ C$ 'de 3 sa indirgenmiştir. Kompozit tozları, 50 MPa basınç altında, 3dk boyunca ve $600^\circ C$ 'de SPS ile sinterlenmiştir. Kompozitlerin, saf Cu'a göre, sırasıyla, elastik modül (131 GPa) ve akma dayanımı (284 MPa), %30 ve %80 olarak daha yüksek oranda elde edilmiştir. Cui ve diğ., (2014), birkaç katmanlı grafen (FLG) ve Cu tozunu, homojen kompozit tozlar üretmek için, bilyalı öğütme yardımı (100, 200 ve 300 rpm, 4 ve 8 sa) ile karıştırmışlardır. Hacimce %2,4 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitler; SPS ile 40 MPa basınç altında, $600^\circ C$ 'de üretilmişlerdir. 4 sa, 100 rpm bilyalı öğütmeyle üretilmiş olan FLG/Cu kompozitinin, akma dayanımı 378 MPa ve elektrik iletkenliği %70,4 IACS (International Annealed Copper Standard) elde edilmiştir. Chu ve Jia (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada; grafen nano tabakalı (GNP) hacimsel Cu esaslı kompozitlerin üretilmesine yönelik fizibilitesini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan eksfoliye edilen GNP'ler, modifiye Brodie'nin yöntemine göre doğal grafit pullarından elde edilmiştir. Matris yapısında yüksek GNP dağılımı elde etmek için; hacimce %0, %3, %5, %8 ve %12 olan GNP'ler, bilyalı öğütme yardımıyla Cu tozları ile karıştırılmıştır. Karıştırılan tozların her biri bir SPEX karıştırıcıyla, 1200 rpm'lik bir dönme hızında, Ar atmosferi altında 3 sa öğütülmüşlerdir. Öğütülmüş tozlar ilk önce yaklaşık %75 teorik yoğunluğa

sahip olacak şekilde kompakt hâle getirilmiş ve yoğunlaştırmak için sıcak pres tekniği kullanılmıştır. Kompakt tozlar, 15 dk boyunca 800°C'de sinterlenmiştir. Hacimce %3 ve %8 GNP içeriğine sahip kompozitlerde, GNP'lerin Cu matrisinde iyi bir şekilde dağılımı gözlemlenirken; hacimce %12 GNP içeriğine sahip kompozitte GNP'lerin matriste aglomerasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Hacimce %8 GNP'ye sahip kompozitin akma dayanımında %114, Young modülünde ise %37 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Fakat, GNP'lerin aglomerasyonu gözenekliliğe yol açmış ve bu durum mukavemeti zayıflatmıştır. Li ve diğ. (2015), bilyalı öğütme (1700 rpm, 4 sa) ile grafen kaplı Cu tozları ve ardından SPS (60 MPa, 5 dk, 650°C) yoluyla yüksek kaliteli grafene (HQG) dayalı elektriksel iletkenliği geliştirilmiş bir grafen takviyeli kompozit üretmeyi başarmışlardır. Porozite artışı ile birlikte, ağırlık %0,5 oranının üstünde HQG takviye edildiği takdirde, sertlik ve elektriksel iletkenliğin düştüğü gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik (100 HV) değeri, ağırlık %0,5 HQG takviyeli Cu esaslı kompozitte görülmüştür. Dutkiewicz ve diğ. (2015), grafen takviyeli Cu esaslı kompozitleri vakum içinde tek eksenli sıcak presleme ile üretmişlerdir. Biri 10-20 nm kalınlığında ve 14 µm'den daha az yanal boyuta sahip (N0006) ve diğeri 2-4 nm tabaka kalınlığında iki dereceli grafen tabakaları (RFGLO) takviye malzemesi olarak kullanılmıştır ve ağırlık %1 ve %2 şeklinde Cu matrisine eklenmiştir. Ağırlık %1-2 FLGRO içeriği, N006 grafen içeriğine göre, kompozitin sertliğinde %50 artışa ve %30 kadar elektrik direncinde düşüşe neden olmuştur; FLGRO'nun, matris yapısı içerisinde N006 grafen içeriğine göre daha homojen dağıldığı görülmüştür. Varol ve Canakci (2015), T/M ile üretilen çok katmanlı grafen (MLG) içeriğinin, MLG takviyeli Cu esaslı kompozitler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ağırlık %0,5; %1,5; %3 ve %5 olarak matrise eklenen MLG'lerin içeriğinin artmasıyla, MLG/Cu kompozitlerinin sertliğinin ve elektriksel iletkenliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun, MLG partiküllerinin yumuşak yapısına ve partikül sınırlarındaki aglomerasyon içeriğindeki artıştan dolayı olduğu düşünülmüştür. Li ve diğ. (2015), RGO / Cu tozlarını, glisin, bakır nitrat ve GO karışımının tek basamaklı bir termal reaksiyon vasıtasıyla sentezlemek için yeni bir proses uygulamışlardır. Hazırlanan RGO/Cu kompozit tozları spark plazma sinterleme (SPS) ile 580°C'de, 50 MPa' bir basınç altında ve vakum ortamında 5 dk boyunca sinterlenmiştir. Saf Cu'ya göre; ağırlık %0,6 RGO takviyeli Cu esaslı kompoziti, akma mukavemetinde %75,8 artış; gerilme mukavemetinde ise %47,7 bir artış göstermiştir. Jiang ve diğ. (2016), Cu için bozunmamış saf grafenin (PG) takviye olabilme olasılığını incelemişlerdir. Ticari PG,

grafitin interkalasyon ve eksfoliyasyonu, oksijen içeren fonksiyonel gruplar olmadan ve yüksek kristalinite ile hazırlanmıştır. Cu matrisinde PG'nin homojen dağılımını gerçekleştirmek için; Cu tozu ve PG'nin, polivinil alkol (PVA) ve polivinil pirolidon (PVP) ile modifikasyonu sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kompozit toz, ısıyla işlemde geçirilmiş ve hacimsel PG/Cu kompozitini elde etmek için SPS ile sinterlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, Hummers' yöntemi ile elde edilen GO ile PG numunelerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. PG ile takviye edilen kompozitler RGO ile ilave edilenlere kıyasla, mukavemet artırma yönünden daha uygun olduğu tespit edilmiştir. PG/Cu kompozitlerinde akma dayanımı (172 MPa) saf Cu'dan %90; basma mukavemeti (228 MPa) ise %81 daha iyi olarak elde edilmiştir. Chen ve diğ. (2016), grafen aglomerasyonunun etkisi olmaksızın grafen konsantrasyonunun kompozitin özelliklerine etkilerini incelemek için, moleküler seviyede karıştırma işlemi ve SPS işlemi vasıtasıyla, değişik grafen içeriğine sahip Cu esaslı matris kompozitleri (Cu/GNPs) hazırlamışlardır. Hacimce %0,2; %0,4; %0,6; %0,8; %2,0 ve %4,0 GNPs içeren kompozit tozlar üretilmiştir. Cu/GNPs kompozit tozları; 700°C'de 5 dk boyunca vakum altında SPS ile sinterlenmiştir. GNP'lerin miktarı arttıkça termal ve elektriksel iletkenliğin düştüğü görülmüştür. Elde edilen en yüksek elastisite modülü ve sertlik değeri, sırasıyla; 147 GPa ve 1,75 GPa olarak belirlenmiştir. Yue ve diğ. (2017), grafen nano plaka (GNS) takviyeli Cu esaslı kompozitleri, bilyalı öğütme ve sıcak pres sinterleme yöntemlerini kullanarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada, Hummers' yöntemi ile elde edilen GO nano plakaları ultrasonik bir işlemle homojen bir dağılım elde edebilmek için, etanolde 1 saat süreyle dağıtılmış ve saf Cu tozları eklenmiştir. Daha sonra GO nano plakalarının ve Cu tozlarının karışımına; Ar atmosferi altında, 1, 3, 5 ve 7 saat boyunca bilyalı öğütme uygulanmıştır. Kompozitlerin GNS içeriklerinin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için, sırasıyla ağırlık %0,5; %1,0 ve %2,0 GO nano tabakaları kompozitlere eklenmiştir. Bilyalı öğütme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen GO-Cu tozları, daha sonra bir vakumlu sıcak pres sinterleme fırınında 25 MPa basınç altında, 850°C'de 1 saat sinterlenmiştir. Sinterleme esnasında GO, yüksek sıcaklıklarda grafene indirgenerek GNS/Cu kompoziti elde edilmiştir. Sonuç olarak, bilyalı öğütmenin, Cu matris içerisinde GNS'lerin dağılımı için elverişli bir yöntem olduğu görülmüştür. Fakat uzun süren bilyalı öğütmenin GNS'lere ciddi hasar verdiği de gözlemlenmiştir. GNS içeriği az olduğunda, GNS'ler ile Cu matris arasındaki arayüzey bağları iyi ve GNS'ler Cu tanelerinin sınırları boyunca dağılmaktadır. GNS içeriği yüksek olduğunda ise GNS'lerin toplanması, GNS/Cu kompozitlerinde

belirgin olarak görülmektedir. GNS içeriği ağırlık %0,5 olduğunda hem maksimum çekme kuvveti hem de kopma uzamasının en yüksek değerde olduğu görülmüştür. He ve diğ. (2018), elektrokimyasal eksfoliyasyon olarak elde edilen grafeni (EG), ağırlık %0,05; %0,1; %0,15 ve %0,2 oranlarında, bilyalı öğütme (200 rpm, 1 sa) ve vakumlu tüp fırında sinterleme (800°C, 1 sa) ile takviye ederek Cu esaslı kompozit yapılar elde etmişlerdir. En yüksek sertlik değerini (70,2 HV), ağırlık %0,2 EG takviyeli Cu esaslı kompozitle elde etmişlerdir. Gao ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, GO-Cu tozlarını elektrostatik olarak kendiliğinden oluşumu ile elde etmek için; katyonik yüzey maddesiyle kaplı Cu tozlarına modifiye edilen, Hummers' yöntemi uygulayarak hazırlanan GO, ilâve etmişlerdir. Hummers' ile hazırlanmış GO tozları (10, 30, 50 mg) damıtılmış suya (50 mL) eklenmiş ve GO sulu dispersiyon çözeltisini elde etmek için 2 sa sonike edilmiştir. Cu tozları (10 g), CTAB sulu çözeltisine (100 ml) ilave edilmiş, 20 dk ultrasonik işlemle dağıtılmış ve manyetik olarak 1 saat karıştırılmıştır. CTAB ile modifiye edilen tozlar damıtılmış suya eklenip, karıştırılarak böylece bir Cu toz süspansiyonu oluşturulmuştur. GO sulu dispersiyon çözeltisi, Cu tozu süspansiyonuna ilave edilmiş ve manyetik olarak karıştırılmıştır. Son olarak karışım damıtılmış su ile durulanmış ve GO-Cu tozlarını elde etmek için filtrelenmiştir. Kompakt kompozit tozlar; Ar atmosferinde, 25 MPa basınç altında 1 sa boyunca 900 °C'de sinterlenmiştir. Kompozit içindeki grafen içeriği, sırasıyla, ağırlık %0,1; %0,3 ve %0,5 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, grafenin Cu matrisinde homojen olarak dağıldığı ve hiçbir grafen aglomerasyonunun gözlenmediği görülmektedir. Grafen içeriğinin artmasıyla birlikte kompozitlerin sertlik ve aşınma özellikleri önce artmakta, daha sonra ise azalmaktadır. Asgharzadeh ve Eslami (2019) gerçekleştirdikleri **bir** çalışmada, homojen bir grafen dağılımı elde etmek için, ıslak kimyasal karıştırma yöntemi ile grafen takviyeli Cu esaslı kompozit tozları hazırlamışlardır. Ağırlık %0,25; %0,5; %0,75 ve %1 rGO takviyesi ile sıcak haddeleme prosesi kompozitler üretilmiştir. Kompozitteki rGO içeriği arttıkça, Cu/rGO kompozitlerinin sertlik değerleri artarken, basma dayanımı ve elektrik direnci başlangıçta yükselmekte ve daha sonra ise düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, rGO içeriğindeki artış, kompozitlerin relatif yoğunluğunun azalmasına yol açtığı görülmüştür. Salvo ve diğ. (2019); bilyalı öğütme (Ar, 150 rpm, 0,5-4 sa) ve ardından vakum ortamında sıcak presleme (30 MPa, 600°C -700°C) kullanarak, ağırlık %1 GNS ile takviye edilen Cu esaslı kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri, %83 ve %92 arasında değişim göstermiştir. 700°C'de sinterlenen kompozit, tane boyutunun artması nedeniyle, 600°C'de

sinterlenmiş kompozite göre daha düşük sertlik değerleri sergilemiştir. Ağ. %1 GNS takviye edilerek elde edilen kompozitin elektriksel iletkenliği, saf Cu'a göre %22 olarak iyileşme göstermiştir. Wu ve diğ. (2019), farklı grafen içeriklerine sahip (hacimce %0,5; %1, %1,5 ve %2) grafen plaka takviyeli Cu esaslı kompozitleri, bilyalı öğütme (100 rpm, 3 sa) ve SPS (600°C, 5 dk, 35 MPa) yardımıyla üretmişlerdir. Kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri, yaklaşık %95 ile %98 arasında değişmektedir. Grafen içeriği arttıkça, yoğunluk değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değerine (75 HV) ise, hacimce %1 grafen içeriğine sahip kompozitle ulaşmışlardır. Swikker ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, GNS takviyeli Cu esaslı kompozitleri (Cu/GNS), T/M yardımıyla üretmişler ve sinterleme sıcaklığının Cu/GNS kompozitinin mikroyapısı ve tane büyümesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerin relatif yoğunlukları, %95 ile %98 arasında değişim göstermiştir. En yüksek sertlik değerini (95 HRB), ağ. %1 GNS takviyeli ve 800°C'de sinterlenen Cu esaslı kompozitle elde etmişlerdir. Cu matrisinde GNS'nin varlığı hem tane büyümesini hem de dislokasyon hareketini kısıtladığı görülmüştür. Cu matrisinde GNS içeriği daha düşük olduğunda dağılım homojendir ve tane büyümesi ile dislokasyon hareketini kısıtladığı düşünüldükçe, yüksek mekanik özellikler kazanılmıştır. Fakat, GNS içeriği ağ. %2 ve %3 olduğunda; zayıf arayüz bağından dolayı mekanik özellikleri azalttığı tespit edilmiştir. Konakov ve diğ. (2020), partikül boyutu dağılım sonuçlarını baz alarak, grafen takviyeli Cu esaslı kompozit üretebilmek için, T/M yöntemini modifiye edilmesi üzerine çalışmışlardır. Grafen kaynağı olarak, termal olarak eksfoliyeye olmuş grafit (TEFG) kullanılmış ve ağ. %0,1; %0,5; %1 ve %3 oranlarında matrise takviye edilmiştir. Gezegen tipli öğütücüde 350 rpm ve 5 sa optimum koşullarıyla öğütülen kompozit tozları, soğuk presleme yardımıyla 17 ton/cm²'de şekillendirilmiş ve ardından 1 sa boyunca vakum altında 1030°C'de ısıtılma maruz bırakılmıştır. En yüksek sertlik değerine (36 HV), ağ. %0,5 TEFG içeriğine sahip kompozitle ulaşılmıştır. Takviye partikül içeriğinin artmasıyla, partikül sınırındaki takviye partiküllerinin sayısı artmakta ve dolayısıyla aglomerasyon içeriği arttığı düşünülmektedir. Chen ve diğ. (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada, GO'yu mekanik ıslak bilyalı öğütme (280 rpm) yöntemi ile Cu partikülleri ile karıştırmışlardır. Grafen takviyeli kompozitler, Ar atmosferinde, 40 dk boyunca, 900°C'de Cu-GO kompozit tozunun mikrodalga sinterlemesi sırasında GO'nun yerinde indirgenmesi ile üretilmişlerdir. Kompozitlerin sertlik değerleri, 61,8 HV ile 92,8 HV (bölgesel olarak) arasında değişmektedir. Ortalama sertlik, saf Cu'ya kıyasla

%14,2 oranında iyileşerek 81,1 HV olarak elde edilmiştir. Hu ve diğ. (2021) grafen takviyeli Cu esaslı kompozitleri, ağı. %1, %2,5 ve %5 MLG takviyesiyle bilyalı öğütme (300 rpm, 2 sa) ve basınçsız vakum sinterleme yardımı ile 700°C, 800°C ve 850°C’de (Ar, 1 sa) üretmişlerdir. En yüksek sertlik değerine (64,4 HV), ağı. %2,5 MLG takviyeli Cu esaslı kompozit ile ulaşmışlardır. Şekil A.2; T/M ile üretilen grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlere yönelik olarak şu ana kadar incelenmiş mevcut literatür çalışmaları, genel olarak ifade etmektedir (EK A).

1.6.4 Toz metalurjisi ile üretilen Al esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere yönelik çalışmalar

FDM’lerin benzersiz niteliğe sahip özellikleri düşünülerek, tasarım ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Al ve alaşımlarının geniş uygulama alanları düşünülerek, T/M ile üretilmesi gerçekleştirilmiş Al esaslı FDM’lere yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur. Cong ve diğ. (2011), beş katmana sahip, Cu içeriklerini (Ağı. %1, 2, 3 ve 4) her katman boyunca arttırarak Al/Al-Cu esaslı FDM üretimini T/M yöntemiyle başarıyla gerçekleştirmiş ardından, FDM’yi çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemine tabi tutmuşlardır. İkinci bir faz olan CuAl_2 , Al matrisinin tane sınırında homojen bir şekilde dağılmasıyla birlikte, FDM için çöeltme sertleşmesinde önemli bir rol oynamıştır. Rajasekhar ve diğ. (2021), iki katmanlı FDM tasarımı düşünerek, birincil alaşım elementi olan Cu’nun oranlarını (hacimce %5, 10 ve 15) değiştirerek, T/M yöntemiyle FDM’ler üretmişlerdir. FDM’lerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin, malzeme kompozisyonunun artmasıyla derecelendirilerek değiştiği gözlemlenmiştir. Al_2Cu fazının arayüzde dağılmış olması nedeniyle arayüz bölgesinde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir ve ağı. %10 Cu içeren FDM daha fazla sertlik değeri (65,75 HV) göstermiştir.

Al esaslı malzemeleri takviyelendirerek FDM tasarımlarına T/M yöntemiyle ilgili çalışmalar da liateratürde araştırılmıştır. Canakci ve diğ. (2014) gerçekleştirdikleri bir çalışmada; (Al – ağı. %5 B_4C) ve (Al – ağı. %10 B_4C) kompozisyonunda tek tipli katmanlar; (Al – ağı. %5 B_4C + Al), (Al -ağı. %10 B_4C + Al) kompozisyonunda iki tipli katmanlar ve (Al – ağı. %10 B_4C + Al – ağı. %5 B_4C + Al) kompozisyonuna sahip üç tipli FDM tasarımını başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Hazırladıkları tozları, 400 ve 500 MPa basınçlarda şekillendirip, ardından Ar atmosferinde 600°C’de 3 sa boyunca

sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Al matris içerisinde homojen bir dağılım gösteren B₄C içeriğinin artırılmasıyla; sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiş ve FDM üretimine bağlı olarak; mikro yapının kademeli olarak değişmesine göre değerlendirilmiştir. Übeyli ve diğ. (2014), farklı iki FDM tasarımı düşünerek, zırh malzemesi olarak kullanılmak üzere, üç katmanlı, farklı kalınlıklara sahip SiC takviyeli AA7075 esaslı FDM'leri T/M ile üretilmesini gerçekleştirmişlerdir. Uygulanan balistik testlere göre, FDM'lerin 25 mm kalınlığa kadar, merminin darbesine dayanmadığı tespit edilmiştir. Erdemir ve diğ. (2015), T/M ve sıcak presle üretilen farklı oranlarda SiC içeren (Ağ. %30, 40, 50 ve 60) Al₂O₃ esaslı FDM'lerin, SiC içeriğine bağlı olarak mekanik özelliklerinin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Artan SiC içeriği ile birlikte, FDM'lerin mekanik özellikleri iyileşirken, yüksek miktarda SiC içeriğinin ise artan gözenekliliğe bağlı olarak FDM'lerin sertlik değerini düşürdüğü görülmüştür. Çalışkan ve diğ. (2017); T/M yöntemi kullanılarak çeşitli takviye katmanları, ağ. %0 ile %10 ve ağ. %0, 10 ve 15 oranında Al₂O₃ içeren Al₂Si₂O₇ esaslı FDM'ler üretmeyi başarmışlardır. Atritör değirmende öğütülüp, 400 MPa'da tek eksenli olarak basılan toz karışımı, 630°C'nin üstünde Ar atmosferinde sinterlenmiştir. FDM olarak üretilen Al₂Si₂O₇/Al₂O₃ tasarımının, artan Al₂O₃ içeriğine göre, monolitik Al₂Si₂O₇ alaşımına göre daha iyi mekanik özellik gösterdiği, sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bharathi ve Kumar (2018); T/M yöntemi ile farklı içeriklere sahip Al esaslı FDM'ler üretmeyi başarmışlardır. Ağ. %0, %20, %40, %60 ve %80 SiC içeriği ile katman katman olacak şekilde ayrı ayrı 50 MPa olarak ve daha sonra bütün olarak 10 KN olarak bir bütün olarak şekillendirilmiştir. Preslenen FDM'ler, 1100°C'de 30 dk boyunca mikrodalga sinterlemesine tabi tutulmuştur. Birikme yönü boyunca SiC parçacıklarının ağırlık yüzdesindeki artışla birlikte; gözeneklilik seviyelerinde ve SiC takviyeli Al esaslı FDM'ler için matrisin sertliğinde bir artışa yol açmıştır. SiC'nin önemli ölçüde farklı içerik oranına bağlı olarak, FDM'nin en uç bölgelerinde önemli ölçüde sertlik değerlerinin farklı olduğu görülmüştür.

B₄C, SiC, Al₂O₃ gibi seramik takviye malzemelerine alternatif olarak, farklı türde takviye malzemeleri de Al esaslı FDM'lere T/M ile yapılan çalışmalarda uygulanmıştır. Son yıllarda; grafen ve karbon nano tüpler (CNT) dâhil olmak üzere karbon yapılı nano malzemeler; olağanüstü yüksek elastik modülü ve mekanik mukavemeti ile mükemmel elektriksel ve termal iletkenliklerinden dolayı, yapısal

mühendislik ve fonksiyonel cihaz uygulamaları için önemli yeni malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmış ve ileri teknoloji malzemeleri için etkili bir takviye malzemesi olarak bu tür çalışmalarda kullanılmaktadırlar (Tjong, 2013). Kwon ve diğ. (2011) gerçekleştirdikleri bir çalışmada, homojen bir şekilde dağıtılmış CNT tabakalar için; mekanik bilyalı öğütme ve sıcak presleme prosesleriyle Al matrisinde CNT takviyeli FDM'ler,, yüksek yoğunlukta başarılı bir şekilde T/M ile üretmişlerdir. CNT içeriği arttıkça, FDM'lerin katman boyunca sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Udupa ve diğ. (2015); ağı. % 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 ve 0,5 oranlarında CNT ekleyerek; soğuk presleme ve sinterleme ile CNT takviyeli Al matris laminatlar üretmişlerdir. Farklı katmanlar boyunca elde edilen sertlik sonuçları, bir tarafta 31 HV'den diğer tarafta 71 HV'ye kadar değişmiştir; bu da doğrusal bir şekilde FDM'nin sertlik değerinde %129 oranında bir artış sergilemiştir. Tane sınırları üzerinde CNT'lerin topaklanması, Al matrisinin derecelendirilmiş bir yapıya sahip olmasına yol açmış, bu da tane boyutunda azalmaya ve takviye edilen malzemenin sertliğinde iyileşmeye yol açmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzemeler

Yüksek saflıkta birkaç katmanlı grafen (FLG) sentezi için, ortam atmosferi olarak reaktörde kullanılmak üzere yüksek saflıkta (%99,999) Azot (N₂) ve Helyum (He) gazları (Asalgaz, Türkiye) ile özel olarak tasarlanmış “120 mm” boy ve “10 mm” çapa sahip grafit çubuklar (Kent Kimya, Türkiye) temin edilmiştir. Ayrıca, grafen nanoplatelet (GNP) takviyeli Al-Cu esaslı FDM üretiminde, takviye malzemesi olarak, 25 µm ortalama partikül boyutuna ve 120-150 m²/g yüzey alanına sahip ticari grafen (TG) (Sigma Aldrich, ABD) kullanılmıştır.

FLG takviyeli Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı kompozit tozlarının MA ile üretilmesi için çalışmada; Al tozu (-325 mesh; %99,5 saflık, Alfa Aesar, ABD), Cu tozu ($\geq$ %99 saflıkta, <63 µm tane boyutuna sahip, Merck, Almanya), Zn tozu (325 mesh; %99,9 saflık, abcr GmbH), Mg tozu (-325 mesh, %99,8 saflık, abcr GmbH), Mn tozu (-325 mesh, %99,95 saflık, Alfa Aesar, ABD) kullanılmıştır.

Öğütme işlemi sırasında, tozların öğütme kabı içerisinde sıvanmaması için proses kontrol ajanı (PCA) olarak stearik asit (C₁₈H₃₆O₂; %97 saflıkta, Merck) kullanılmıştır. Ayrıca glove box içerisinde hazırlanan numunelerin, ortam atmosferinden korunması ve sinterleme işlemlerinin inert ortamda gerçekleşmesi için kullanılmak üzere yüksek saflıkta (%99,999) Argon (Ar) gazı (Asalgaz) temin edilmiştir.

2.2 Yöntem

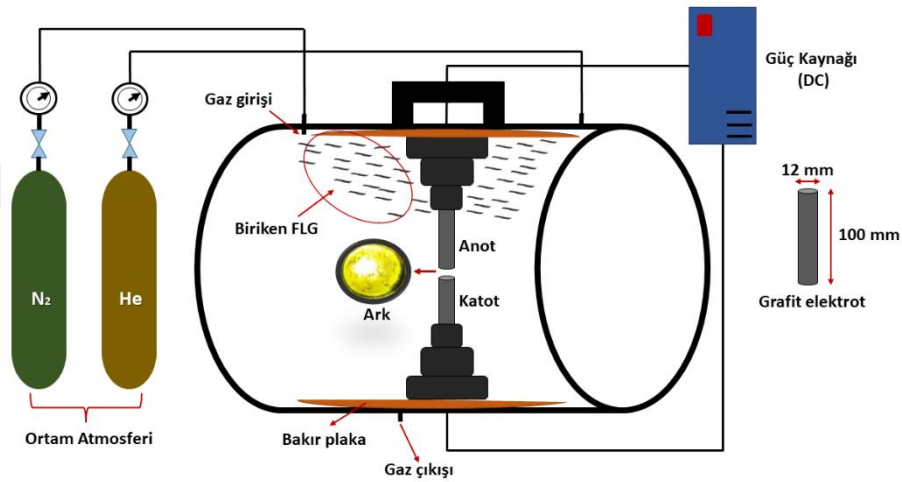
2.2.1 Birkaç katmanlı grafenin elektrik ark deşarj (EAD) yöntemi ile üretimi

Takviye malzemesi olarak kullanılacak olan FLG, laboratuvarımızda mevcut olan Şekil 2.1’de gösterilen özel olarak tasarlanmış paslanmaz çelik bir reaktörde, EAD yöntemi kullanılarak başarıyla üretilmiştir.



Şekil 2.1 : FLG üretiminin gerçekleştirildiği reaktör.

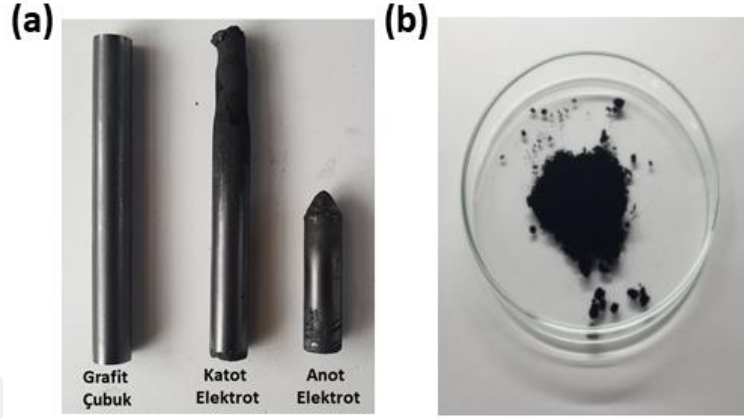
Bu yöntemde; reaktör içerisinde yerleştirilmiş biri katot diğeri anot olarak işlev gören yüksek saflığa sahip iki grafit elektrot arasına, yüksek akım uygulanarak grafitin buharlaşması sağlanmaktadır. Şekil 2.2, FLG üretiminin gerçekleştirildiği, reaktör sisteminin şematik görüntüsünü ifade etmektedir.



Şekil 2.2 : FLG üretim sisteminin şematik görünümü.

Grafit çubuklar reaktördeki yuvalarına yerleştirildikten sonra, sistem güvenli bir şekilde sıkıca kapatılır ve reaktör, sırasıyla N_2 ve He gazları ile beslenir. Ardından, reaktör içerisinde yer alan, grafit elektrot çubuklar arasına yüksek akım uygulanır. Elektrik akımı, reaktör sistemine bağlı bir doğru akım (DC) kaynağı ile sağlanmaktadır. FLG üretimi için akım değeri, 150 Amper olacak şekilde daha önceki deneysel çalışmalar sonucunda optimum koşul olarak belirlenmiştir. Katot ve anot reaktör içerisinde, manuel olarak, birbirine yakın konuma getirildiği zaman, plazma oluşumuyla arklama başlamaktadır. Ark işlemi sona erdiğinde DC kaynağı kapatılır ve reaktör içerisindeki gaz, tahliye vanası yardımıyla boşaltılır. Elde edilen ürün, anot

grafit çubuğun üst kısmına yakın olan bölgeden toplanmaktadır. Şekil 2.3(a), FLG üretimi sırasında kullanılan grafit elektrotların başlangıç görünümü ile birlikte, arklama prosesi sonrası tüketilmiş anot ve katot çubuklarının görüntüsünü vermektedir. Ayrıca, üretilen FLG tozlarının genel görüntüsü Şekil 2.3(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : (a) Sırasıyla kullanılan ticari grafit elektrot, tüketilen katot ve anot, (b) Elde edilen FLG.

FLG üretiminde kullanılan proses parametreleri, Çizelge 2.1'de verilmiştir. Daha önce laboratuvarımızda gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda (Borand ve diğ., 2021; Cotul ve diğ., 2018) optimize edilen parametreler kullanılarak, tez çalışması boyunca FLG üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.1 : FLG üretim parametreleri.

Parametre	Değer
Elektrot kompozisyonu	Grafit (%99,999)
Elektrot çapı	12 mm
Elektrot boyu	100 mm
Akım	150 A
Koruyucu atmosfer	He ve N ₂

2.2.2 Grafen takviyeli alüminyum ve bakır matrisli kompozit tozlarının mekanik alaşımlama ile üretimi

FDM'lerin tasarımında kullanılmış olan FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompozit tozlarının MA ile üretiminde; yüksek enerjili gezegen tipi bilyalı öğütücü kullanılmıştır. Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı alaşım grubu tozlarıyla birlikte, bu tozlara ağırlıkça %0,1; 0,2; 0,3; 0,5 ve 0,7 FLG takviye edilerek kompozit tozları hazırlanmıştır. Al-Cu ve Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit gruplarının kompozisyonları, sırasıyla, Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Al-4,5Cu esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının kompozisyonu.

Alaşım Grubu	Ağ. %Al	Ağ. %Cu	Ağ. %Mg	Ağ. %Mn	Ağ. %FLG
Al-Cu	Kal.	4,5	0	0	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7
Al-Cu-Mg	Kal.	4,5	1,5	0	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7
Al-Cu-Mg-Mn	Kal.	4,5	1,5	0,5	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7

Çizelge 2.3 : Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının kompozisyonu.

Alaşım Grubu	Ağ. %Al	Ağ. %Zn	Ağ. %Cu	Ağ. %Mg	Ağ. %FLG
Al-Zn	Kal.	6	0	0	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7
Al-Zn-Cu	Kal.	6	2	0	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7
Al-Zn-Cu-Mg	Kal.	6	2	2	0;0,1;0,2;0,3; 0,5;0,7

Öğütme işlemleri, çelik kap ve bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilya-toz oranı 7:1 ve öğütme hızı 500 devir/dakika (rpm) olacak şekilde, öğütme işlemi uygulanmıştır. Öğütme işlemlerinde, proses kontrol ajanı olarak ağ. %2,5 oranında stearik asit ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) kullanılmıştır. Öğütme kabının içindeki toplam toz ağırlığı 25 g olacak şekilde; Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozları hazırlanmıştır. Çizelge 2.4; Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozları için MA parametrelerini ifade etmektedir.

Çizelge 2.4 : Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozları için MA parametreleri.

Parametre	Değer
Öğütücü tipi	Gezegensel
Öğütme hızı	500 rpm
Öğütme kabı/bilya	Paslanmaz çelik
Öğütme kabının hacmi	250 mL
Bilya çapı	10 mm
Bilya/toz ağırlık oranı	7/1
Öğütme atmosferi	Ar
Öğütme süresi	5 sa
Proses kontrol ajanı (PCA)	Stearik asit (ağ. % 2,5)

Metal tozlarının oksitlenme problemi mevcut olduğundan dolayı, öğütme işlemleri Ar atmosferi altında yapılmıştır. Öğütme işleminden önce; ticari metal tozları, daha önce EAD yöntemi ile ürettiğimiz FLG’lerle birlikte tartılıp, öğütme kaplarına yerleştirilmesi, Şekil 2.4’de Mattek marka kapalı ortam kutusu (glove box) içerisinde Ar atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4: Tozların inert ortamda hazırlanması için kullanılan kapalı ortam kutusu (glove box).

Tozların öğütme kaplarına yerleştirilmesinin ardından, öğütme kapları parafin ile birlikte sarılıp, O-ring kullanılarak kapatılmıştır. Bununla birlikte, gezegensel bilyalı öğütücü cihazının özel öğütme kabı sayesinde, bu cihazda yapılan çalışmalarda öğütme kabı öğütücüye yerleştirildikten sonra, öğütme kabına Ar gazı tekrarlı olarak verilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Öğütme işlemlerinin yapıldığı gezegensel tipli bilyalı öğütücü.

Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozit gruplarının bileşimleri Çizelge 2.5’de gösterilmiştir. Üç farklı alaşım kompozisyonu ve bu alaşım gruplarına ağı. %0,5; 1,0 ve 2,0 FLG takviye edilerek, kompozit tozları hazırlanmıştır.

Çizelge 2.5 : Al-7,5Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn kompozit tozlarının kompozisyonu.

Alaşım Grubu	Ağı. %Al	Ağı. %Cu	Ağı. %Mg	Ağı. %Mn	Ağı. %FLG
Al-Zn	Kal.	7,5	0	0	0;0,5;1,0;2,0;
Al-Zn-Mg	Kal.	7,5	2,5	0	0;0,5;1,0;2,0;
Al-Zn-Mg-Cu	Kal.	7,5	2,5	1,8	0;0,5;1,0;2,0;

Al-7,5Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozların MA ile üretimi için elementel tozlar alaşım bileşimine uygun miktarlarda tartılarak, toplam 7 g toz öğütme işlemi için hazırlanmıştır. 7 g olarak hazırlanan tozlara, farklı oranlarda ağı. %0, 0,5, 1 ve 2 FLG ilavesi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan tozlar, Şekil 2.6’da gösterilen toz karıştırma cihazında 2 sa süreyle karıştırılarak homojen toz karışımları elde edilmiştir. MA ile üretilmeyen bu karışım tozlarının isimleri “harmanlanmış (0 sa)” olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2.6 : Toz karıştırma cihazı.

Al-7,5Zn alaşım esaslı tozların MA süreçlerinde, Spex tipi yüksek enerjili öğütücü kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmında MA süresi birer parametre olarak alınıp,

hazırlanan toz karışımlarına 0 (harmanlanmış), 2, 4 ve 8 sa olmak üzere farklı sürelerde öğütme uygulanmıştır. Farklı sürelerde öğütme yapılarak, her bir toz alaşım kompozisyonu için optimum MA süresi belirlenmiştir. Öğütme işlemlerinde, öğütücü ortam olarak paslanmaz çelik kaplar ve bilyalar kullanılmıştır. Bilya-toz oranı 7/1 ve öğütme atmosferi de, Ar seçilmiştir. Öğütme işlemleri boyunca tozların öğütme kaplarına sıvınmasını önlemek amacıyla, proses kontrol ajanı (PCA) olarak ağ. % 2,5 oranında stearik asit ilave edilmiştir. Çizelge 2.6; Al-7,5Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozlar için MA parametreleri hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 2.6 : Al-7,5Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozlar için MA parametreleri.

Parametre	Değer
Öğütücü tipi	SPEX
Öğütme hızı	1200 rpm
Öğütme kabı/bilya	Paslanmaz çelik
Öğütme kabının hacmi	55 ml
Bilya çapı	6 mm
Bilya/toz ağırlık oranı	7/1
Öğütme atmosferi	Ar
Öğütme süresi	0,2,4,8 sa
Proses kontrol ajanı	Stearik asit (ağ. % 2,5)

Metal tozlarının oksitlenme problemi mevcut olduğundan dolayı; öğütme işlemleri, Ar atmosferi altında yapılmıştır. Karıştırıcıdan alınan tozlar, kapalı ortam kutusu içerisinde Ar atmosferi altında, paslanmaz çelik öğütme kaplarına alınarak, Ar gazı ortamında kapatılmıştır. MA proseslerinde kullanılan Spex tipi yüksek enerjili bilyalı öğütme cihazı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : SPEX tipi yüksek enerjili bilyalı öğütücü.

Öğütme işlemi tamamlandıktan sonra tozlar, kapalı ortam kutusu (Şekil 2.4) içerisinde Ar atmosferi altında öğütme kaplarından boşaltılmıştır.

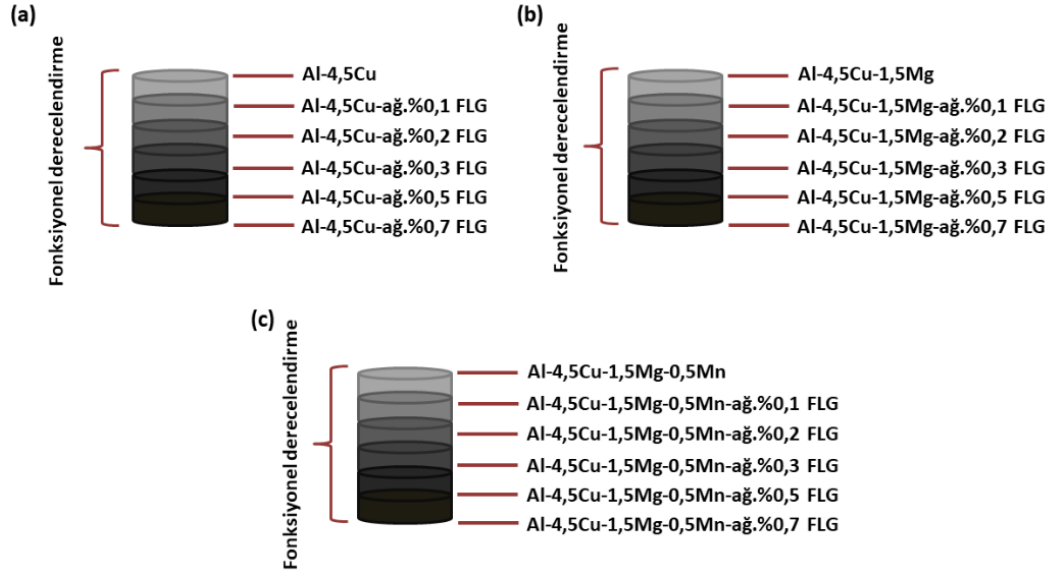
2.2.3 Grafen katkıli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimi

MA ile elde edilen, farklı oranlarda FLG içeriğine sahip Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompozit tozlar; FDM üretimi için katman katman olacak şekilde laboratuvarımızda mevcut olan tek eksenli MSE marka manuel pres ile şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2.8). İstiflenmiş bir şekilde pres kalıbına homojen olarak katman hâlinde yerleştirilen toz bileşenlerinin her biri 450 MPa basınç uygulanarak şekillendirilmiştir.



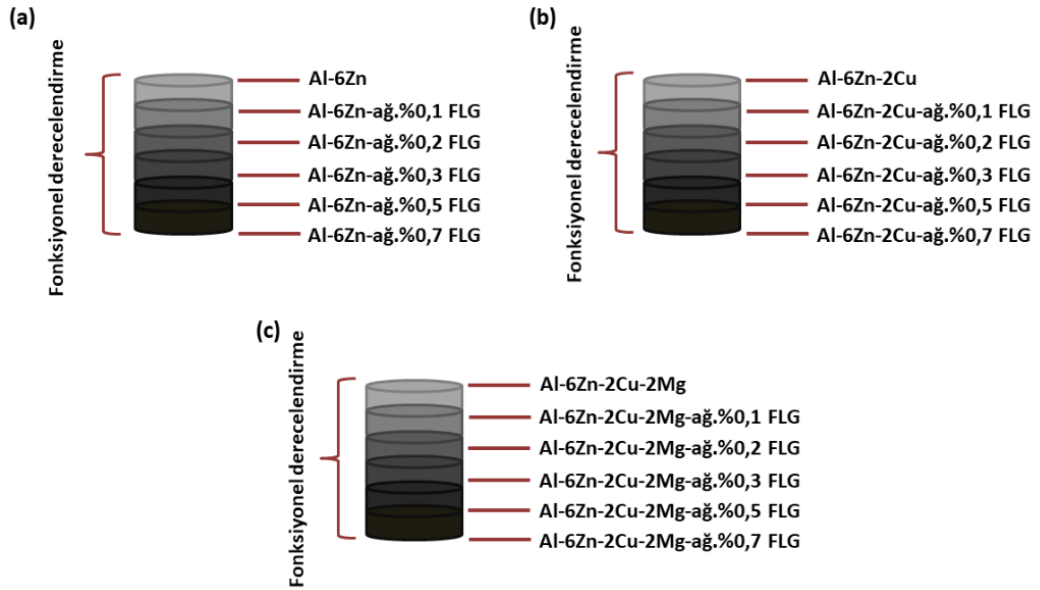
Şekil 2.8 : MSE marka manuel pres.

FDM tasarımı, farklı oranlara sahip FLG takviyeli Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı tozlar için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.9’da FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM’lere ait tasarım gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : FLG takviyeli (a) Al-4,5Cu, (b) Al-4,5Cu-1,5Mg, (c) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn alaşım esaslı FDM'lerin tasarımı.

FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lere ait tasarım, şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: FLG takviyeli (a) Al-6Zn, (b) Al-6Zn-2Cu, (c) Al-6Zn-2Cu-2Mg alaşım esaslı FDM'lerin tasarımı.

Adım adım derecelendirilmiş bir şekilde üretilmesi tasarlanmış olan Al-4,5Cu/FLG FDM numunesinin şekillendirilmiş hâli şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Şekillendirilmiş Al-4,5Cu-FLG FDM numunesi.

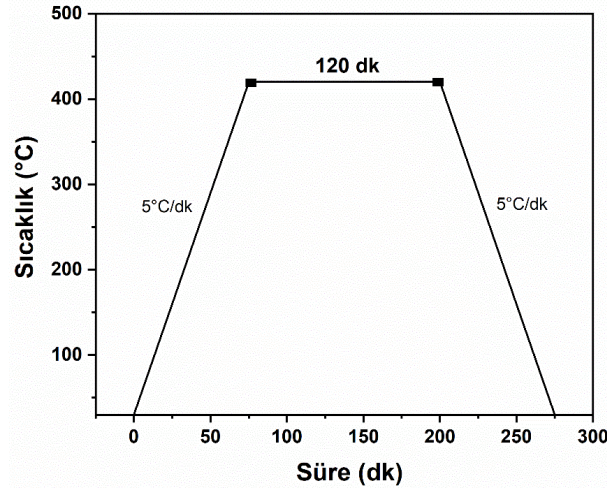
Presleme işlemi tamamlanmış olan FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompakt FDM'ler, daha sonra sinterleme işlemine maruz bırakılmak üzere kullanılmışlardır.

MA sırasında proses kontrol ajanı olarak kullanılan stearik asidin, nihai malzeme içerisinde gözenek oluşturmaması ve sinterleme işleminde fırını kirletmemesi için sinterlenme işleminden önce bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli manuel pres yardımıyla istiflenerek şekillendirilen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn alaşım esaslı FDM numuneleri, alümina tüplü MSE-T-1600-74-450 marka fırında bağlayıcı giderme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Bağlayıcı giderme işleminin yapıldığı MSE T-1600-74-450 marka tüp fırın.

Bağlayıcı giderme işlemi, Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. 420°C'ye, 5°C/dk ile çıkılmış ve bu sıcaklıkta FDM'ler 120 dk bekletilmiştir. Daha sonra, 5°C/dk ile oda sıcaklığına inilmiştir. FDM'lere uygulanan bağlayıcı giderme işleminin fırın kademesi, Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : FDM'lere uygulanan bağlayıcı giderme işleminin fırın kademesi.

Bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirildikten sonra, FLG takviyeli FDM numuneleri, alümina tüplü Protherm PZF12-105-900 marka fırında sinterlenmiştir (Şekil 2.14).

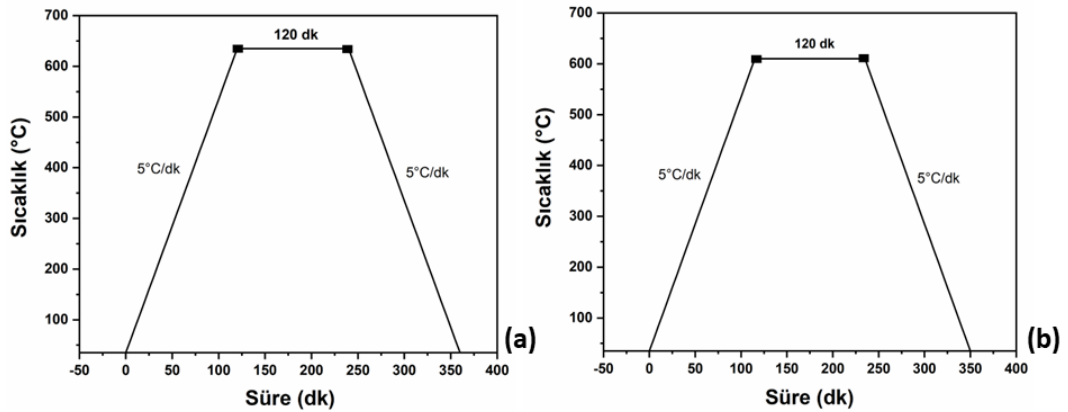


Şekil 2.14 : Sinterleme işleminin yapıldığı Protherm PZF12-105-900 marka tüp fırın.

FLG takviyeli FDM'lerin sinterleme işlemi Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'ler için 590°C, FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'ler için ise 600°C sinterleme sıcaklığı olarak seçilmiştir. Sinterleme işlemi için oda sıcaklığından 5°C/dk ile Al-Cu esaslı FDM'ler için 590°C; Al-Zn esaslı FDM'ler için ise 600°C'ye çıkılmış ve 3 sa boyunca bekletilmiştir. Daha sonra 5°C/dk ile oda sıcaklığına inilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin sinterleme işleminin fırın kademesi, sırasıyla, Şekil 2.15(a) ve (b)'de verilmiştir.

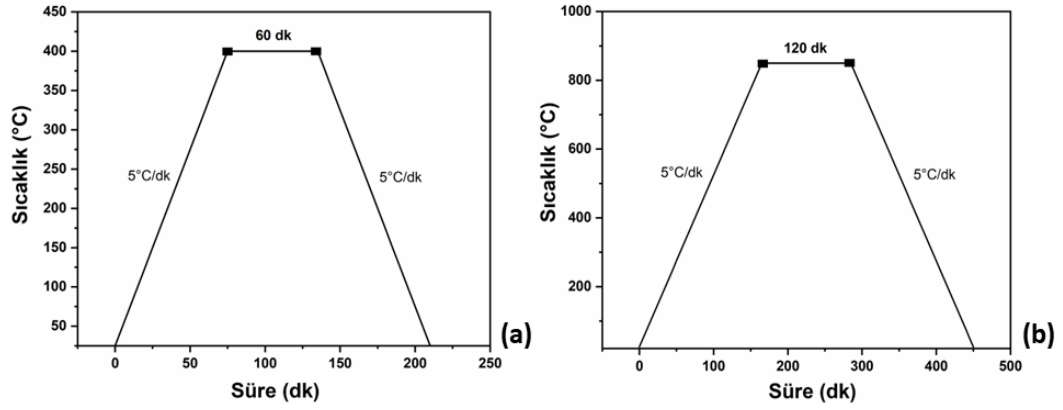
Tozların şekillendirilmesi yaklaşık 450 MPa’da gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi tamamlanmış olan Al-Zn alaşımları ve FLG takviyeli Al-Zn ve Cu esaslı kompakt numuneler, sinterleme işlemine maruz bırakılmak üzere kullanılmışlardır.

Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitler için bağlayıcı giderme işlemi alümina tüplü MSE-T-1600-74-450 marka fırın (Şekil 2.12) kullanılarak, Şekil 2.17’de ifade edilen fırın rejimine uygun olarak Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, DSC analiz sonuçları değerlendirilerek, Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitler için, sinterleme sıcaklığı 635°C; Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitler için 610°C olarak seçilmiştir. Ar atmosferinde gerçekleştirilen sinterleme işleminin, ısıtma ve soğutma hızı 5°C/dk olarak uygulanmıştır. Al-Zn esaslı alaşımların ve FLG takviyeli Al-Zn ile Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitlerin sinterleme işleminin fırın kademesi, sırasıyla, Şekil 2.17(a) ve (b)’de ifade edilmiştir.



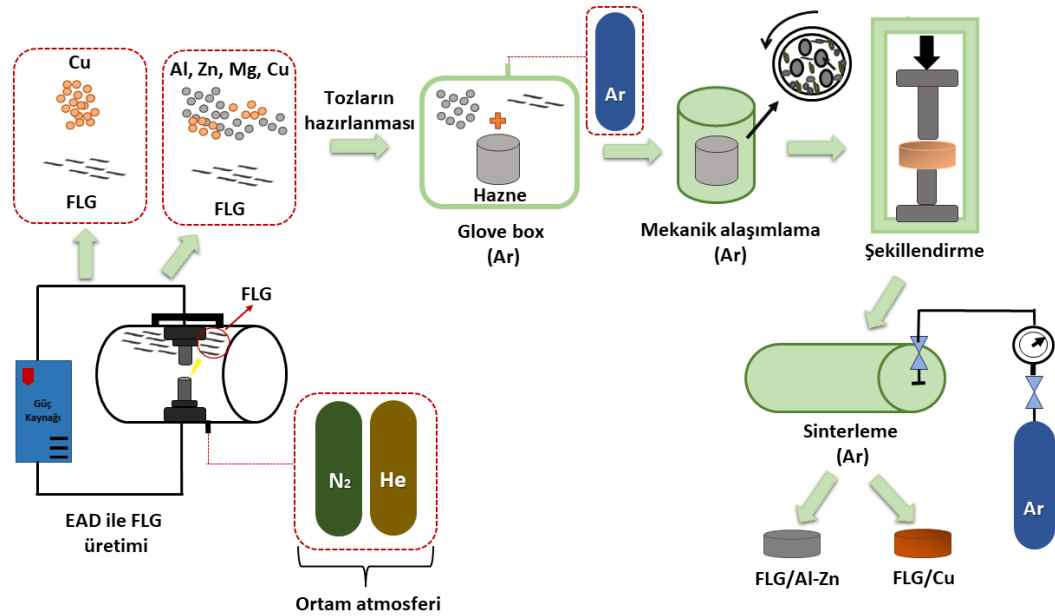
Şekil 2.17 : Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitler için sinterleme işlemi fırın kademesi: (a) Al-Zn, (b) Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu.

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitler için, bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemi alümina tüplü Protherm PZF12-105-900 marka fırında (Şekil 2.14) gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı giderme işlemi için, Ar atmosferi altında, oda sıcaklığından 5°C/dk ile 400°C'ye çıkılmış ve 60 dk bekletilmiştir. Daha sonra, 5°C/dk ile oda sıcaklığına inilmiştir. Sinterleme işlemi ise, 5°C/dk ısıtma ve soğutma hızı ile birlikte, Ar atmosferinde, 850°C'de 120 dk boyunca gerçekleştirilmiştir. FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin bağlayıcı giderme ve sinterleme işleminin fırın kademesi, sırasıyla, Şekil 2.18(a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin (a) bağlayıcı giderme, (b) sinterleme işlemi fırın kademesi.

Al-Zn alaşım ve FLG ile takviye edilen Al-Zn ve Cu esaslı kompozitlerin T/M ile üretimi; MA ile üretilmiş bu tozların preslenmesini ve daha sonra basınçsız sinterleme işlemine tabi tutulmasını kapsamaktadır. Şekil 2.19, bu süreci kapsayan deneysel prosedürün şematik gösterimini ifade etmektedir.



Şekil 2.19 : Al-Zn alaşım ve FLG ile takviye edilen Al-Zn ve Cu esaslı kompozitlerin genel üretiminin şematik görünümü.

T/M yöntemi ile elde edilen FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin kısaltılmış isimleri; tez çalışmasında, alaşımlama için eklenen elementlere, kompozitlere eklenen takviye malzemesine ve uygulanan MA süresine göre belirlenmiştir. Örneğin, Al'a Zn eklenmiş, %2 FLG takviyeli ve 4 sa MA uygulanarak elde edilen bir kompozit için, "Al-Zn-2FLG-4sa" şeklinde ifade edilmiştir. FLG takviyeli Cu esaslı kompozitler için

kısaltılmış isimleri, tez çalışmasında, FLG içerikleri ve uygulanan MA süresine göre adlandırılmaktadır. Örneğin, %0,5FLG takviyeli ve 5 sa MA prosesine maruz kalmış bir kompozit “Cu-0,5FLG-5sa” olarak ifade edilmiştir.

2.3 Karakterizasyon

2.3.1 Partikül boyutu ölçümü

Al, Cu, Zn, Mg ve Mn başlangıç tozları ve FLG takviyeli Cu, Al-Cu ve Al-Zn esaslı MA yoluyla elde edilen bazı toz numunelerinin partikül boyutu ölçümleri; Malvern Mastersizer 3000 marka (Bursa Teknik Üniversitesi, MERLAB) cihaz yardımıyla saf su ortamında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : Malvern Mastersizer 3000 model partikül boyut cihazı.

Lazer kırınım prensibine dayalı olarak çalışan sistemde, lazer ışını dağılmış hâlde bulunan partiküle nüfuz eder ve saçılan ışık yoğunluğundaki açısal değişim detektörler tarafından tayin edilir. Kırınım açısı, partiküllerin boyutuyla ters orantılıdır. Büyük partiküller; ışığı, lazer ışınına göre küçük açılarda saçarken; küçük partiküller ışığı büyük açılarda saçmaktadır (Chernick ve Kendig, 2006; Peciar vd., 2022).

2.3.2 Yüzey alanı ölçümü (BET)

EAD ile elde ettiğimiz FLG ve MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-cu ve Al-Zn esaslı bazı kompozit tozlarının ve ticari grafinin (TG) Brunauer–Emmett–Teller (BET) teorisine göre yüzey alanı ölçümleri için; Micrometrics™ Tristar II marka yüzey alanı cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.21). FLG için numunelerin gazdan arındırılması ve analizleri 105°C'de N₂ gazı altında 12 saat boyunca ve -196°C'de analiz için N₂ referans için ise He gazlarını absorbe ederek gerçekleştirilmiştir. FLG takviyeli Al

esaslı kompozit tozlarının yüzey alanı ölçümleri ise; 77 K’de N₂ gazı altında 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.21 : Micrometrics™ Tristar II marka yüzey alanı ve gözenek boyutu analiz sistemi.

Yüzey alanı ölçümleri, genellikle 77 K’de ölçülen nitrojen adsorpsiyon izotermlerine yaygın olarak kullanılan Brunauer, Emmett ve Teller (BET) teorisi methodu uygulanarak elde edilen “BET” yüzey alanları olarak rapor edilmektedir (Walton ve Snurr, 2007).

2.3.3 Raman analizi

EAD yöntemi ile üretilen FLG’nin ve FLG katkı Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı bazı kompozit tozlarının Raman analizleri, Renishaw Invia marka Raman spektroskopi cihazı (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi– ARUM) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.22). Raman analizi, lazerin dalga boyu çıkış değeri 532 nm; lazerin gücü %10, tarama süresi ise 30 saniye koşullarında yapılmıştır.



Şekil 2.22 : Renishaw InVia marka Raman spektroskopi cihazı.

Raman analizi; titreşim spektroskopisine dayanan, kızılötesi spektroskopisinin tamamlayıcısı olan bir analiz türüdür ve temeli inelastik Raman saçılmasıdır. Raman spektroskopisi, bir molekülün titreşim modunun ölçülmesi sonucuyla, polar olmayan grupların simetrik titreşimlerini tespit etmektedir (Larkin, 2017). Böylelikle, bir moleküle ait titreşimsel modlar, o molekülün “parmak izi” olma özelliği taşımaktadır (Smith ve Dent, 2019). Molekül ile temas eden ışığın dalga boyu ile saçılan ışığın dalga boyunda oluşan fark “Raman kayması” olarak adlandırılmaktadır (Akçe ve Kadioğlu, 2020).

2.3.4 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi

MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu, Al-6Zn ve Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarına şekillendirme ve sinterleme işlemi uygulanmadan önce, meydana gelebilecek reaksiyonları görmek için, diferansiyel termal analiz yapılmıştır. Bu çalışma için; Linseis Sta Pt 1600 model (BTÜ) diferansiyel termal analiz cihazı (DTA) kullanılmıştır (Şekil 2.23). Termal analiz koruyucu azot (N_2) atmosferinde gerçekleştirilmiş olup; $700^{\circ}C$ 'ye $10^{\circ}C/dk$ ısıtma hızıyla çıkılmış, $30^{\circ}C/dk$ ile oda sıcaklığına inilmiştir.



Şekil 2.23 : Linseis Sta Pt 1600 marka diferansiyel termal analiz cihazı (DTA).

DSC; bir numunenin fiziksel özelliklerinin zaman karşı sıcaklıkla birlikte nasıl değiştiğini tespit eden bir termal analiz yöntemidir. Sıcaklığa bağlı olarak DSC, numune ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkına dayalı olarak, numune tarafından aşırı derecede yayılan veya absorbe olan ısı miktarını ölçmektedir (Gill ve diğ., 2010).

2.3.5 X - Işınları difraktometresi (XRD) analizi

MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu, Al, Al-4,5Cu, Al-6Zn ve Al-7,5Zn esaslı kompozit tozları ve FLG takviyeli kompozit ve FDM'ler için gerçekleştirilen XRD analizi, Bruker AXS/Discovery D8 marka (BTÜ, MERLAB) X - Işınları Difraktometresi ile CuK α radyasyonu ile ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$; 35 kV, 40 mA, $2\theta=10^\circ-90^\circ$) koşullarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.24). XRD paternlerine ait faz analizlerinin tayini, “X’Pert HighScore Plus (Malvern Panalytical)” yazılım programı vasıtasıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 2.24 : Bruker AXS/Discovery D8 marka X - Işınları difraktometresi.

XRD; “Bragg” kanununu esas alarak, karakterize edilecek numunenin bir kristal düzleminde toplanmış X-ışını demetinin yansıması açısından tanımlanarak gerçekleştirilmektedir. Numune üzerinde X-ışınlarının birbirleri ile saçılması sonucu oluşan girişim, Bragg yasası uygulanarak, sistemdeki bir detektör yardımıyla, malzemenin kristal yapı özellikleri hakkında bilgi vermektedir (Tekade, 2018).

2.3.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

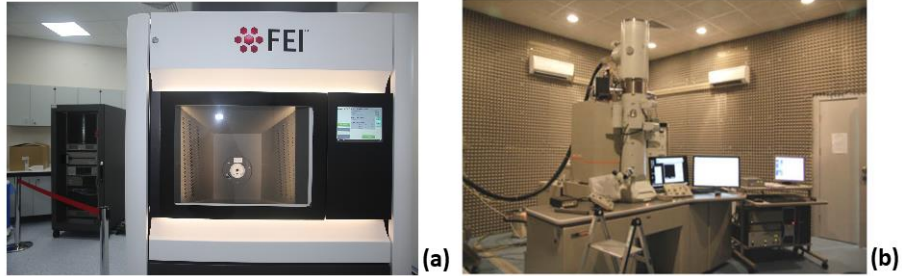
EAD yöntemi ile üretilen FLG, MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı kompozit tozlarının ve FLG takviyeli Al-Cu, Al-Zn esaslı FDM'lerin, Al-Zn ve Cu esaslı kompozitlerin; mikroyapısal incelemeleri, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS, Bruker/X Flash 6I100) ile entegre, yayınımlı elektron tabancalı (FEG) Carl Zeiss / Gemini 300 marka (BTÜ-MERLAB) taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.25). SEM incelemelerinde, geri saçılım elektron veya ikincil elektron görüntü yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 2.25 : Carl Zeiss / Gemini 300 marka taramalı elektron mikroskobu.

2.3.7 Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) analizi

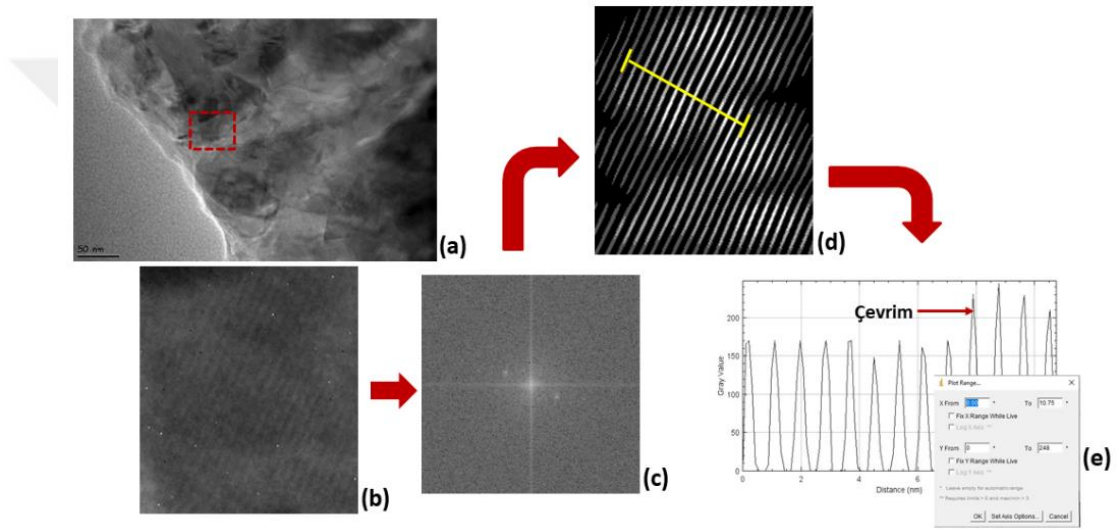
EAD yöntemi ile elde ettiğimiz FLG ve MA ile üretilen FLG takviyeli bazı kompozit tozlarının TEM analiz incelemeleri; Şekil 2.26(a)'da gösterilen FEI TALOS F200S - 200 kV marka (Bayburt Üniversitesi - BUMER) taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile gerçekleştirilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı bazı FDM'lerin yapısı ise, Şekil 2.26(b)'de gösterilen JEOL JEM-2100 – 200 kV marka (Ortadoğu Teknik Üniversitesi-MERLAB) TEM kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 2.26 : (a) FEI TALOS F200S - 200 kV, (b) JEOL JEM-2100 - 200kV marka geçirimli elektron mikroskobu.

Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM) görüntüleri, “ImageJ” (Optik ve Hesaplamalı Enstrümantasyon Laboratuvarı, Wisconsin Üniversitesi; ABD) adlı bir yazılım programı yardımıyla değerlendirilmiştir. Öncelikle HRTEM görüntülerinden belirlenen bölgelerden, hızlı Fourier dönüşümü (FFT) görüntüleri tanımlanmıştır (Liu ve diğ., 2023). FFT kırınım bölgelerinde, belirgin kırınım noktaları seçilerek, ters Fourier dönüşümü (IFFT) görüntüsüne çevrilmiştir. IFFT görüntülerindeki belirgin çizgilere dikey olacak şekilde program üzerinden çizim yapıp, hesaplanan çevrim sayısından düzlemler arası mesafe hesaplanmıştır. Şekil

2.27(a)-(e); FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'ye ait TEM analizinde; ham HRTEM görüntülerinden elde edilen, örnek bir IFFT dönüşüm değerlendirilmesinin iş akışını göstermektedir. Şekil 2.27(a) ve (b), ham HRTEM görüntülerini temsil etmektedir. Şekil 2.27(c), ham HRTEM görüntülerinden elde edilen FFT kırınım noktalarını temsil ederken, Şekil 2.27(d) ise FFT görüntüsünden çevrilmiş IFFT görüntüsünü ifade etmektedir. Program üzerinden Şekil 2.27(d)'de belirtilen sarı ile çizilen mesafe üzerinden, Şekil 2.27(e)'de gösterilen çevrim sayıları grafiği elde edilmektedir. Al_4C_3 fazına ait bu bölgede 13 olan çevrim sayısı, X ekseninde 10,75'e tekabül eden çizim aralığına bölünmektedir. Buradan düzlemler arası mesafe, yaklaşık 0,83 nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.27 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM için; (a), (b) Ham HRTEM görüntüleri, (c) (b)'den elde edilen FFT görüntüsü, (d) (c)'den elde edilen IFFT görüntüsü, (e) (d)'den elde edilen mesafeye göre çevrim sayısı ($d_{Al_4C_3} = 0,83 \text{ nm} = 10,75/13$).

2.3.8 Yoğunluk tayini

Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet yoğunluk prensibine göre belirlenmiştir. Ohaus marka hassas terazi ile birlikte kullanılan Arşimet yoğunluk ölçüm kiti, Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Arşimet yönteminde, üretilen numunelerin havada ve etil alkol içerisindeki ağırlıkları iki kez tekrarlı olarak ölçülerek aşağıda verilen Denklem 2.1 kullanılarak Arşimet yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Eşitlikte alkolün yoğunluğu $0,79 \text{ g/cm}^3$, havanın yoğunluğu ise $0,001 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır.

$$\text{Yoğunluk} = \frac{\text{Havadaki ağırlık}}{\text{Havadaki ağırlık} - \text{Alkoldeki ağırlık}} \times (\text{Alkolün yoğunluğu} - \text{havanın yoğunluğu}) + \text{havanın yoğunluğu} \quad (2.1)$$



Şekil 2.28 : Arşimet ölçüm kiti.

Üretimi tamamlanan kompozit ve FDM’lerin relatif yoğunluklarını hesaplamak için, teorik yoğunlukları da ayrıca hesaplanmıştır. Kompozit ve FDM’lerin teorik yoğunlukları; Denklem 2.2’de ifade edilen “Karışımlar Kuralı (ROM)” yardımıyla hesaplanmıştır (Tam ve diğ., 2012):

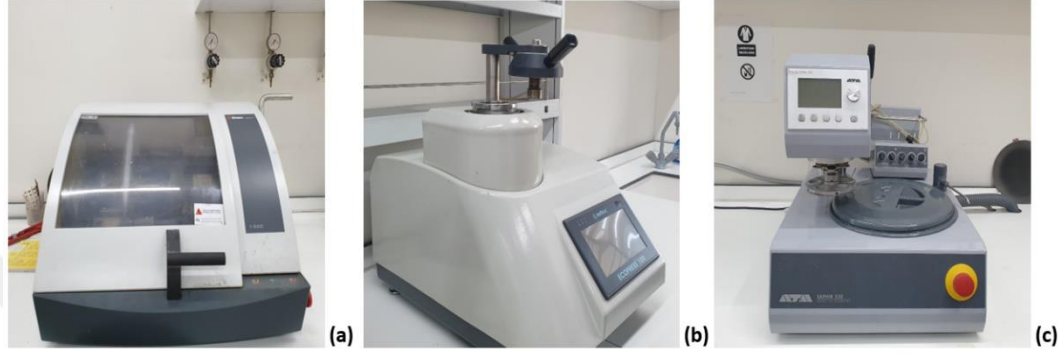
$$\rho_c = \rho_r \cdot V_r + \rho_m \cdot V_m \quad (2.2)$$

“ V_r ” ve “ V_m ”, sırasıyla, takviye ve matrisin hacim fraksiyonunu; “ ρ_r ” ve “ ρ_m ” ise sırasıyla takviye ve matrisin yoğunluklarını ifade etmektedir. Her bir FDM’nin altı katmana sahip tasarımı düşünülerek; her katman için ayrı ayrı hesaplanan teorik yoğunlukların, yaklaşık ortalaması alınmıştır. Kompozit ve FDM yapısını oluşturan; Al, Cu, Zn, Mg, Mn ve FLG için teorik yoğunluklar, sırasıyla, 2,7; 8,96; 7,14; 1,74; 7,21 ve 1,77g/cm³ (Borand ve diğ.,2021) olarak alınmıştır.

2.3.9 Mikroyapı incelemesi

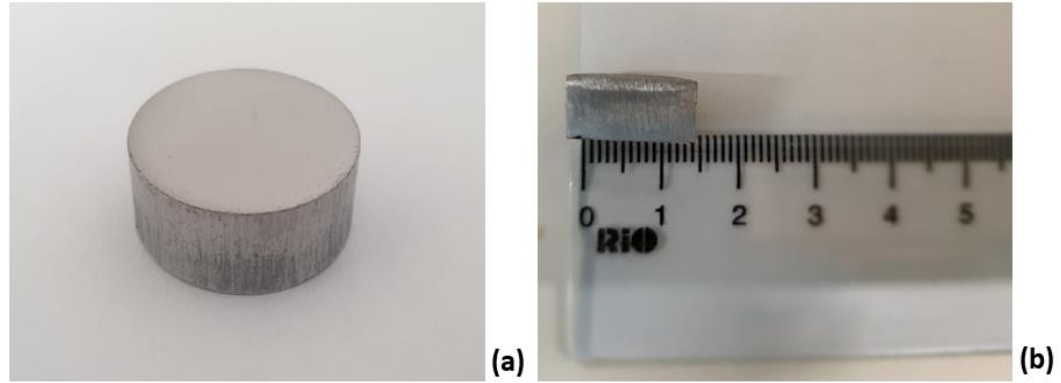
Optik ve elektron mikroskoplarıyla gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri öncesi, FDM ve kompozit numuneler belirli metalografik işlemlerden geçmiştir. Öncelikle, sadece FDM’ler için, katmanlar boyunca yapısal ve mekanik özellikleri inceleneceği için, üretilen FDM’lerin kesitleri alınmıştır. Her bir numune için kesme işlemi, Şekil 2.29(a)’da gösterilen Struers marka kesme cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kesitleri alınan FDM ve diğer hacimsel kompozit numuneler; 150°C sıcaklık, 12 dk ısıtma ve ardından yaklaşık 7 dk soğutma süresi ile Şekil 2.29(b)’de gösterilen Metkon

Ecopress 100 marka cihaz yardımıyla bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler, sırasıyla, su ile birlikte 800, 1200 ve 2500 numaralı zımpara kağıtları ile yaklaşık 15 dk boyunca zımparalanmıştır. Ardından, numunelere koloidal silika süspansiyon (Metkon) ile yaklaşık 10 dk boyunca parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri, Şekil 2.29(c)'de gösterilen yarı-otomatik ATM Saphir 520 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.29 : Sinterlenen numuneler için; (a) Struers marka kesme cihazı, (b) Metkon Ecopress 100 marka bakalite alma cihazı, (c) yarı-otomatik ATM Saphir 520 marka zımparalama-partlatma cihazı.

Şekil 2.30'da 600°C'de 3 sa boyunca sinterlenme işlemine tabi tutulan FLG takviyeli Al-6Zn FDM ve bu FDM'nin kesiti alınmış görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.30 : 600°C'de 3 sa boyunca sinterlenmiş olan; (a) Al-6Zn-FLG FDM, (b) kesiti alınmış Al-6Zn-FLG FDM.

Metalografik işlemleri gerçekleştirilmiş olan numunelerin mikroyapı incelemeleri için optik görüntüleri, Nikon™ Eclipse marka optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 : Nikon Eclipse marka optik mikroskop.

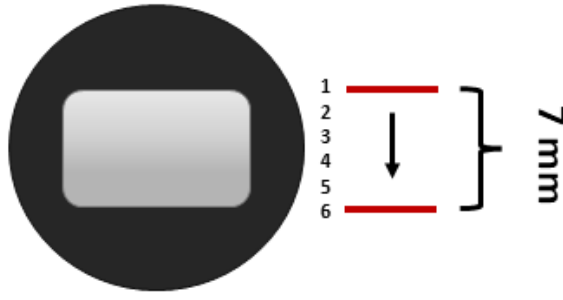
2.3.10 Sertlik ölçümü

Metalografik işlemleri gerçekleştirilen FDM ve hacimsel numunelerin; mikro sertlik ölçümleri Qness Q10M model sertlik cihazı ile 136° elmas piramit Vickers uç kullanılarak HV cinsinden ölçülmüştür (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 : Qness Q10M marka sertlik cihazı.

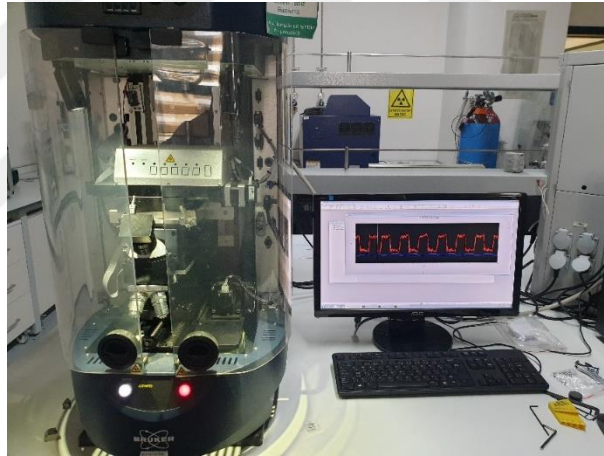
Sertlik ölçümleri 200 g'lık yük ile 15 saniye boyunca, FDM numunelerine uygulanmıştır. Altı katmanın her birinden ayrı ayrı beş ölçüm alınarak; her katman bölgesi için bu değerlerin ortalaması ve standart sapması alınmıştır. FDM'lerin tasarımı göz önünde bulundurularak; en alt katmandan en sondaki katmana doğru bir ölçüm işlemi uygulanmıştır (Şekil 2.33). Hacimsel alaşım ve FLG takviyeli kompozit numuneler için ise, merkez, orta ve dış bölgelerden beşer ölçümle birlikte toplam 15 adet ölçüm alınarak ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.33 : FDM'lerin sertlik ölçümlerinin numune üzerindeki şematik gösterimi.

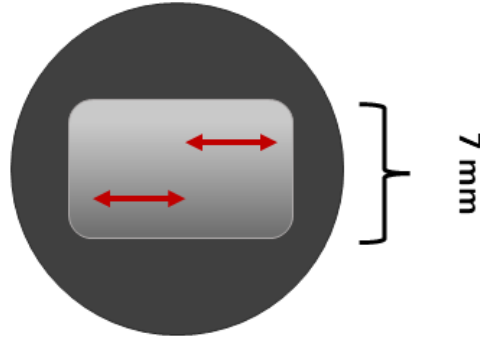
2.3.11 Aşınma testi

Metalografik işlemleri gerçekleştirilen numunelerin aşınma testleri Bruker UMT 2 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.34). Aşınma testlerinde, 5 mm çapa sahip çelik bilyalar kullanılmıştır. Bu çaptaki bilyaların konumuna göre, FDM numunelerin tabakalı yapısı düşünülerek aynı numune üzerinde hem alt hem de üst bölgelerine aşınma testi uygulanmıştır (Şekil 2.35).



Şekil 2.34 : Bruker UMT 2 marka aşınma cihazı.

Aşınma işlemi; FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lere ve FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlere uygulanan yük 3 N, aşındırma mesafesi 5 mm, aşınma hızı 5 mm/sn ve buna bağlı olarak toplam aşınma mesafesi 20000 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlere ise, toplam aşınma mesafesi 25000 mm olarak uygulanmıştır.



Şekil 2.35 : FDM’lerin aşınma ölçümlerinin numune üzerindeki şematik gösterimi.

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’ler ve FLG takviyeli Al-Zn kompozitlerin aşınma testi sonrası yüzeyindeki aşınma izlerinin incelenmesi için, Leica/DM2500 marka stereo mikroskop kullanılmıştır (Şekil 2.36). Elde edilen aşınma izi görüntülerinden, aşınma genişliği, “ImageJ” yazılım programı vasıtasıyla, beş ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir (Morgado ve diğ., 2016).



Şekil 2.36 : Leica/DM2500 marka stereo mikroskop.

2.3.12 Basma testi

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozit numunelere basma testleri uygulanarak, numunelerin; elastik modülü, akma ve basma mukavemeti ve %kısalma değerleri belirlenmiştir. Basma testleri, Şekil 2.37(a)’da gösterilen Shimadzu™ AG-X marka mekanik test cihazı ile 0,18 mm/dk yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Basma testleri için, T/M yöntemi ile, aynı proses koşullarını içeren, Şekil 2.37(b)’de gösterilen 8 mm çap ve yaklaşık 18 mm uzunluğunda silindirik numuneler üretilmiştir.



(a)



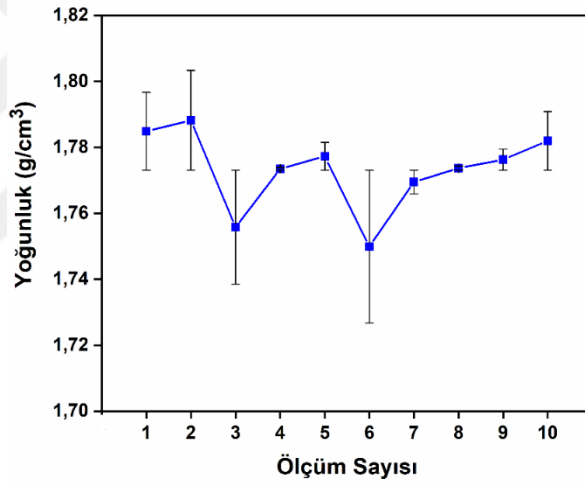
(b)

Şekil 2.37 : (a) Shimadzu™ AG-X marka mekanik test cihazı, (b) basma testi numunesi.

3. BULGU VE TARTIŞMA

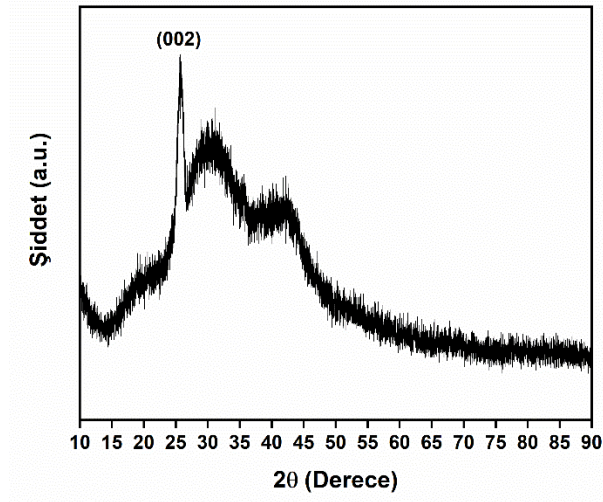
3.1 Elektrik Ark Yöntemi ile Üretilen Birkaç Katmanlı Grafen Tozlarının Karakterizasyonu

EAD yöntemi ile üretilen FLG'nin, gaz piknometresi ile ölçülen yoğunluk değeri, yaklaşık 10 farklı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu ölçümleri gösteren grafik Şekil 3.1'de ifade edilmiştir. Bu ölçümler sonucunda, FLG'nin yoğunluk değeri ortalama olarak $1,7731 \pm 0,0115 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.



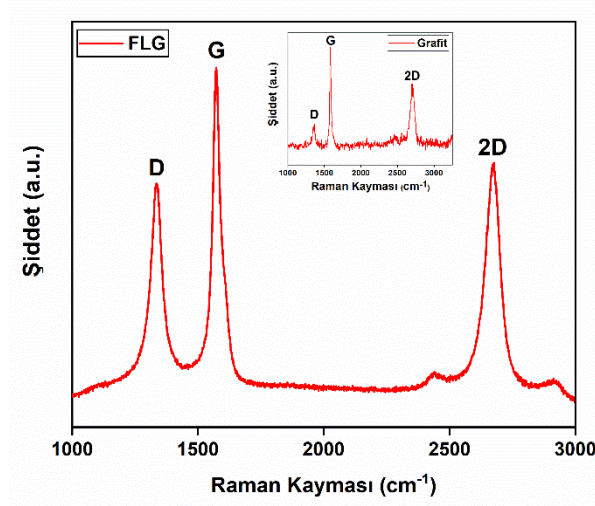
Şekil 3.1 : FLG'nin piknometre yoğunluk ölçüm değerleri.

FLG'nin BET yüzey alanı $153,52 \pm 2,36 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer, tek katmanlı grafenin teorik yüzey alanı değerinden ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$) daha düşüktür (Stoller ve diğ., 2008). Bu durumun, üretilen grafenin birkaç katmanlı olması ve üretim yönteminden dolayı olduğu söylenebilir (Chen ve diğ., 2012; Shen ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2020). EAD ile üretilen FLG'ye ait XRD paterni Şekil 3.2'de gösterilmiştir. XRD paternine bakıldığında, üretilen grafenin amorf bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. En güçlü pik, (002) düzlemine karşılık gelen yaklaşık olarak $2\theta=25,7^\circ$ 'de kristalleşmiş bir yapıya işaret etmektedir.



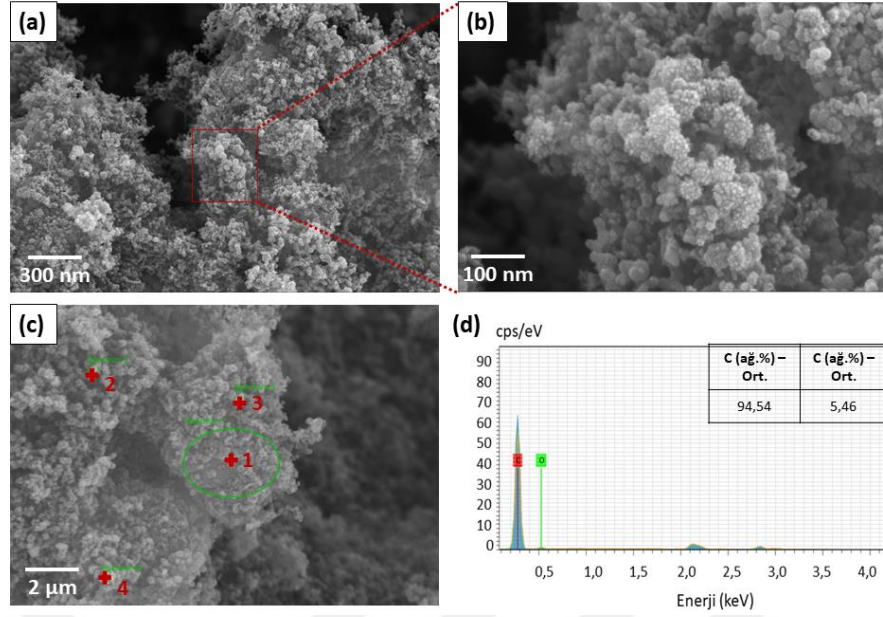
Şekil 3.2 : FLG'ye ait XRD paterni.

Raman spektroskopisi, karbon malzemelerin yapısal özelliklerini araştırmak için kullanılan hızlı, tahribatsız ve kolay bir tekniktir (Soldano ve diğ., 2010). Karbon esaslı malzemelerin Raman spektrumu; D, G ve 2D (D bandının ikinci mertebesi) olarak adlandırılan üç ana pike sahiptir (Hao ve diğ., 2010). Yaklaşık 1350 cm^{-1} civarında konumlanan D bandı, kusurlar hakkında bilgi vermektedir (Ni ve diğ., 2008). 1580 cm^{-1} civarındaki G bandı, sp^2 karbon esaslı malzemelerdeki fonon titreşimleriyle ilgilidir (Ferrari, 2007). D bandının ikinci sırası olan 2D bandı ise, yaklaşık 2680 cm^{-1} 'de konumlanmaktadır ve grafen katmanlarının sayısı hakkında bilgi vermektedir (Wu ve diğ., 2016). Şekil 3.3; EAD yöntemiyle üretilen FLG'ye ait bir Raman grafiğini göstermektedir. D, G ve 2D bantlarını ifade eden, sırasıyla, yaklaşık olarak, 1336 , 1575 ve 2673 cm^{-1} 'de konumlanan üç karakteristik pik göze çarpmaktadır. Raman spektrumundan elde edilen entegre şiddet oranı (I_D/I_G), karbon yapılarının kristallliği ve saflığı hakkında bilgi vermektedir. Yüksek I_D/I_G değerleri, grafen için düşük bir kristallliği ve saflığı ifade etmektedir (Pimenta ve diğ., 2007; Sun ve diğ., 2016). Üretilen FLG için elde edilen I_D/I_G oranı $0,66$ olarak hesaplanmıştır ve bu durum, oldukça yüksek saflığa grafenin elde edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, I_G/I_{2D} 'nin entegre şiddet oranı, FLG'lerin katman sayısını belirlemek için kullanılabilir (Liu ve diğ., 2010). Wu ve diğ. (2010), yaklaşık olarak $0,4$ değerine sahip I_G/I_{2D} entegre şiddet oranının, tek bir katmana karşılık geldiğini bir çalışmalarında belirtmişlerdir. FLG için I_G/I_{2D} oranı $1,29$ olarak hesaplanmıştır ve bu değer de üretilen grafenin birkaç katmanlı (~ 3 katman) bir morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir (Li ve diğ., 2016; Shen ve diğ., 2012; Wu ve diğ., 2010, 2016).



Şekil 3.3 : FLG'nin Raman analiz sonuçları (Ekteki grafik, üretim sırasında kullanılan grafit çubuklarına aittir.).

EAD ile üretilen FLG'nin farklı büyütmelerindeki SEM görüntüleri, Şekil 3.4(a) ve (b)'de gösterilmektedir. He-N₂ atmosferi altında, yaklaşık olarak 50–90 nm çap aralığına sahip olduğundan dolayı, karbon nanopartiküllerinin küresel ve büyük kümelenmiş olarak topaklandığı gözlemlenmiştir. FLG'nin bu topaklanan morfolojisi, kullanılan ortam atmosferine ve üretim koşullara bağlı olarak değişmektedir (Fronczak ve Bystrzejewski, 2017; Shen ve diğ., 2012; Yu ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2019). Şekil 3.4(c)'deki SEM görüntüsündeki seçilen alanlardan SEM-EDS analizi uygulanarak elde edilen FLG'nin kimyasal kompozisyonuna ait EDS spektrumu, Şekil 3.4(d)'de verilmiştir. Seçilen alanlardan gerçekleştirilen EDS analizi, FLG'nin ağırlık %94,54 C ve ağırlık %5,46 O bileşimine sahip olduğunu göstermiştir (Çizelge 3.1). Mevcut O miktarı, analiz koşulları ve üretildikten sonra depolama sırasında FLG yüzeyinde biriken O ile ilişkili olabilir. Bununla birlikte, başka hiçbir farklı safsızlık tespit edilmedi.



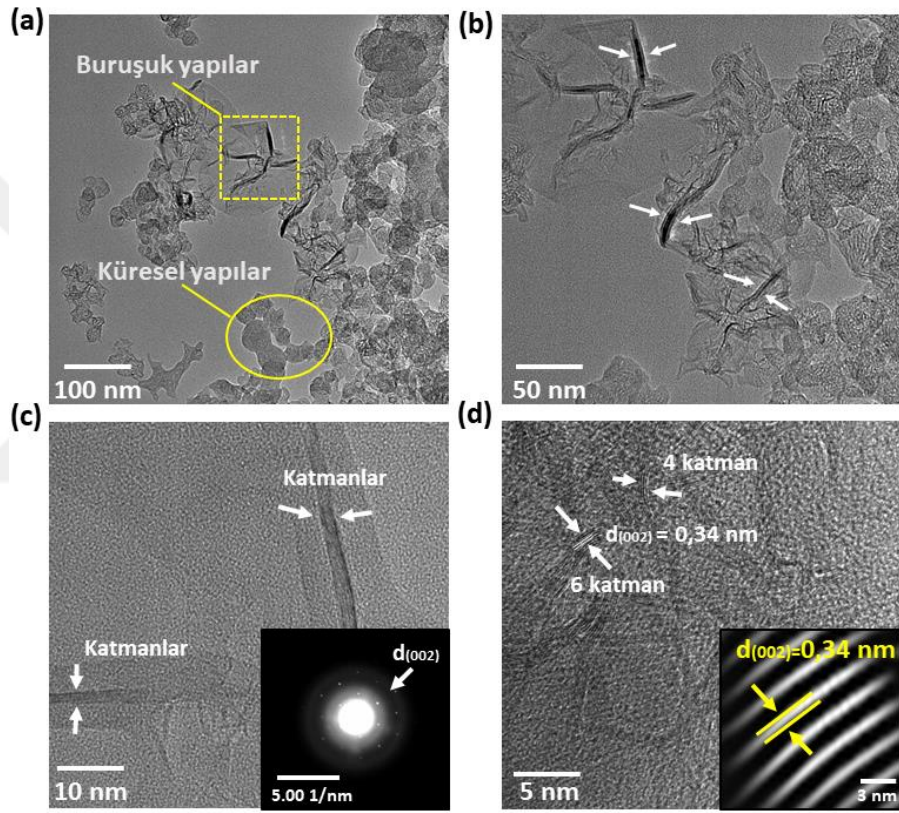
Şekil 3.4 : FLG'ye ait (a),(b)farklı büyütmeledeki SEM görüntüleri; (c) EDS için seçilen bölgelerin SEM görüntüsü, (d) (c)'de belirtilen bölgelerin EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.1 : Şekil 3.4(c)'deki işaretli bölgelerin EDS sonuçları.

Bölgeler	Element Miktarları (ağ. %)	
	C	O
1	95,00	5,00
2	94,61	5,39
3	94,26	5,74
4	94,29	5,71

Şekil 3.5(a) ve (b), EAD ile üretilen FLG'nin farklı büyütmelede aydınlık alan TEM görüntülerini göstermektedir. TEM görüntülerinde küresel parçacıklar ve buruşuk grafen morfolojisi olmak üzere, iki yapı göze çarpmaktadır (Wang ve diğ., 2020). He-N₂ ortam atmosferinde uygun koşullarda üretilen grafen için temel yapı olan küresel parçacıklar, Şekil 3.4(a) ve (b)'de ifade edilen SEM görüntüleriyle uyumludur. Birçok küresel ve buruşmuş yapılar, Şekil 3.5(a)'da kümelenmiş olarak görünmektedir. Ayrıca, SEM görüntülerinde tespit edilemeyen yarı şeffaf buruşuk grafen yapıları, Şekil 3.5(b)'de görülmüştür. Beyaz oklarla belirtilen bu buruşuk grafen yapıları, topaklanmış olan küresel parçacıklara gömülmüştür. Buruşuk şeffaf grafen yüzeylerinden elde edilen HRTEM görüntüleri, Şekil 3.5(c) ve (d)'de farklı büyütmelede gösterilmektedir. Grafenin birkaç katmanlı olarak üretildiği, HRTEM görüntülerinde açıkça (Qin ve diğ., 2016; Wang ve diğ., 2019; Wu ve diğ., 2016; Yu

ve diğ., 2015). HRTEM görüntüleri boyunca grafen katmanlarının sayısı, 4 ile 8 katman arasında değişmektedir. Şeffaf katmanlardan alınan, Şekil 3.5(c)'nin eki olarak gösterilen seçilmiş alan kırınım (SAD) paterni, karbonun bal peteği kafes yapılarının varlığını doğrulayan (002) kırınım noktalarını göstermektedir (Karmakar ve diğ., 2013; Kumar ve diğ., 2013; Li ve diğ., 2016). Şekil 3.5(d)'deki ek kısım, işaretli alanın ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) görüntüsünü ifade etmektedir ve bu da üretilen FLG'nin düzlemler arası mesafesinin, grafitin düzlemler arası mesafesinden ($d_{002} = 0,33$ nm) daha büyük olan yaklaşık 0,34 nm olduğunu ortaya çıkarmaktadır (Guo ve diğ., 2013).

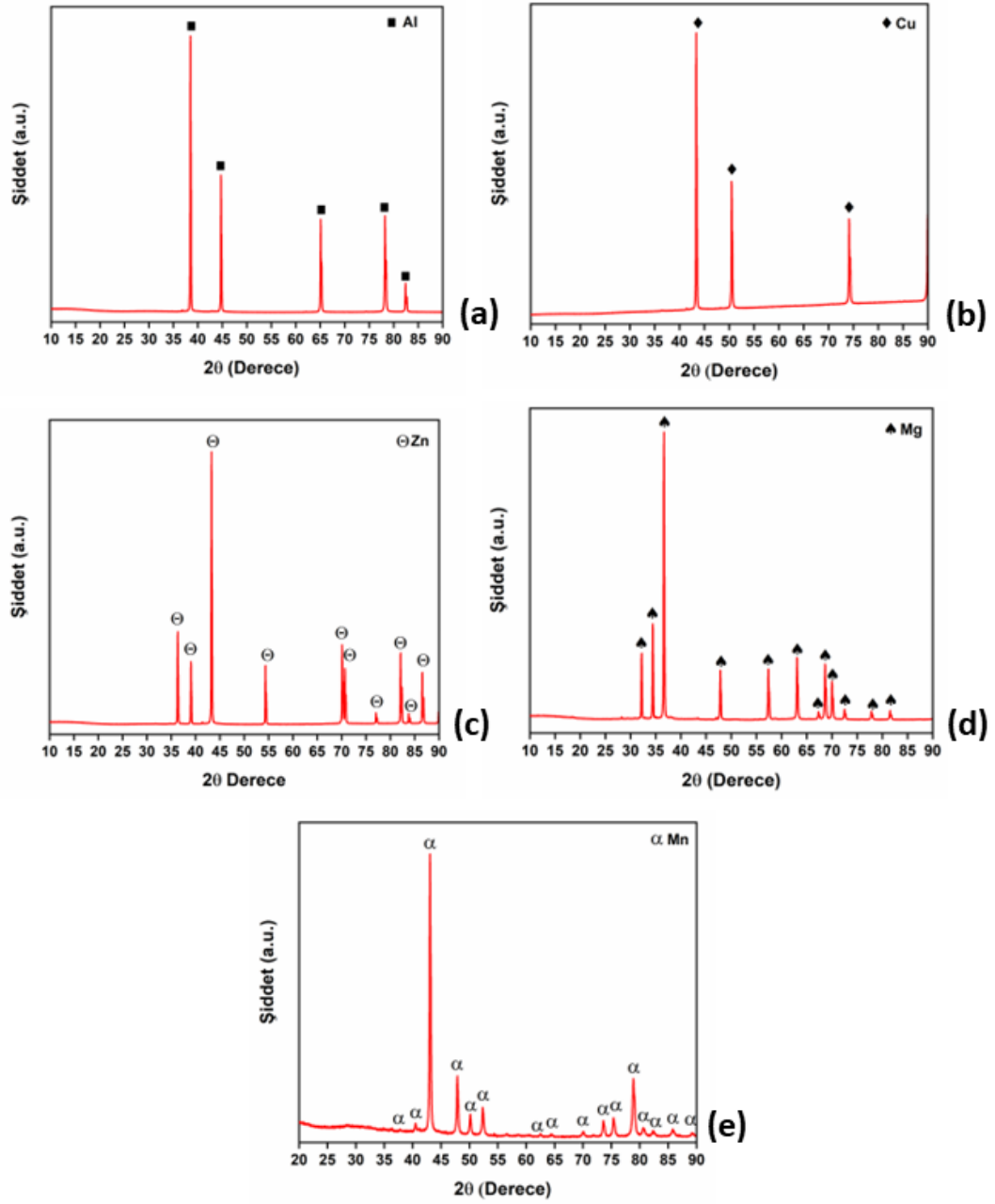


Şekil 3.5 : FLG'ye ait farklı büyütmelerdeki (a), (b) Aydınlik alan TEM görüntüsü; (c), (d) HRTEM görüntüsü. (Şekil 3.5 (c)'deki ek SAD paternini, (d)'deki ek ise IFFT görüntüsünü ifade etmektedir.).

3.2 Başlangıç Tozlarının Karakterizasyonu

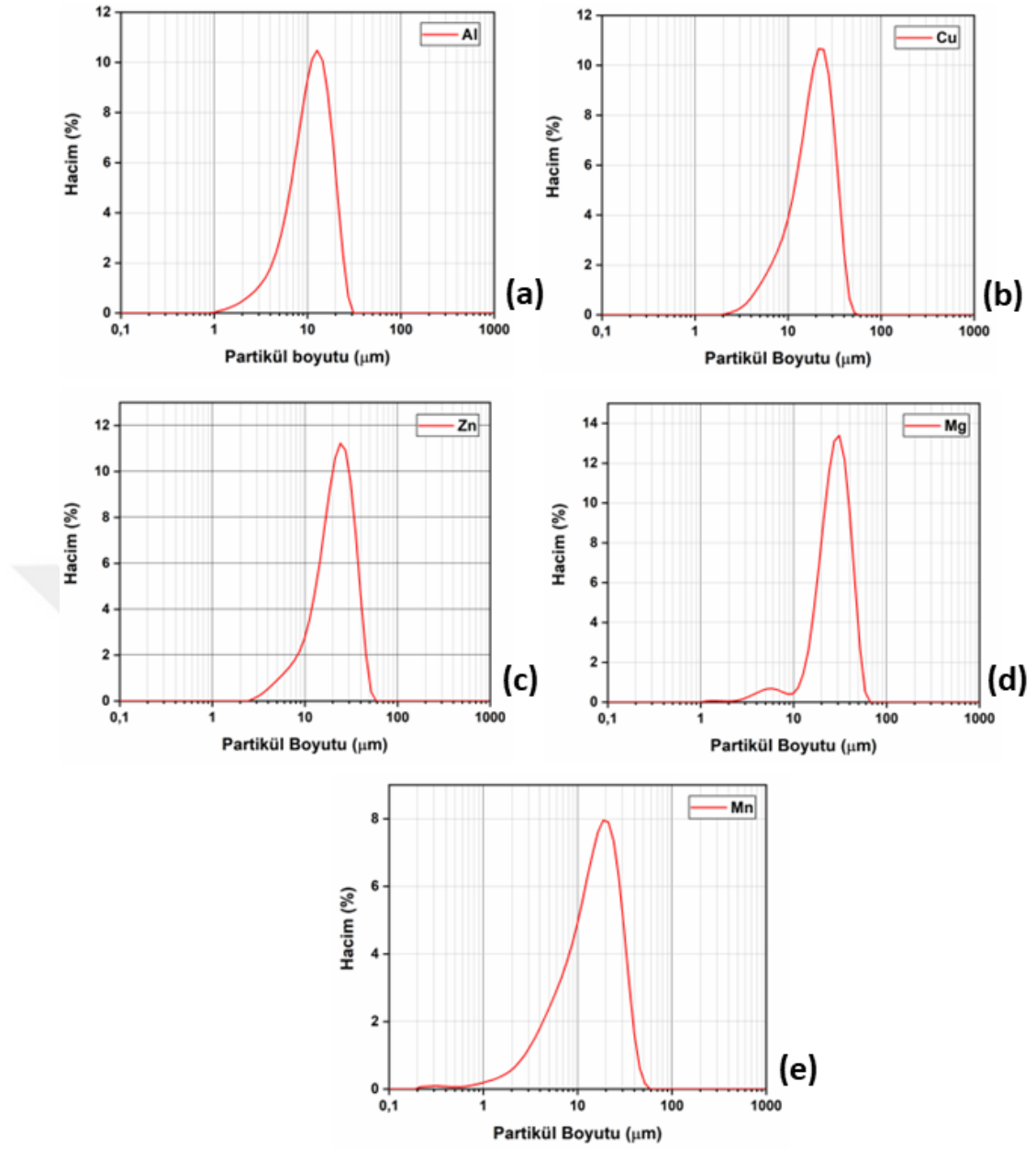
Gerçekleştirilen tez çalışmasında, kompozit ve FDM'lerin üretilmesinde matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum (Al), bakır(Cu), çinko(Zn), magnezyum(Mg) ve mangana(Mn) ait başlangıç tozlarının XRD paternleri Şekil 3.6(a)-(e)'de verilmiştir. Al, Cu, Zn, Mg ve Mn elementlerine ait karakteristik pikler, XRD

paternlerinde göze çarpmaktadır ve bu durum tozların herhangi bir empürite fazı içermeyen, saf hammadde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.6 : Başlangıç tozlarının XRD paternleri: (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e) Mn.

Başlangıç tozlarına ait, partikül boyut dağılımı Şekil 3.7(a)-(e)'de gösterilmiştir. Unimodal ve düzgün dağılım gösteren tozların ortalama partikül boyutları, Çizelge 3.2'de verilmiştir. Al tozu 12,3 μm ; Cu tozu, 21 μm ; Zn tozu 23,6 μm ; Mg tozu 29,9 μm ve Mn tozu 17 μm ortalama partikül boyutuna sahiptir.

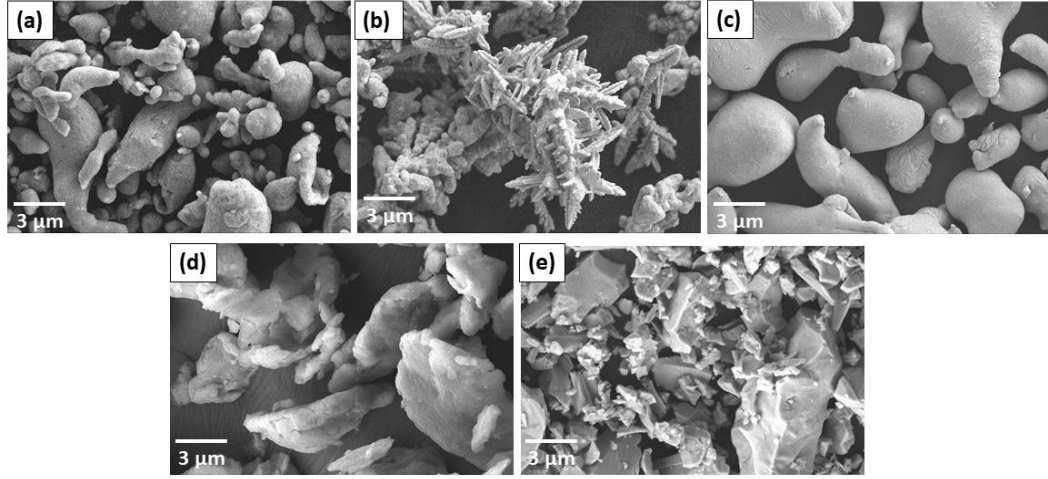


Şekil 3.7 : Başlangıç tozlarının partikül boyut dağılımı: (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e)Mn.

Çizelge 3.2 : Başlangıç tozlarının ortalama partikül boyutu sonuçları.

Başlangıç tozları	Ortalama Partikül Boyutu (μm)
Al	12,3
Cu	21
Zn	23,6
Mg	29,9
Mn	17

Başlangıç tozlarına ait, SEM görüntüleri, Şekil 3.8(a)-(e)'de verilmiştir. Şekil 3.8 (a)'da Al'in SEM görüntülerine bakıldığında şekilsiz irili ufaklı birçok partiküle sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.8(b)'de ifade edilen Cu'lar ise dendritik bir görünüme sahiptir. Ayrıca, Zn'lerin Şekil 3.8(c)'de gösterilen SEM görüntülerine bakıldığında, irili ufaklı birçok partikülün mevcut olduğu ve bu partiküllerin yüksek en-boy oranına sahip olduğu görülmektedir.



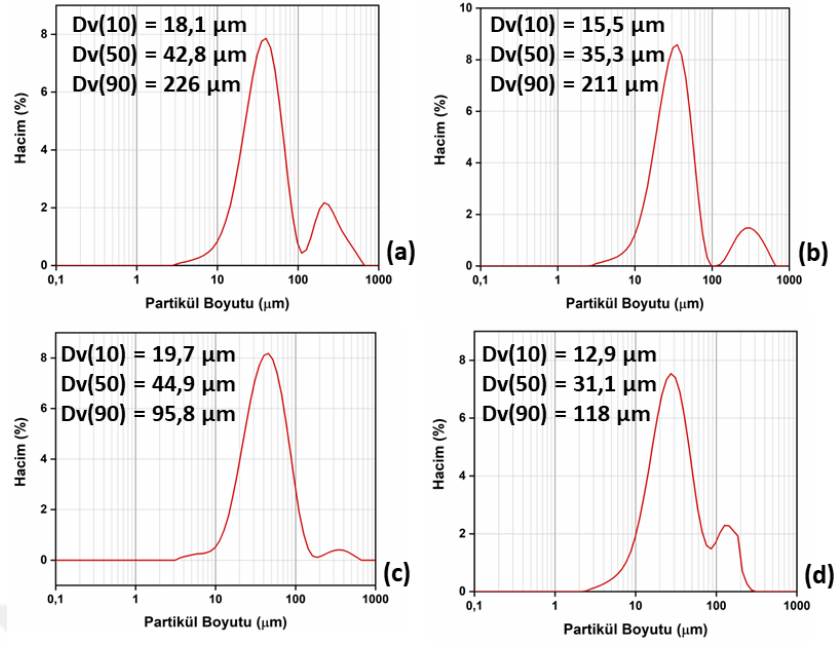
Şekil 3.8 : Başlangıç tozlarının SEM görüntüsü (2000X): (a) Al, (b) Cu, (c) Zn, (d) Mg ve (e)Mn.

3.3 Mekanik Alaşımlanmış Tozların Karakterizasyonu

3.3.1 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının partikül boyutları

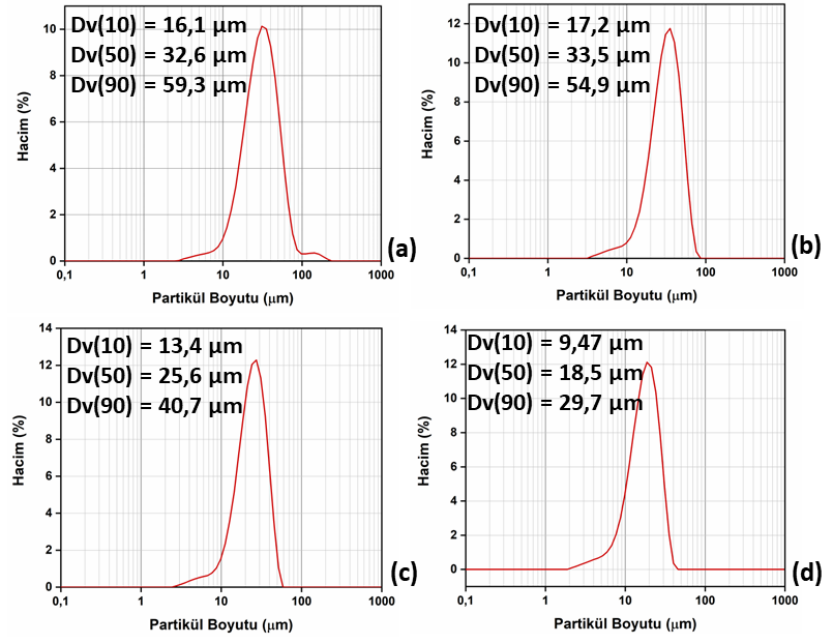
FLG takviyeli (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin üretiminde kullanılan MA ile elde edilen kompozit tozlarının, FLG içeriklerine göre partikül boyut dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca, partikül boyut grafiklerinde $D_v(10)$, $D_v(50)$ ve $D_v(90)$ değerleri ifade edilmiştir. $D_v(10)$ değeri, partikül boyut dağılımının %10'unun, $D_v(90)$ ise %90'unun hangi boyutun altında olduğunu açıklamaktadır. $D_v(50)$ değeri ise, partikül dağılımının %50'sinin hangi boyut altında, diğer %50'sinin de hangi boyut üstünde olduğunu ifade etmektedir (Baig ve diğ., 2018).

FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği, Şekil 3.9(a)-(d)'de gösterilmiştir. Bimodal olarak hacimsel dağılım gösteren tozların, ortalama partikül boyutları, yaklaşık olarak, 45-80 μm arasında değişmektedir. FLG içeriği arttıkça, partikül boyutunun genel olarak bir miktar düştüğü görülmektedir.



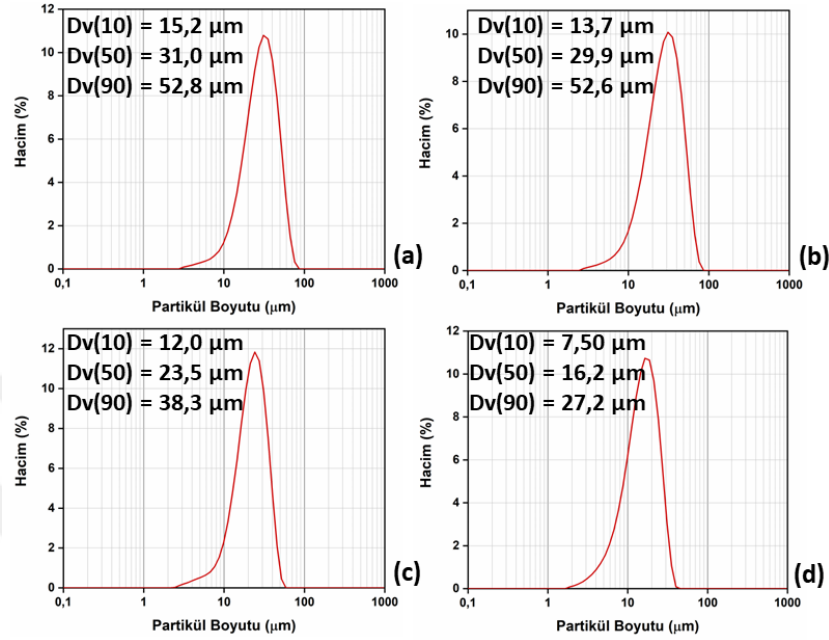
Şekil 3.9 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu; (b) Al-4,5Cu + ağırlık % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu + ağırlık % 0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu + ağırlık % 0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği Şekil 3.10(a)-(d)'da verilmiştir. Unimodal olarak hacimsel dağılım gösteren tozların, ortalama partikül boyutları, 20-40 μm arasında değişmektedir. FLG içeriği arttıkça, partikül boyutlarında bariz bir şekilde düşüş görülmektedir.



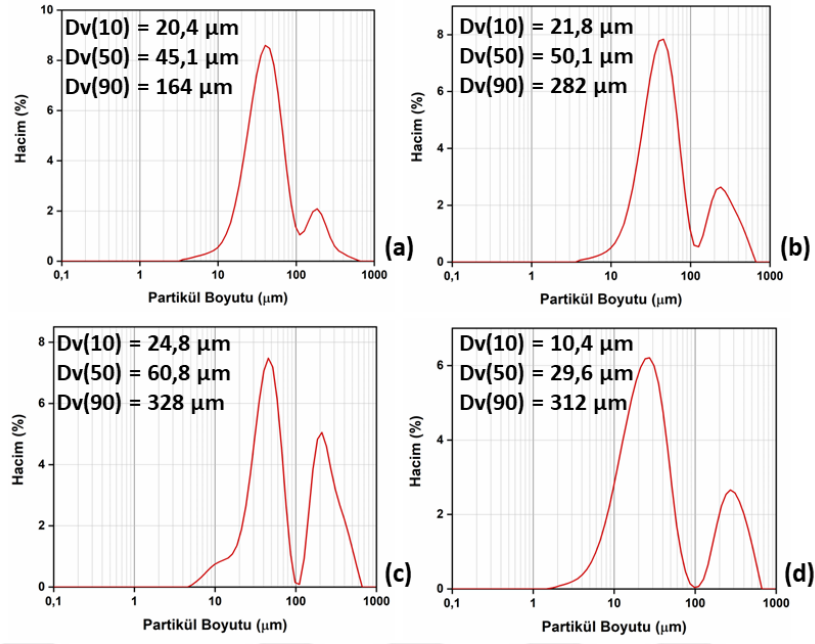
Şekil 3.10 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu-1,5Mg; (b) Al-4,5Cu-1,5Mg + ağırlık % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu-1,5Mg + ağırlık % 0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu-1,5Mg + ağırlık % 0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği Şekil 3.11(a)-(d)'de verilmiştir. Unimodal olarak hacimsel dağılım gösteren tozların, ortalama partikül boyutları, 15-35 μm arasında değişmektedir. FLG içeriği arttıkça, partikül boyutlarında bir miktar düşüş görülmektedir.



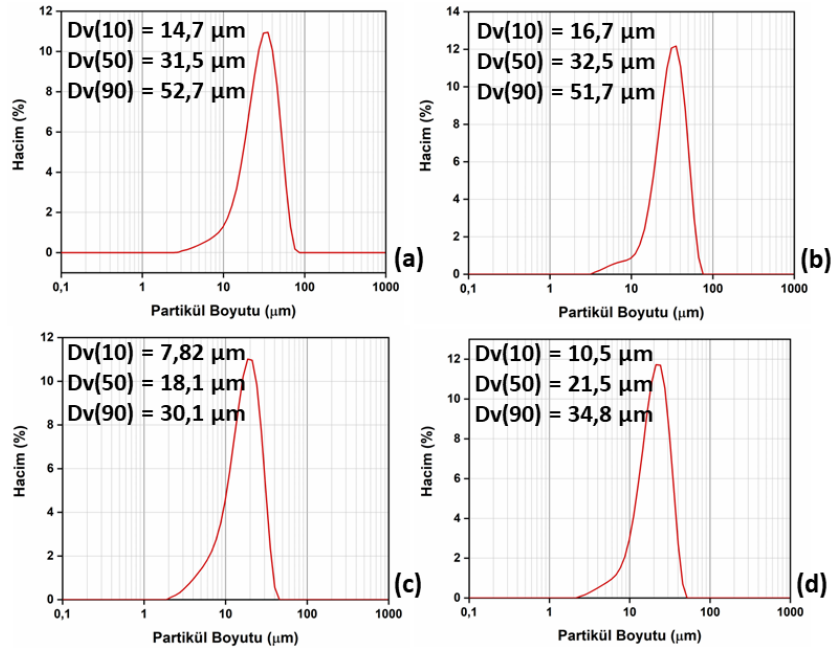
Şekil 3.11 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn; (b) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn + ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn + ağ. % 0,3 FLG ve (d) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn + ağ. % 0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli, Al-6Zn esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği Şekil 3.12(a)-(d)'de verilmiştir. Bimodal olarak hacimsel dağılım gösteren numunelerin ortalama partikül boyutları, 65-140 μm arasında değişmektedir. Ağ. % 0,3 FLG içeriğine kadar partikül boyutunda artma görülürken, ağ. % 0,7 FLG içeriğiyle partikül boyutunda bir düşüş gözlemlenmiştir.



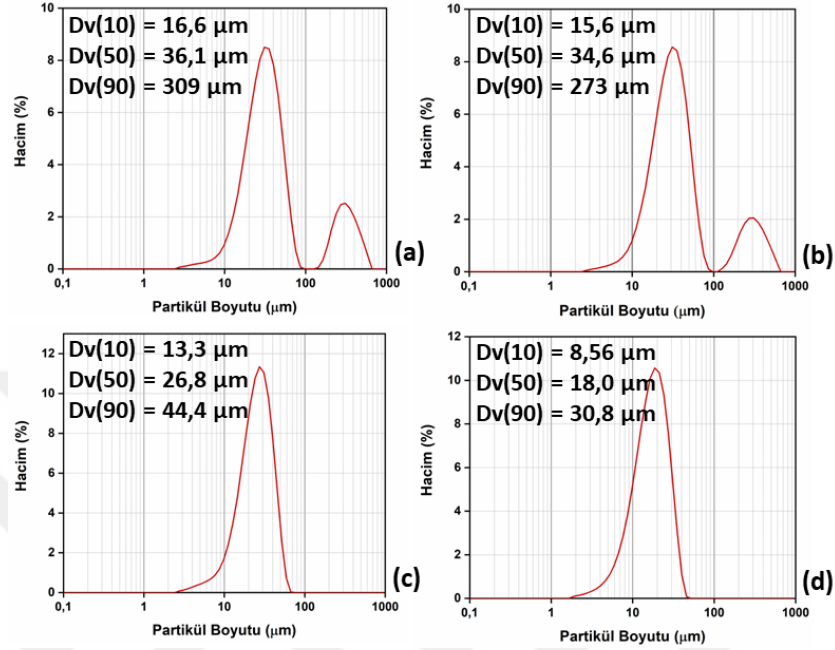
Şekil 3.12 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn; (b) Al-6Zn + ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-6Zn + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli, Al-6Zn-2Cu esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği Şekil 3.13 (a)-(d)'de verilmiştir. Unimodal olarak hacimsel dağılım gösteren numunelerin ortalama partikül boyutları, 20-35 μm arasında değişmektedir. FLG içeriği arttıkça, kompozit tozlarının ortalama partikül boyutlarında düşüş görülmektedir.



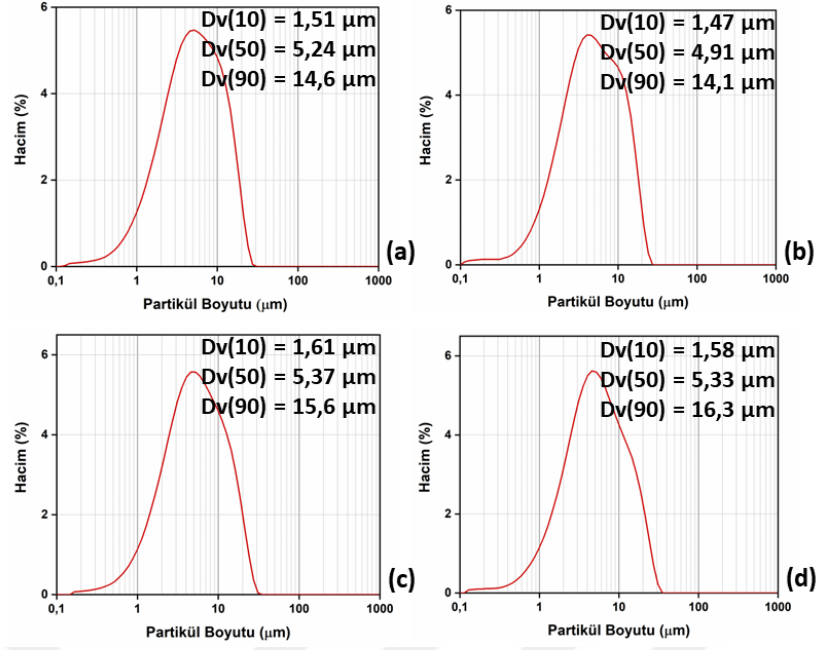
Şekil 3.13 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn-2Cu; (b) Al-6Zn-2Cu + ağ. % 0,1 FLG; (c) Al-6Zn-2Cu + ağ. %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn-2Cu + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli, Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı tozların partikül boyut dağılım grafiği Şekil 3.14(a)-(d)'de gösterilmiştir. Bimodal ve unimodal olarak hacimsel dağılım gösteren numunelerin ortalama partikül boyutları, 20-90 μm arasında değişmektedir. FLG içeriği arttıkça, partikül boyutlarında düşüş görülmektedir.



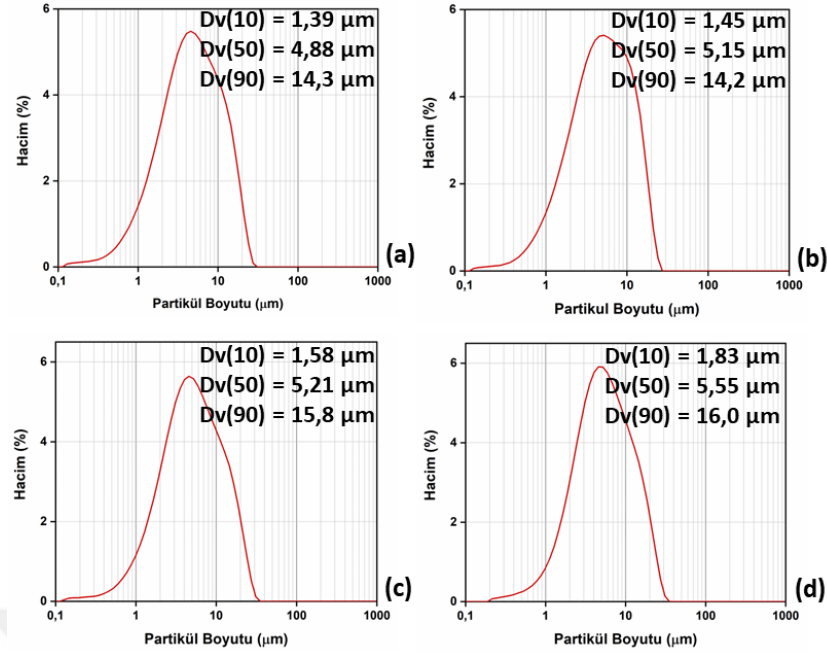
Şekil 3.14 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al-6Zn-2Cu-2Mg; (b) Al-6Zn-2Cu-2Mg + ağırlık %0,1 FLG; (c) Al-6Zn-2Cu-2Mg + ağırlık %0,3 FLG ve (d) Al-6Zn-2Cu-2Mg + ağırlık %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretilmesinde kullanılmış olan, MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı tozların partikül boyut dağılımları belirlenmiştir. Şekil 3.15 (a)-(d), 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu tozlarının partikül boyut dağılım grafiklerini göstermektedir. Unimodal bir dağılım gösteren tozların ortalama partikül boyutu 6 ila 7 μm arasında değişmektedir. Bununla birlikte, FLG içeriğindeki artışın partikül boyut dağılımı üzerinde çok etkili olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.15 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Cu ; (b) Cu+ağ. % 0,1 FLG; (c) Cu+ ağ. %0,3 FLG ve (d) Cu+ ağ. %0,5 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

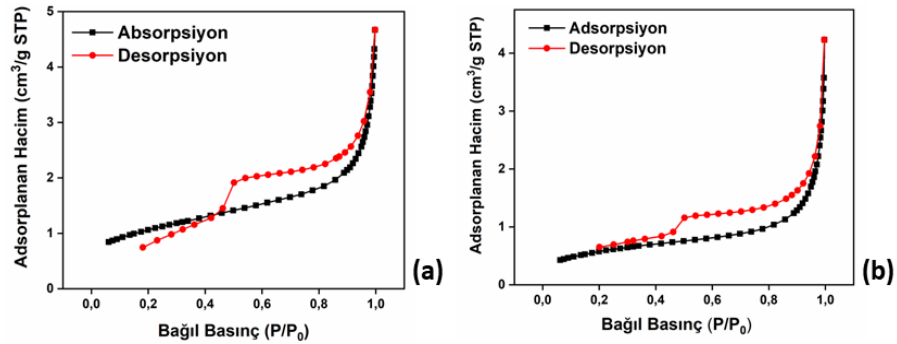
Şekil 3.16 (a)-(d), 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu tozlarının partikül boyut dağılım grafiklerini göstermektedir. Tozların ortalama partikül boyutu 6 ila 7 μm arasında değişmekte ve unimodal bir dağılıma sahiptir. FLG içeriğindeki artışın partikül boyut dağılımı üzerinde çok etkili olmadığı görülmektedir. Fakat 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli kompozit tozların Dv(90) değerinin FLG içeriği arttıkça arttığı gözlenmiştir. Bu durum, FLG'nin Cu matris yapısında topaklanma eğiliminde olabileceğini gösterebilir (Cui ve diğ., 2014; Varol ve Canakci, 2015).



Şekil 3.16 : 7 sa MA ile elde edilen (a) Cu ; (b) Cu+ağ. % 0,1 FLG; (c) Cu+ ağ. %0,3 FLG ve (d) Cu+ ağ. %0,5 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.

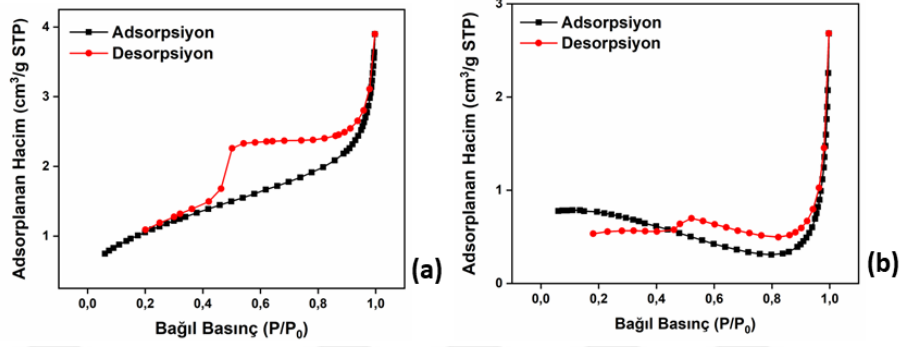
3.3.2 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının yüzey alanı (BET) ölçümleri

FLG takviyeli (ağ. %0,1 ve %0,7) Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM üretiminde kullanılmış olan bazı nanokompozit tozlarının, sinterleme davranışları için yüzey alanı ölçümleri (BET) gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17(a) ve (b), sırasıyla, 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,1 FLG ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının azot adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında her numunede, adsorpsiyon ve desorpsiyonun farklı yol izlemesi, histeresis halkalarının oluşmasına sebep vermektedir. Bu durum, mikro gözenekli bir yapı yanında aynı zamanda mezo gözenekler içeren katıları işaret etmektedir.



Şekil 3.17 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. (a) %0,1 ve (b) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermeleri.

Şekil 3.18 (a) ve (b), sırasıyla, 5 sa MA ile elde edilen ağırlık %0,1 FLG ve ağırlık %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının azot adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermelerini göstermektedir. Nanokompozit tozlarında histeresis halkaları oluşmuştur ve bu tozlarda da mikro gözenekli bir yapı yanında aynı zamanda mezo gözenekler içeren katılar da mevcuttur.



Şekil 3.18 : 5 sa MA ile elde edilen ağırlık (a) %0,1 ve (b) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermeleri.

Çizelge 3.3’de FLG takviyeli Al-4,5Cu ve Al-6Zn esaslı bazı kompozit tozlarına ait yüzey alanı sonuçları gösterilmiştir. MA ile üretilen kompozit tozlarının yüzey alanları 2-5 m²/g arasında değişmektedir. Kompozit tozlarında mevcut FLG içeriğinin değiştirilmesinin, çok yüksek bir etkisi bulunmamaktadır. Yüksek enerjili bilyalı öğütme; birkaç m²/g ile 20 m²/g’den fazla geniş bir spesifik yüzey alanı aralığında tozların üretilmesine izin vermektedir (Esposito ve diğ., 2020).

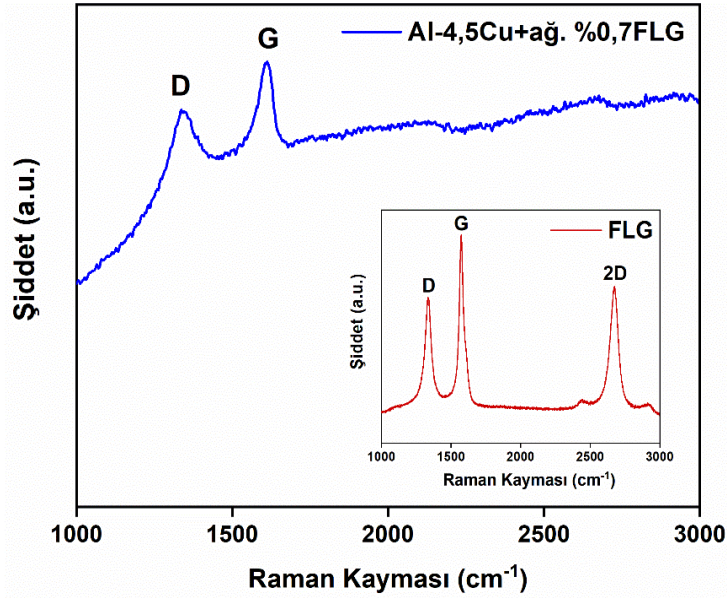
Çizelge 3.3 : FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı bazı kompozit tozlarının yüzey alanı ölçümleri.

Numune	Yüzey alanı (m ² /g)
Al-4,5Cu-0,1FLG	3,6883
Al-4,5Cu-0,7FLG	2,0514
Al-6Zn-0,1FLG	3,9021
Al-6Zn-0,7FLG	2,1279

3.3.3 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının Raman analizi

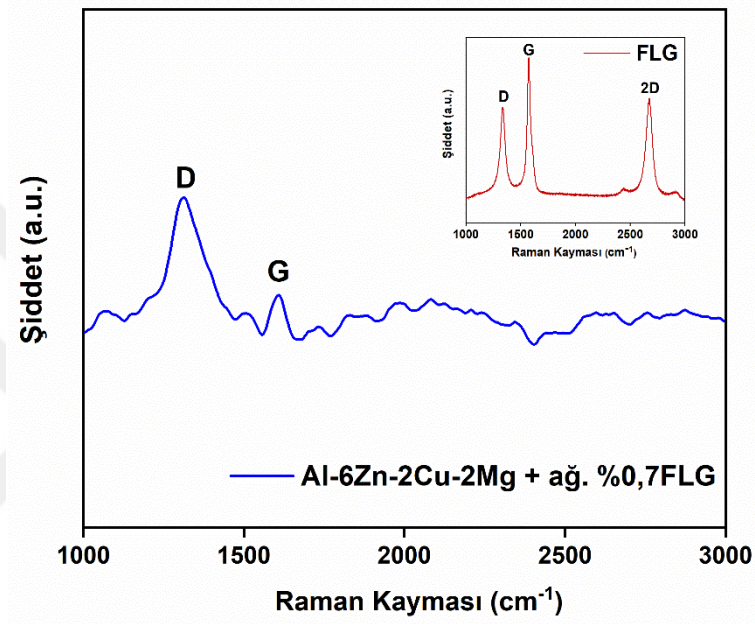
FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’lerin üretilmesinde kullanılan bazı FLG takviyeli kompozit tozlarının; yapısal değişikliklerini belirlemek için, Raman spektroskopisi kullanılmıştır. Şekil 3.19; 5 sa MA ile elde edilen ağırlık %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozunun Raman spektrumunu göstermektedir. Şekil 3.3’te gösterilen FLG Raman spektrumu grafiğine göre, FLG’nin D, G ve 2D bantları, sırasıyla, yaklaşık olarak 1336, 1574 ve 2673 cm⁻¹ olarak konumlanmıştır.

Ağ. %0,7 FLG ile takviye edilen Al-4,5Cu esaslı kompozit tozları için, bu karakteristik pikler, sırasıyla, 1352 ve 1615 cm^{-1} olarak D ve G bantlarına karşılık gelmektedir. Ayrıca, FLG'ye ait Raman spektrumunda olduğu gibi 2D bandı gözlemlenmemiştir (Kwon ve diğ., 2017). Piklerin şiddeti, 5 sa bilyalı öğütmenin ardından azalmaktadır. Bununla birlikte, D ve G bandının pikleri, ağ. %0,7 FLG ile takviye edilen Al-4,5Cu esaslı kompozit tozu için kaymıştır. G bandının konumundaki değişiklikler, grafendeki gerilimin mevcudiyeti ile ilişkilendirilebilir (Mohiuddin ve diğ., 2009). MA prosesi boyunca, dalga sayısı kaymasına neden olarak, grafen gerilmiştir (Zhang ve diğ., 2018). Raman spektrumundan elde edilen D bandı ve G bandının (I_D/I_G) entegre şiddet oranı ne kadar yüksek olursa, grafenin kusurları da o kadar yüksek olur (Dasari ve diğ., 2018). Şekil 3.3'te gösterilen grafiğe göre, FLG'nin I_D/I_G oranı 0,69 iken; ağ. %0,7 FLG ile takviye edilen Al-4,5Cu esaslı kompozit tozunun I_D/I_G oranı 0,89 olarak bulunmuştur. 5 sa bilyalı öğütme sonrasında, grafen yapısı için kusurları ve azalan kristalit boyutunu ifade eden I_D/I_G oranı artmıştır (Bastwros ve diğ., 2014; Li ve diğ., 2018). Grafenin daha fazla kusurlu olmasına neden olan bilyalı öğütme enerjisi ne kadar yüksek olursa, grafenin yapıda dağılımı o kadar homojen olmaktadır (Li ve diğ., 2019).



Şekil 3.19 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları (Ekteki grafik, Şekil 3.3'ten referans alınarak eklenmiştir.).

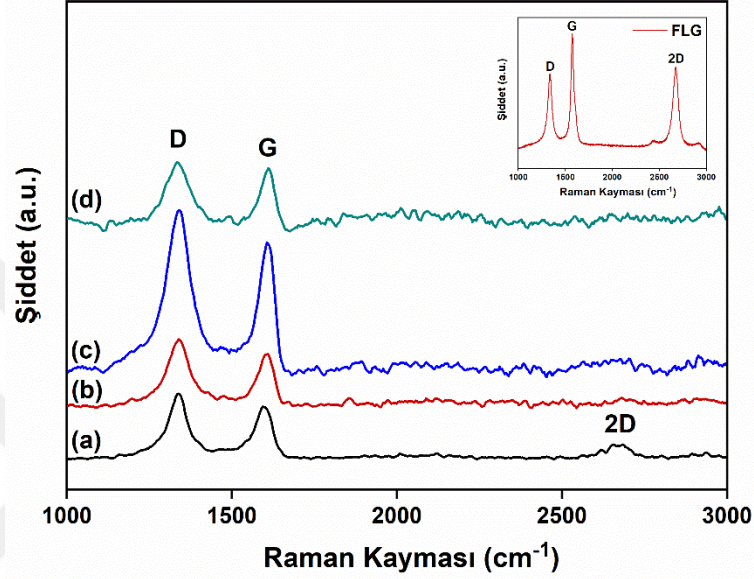
Şekil 3.20; 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozunun Raman spektrumunu göstermektedir. Ağ. %0,7 FLG ile takviye edilen Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozları için, bu karakteristik pikler sırasıyla yaklaşık 1314 ve 1609 cm^{-1} olarak D ve G bantlarına karşılık gelmektedir. Ekteki FLG'ye ait Raman spektrumuna bakıldığında; bu kompozit tozlarında da 2D bandı gözlemlenmemiştir. Piklerin şiddetinin 5 sa bilyalı öğütmeden sonra azaldığı, bu grafikte de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.20 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları (Ekteki grafik, Şekil 3.3'ten referans alınarak eklenmiştir.).

FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan bazı kompozit tozlarının, öğütme sürelerine göre yapısal değişikliklerini belirlemek için Raman spektroskopisi kullanılmıştır. Şekil 3.21 (a)-(d), sırasıyla, 0,2,4,8 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumunu göstermektedir. %2 FLG takviyeli harmanlanmış kompozit tozlarında, FLG'yi ifade eden, D, G ve 2D karakteristik pikleri mevcutken, 2,4 ve 8 sa MA ile elde edilen kompozit tozlarında 2D piki oluşumu mevcut değildir. Bilyalı öğütmeyle birlikte FLG'nin deformasyona uğradığı görülmektedir. Ayrıca, FLG'ye ait ekteki Raman spektrumuyla karşılaştırıldığında, piklerin şiddetinin arttığı ve daha geniş bir görünüme sahip olduğu tespit edilmiştir. FLG'ye ait Raman spektrumuna kıyasla; 0, 2, 4 ve 8 sa MA ile elde edilen kompozit tozlarının, D ve G bantlarının konumlarının

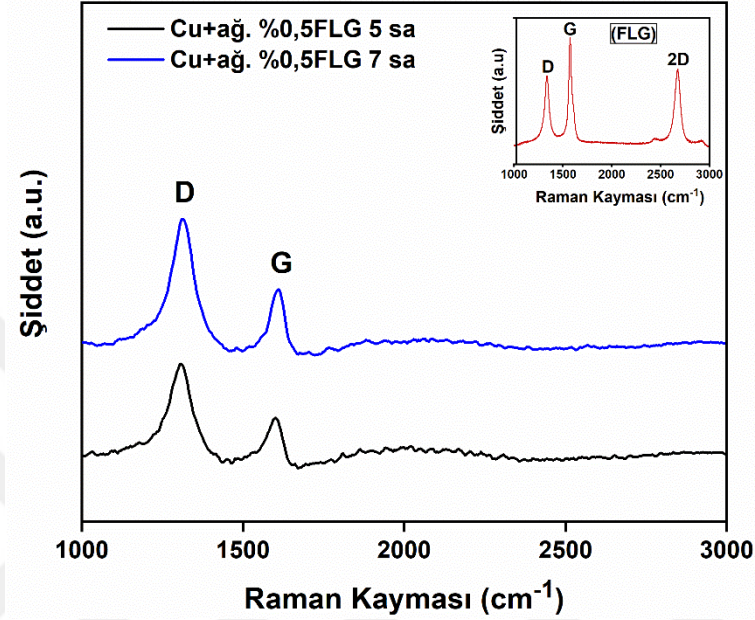
bir miktar kaydığı gözlemlenmiş ve bu konumlar yaklaşık olarak, sırasıyla, 1343 cm^{-1} ve 1597 cm^{-1} 'de tespit edilmiştir. Ayrıca, 0,2,4 ve 8 sa MA ile elde edilen kompozit tozlarının I_D/I_G oranları, sırasıyla, 1,23; 1,33; 1,37 ve 1,21 olarak bulunmuştur. MA uygulama süresi arttıkça, I_D/I_G oranının arttığı görülmektedir. Fakat 8 sa MA sonrası bu oran, düşmüştür. Genel olarak, öğütme süresi arttıkça, bilyalı öğütmeye bağlı olarak, grafen kusur derecesinin arttığı söylenebilir.



Şekil 3.21 : (a) 0, (b)2, (c)4 ve (d) 8 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları (Ekteki grafik, Şekil 3.3'ten referans alınarak eklenmiştir.).

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan bazı kompozit tozlarının, öğütme sürelerine göre yapısal değişikliklerini belirlemek için, Raman spektroskopisi kullanılmıştır. Şekil 3.22; 5 ve 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumlarını göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi; D ve G bantları, kompozit tozlar için, sırasıyla, yaklaşık 1307 cm^{-1} ve 1600 cm^{-1} 'de konumlanmıştır. Ancak FLG'ye ait ekteki grafiğe baktığımızda, bu kompozit tozlar için Raman spektrumunda pik şiddetinin azaldığını ve dalga sayısı kaymasının olduğunu söyleyebiliriz. FLG'ye kıyasla, bantların konumlarındaki değişiklik, bilyalı öğütme sırasında grafenin maruz kaldığı gerilimden kaynaklandığı, FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozları için de söyleyebiliriz (Borand ve Uzunsoy, 2022). Ayrıca, FLG'ye ait Raman grafiği ile karşılaştırıldığında; bilyalı öğütme sonrası Raman spektrumunda 2D bandı burada da gözlemlenmemiştir. D bandının yoğunluğunun G bandından daha yüksek olması, bilyalı öğütme sonrası grafen yapısının zarar görmesi

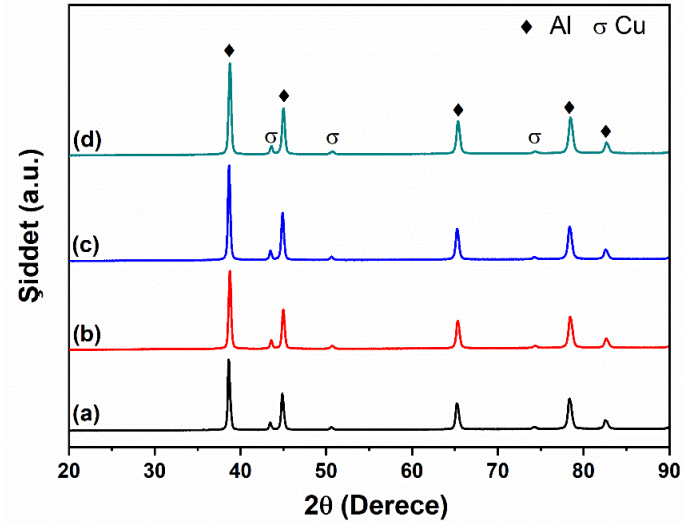
ile ilgili olabilir(Kwon ve diğ., 2017). Şekil 3.22'e göre; kompozit tozlarının I_D/I_G oranları 5 saat ve 7 sa öğütme süresi için, sırasıyla, 2,33 ve 2,44 olarak elde edilmiştir. Öğütme süresi arttıkça grafenin kusur derecesinin de arttığı düşünülmektedir (Yue ve diğ., 2017). Böylece yüksek enerjili bilyalı öğütme ile birlikte artan grafen kusurunun, daha homojen bir dağılım sağlayabileceğini burada da belirtebiliriz.



Şekil 3.22 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının Raman spektrumları (Ekteki grafik, Şekil 3.3'ten referans alınarak eklenmiştir.).

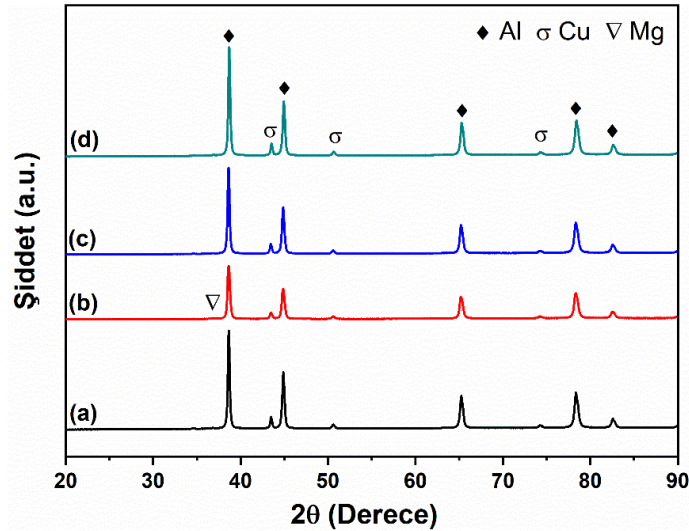
3.3.4 Mekanik alaşımlama ile elde edilen alaşım ve FLG takviyeli kompozit tozlarının XRD analizi

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin üretilmesinde kullanılacak olan tozların MA sonrası faz yapılarının incelenmesi için, XRD analizi uygulanmıştır. Şekil 3.23(a)-(d); 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.23(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK kubik, $a=b=c=0,405$ nm) ve Cu (Bravais kafes: YMK $a=b=c=3,62$ nm) fazları tespit edilmiştir. Al ve Cu arasında herhangi bir intermetalik faz oluşumu tespit edilmemiştir. Ayrıca, MA tozların yapısında; öğütme ortamının aşınmasından kaynaklanan Fe veya oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir empüriteye XRD paternlerinde rastlanmadığı görülmektedir. Ayrıca, FLG takviyeli kompozit tozlarında grafene ait bir pikin gözlemlenmemesi, FLG'nin matris yapısında homojen bir şekilde dağılmış olduğuna ithaf edilebilir (Bastwros ve diğ., 2014; Ju ve diğ., 2017).



Şekil 3.23 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

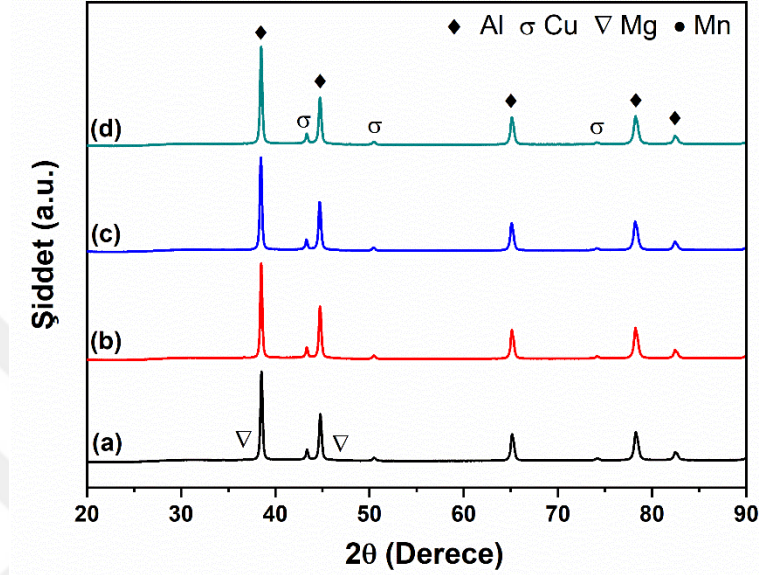
Şekil 3.24(a)-(d), 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.24(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK kubik, $a=b=c=0,405$ nm), Cu (Bravais kafes: YMK $a=b=c=3,62$ nm) ve Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) fazları tespit edilmiştir. Herhangi bir intermetalik faz oluşumuna rastlanmamıştır.



Şekil 3.24 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

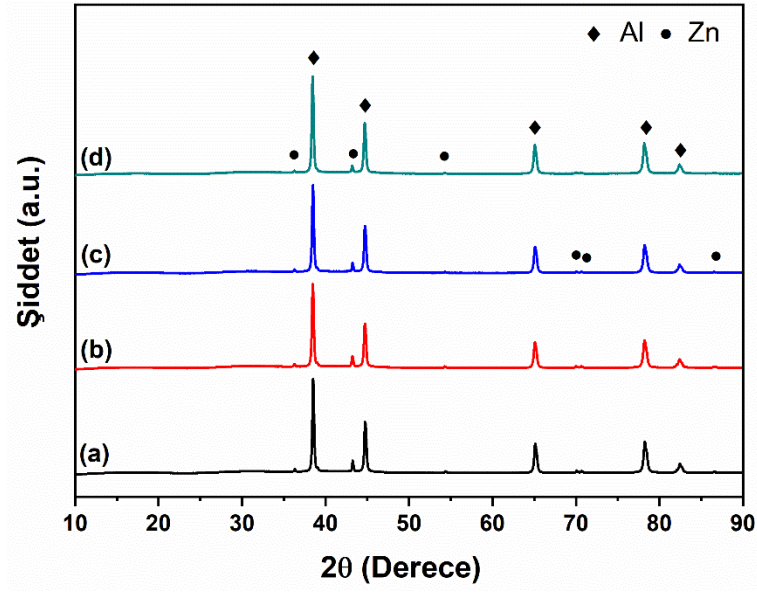
Şekil 3.25 (a)-(d); 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.25(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK,

$a=b=c=0,405$ nm), Cu (Bravais kafes: YMK $a=b=c=3,62$ nm) ve Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) fazları tespit edilmiştir. Mn fazının XRD cihazının saptama limiti altında kalan düşük miktarı (ağ. %0,5) nedeniyle belirlenemediği düşünülmektedir. Ayrıca, herhangi bir intermetalik faz oluşumuna rastlanmadığı görülmektedir.



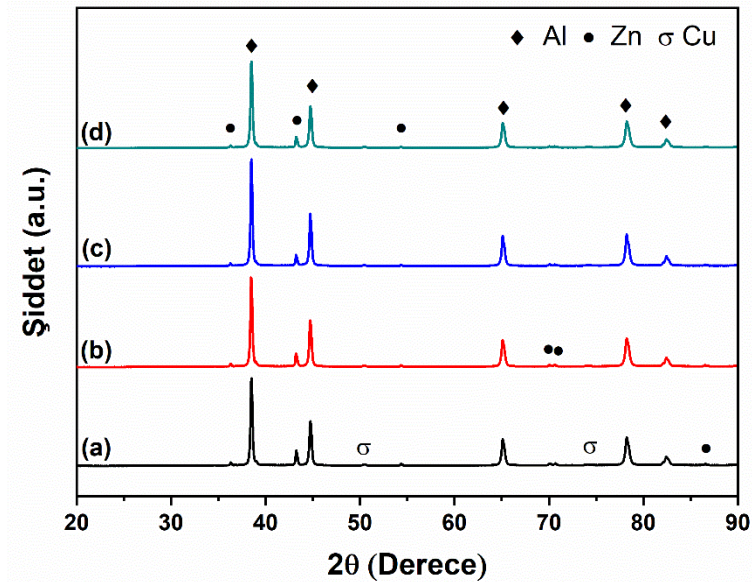
Şekil 3.25 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

Şekil 3.26 (a)-(d), 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.26 (a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm) ve Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm YMK $a=b=c=3,62$ nm) fazları belirlenmiştir. Herhangi bir empürite veya intermetalik bileşiğe rastlanmamıştır.



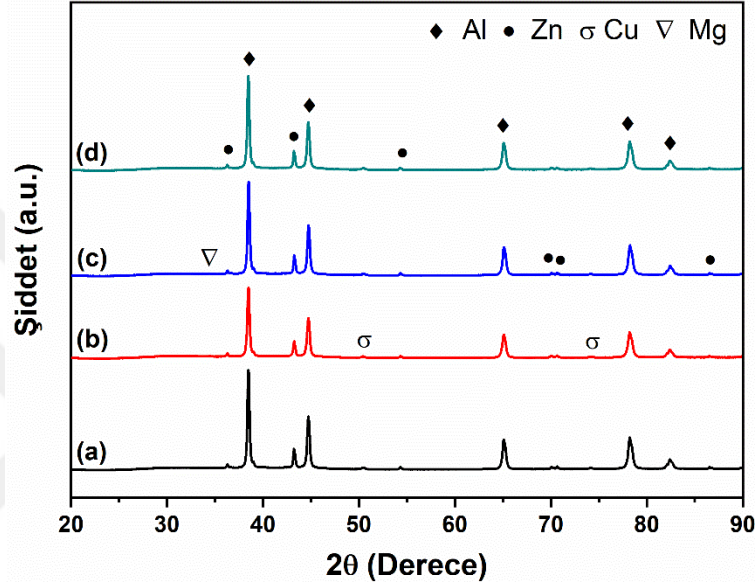
Şekil 3.26 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

Şekil 3.27 (a)-(d); 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.27 (a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) ve Cu (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,362$ nm) fazları tespit edilmiştir. Kompozit tozlarında herhangi bir intermetalik bileşik veya empürite görülmemiştir.



Şekil 3.27 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

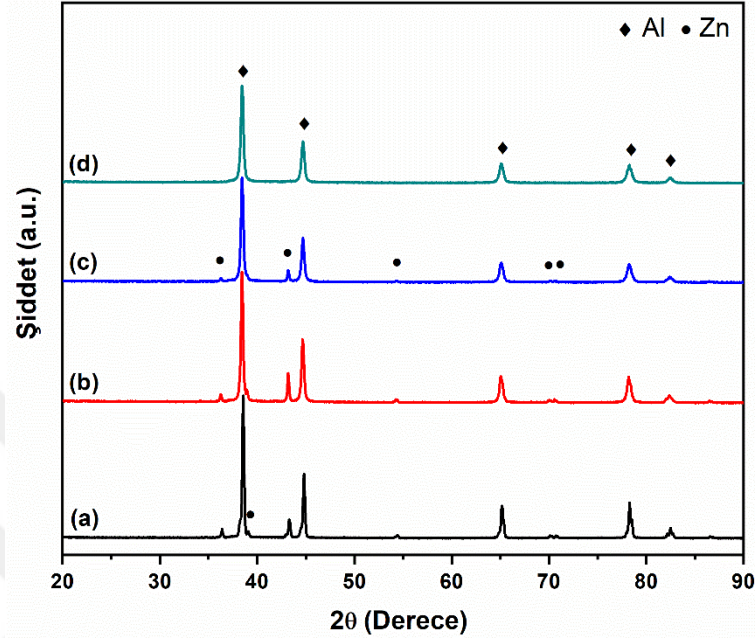
Şekil 3.28(a)-(d); 5 sa MA ile elde edilen FLG (ağ. %0, %0,1; %0,3 ve %0,7) takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. Şekil 3.28(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde; Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm), Cu (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=3,62$ nm) ve Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) fazları belirlenmiştir. Kompozit tozlarında herhangi bir intermetalik bileşik ve empüritiye rastlanmadığı görülmüştür.



Şekil 3.28 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

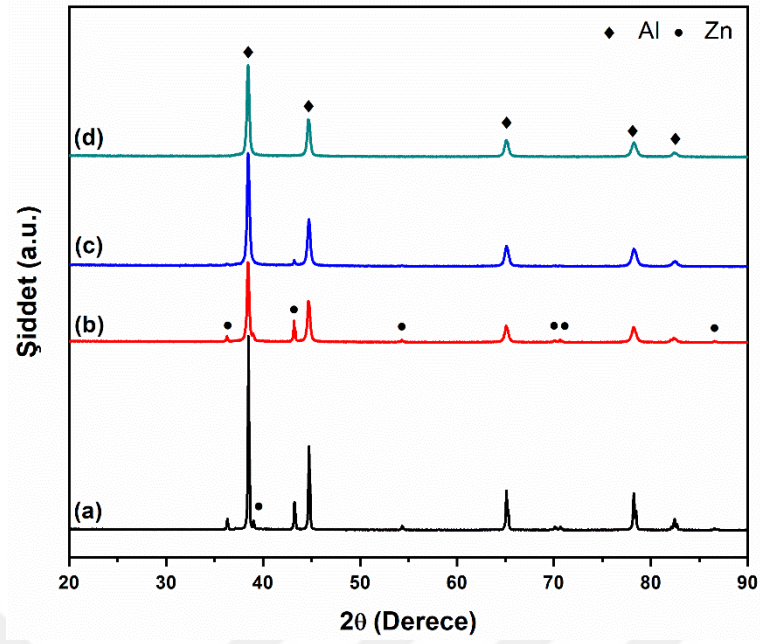
Al-Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin üretilmesinde kullanılmış olan harmanlanmış ve MA ile elde edilen Al-7,5Zn alaşımı ve ağ. %0,5; %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının faz yapılarının incelenmesi için, XRD analizi uygulanmıştır. Elde edilen XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de gösterilmiştir. AlZn-0sa, AlZn-2sa, AlZn-4sa ve AlZn-8sa tozlarının sırasıyla Şekil 3.29(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde, Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm) ve Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) fazları belirlenmiştir. Al ve Zn arasında herhangi bir intermetalik faz oluşumu tespit edilmemiştir. Ayrıca, MA tozların yapısında; öğütme ortamının aşınmasından kaynaklanan Fe veya oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir empüritiye XRD paternlerinde rastlanmadığı görülmektedir. Şekil 3.29(a)-(d)'de verilen grafiğe göre, artan MA süresi ile birlikte piklerin şiddetlerinin azalarak pik genişliklerinin arttığı gözlenmektedir. MA sırasında partikül boyutunun

azalması ve partiküllerin deformasyonu nedeniyle XRD piklerinde bu değişimler gözlenmiştir (Suryanarayana, 2011). Ayrıca, Şekil 3.29(d) incelendiğinde, 8 sa MA ardından XRD paterninde Zn piklerine rastlanılmadığı görülmektedir. Bu durum, 8 sa MA ardından pik şiddetlerinin önemli ölçüde düşmesinden kaynaklanmaktadır.

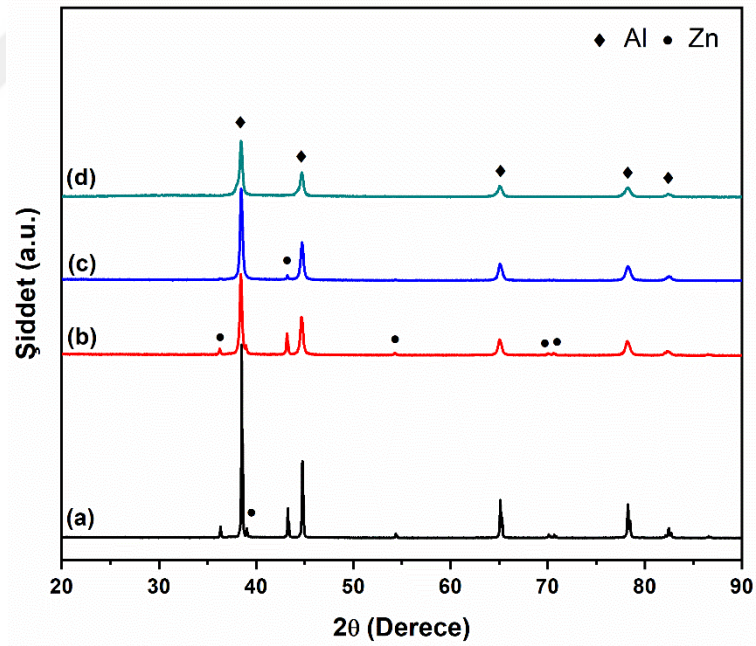


Şekil 3.29 : Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

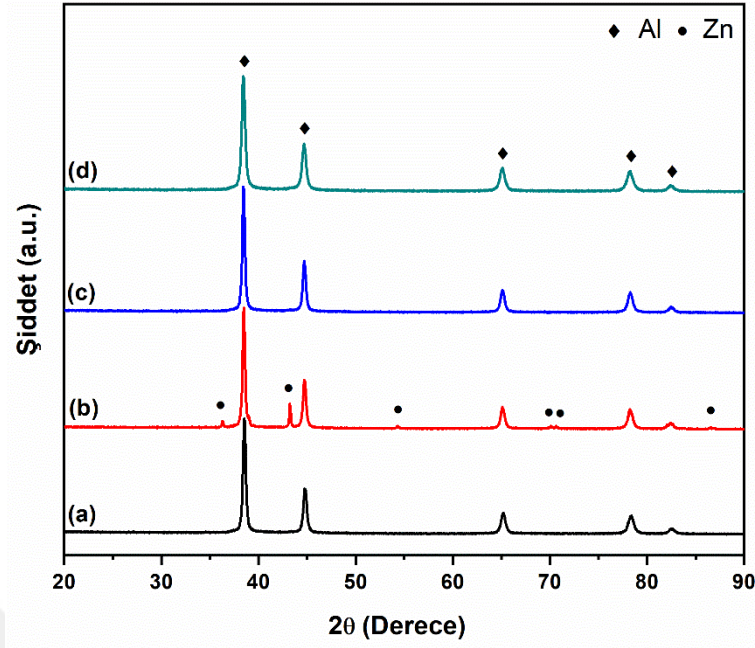
Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının MA süresine göre XRD paternleri Şekil 3.30(a)-(d)'de verilmiştir. Kompozit tozlarının XRD analizlerinde, Al ve Zn fazları tespit edilmiştir. Herhangi bir intermetalik faz oluşumuna veya empüriteye rastlanmamıştır. Aynı şekilde, ağ. %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.31(a)-(d) ve Şekil 3.32(a)-(d)'de verilmiştir. Al ve Zn fazları, bu kompozit tozlarında da belirlenmiştir. Ayrıca, XRD paternlerinde 4 ve 8 sa gibi uzun öğütme sürelerinde ve ağ. %2 gibi yüksek grafen miktarlarında dahi Al_4C_3 oluşumunun görülmemesi, MA sırasında matris ve karbon esaslı takviye malzemesi arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmediğini göstermektedir. Bu durum, MA sırasında grafen fazının stabilesini koruduğunu göstermektedir.



Şekil 3.30 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

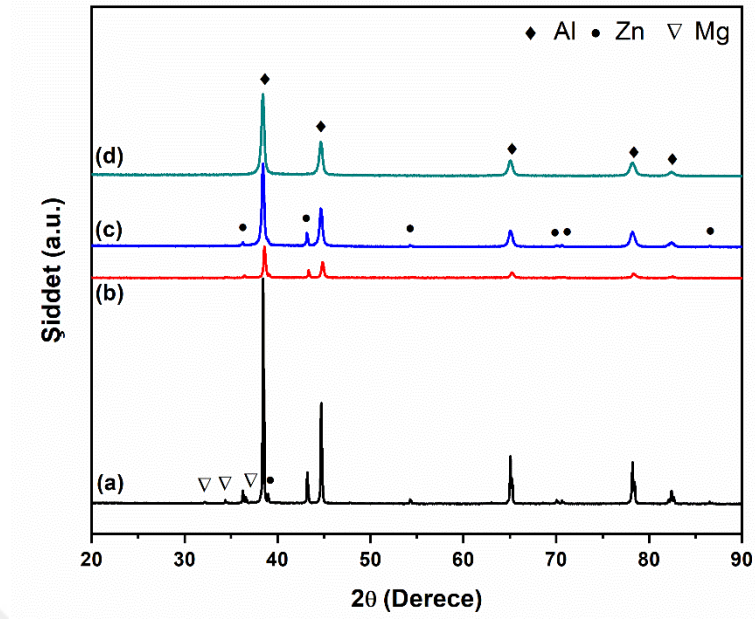


Şekil 3.31 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.



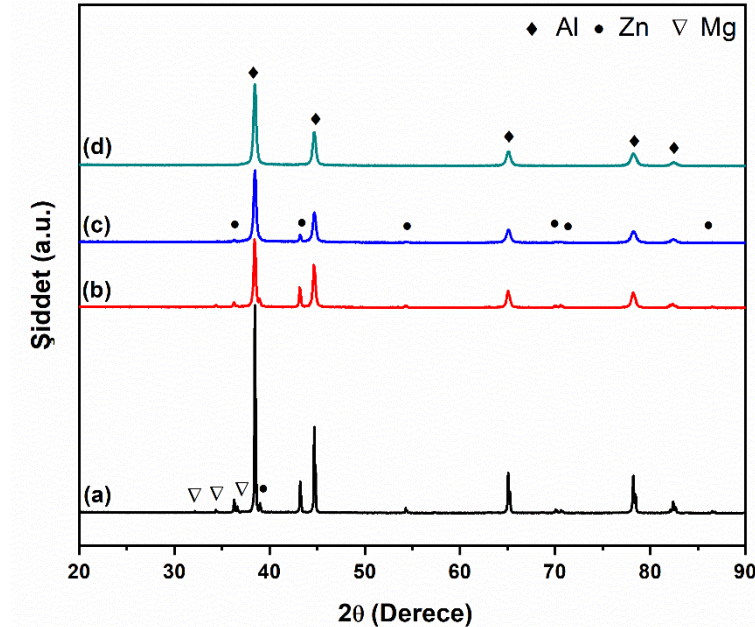
Şekil 3.32 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımı ve ağ. %0,5; %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarının harmanlanmış ve MA uygulandıktan sonrası; faz yapılarının incelenmesi için XRD analizleri uygulanmıştır. Elde edilen XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’de gösterilmiştir. AlZnMg-0sa, AlZnMg-2sa, AlZnMg-4sa ve AlZnMg-8sa tozlarının, sırasıyla, Şekil 3.33 (a)-(d)’de verilen XRD paternlerinde, Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) ve Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) fazları belirlenmiştir. Al, Zn ve Mg arasında herhangi bir intermetalik faz oluşumuna rastlanmamıştır. Ayrıca, MA sonrası tozların yapısında öğütme ortamının aşınmasından kaynaklanan Fe veya oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir empüriteye rastlanmamıştır. MA süresi ile birlikte piklerin şiddetlerinin azaldığı ve pik genişliklerinin arttığı bu kompozit tozlarında da gözlenmektedir. MA sırasında partikül boyutunun azalması ve partiküllerin deformasyonu nedeniyle XRD piklerinde bu değişimlerin meydana geldiği bilinmektedir. Ayrıca, Şekil 3.33(d) incelendiğinde 8 sa MA ardından Zn ve Mg fazının XRD paterninde dedekte edilmediği görülmektedir. Bu durum, 8 sa MA ardından pik şiddetlerinin nispeten önemli ölçüde düşmesinden kaynaklanmaktadır.

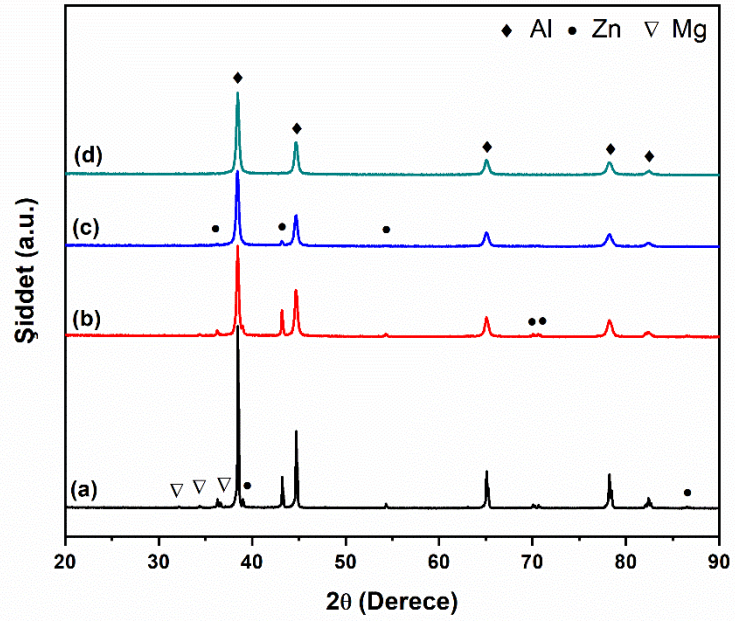


Şekil 3.33 : Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

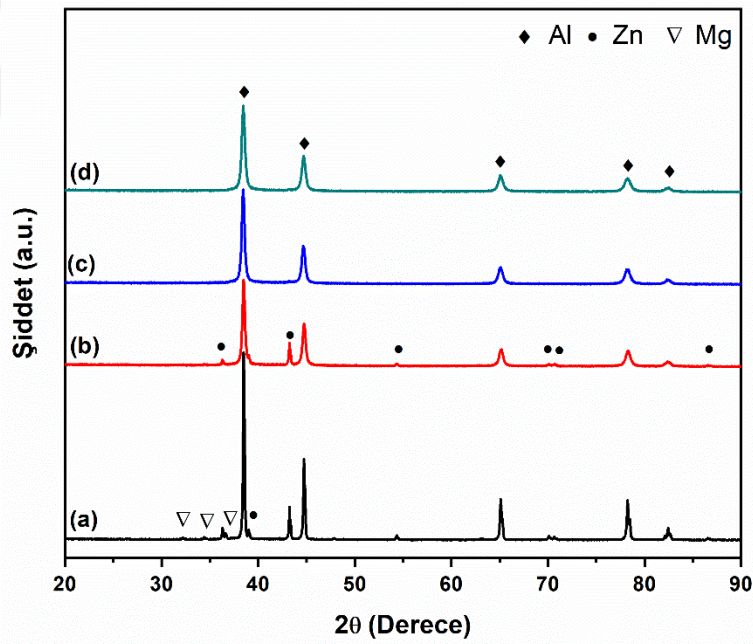
Ağ. %0,5; %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarının MA süresine göre XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.34(a)-(d), Şekil 3.35 (a)-(d) ve Şekil 3.36(a)-(d)'de verilmiştir. Kompozit tozlarının XRD analizlerinde; Al, Zn ve Mg fazları tespit edilmiştir. Herhangi bir intermetalik faz oluşumuna, karbür bileşiğine veya empüriteye rastlanmamıştır.



Şekil 3.34 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.



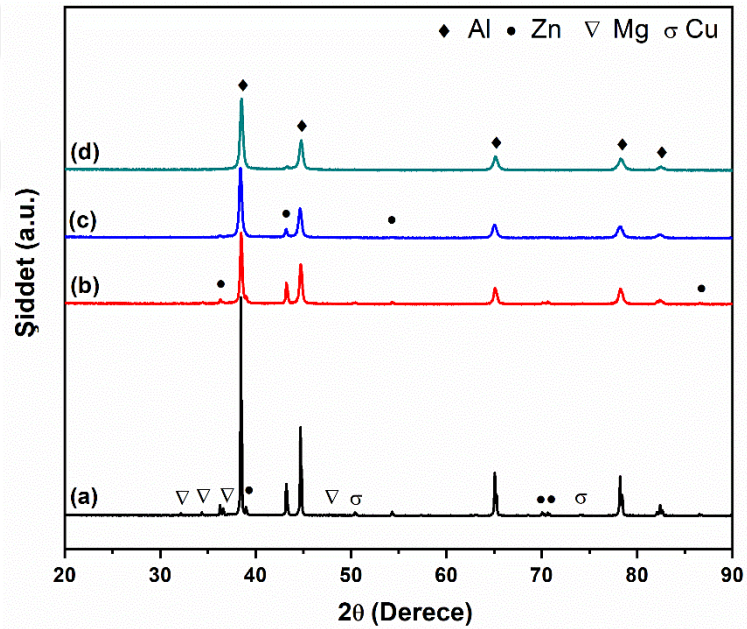
Şekil 3.35 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.



Şekil 3.36 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

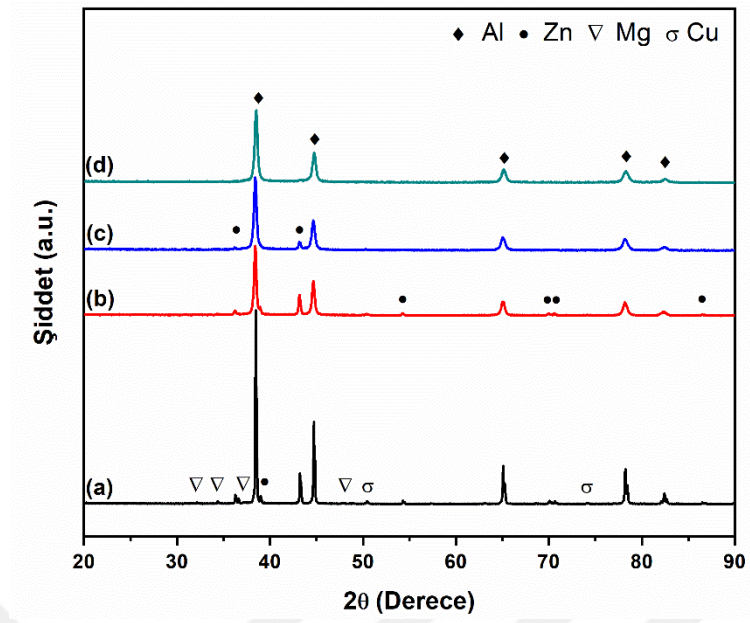
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımı ve ağ. %0,5; %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının harmanlanmış ve MA uygulandıktan sonrası; faz yapılarının incelenmesi için XRD analizleri uygulanmıştır. Elde edilen XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40’da verilmiştir. AlZnMgCu-0sa, AlZnMgCu-2sa, AlZnMgCu-4sa ve AlZnMgCu-8sa tozlarının,

sırasıyla, Şekil 3.37(a)-(d)'de verilen XRD paternlerinde, Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm), Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) ve Cu (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,361$ nm) fazları belirlenmiştir. Al, Zn, Mg ve Cu arasında herhangi bir intermetalik faz oluşumuna rastlanmamıştır. MA ile üretilen tozların yapısında öğütme ortamından kaynaklanan Fe veya oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir empürite XRD analizinde görülmemiştir. Ayrıca, MA süresi ile birlikte piklerin şiddetlerinin azaldığı ve pik genişliklerinin arttığı bu toz serisi için de gözlenmiştir. Şekil 3.37(c) ve (d) incelendiğinde 4 sa ve 8 sa MA ardından Mg ve Cu fazının XRD paterninde dedekte edilmediği görülmektedir. Bu durum, 4 ve 8 sa MA sonrası pik şiddetlerinin nispeten düşmesinden kaynaklanmaktadır.

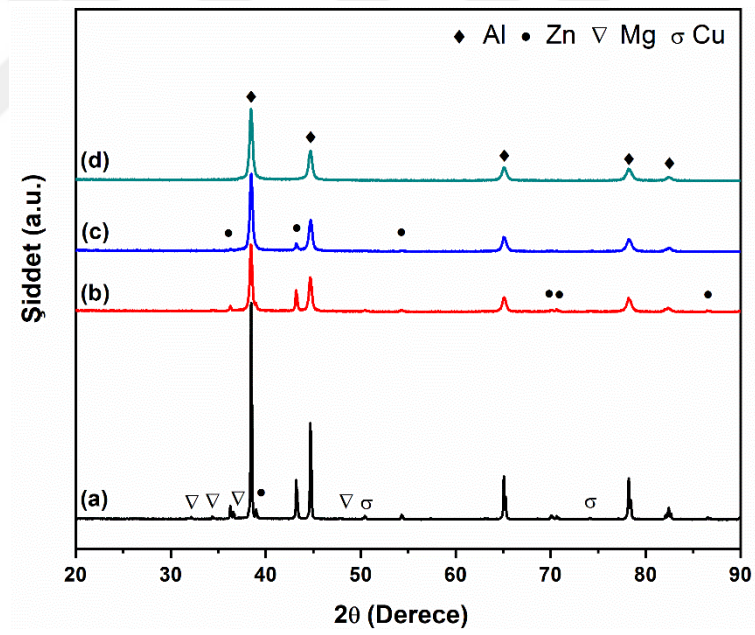


Şekil 3.37 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

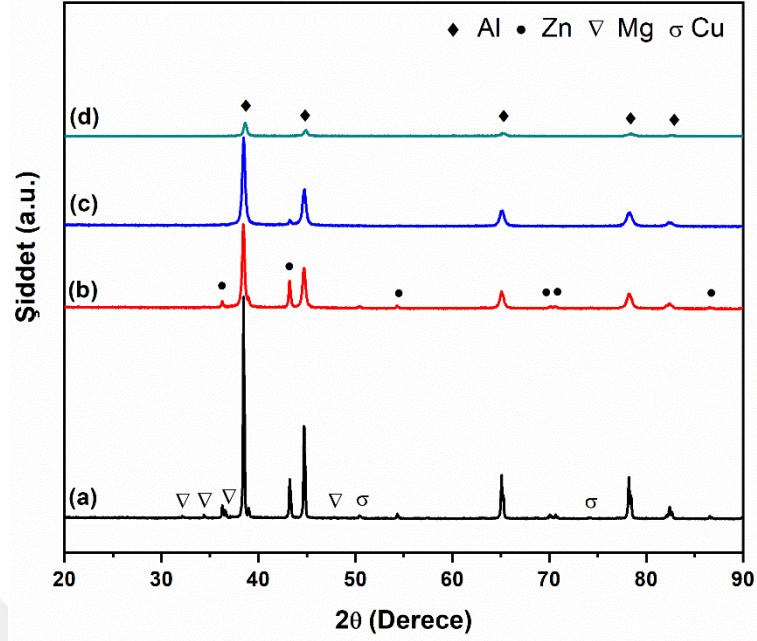
Ağ. %0,5; %1 ve %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının MA süresine göre XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.38(a)-(d), Şekil 3.39 (a)-(d) ve Şekil 3.40(a)-(d)'de verilmiştir. Kompozit tozlarının XRD analizlerinde; Al, Zn, Mg ve Cu fazları tespit edilmiştir. Herhangi bir intermetalik faz oluşumuna veya empüriteye rastlanmamıştır. Ayrıca, XRD paternlerinde 4 ve 8 sa gibi uzun öğütme sürelerinde herhangi bir karbür oluşumu ya da fazlar arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon görülmemiştir.



Şekil 3.38 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

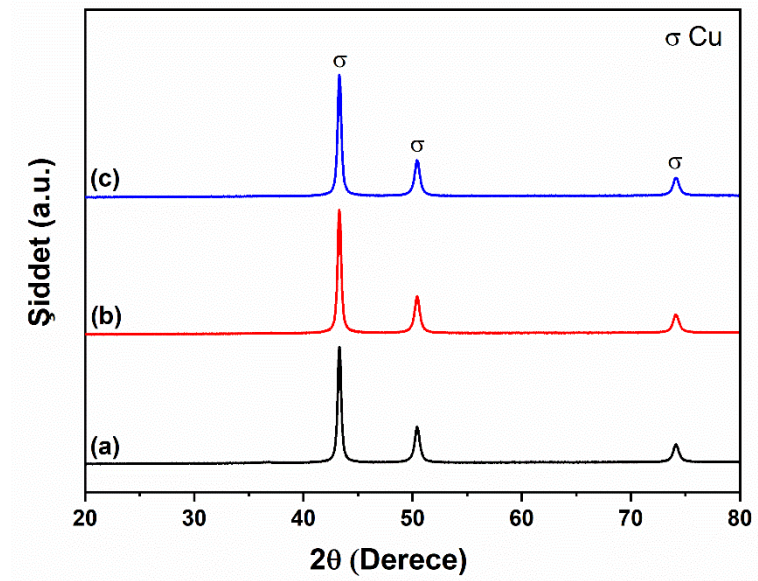


Şekil 3.39 : Ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.



Şekil 3.40 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının MA süresine bağlı olarak XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa.

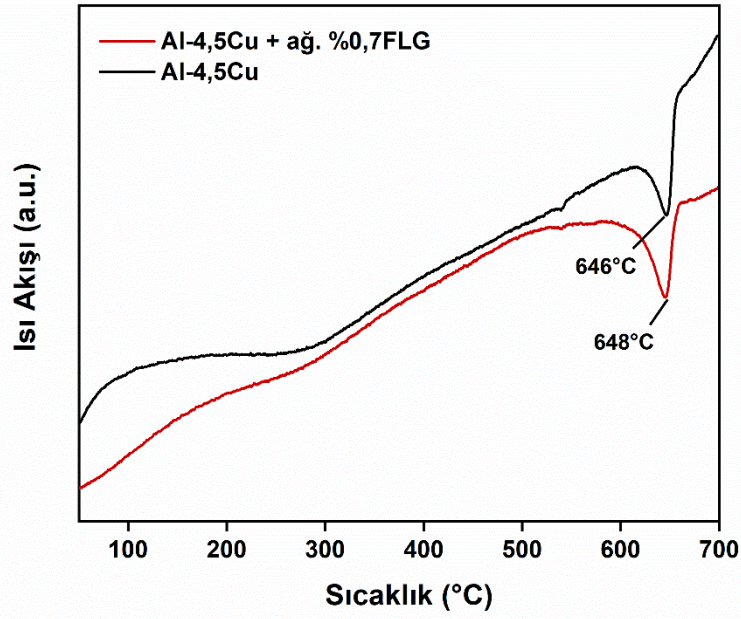
Takviyesiz Cu ve ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının 5 sa ve 7 sa MA sonrası; faz yapılarının incelenmesi için XRD analizleri uygulanmıştır. Şekil 3.41 (a), (b) ve (c), sırasıyla, takviyesiz Cu ve 5 sa ile 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının XRD paternlerini göstermektedir. XRD paternlerinde, Cu (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,361$ nm) fazına ait pikler tespit edilmiştir. FLG/Cu kompozitleri düşük miktarda FLG (ağ. %0,5) içerdiğinden ve C metal atomlarına kıyasla küçük saçılma uzunluğuna sahip olduğundan, grafit veya grafen için gözlemlenen bir pik yoktur (Stein ve diğ., 2012). Ayrıca, herhangi bir empürite tespit edilmemiştir.



Şekil 3.41 : Takviyesiz Cu (a) ve ağı. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin (b) 5 ve (c) 7 sa MA süresine bağlı olarak XRD paternleri.

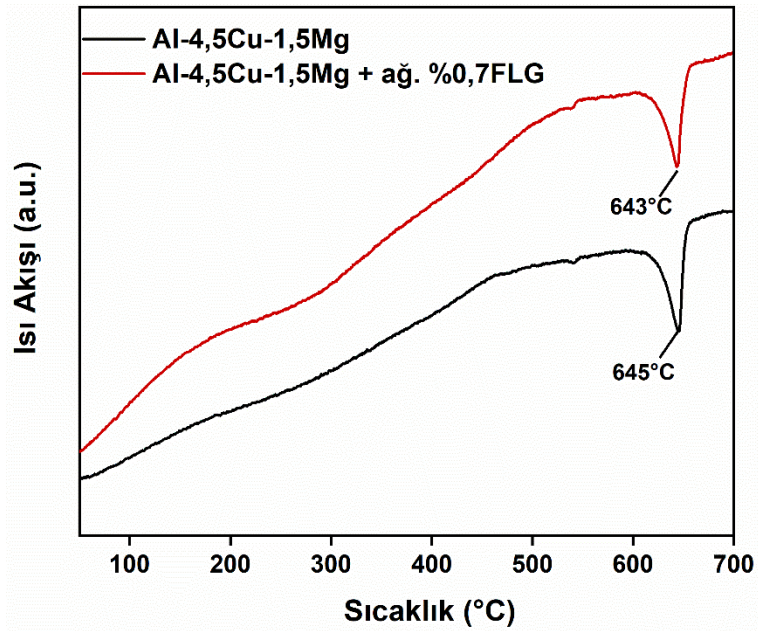
3.3.5 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının DSC analizi

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin üretilmesinde kullanılan MA ile elde edilen tozların, sinterleme davranışlarını ve herhangi bir reaksiyon olup olmadığını incelemek için tozlara DSC analizi gerçekleştirilmiştir. DSC analiz sonuçlarına göre, alaşım ile FLG takviyeli kompozit tozları sadece ergime piki göstermekte ve herhangi farklı bir reaksiyon oluşumu görülmemektedir. Şekil 3.42; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Her iki numune için endotermik karakterde pik oluşumu gözlemlenirken; bunun dışında farklı bir faz dönüşümünün mevcut olmadığı görülmüştür. Ağı. %0,7 FLG takviyesi, Al-4,5Cu alaşımına göre ergime pik sıcaklığını yaklaşık 2°C düşürmüştür. Al-4,5Cu esaslı tozların ergime pik genişliği ise, Al esaslı tozlara göre daha geniş bir şekilde görünmektedir (EK C; Şekil C.3).



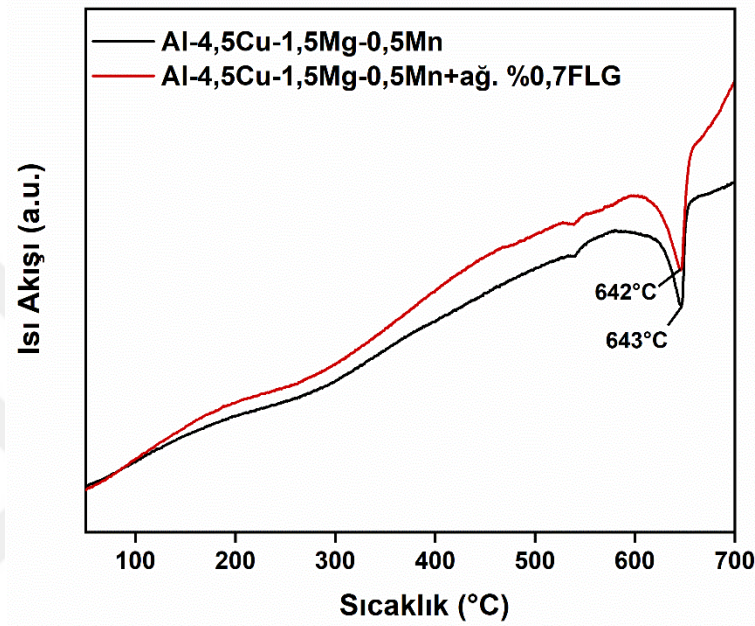
Şekil 3.42 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların DSC eğrileri.

Şekil 3.43; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Endotermik karaktere sahip ergime piki dışında, farklı bir pik oluşumu mevcut değildir. Al-4,5Cu esaslı tozlarda olduğu gibi, FLG takviyesinin ergime pik sıcaklığını yaklaşık olarak 2°C düşürdüğü görülmektedir.



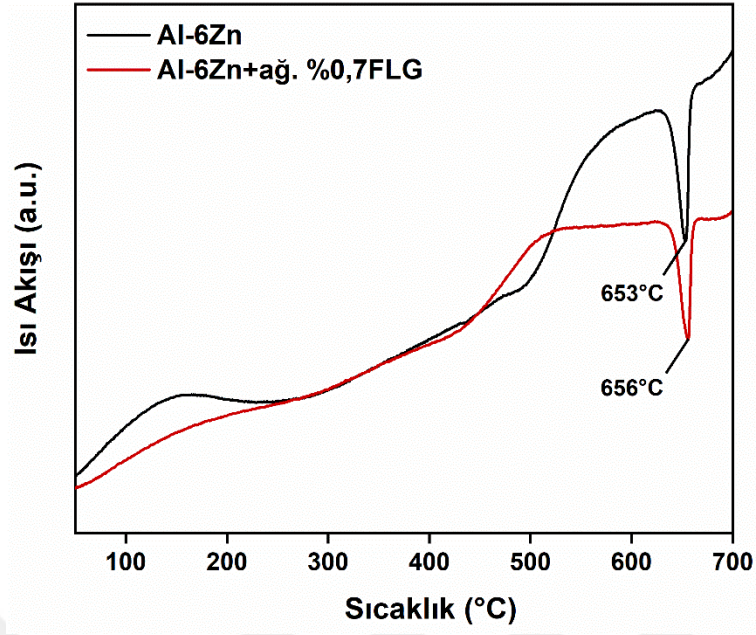
Şekil 3.43 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağı. %0,7 FLG içeriğine sahip Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların DSC eğrileri.

Şekil 3.44; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Endotermik karakter gösteren pik dışında herhangi bir oluşum reaksiyonu bu alaşım tozlarında da mevcut olmadığı gözlemlenmiştir. FLG takviyesinin, ergime sıcaklığını yaklaşık olarak 1°C olarak düşürdüğü görülmektedir. Diğer alaşım tozlarında olduğu gibi burada da daha yaygın oluşum gösteren bir pikin varlığı tespit edilmiştir.



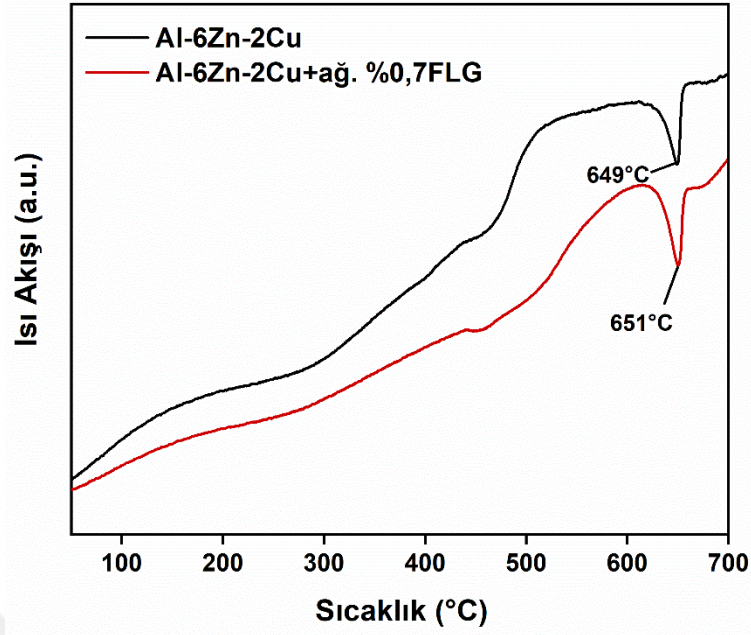
Şekil 3.44 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların DSC eğrileri.

Şekil 3.45; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Bu grafiğe ait pikler, endotermik karakterde ergime pikidir. Bunun dışında herhangi bir pik oluşumu görülmemiştir. FLG içeriği ile birlikte, Al-6Zn esaslı kompozit tozunun ergime pik sıcaklığının yaklaşık 3°C artmış olduğu görülmektedir. Al esaslı tozlara kıyasla, Al-6Zn esaslı bu kompozit tozlarının da ergime sıcaklık piki daha düşük görülmektedir (EK C; Şekil C.3). Birinci alaşım elementi olarak kullanılan Cu gibi, bu serideki birinci alaşım elementi olan Zn'nin da ergime sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Al-4,5Cu alaşım serisinden farklı olarak, Al-6Zn alaşım serisindeki ergime sıcaklık pikinin yüksek olduğunu söyleyebiliriz.



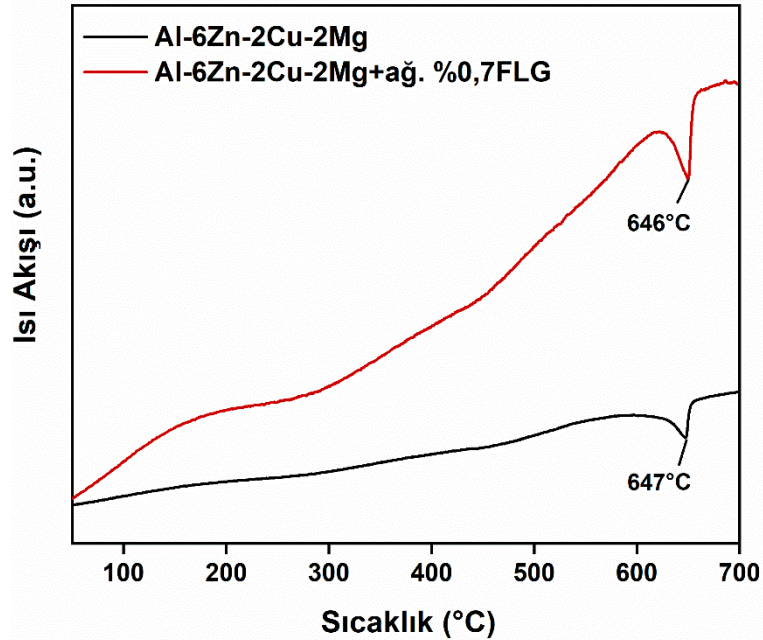
Şekil 3.45 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı tozların DSC eğrileri.

Şekil 3.46; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Endotermik karaktere sahip olan pikler, Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının ergime sıcaklığını göstermektedir. Bunun dışında herhangi bir pik oluşumu göze çarpmamaktadır. FLG içeriğiyle birlikte, Al-6Zn-2Cu esaslı kompozitlerde ergime sıcaklığı yaklaşık 3°C bir artış göstermiştir. Al tozlarına kıyasla, bu piklerin de daha geniş olduğu görülmektedir. İkinci alaşım elementi olarak Cu'un eklenmesiyle birlikte Al-6Zn esaslı tozlara oranla ergime sıcaklığında bir miktar düşüş de göze çarpmaktadır.



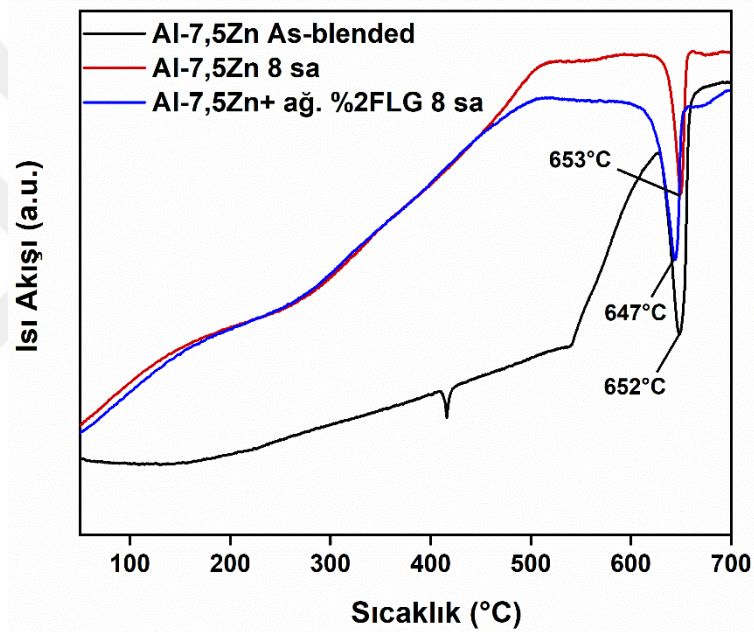
Şekil 3.46 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı tozların DSC eğrileri.

Şekil 3.47; 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının DSC grafiğini göstermektedir. Her iki pikte de endotermik karakterde ergime sıcaklık piki görülmektedir. FLG içeriğinin eklenmesiyle birlikte bir miktar ergime sıcaklığının düştüğü tespit edilmiştir.



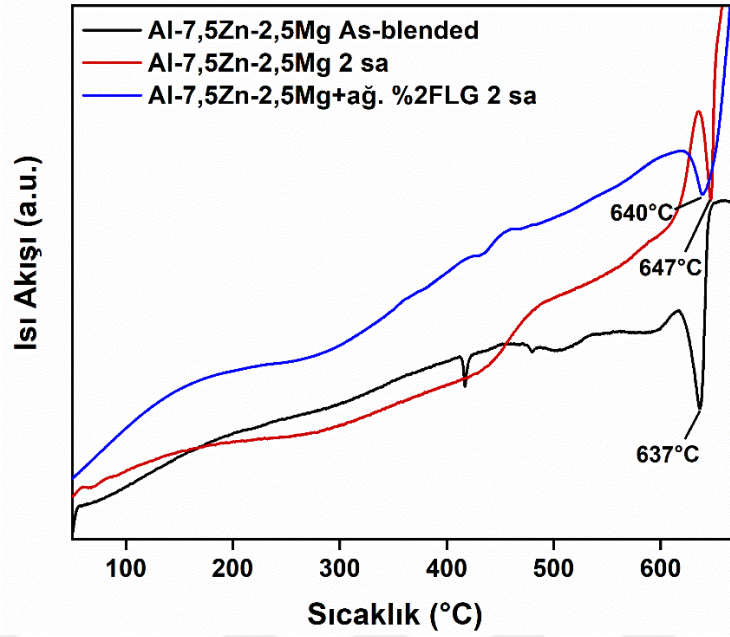
Şekil 3.47 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı tozların DSC eğrileri.

Al-Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin üretilmesinde kullanılan, harmanlanarak ve MA ile elde edilen Al-Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozit tozlarının sinterleme davranışlarını ve herhangi bir reaksiyon olup olmadığını incelemek için, bu tozlara DSC analizi gerçekleştirilmiştir. Harmanlanmış Al-7,5Zn ve 8 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn alaşım tozlarının şekil 3.48’de verilen DSC eğrilerinde, sırasıyla, 652°C ve 653°C’de maksimum sıcaklık noktasına sahip endotermik pikler belirlenmiştir. Bununla birlikte, 8 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn kompozit tozları için ise bu sıcaklığın bir miktar düştüğü ve 647°C olarak ölçüldüğü grafikte açıkça görülmektedir. Buna göre, FLG takviyesinin, ergime sıcaklığını bu alaşım serisi için bir miktar düşürdüğü söylenebilir.



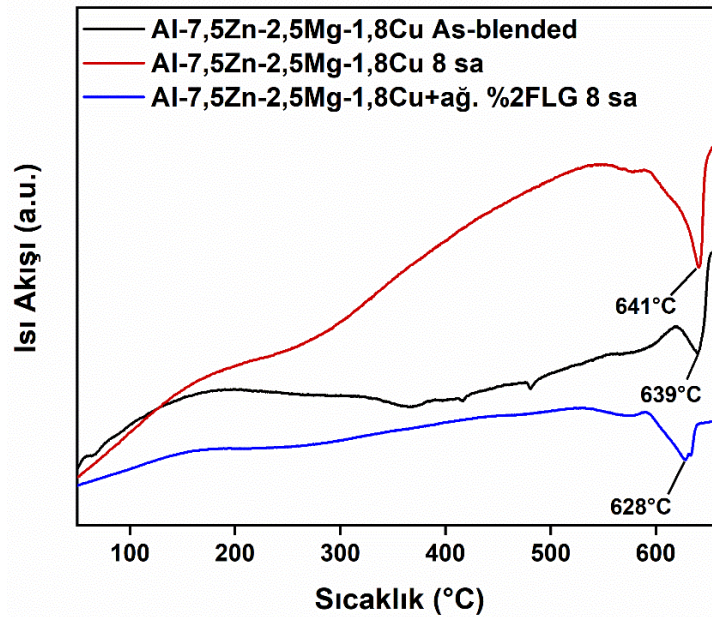
şekil 3.48 : 0 ve 8 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn tozlarının DSC eğrileri.

Harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg ve 2 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının şekil 3.49’da verilen DSC eğrilerinde, sırasıyla 637°C ve 647°C maksimum sıcaklık noktasına sahip endotermik pikler belirlenmiştir. Ayrıca, 2 sa MA ile elde edilen ağ. %2FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg kompozit tozları için ise bu sıcaklığın bir miktar düştüğü ve 640°C olarak ölçüldüğü açıkça görülmektedir. Buna göre, FLG takviyesinin ergime sıcaklığını bu alaşım serisinde de bir miktar düşürdüğü söylenebilir.



Şekil 3.49 : 0 ve 2 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının DSC eğrileri.

Harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg ve 8 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının Şekil 3.50’de verilen DSC eğrilerinde, sırasıyla, 639°C ve 641°C maksimum sıcaklık noktasına sahip endotermik pikler belirlenmiştir. Ayrıca, 8 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozları için ise, bu sıcaklığın MA tozlarda bir miktar düştüğü ve 628°C olarak ölçüldüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 3.50 : 0 ve 8 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının DSC eğrileri.

DSC analizi gerçekleştirilen kompozit tozları içerisinde; takviyesiz tozlar ve FLG takviyeli kompozit tozlar seçilmiştir. Böylece, FLG içeriğinin; kompozit tozlarının termal özelliklerini etkileyip etkilemediği incelenmiştir. DSC analizi gerçekleştirilen bu kompozit tozları genel olarak değerlendirildiğinde; FLG içeriğinin alaşım tozlarında önemli ölçüde bir değişiklik teşkil etmediği görülmüştür. Mevcut literatür değerlendirildiğinde, karbon esaslı takviye malzemeler için DSC analizi gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, takviye içeriğindeki C'nin Al ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan karbür yapıları araştırılmıştır. Deng ve diğ. (2007b), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, ağı. %5 KNT takviyeli Al2024 kompozit tozuna farklı ısıtma hızlarında DSC analizi uygulamışlardır. Endotermik karakter gösteren piklerin yanında, ayrıca ekzotermik pik de gözlemlenmiştir. Al'un KNT ile reaksiyona girmesi sonucu Al_4C_3 fazının oluşacağından dolayı, ekzotermik karakterde olan pikin bu reaksiyonla meydana gelebileceğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Deng ve diğ. (2007a) başka bir çalışmada da; ağı. %5 KNT takviyeli Al2024 tozu için gerçekleştirdikleri DSC analizinde aynı şekilde endotermik karakterdeki ergime pikinin yanında $656,3^{\circ}C - 699,6^{\circ}C$ arasında ekzotermik bir karakterde bir pik oluşumuna rastlamışlardır. Bu ekzotermik pikin de Al_4C_3 fazının oluşumundan kaynaklı olduğunu düşünmüşlerdir. Bartolucci ve diğ. (2011) ise, MA ile üretilmiş ağı. %0,1 grafen katkılı bir Al toz numunesi için gerçekleştirdikleri DSC analizinde ($700^{\circ}C$ sıcaklığa kadar), Al_4C_3 oluşumu gözlemlemediklerini belirtmişlerdir. Takviye edilen grafen içeriğinin düşüklüğünün, bu durumu etkiledikleri düşünülmektedir.

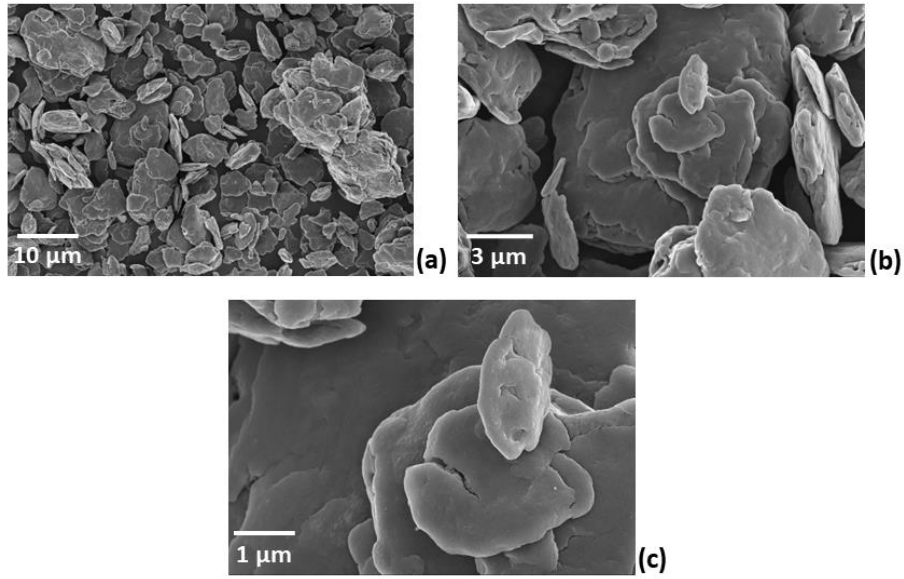
Buna bağlı olarak, analizi gerçekleştirilen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompozit tozları için, ergime piki dışında DSC analizlerinde herhangi bir pik oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu durum, aynı zamanda, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı kompozit tozlarında, herhangi bir farklı faza rastlanmadığı tespit edilen XRD analiz sonuçlarıyla da uyumlu olduğunu göstermektedir.

3.3.6 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının SEM analizi

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin üretilmesinde kullanılan, MA ile elde edilen kompozit tozların; yapı içerisinde dağılımı ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için SEM ve SEM-EDS analizi gerçekleştirilmiştir.

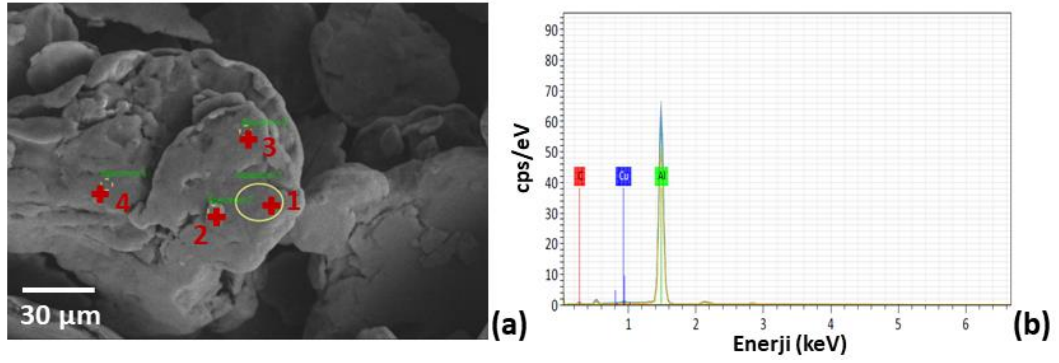
5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri Şekil 3.51'de gösterilmiştir. Başlangıç

tozlarından farklı olarak, 5 sa MA sonrası tozların yassı bir görüntüye sahip olduğu görülmektedir. Gezegensel tipli bilyalı öğütmeden sonra, aşındırılmış bir şekilde öğütülmüş olan tozlar; tekrarlanan şiddetli plastik deformasyon, kırılma ve soğuk kaynak ile birlikte düzleştirilmiş bir şekil sergilemektedir (Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013). FLG'nin Al parçacıklarının düzleşmesine neden olan bir gerilim oluşturabileceği düşünülmektedir (Esawi ve Morsi, 2007; Wu ve diğ., 2012). Tozların yüzeyinde FLG kalıntısı görülmediğinden dolayı, FLG'lerin alaşım tozları tarafından içe gömüldüğü düşünülmektedir (Shin ve Bae, 2015). Bilyalı öğütme sırasında Al sünek bir davranış sergilerken, FLG ise kırılgan bir yapıya sahiptir (Zhang ve diğ., 2018). Topaklanmış bir hâlde olan FLG'ler, öğütme boyunca kırılmakta ve katmanlara ayrılmaktadır. Bu kırılmaya maruz kalmış olan FLG'ler; bilyalı öğütmenin etkisiyle soğuk kaynaklı Al partiküllerine gömülmektedir (Baig ve diğ., 2018; Bastwros ve diğ., 2014).



Şekil 3.51 : 5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.52’de ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının EDS nokta analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al ve birinci alaşım elementi olan Cu’nun varlığı ile birlikte C miktarı da göze çarpmaktadır. C elementi, FLG’lerin matris içerisindeki varlığını göstermektedir. Ayrıca, ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.52(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.4’de verilmiştir.

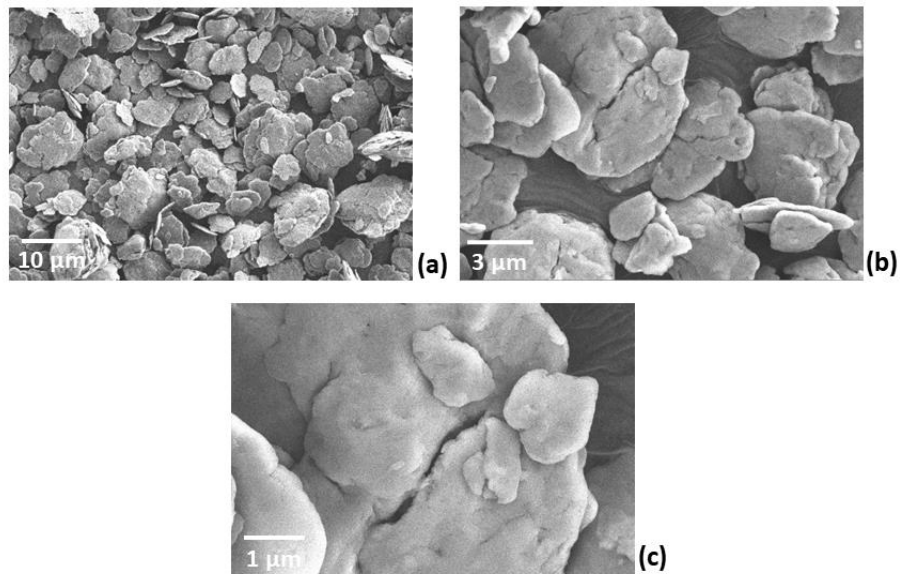


Şekil 3.52 : 5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.4 : 5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.52(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

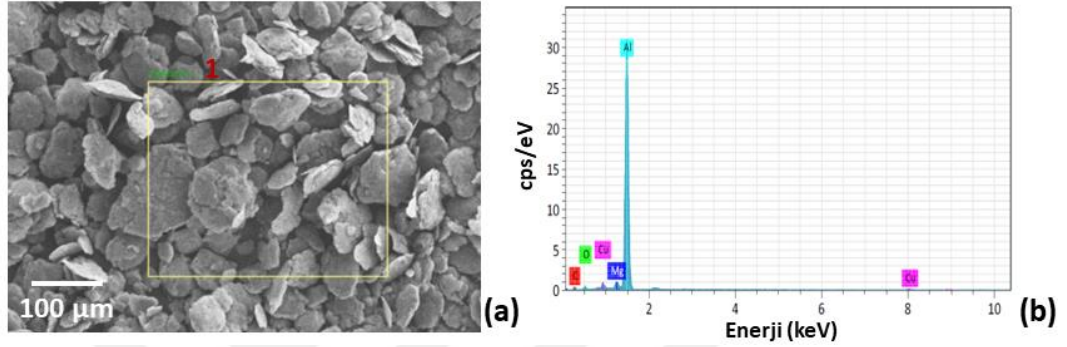
Nokta	Al (ağı. %)	Cu (ağı. %)	C (ağı. %)
1	89,46	1,20	9,34
2	89,09	1,79	9,11
3	91,98	0,30	7,72
4	92,65	0,45	6,90

5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Şekil 3.53'de gösterilmiştir. 5 sa bir öğütme sonucunda; plastik deformasyona maruz kalan FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının yassılaştığı görünümünün mevcut olduğu açıktır. FLG'lerin Al esaslı alaşım partiküllerine gömülmüş olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.53 : 5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.54’de ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının EDS alan analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al, birinci alaşım elementi olan Cu ve ikinci alaşım elementi olan Mg’nin varlığı ile birlikte C miktarı da göze çarpmaktadır. C elementi, FLG’lerin matris yapısındaki mevcudiyetini göstermektedir. Bununla birlikte, ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.54(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.5’de verilmiştir.

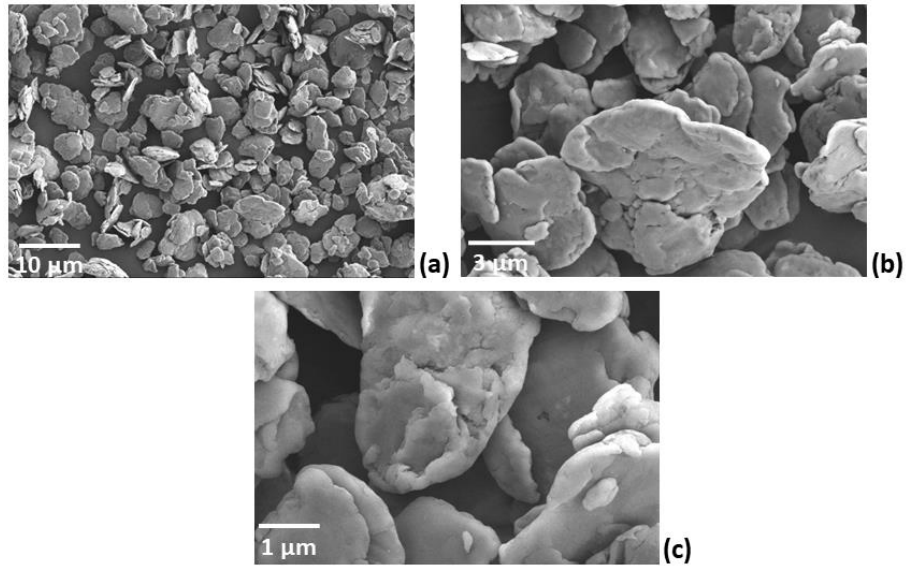


Şekil 3.54 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)’da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.5 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.54(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

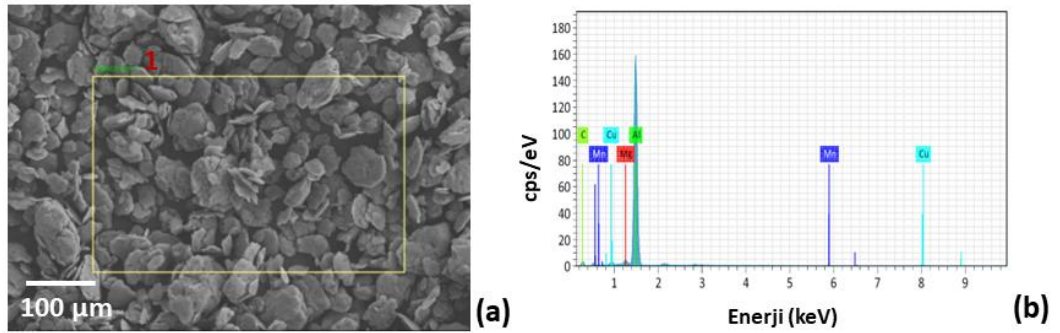
Alan	Al (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	80,93	2,67	1,43	12,64

5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, Şekil 3.55’de gösterilmiştir. 5 sa bilyalı öğütme sonucunda; plastik deformasyona maruz kalan FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının, başlangıç tozlarından farklı olarak yassılaştırmış görünümünün mevcut olduğu görülmektedir. FLG’lerin Al esaslı matris yapısında kırılğan davranarak, gerilim oluşturarak, FLG’lerin matris yapısında gömüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 3.55 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.56'da ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının EDS alan analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al, birinci alaşım elementi Cu, ikinci alaşım elementi Mg ve üçüncü alaşım elementi olan Mn'nin varlığı ile birlikte C miktarı da göze çarpmaktadır. Ağ. %C oranı, FLG'lerin matris yapısındaki mevcudiyetini göstermektedir. Ayrıca, ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.56(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.6'da verilmiştir.

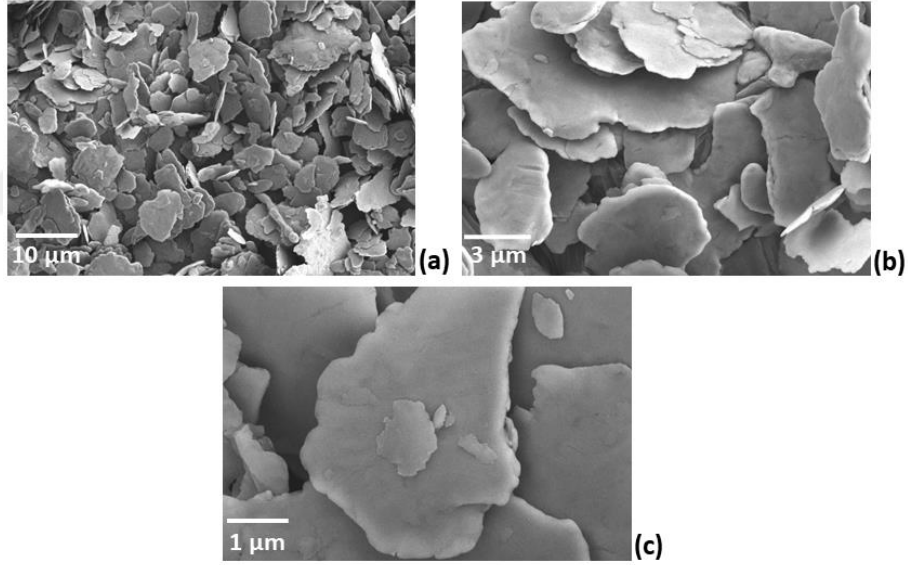


Şekil 3.56 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.6 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.56(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

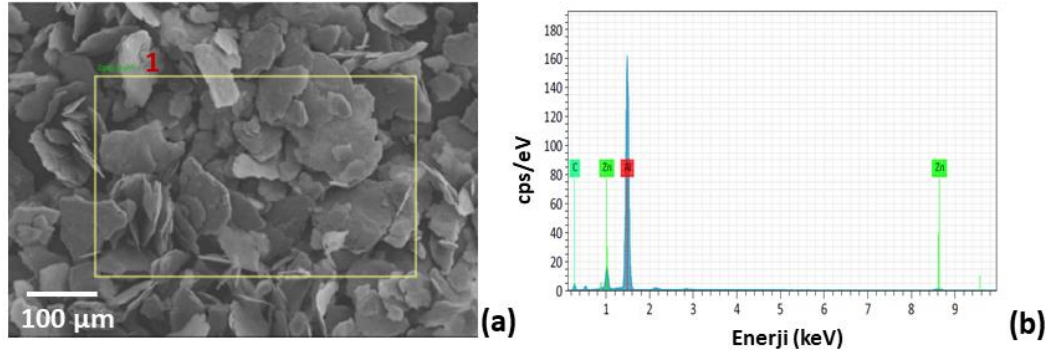
Alan	Al (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Mn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	73,46	2,49	1,58	0,37	22,10

5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, Şekil 3.57'de gösterilmiştir. Başlangıç tozlarından farklı olarak, bilyalı öğütme sonucu gerçekleştirilen çarpmanın etkisiyle partiküller yassılaştırmış bir görüntü sergilemektedir (Azimi ve diğ., 2015). Şekil 3.57(b)'deki yüksek büyütmeye bakıldığında; tek bir toz partikülünün çarpma etkisiyle birçok partikülün soğuk kaynaklanması sonucu olduğu görülmektedir. Şekil 3.57(c)'deki yüksek büyütmede ise, partiküllerin yüzeyinde grafene ait kalıntılar görülmemektedir. Burada da, grafenin Al esaslı partiküllerin içine gömüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 3.57 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı tozların farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.58'de ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının EDS alan analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al ve birinci alaşım elementi Zn'nin varlığı ile birlikte C miktarı da göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.58(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.7'de verilmiştir.

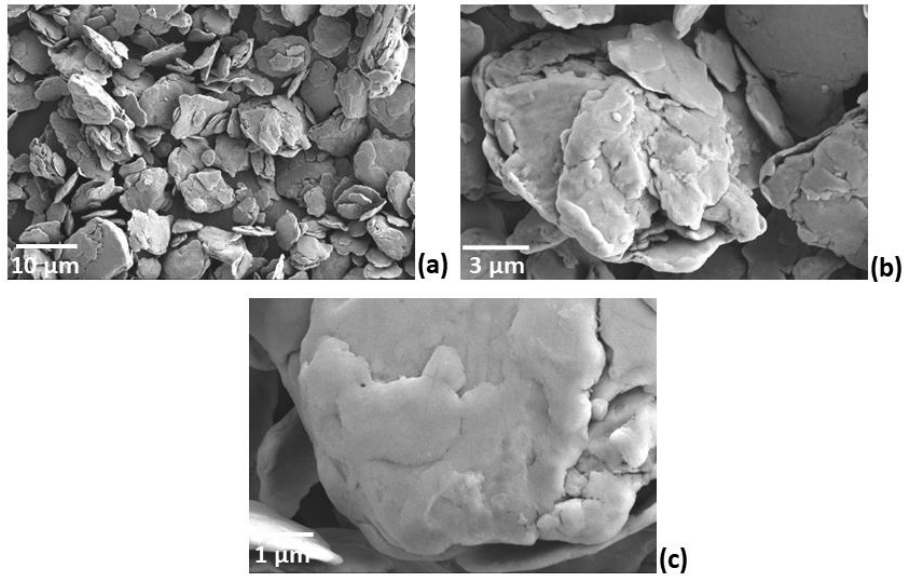


Şekil 3.58 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.7 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.58(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	72,16	7,14	20,71

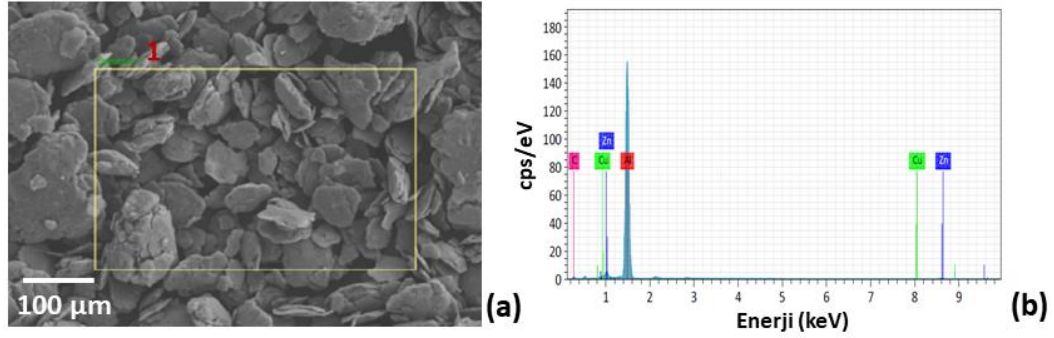
5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, Şekil 3.59'da gösterilmiştir. Başlangıç tozlarından farklı olarak yassı partikül şekli bu kompozit tozlarında da mevcuttur. Grafen kalıntısı, partiküllerin üzerinde çarpmamıştır.



Şekil 3.59 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı tozların farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.60'da ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının EDS alan analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al, birinci alaşım

elementi Zn ve ikinci alaşım elementi olan Cu'nun varlığı ile birlikte C miktarı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarının şekil 3.60(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, izelge 3.8'de verilmiştir.

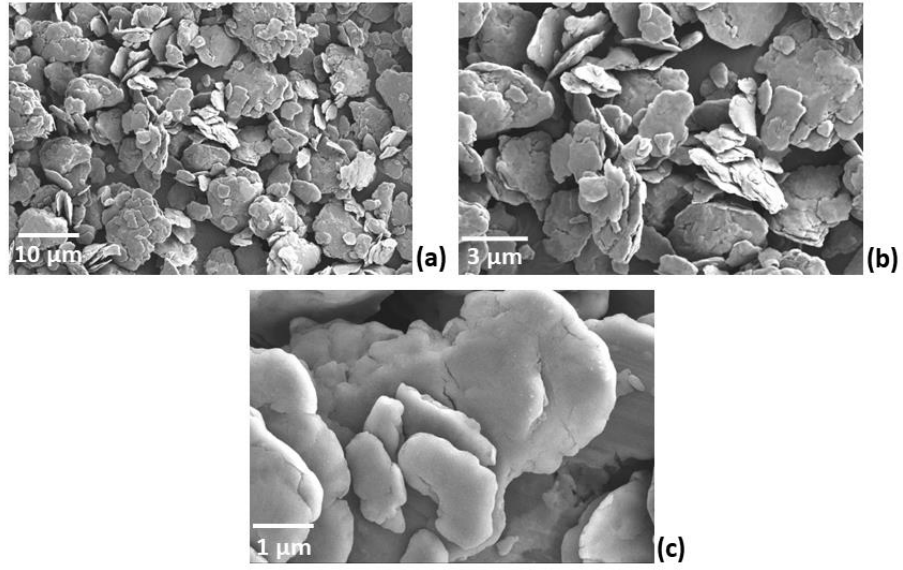


şekil 3.60 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.8 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı kompozit tozlarına ait şekil 3.60(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

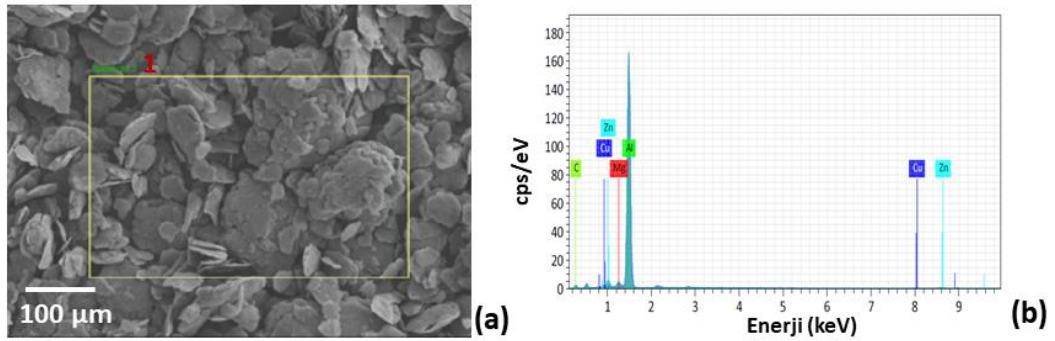
Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	84,07	2,34	2,10	11,50

5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, şekil 3.61'de gösterilmiştir. Plastik deformasyon etkisi bu kompozit tozlarında da göze çarparken, aynı şekilde FLG'lerin matris yapısının içinde gömüldüğü dolayısıyla SEM görüntülerinde etkin bir şekilde görülmediği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.61 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı tozların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Şekil 3.62’de ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının EDS alan analizi gösterilmiştir. Matris alaşımı içerisinde ana element olan Al, birinci alaşım elementi Zn, ikinci alaşım elementi Cu ve üçüncü alaşım elementi olan Mg’nin varlığı ile birlikte C miktarı görülmüştür. Ayrıca, ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.62(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.9’da ifade edilmiştir.

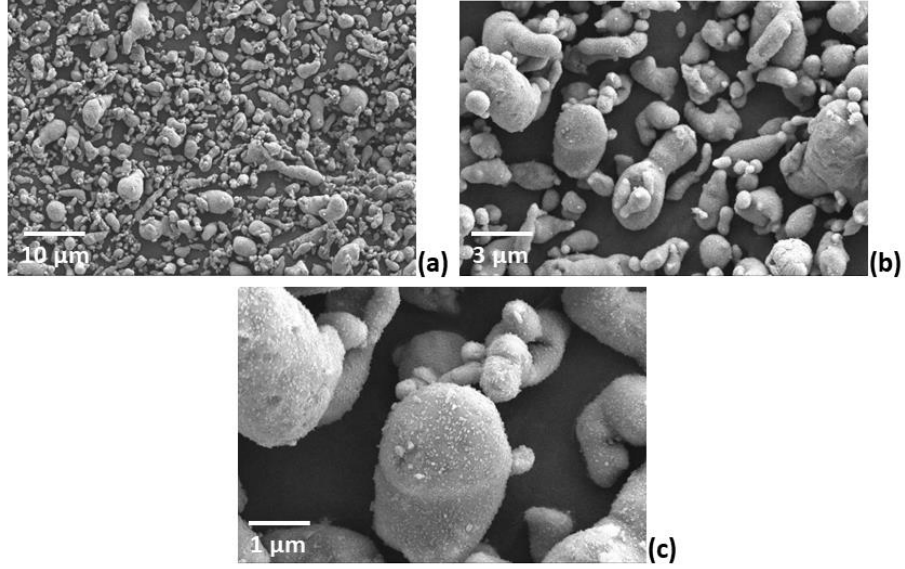


Şekil 3.62 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)’da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.9 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.62(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

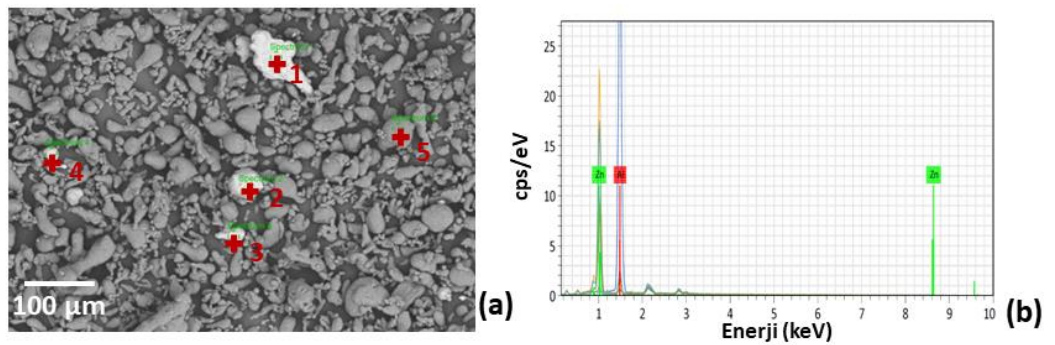
Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	79,33	1,92	2,16	1,45	15,13

Al-Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin üretilmesinde kullanılan, MA ile elde edilen alaşım ve kompozit tozların; yapı içerisinde dağılımı ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için SEM ve SEM-EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Harmanlanmış Al-7,5Zn tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, sırasıyla, şekil 3.63(a)-(c)'de verilmiştir. Harmanlanmış Al-7,5Zn tozlarının şekil 3.63(a), (b) ve (c)'de verilen SEM görüntülerinden, genellikle yuvarlak, küresel ve elips şeklinde partiküllerden oluştuğu görölmektedir.



şekil 3.63 : Harmanlanmış Al-7,5Zn tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

Harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların içerdiği elementlerin yapı içerisindeki dağılımlarının incelenmesi için, nokta EDS analizleri uygulanmıştır. Harmanlanmış tozlara ait şekil 3.64(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş noktaların, EDS analiz spektrumu şekil 3.64(b)'de verilmiştir.



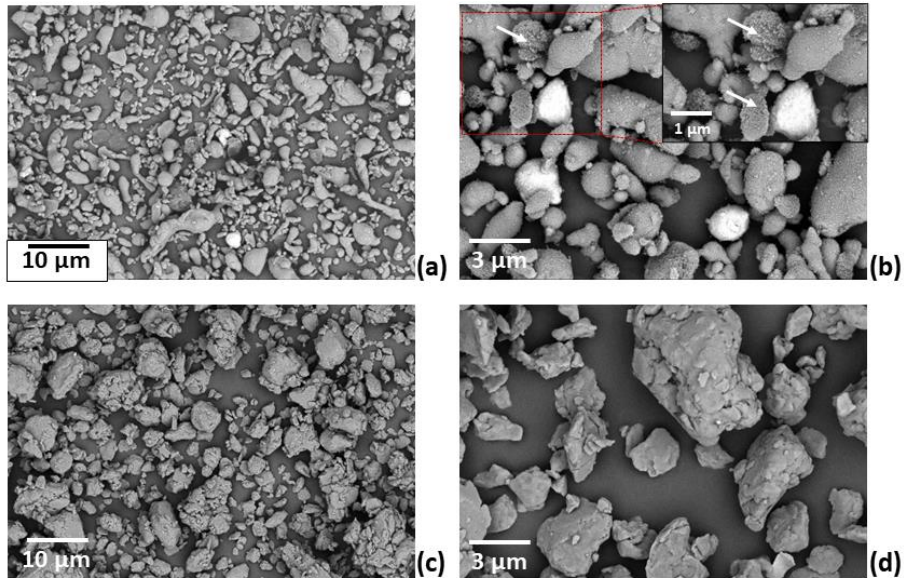
şekil 3.64 : Harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Ayrıca, harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların Şekil 3.64(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.10'da ifade edilmiştir.

Çizelge 3.10 : Harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.64(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

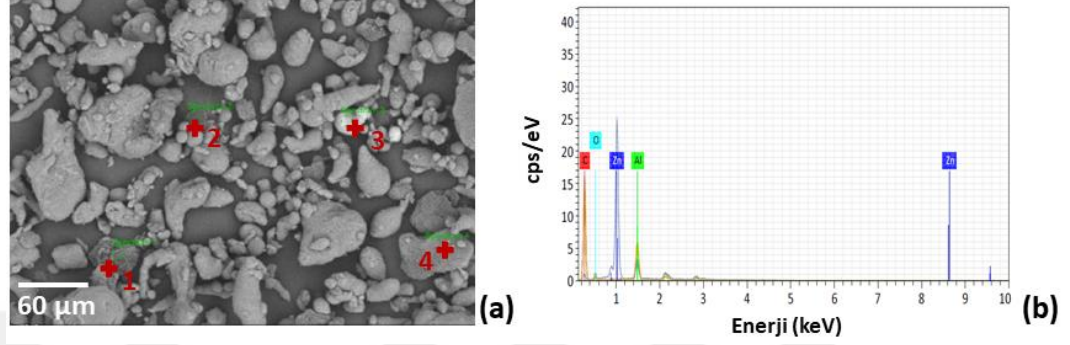
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)
1	1,92	98,08
2	13,10	86,90
3	63,04	36,96
4	1,73	98,27
5	99,67	0,33

0 ve 4 sa MA ile üretilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.65(a)-(d)'de verilmiştir. SEM görüntülerinde, ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının genellikle yuvarlatılmış köşeli, küresel ve elips şeklinde partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Ağ. %2 FLG içeriğine sahip olan harmanlanmış toz içeriğinde, topaklanmış grafenlerin, partiküllerin üzerinde mevcudiyeti SEM görüntülerinde tespit edilmiştir. Ayrıca, 4 sa MA uygulanmış ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.65(c) ve (d)'de verilen SEM görüntülerinde ise, toz morfolojisinde belirgin bir farklılık oluştuğu ve 4 sa öğütülmüş tozların yassılaştırmış partiküllerden oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.65 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a)0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.

Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış tozlarına ait Şekil 3.66(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş noktaların EDS analiz spektrumu, Şekil 3.66(b)'de verilmiştir. Ayrıca, ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların Şekil 3.66(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.11'de ifade edilmiştir.

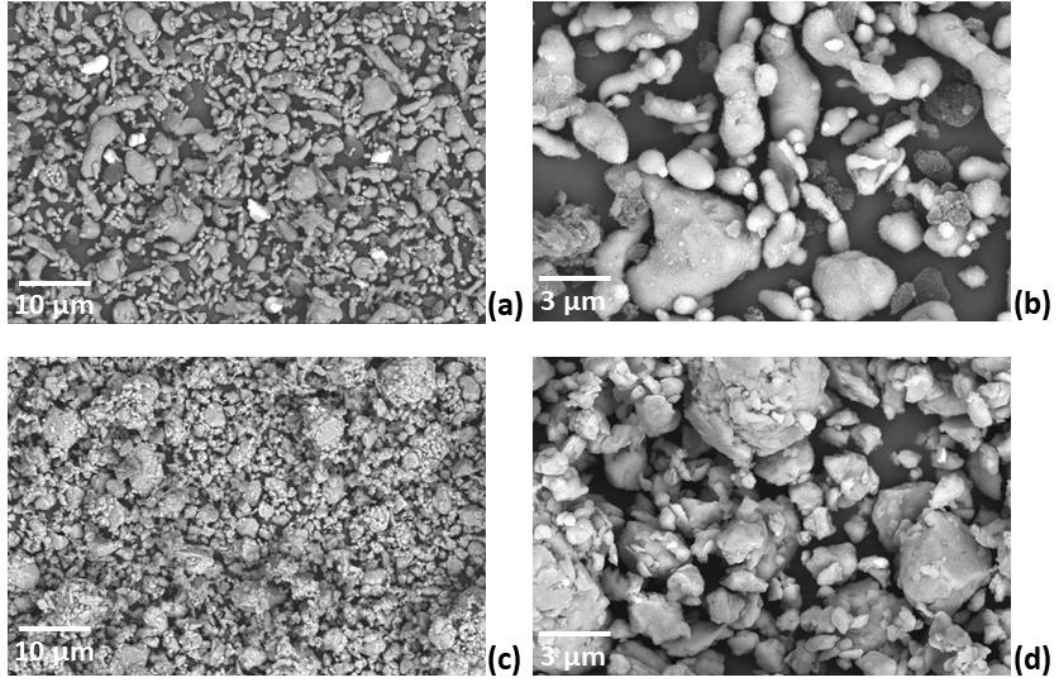


Şekil 3.66 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.11 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.66(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

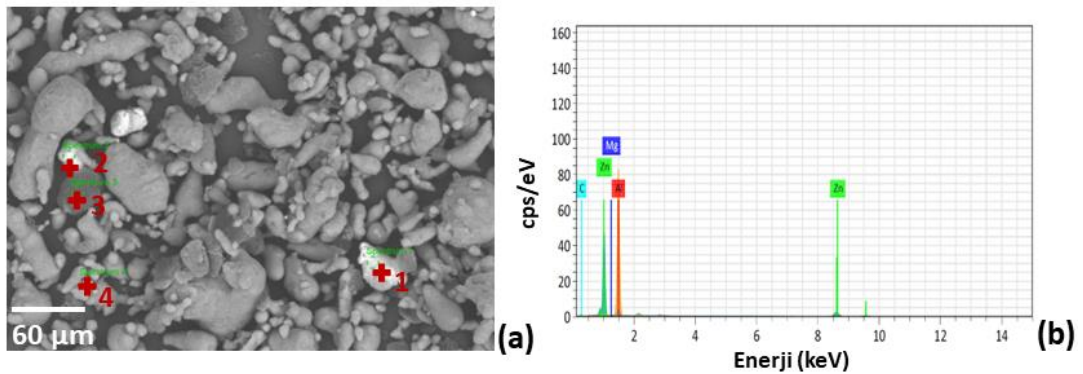
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	C (ağ. %)	O (ağ. %)
1	9,80	0,22	79,69	10,29
2	11,81	0,17	83,66	4,86
3	6,68	79,86	11,76	1,70
4	15,50	0,00	77,61	6,88

0 ve 4 sa MA ile üretilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.67(a)-(d)'de verilmiştir. Harmanlanmış ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozlarının Şekil 3.67(a) ve (b)'de verilen SEM görüntülerinden; tozların genellikle yuvarlak köşeli, küresel ve elips şekilli, irili ufaklı partiküllerden oluştuğu görülmektedir. 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarının Şekil 3.67(c) ve (d)'de verilen SEM görüntülerinde ise, tozların yassılaştırmış partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, 4 sa MA sonrası grafen fazının, Al-Zn-Mg kompozisyonuna sahip toz partiküllerinin içine gömüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 3.67 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.

Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların Şekil 3.68(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş noktaların EDS analiz spektrumu Şekil 3.68(b)'de verilmiştir. Çizelge 3.12; ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların, Şekil 3.68(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analizi sonuçları hakkında bilgi vermektedir. SEM görüntüleri ve EDS analizlerinde Al, Zn ve grafen fazlarının homojen bir alaşım olmaktansa ayrı ayrı yapı içerisinde bulunduğu görülmektedir. Ayrıca, nokta 3'ün Çizelge 3.12'de verilen EDS analizinde belirlenen yüksek C içeriği bu partikülün bağımsız ve topaklanmış bir grafen partikülü olduğunu göstermektedir.

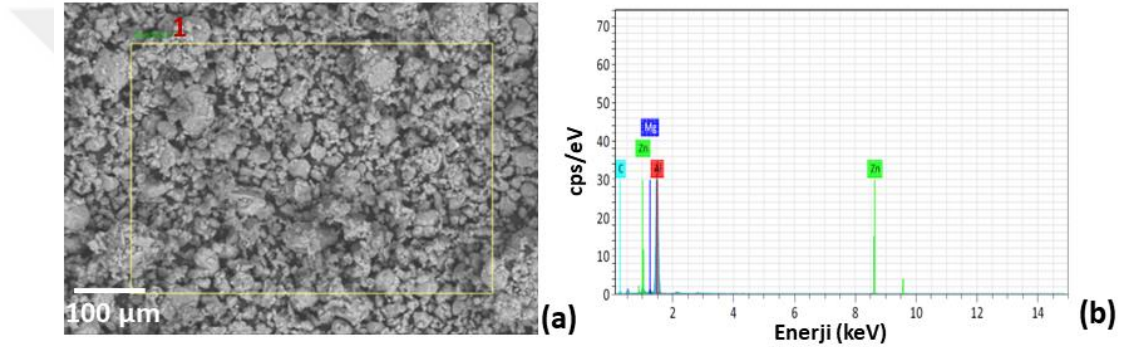


Şekil 3.68 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.12 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit tozlarına ait Şekil 3.68(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	16,03	70,39	1,49	12,08
2	44,32	52,65	1,27	1,75
3	37,03	6,71	0,00	56,26
4	79,04	0,00	0,45	20,51

Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg tozlarının Şekil 3.69(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş alanın EDS analizine ait spektrum, Şekil 3.69(b)'de verilmiştir. Ayrıca; kompozit tozlarının Şekil 3.69(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.13'de verilmiştir.



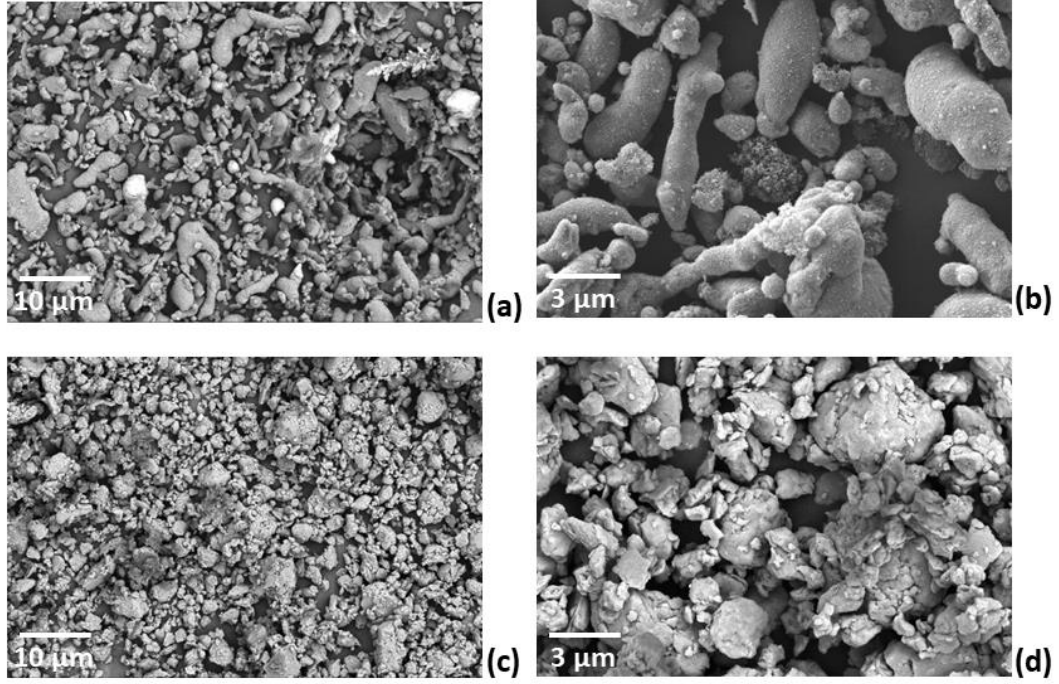
Şekil 3.69 : Ağ.%2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.13 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.69(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	85,02	8,94	1,96	4,08

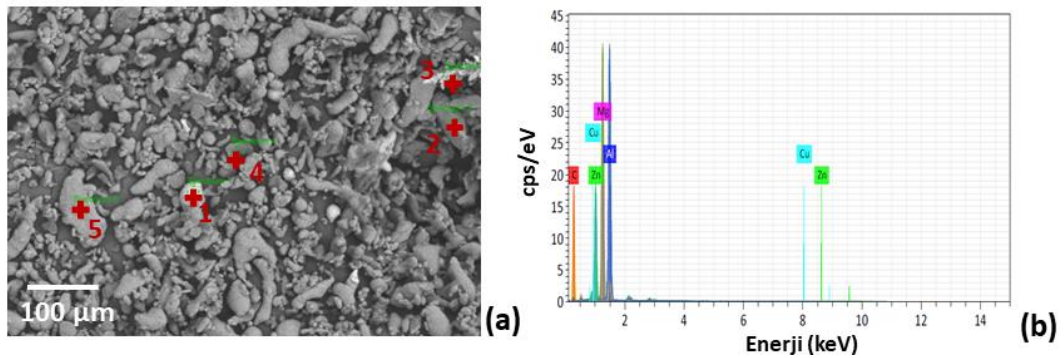
0 ve 4 sa MA ile üretilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu- tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.70(a)-(d)'de verilmiştir. Harmanlanmış ağ.%2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının Şekil 3.70(a) ve (b)'de verilen SEM görüntülerinden tozların genellikle yuvarlak köşeli, küresel ve elips şekilli irili ufaklı partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, topaklanmış grafenlerin, partiküllerin üzerinde mevcudiyeti SEM görüntülerinde belirlenmiştir. 4 sa MA ile elde edilen ağ.%2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların Şekil 3.70(c) ve (d)'de verilen SEM görüntülerinde ise, toz morfolojisinde değişim gözlenerek, tozların partikül boyutlarının azalarak küreselliklerini kaybettikleri bunun

yanında içiçe geçmiş bir alaşım yapısı oluşturdukları görülmektedir. Ayrıca, 4 sa MA sonrası yapıda serbest grafen partikülleri gözlenmemesi, grafen fazının Al-Zn-Mg-Cu alaşım partiküllerinin içine gömüldüğünü düşündürmektedir.



Şekil 3.70 : Ağ. %2 FLG takviyeli 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 0 sa, 500X, (b) 0 sa, 2000X, (c) 4 sa, 500X, (d) 4 sa, 2000X.

Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların Şekil 3.71(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş noktaların EDS analizi spektrumu, Şekil 3.71(b)'de verilmiştir.



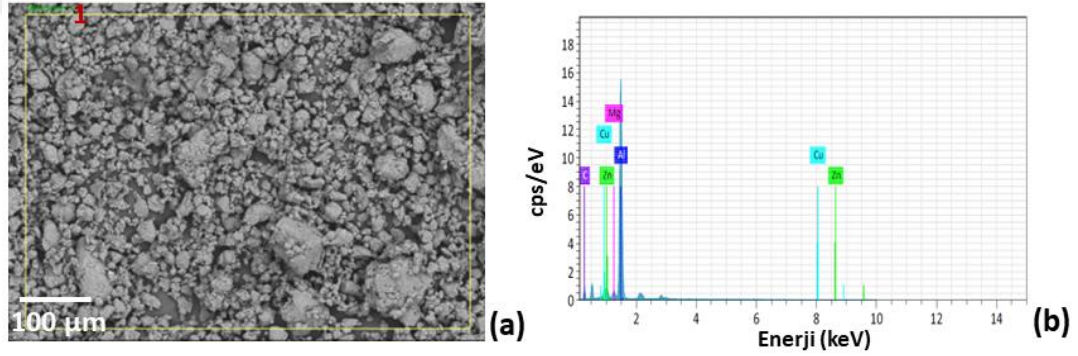
Şekil 3.71 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Ayrıca, Çizelge 3.14; ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozlarına ait Şekil 3.71(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 3.14 : Ağ.%2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozlarına ait Şekil 3.71(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	2,71	59,62	0,00	0,25	37,42
2	2,50	0,33	77,47	0,15	19,56
3	26,25	1,45	3,22	7,07	62,01
4	4,82	0,01	0,22	0,00	95,15
5	81,67	0,08	0,31	0,08	17,86

Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu tozlarının Şekil 3.72(a)'da verilen SEM görüntüsünde işaretlenmiş alanın EDS analiz spektrumu, Şekil 3.72(b)'de verilmiştir. Ayrıca kompozit tozlarının Şekil 3.72(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.15'de gösterilmiştir.



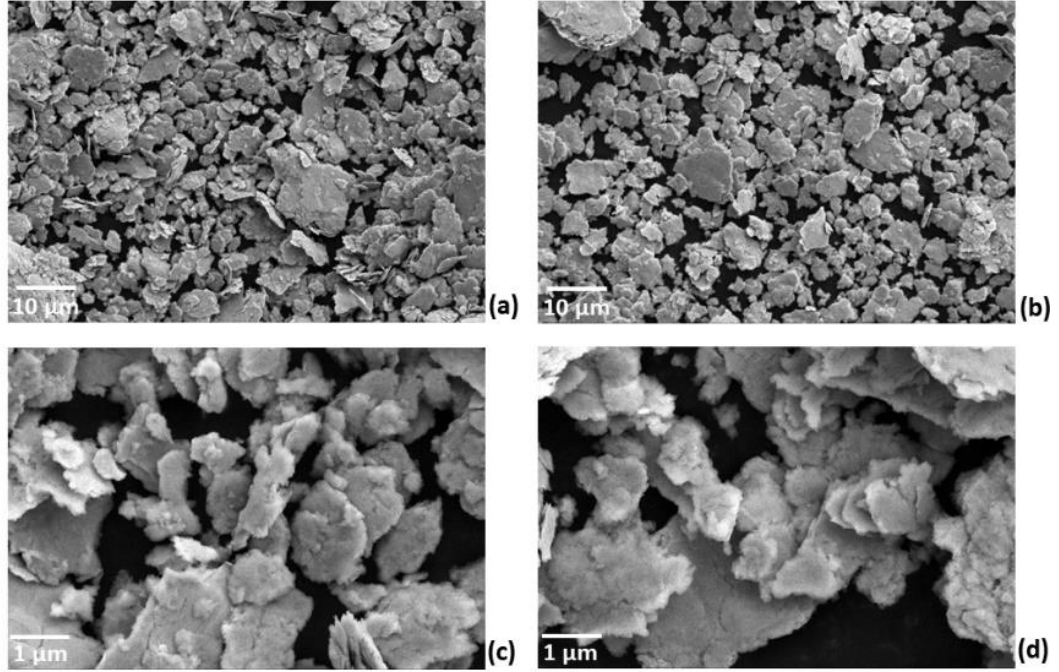
Şekil 3.72 : Ağ.%2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı tozların: (a) SEM görüntüsü; (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.15 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı alaşım tozlarına ait Şekil 3.72(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	59,39	1,95	1,54	0,18	36,94

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılmış olan, 5 ve 7 sa farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozların farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri, Şekil 3.73'de gösterilmiştir. Gezegen tipli bilyalı öğütme işleminden sonra, Şekil 3.8(b)'de görülen başlangıç tozlarının aksine, parçacıklar düz bir görünüme sahip görünmektedir. Cu partikülleri tekrarlı olarak plastik deformasyona, kırılmaya ve soğuk kaynaklanmaya maruz kalmaktadır (Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013). Bilyalı öğütmeden kaynaklanan şiddetli kayma gerilimi nedeniyle FLG'nin parçalanabileceği ve Cu matrisine gömüleceği

düşünülmektedir (Jang ve diğ., 2018). Buna bağlı olarak, Cu partiküllerinin yüzeyinde FLG kalıntısı gözlemlenmemiştir. Ayrıca, Şekil 3.73(c) ve (d)'deki yüksek büyütme SEM görüntülerine göre, birkaç partikülün soğuk kaynaklanmasının bir sonucu olarak ayrık partiküllerin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.73 : Ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozların farklı öğütme sürelerine bağlı olarak SEM görüntüleri: (a,c): 5 sa, (b-d) 7 sa.

T/M ile elde edilen grafen takviyeli Al ve Cu esaslı kompozit tozlarının morfolojisinin incelenmesi, mevcut literatürde SEM analizi uygulanarak değerlendirilmiştir. Bastwros ve diğ. (2014); Al alaşımına (Al6061) ağ. %1 grafen takviye ederek, farklı sürelerde (10,30,60 ve 90 dk) uygulanan bilyalı öğütme ile ürettikleri kompozit tozlarının SEM görüntülerinde, grafenin aglomere olarak Al partiküllerinin içine gömüldüğünü tespit etmişlerdir. Pérez-Bustamante ve diğ. (2014); Al tozuna ağ. %0,25; %0,50 ve %1,0 GNP takviye ederek, 1,3 ve 5 saat uyguladıkları MA sonrası, elde edilen SEM görüntülerinde, kompozit tozlarının pulsu bir morfolojiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, GNP'lerin homojen bir şekilde dağıldığı ve 5 sa MA sonrası yassılaştırmış partiküllerin miktarının bir miktar azaldığı belirtilmiştir. Shin ve Bae (2015); gezegensel tipli bilyalı öğütme (100 rpm, 3 sa) sonrası FLG takviyeli Al2024 esaslı kompozit tozlarının SEM görüntülerinde, alaşım partiküllerinin üzerinde tespit edilen FLG'nin kademeli olarak bu alaşım tozuna gömüldüğünü görmüşlerdir. Fakat daha sonra öğütme işlemi attritör değirmende (500 rpm, 9 sa) uygulandığında, gezegen tipli bilyalı değirmene kıyasla, kompozit toz karışımına etkin

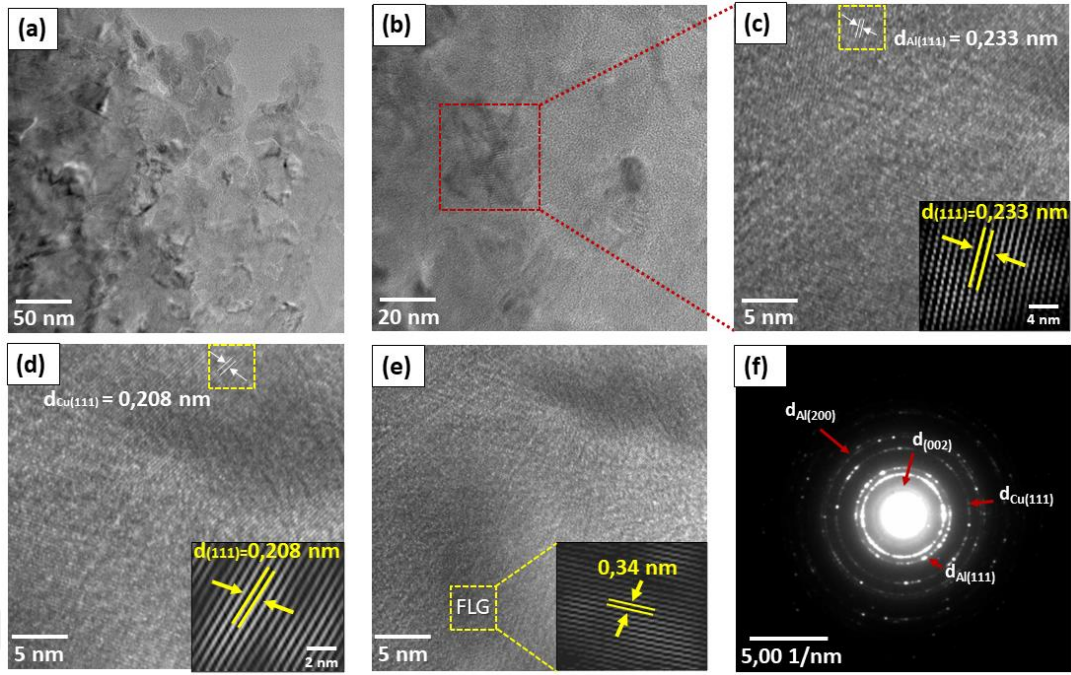
darbe enerjisiyle toz morfolojisinin yassılaşıp görüntüsü mevcutken aynı zamanda partiküllerin yüzeyinde FLG tespit edilememiştir. Zhang ve diğ. (2016); gezegen tipli bilyalı değirmen (350 rpm, 24 sa) kullanarak öğüttükleri, ağı. %0,5 ve %1 GNP takviyeli Al5083 esaslı kompozit tozlarının SEM görüntülerinde, başlangıç tozlarından farklı olarak düzensiz birçok küçük partikülün yassılaşıp tozlarda parçalandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, takviyesiz tozlara kıyasla GNP takviyesi ile birlikte, öğütme sürecinin hızlandığını belirtmişlerdir. Saboori ve diğ. (2017), GNP'leri etil alkolde Al tozlarıyla birlikte karıştırarak elde ettikleri kompozit tozlarının SEM-EDS haritalama görüntülerinde, GNP'lerin morfolojik olarak irili ufaklı görülen Al partiküllerine gömüldüğünü fakat GNP miktarının artışıyla, GNP'lerin dağılımında aglomerasyon eğiliminin fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Kwon ve diğ. (2017), AlMg5 alaşımı ve GO partiküllerinin gezegensel tipli bilyalı değirmende (360 rpm, 20 sa) öğütülmesiyle elde ettikleri kompozit tozlarının SEM görüntülerinde, yüksek enerjili bilyalı öğütme prosesiyle birlikte ince partiküllerin aglomerasyonuyla tane büyümesinin görüldüğünü belirtmişlerdir. Zhang ve diğ. (2018), gezegen tipli bilyalı öğütme (250 rpm; 2,5,10,15 ve 20 sa) ile GNS ve Al-Si (A355) tozlarını karıştırarak elde ettikleri GNS takviyeli Al-Si esaslı kompozit tozlarının, öğütme süresi arttıkça, GNS'lerin Al partiküllerinin içinde hapsolme eğiliminde olduğunu ve böylece matris içinde GNS'lerin homojen bir şekilde dağılabileceğini ifade etmişlerdir.

Cui ve diğ. (2014), farklı devir ve sürelerde bilyalı öğütme (100, 200, 300 rpm; 4 ve 8 sa) ile elde ettikleri FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin SEM görüntülerinde; devir hızının artmasıyla birlikte, daha buruşuk ve ince olan FLG, Cu partiküllerinin yüzeyleri de dahil olmak üzere her yerde mevcut olarak dağıldığını tespit etmişlerdir. Bu durum, FLG tabakalarının, devir sayısı ve öğütme süresinin artmasıyla birlikte, ayrılıp daha küçük tabakalar hâline geldiğini göstermektedir. Chu ve Jia (2014), hacimce GNP içeriğinin artmasıyla birlikte, bilyalı öğütme sonrası, SEM görüntülerine göre, GNP'lerin Cu matrisinde aglomerasyona uğradığını belirtmişlerdir. Yue ve diğ. (2017), farklı sürelerde (400 rpm; 1,3,5 ve 7 sa) gezegensel tipli bilyalı öğütme ile elde ettikleri ağı. %0,5 GO takviyeli Cu esaslı kompozit tozların SEM görüntülerinde, öğütme süresi arttıkça kompozit tozların yassılaşıp görünümünün bir miktar granül hâline geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, öğütme süresinin artışıyla birlikte, GO nano tabakalarının kademeli olarak bakır tozlarında dağıldığını tespit etmişlerdir.

Öğütme, yaklaşık 1 sa olarak uygulandığında, GO nano tabakalarının kümelenmiş hâlde bakır tozlarının yüzeyinde olduğu görülmüştür. Öğütme süresi arttıkça GO nano tabakalarının kümelenmesi azalmıştır ve 5 sa öğütme sonrası GO nano tabakalarının aglomerasyonunun Cu matrisinde mevcut olmadığı tespit edilmiştir. Li ve diğ. (2020), bilyalı öğütme sonrası, dendritik olan Cu partiküllerinin yassı görünümde olduğunu ve grafenin Cu partikülleri yüzeyinde dağılmış olduğunu SEM görüntülerinde gözlemlemişlerdir. Ayrıca bilyalı öğütmenin mekanik etkisi ile grafenin Cu yüzeyinde küçük parçalara ayrıldığı kaplamasız bir yapı elde etmeyi başarmışlardır.

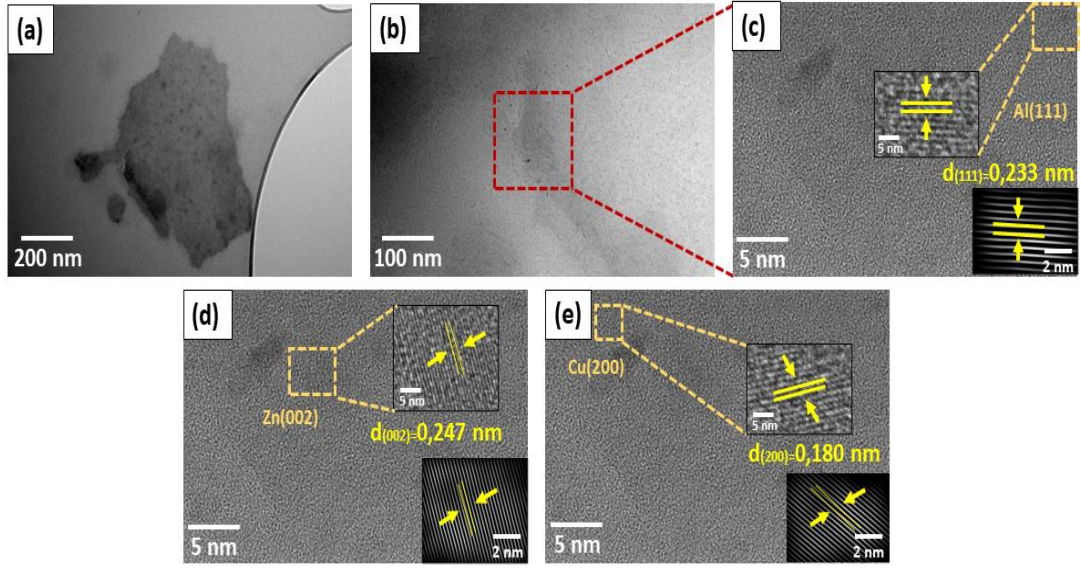
3.3.7 Mekanik alaşımlama ile elde edilen kompozit tozlarının TEM analizi

Şekil 3.74 (a), (b), (c), (d), (e) ve (f); ağırlık %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı kompozit tozların, sırasıyla, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) aydınlık alan, yüksek çözünürlüklü TEM (HRTEM) görüntüsünü ve seçilmiş alan kırınım (SAD) paternlerini göstermektedir. Şekil 3.74(a); Al, Cu ve FLG'yi içeren kompozit yapıyı ifade etmektedir. Şekil 3.74(b)'deki kırmızı kare, Şekil 3.74(c) ve Şekil 3.74(d)'de gösterilen 0,233 nm ile $Al_{(111)}$ ve 0,208 nm düzlemler arası mesafe ile Cu'nun (111)'e karşılık gelen düzlemlerini göstermektedir. Ayrıca, Şekil 3.74(e)'de gösterilen HRTEM görüntüsünde 0,34 nm düzlemler arası mesafeye sahip FLG'nin mevcudiyeti tespit edilmiştir. FLG, Al ve Cu fazlarıyla birlikte kümelenmektedir. Şekil 3.74(c), Şekil 3.74(d) ve Şekil 3.74(e)'deki ek görüntüler, sırasıyla, Al, Cu ve FLG fazlarına karşılık gelen ters hızlı Fourier dönüşüm (IFFT) görüntüsüdür. Şekil 3.74(f), Şekil 3.74(b)'deki kırmızı kareye ait bölgeden elde edilen SAD görüntüsünü vermektedir. SAD görüntüsünde ifade edilen halkalar, yaklaşık olarak hesaplanan 0,34 nm, 0,233 nm, 0,208 nm ve 0,143 nm düzlemler arası mesafesiyle sırasıyla grafen(002), Al(111), Cu(111) ve Al(220) fazlarını ifade etmektedir. Şekil 3.51'deki SEM görüntüsüne göre 5 sa MA sonrası matrise gömülü olduğunu düşündüğümüz FLG'nin, HRTEM görüntülerinde Al ve Cu partikülleri ile birlikte kümeler halinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bilyalı öğütme, yüksek verimliliği nedeniyle grafeni matriste eşit şekilde dağıtmanın etkili bir yoludur (Gao ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2019; Yan ve diğ., 2014). Al-4,5Cu matris yapısında FLG'nin homojen dağılımı gözlemlendiğinden dolayı, bilyalı öğütme işleminin tercihinin etkinliği TEM görüntüleri ile de kanıtlanmıştır.



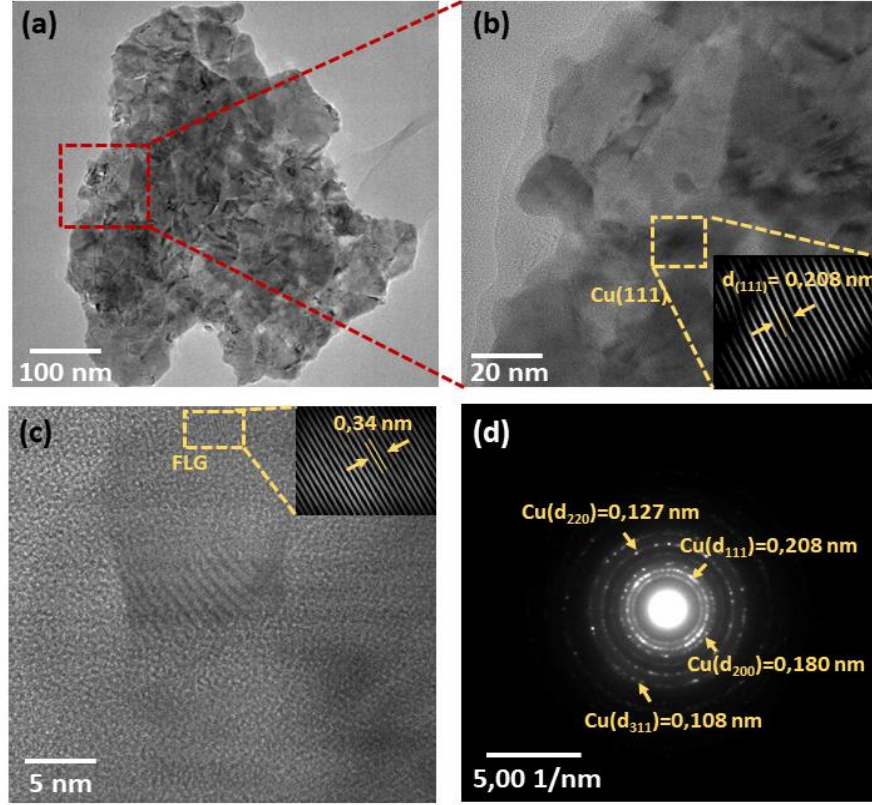
Şekil 3.74 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu kompozit tozlarının (a), (b) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (c), (d), (e) (a)'daki kırmızı kareden elde edilen HRTEM görüntüleri; (f) SAD modeli ((c), (d) ve (e)'deki ek IFFT görüntüleri, sırasıyla Al, Cu ve FLG'yi ifade etmektedir.).

Şekil 3.75(a), (b), (c), (d) ve (e) ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı kompozit tozların, sırasıyla, TEM aydınlık alan ve Al, Zn ve Cu fazlarını ifade eden HRTEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.75(a) ve (b); farklı fazları içeren kompozit toz yapısını belirtmektedir. Şekil 3.75(b)'deki kırmızı kare, Şekil 3.75(c), (d) ve (e)'de belirtilen 0,233 nm ile Al(111), 0,247 nm ile Zn(002) ve 0,180 nm ile Cu(200)'a karşılık gelen düzlemler arası mesafeyi ifade etmektedir. Böylece kompozit yapısında, Al, Zn ve Cu fazlarının varlığı kanıtlanmış olmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.75(c), (d) ve (e)'de ekteki görüntüler, sırasıyla, Al, Zn, Cu fazlarının IFFT görüntüsünü temsil etmektedir.



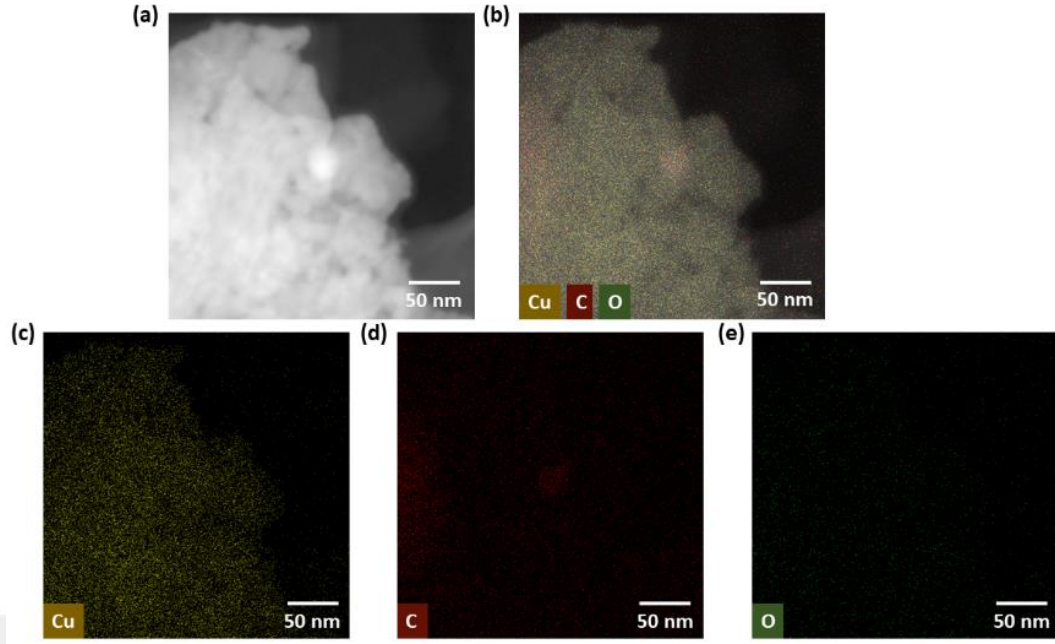
Şekil 3.75 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg kompozit tozlarının (a), (b) Aydınlik alan TEM görüntüsü; (c), (d), (e) (b)'deki kırmızı kareden elde edilen HRTEM görüntüleri (Ekteki görüntüler, sırasıyla, Al, Zn, Cu fazlarının IFFT görüntüsüdür.).

Şekil 3.76 (a), (b) ve (c); 7 sa boyunca MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı tozların farklı büyütme oranlarına sahip aydınlık alan TEM ve HRTEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 3.76(a)'da gösterilen koyu renkli bölgeler kompozit yapıda göze çarpmaktadır. Şekil 3.76(a)'daki kırmızı kareden elde edilen latis izleri, Cu₍₁₁₁₎ fazını temsil eden 0,208 nm düzlemler arası mesafesine karşılık gelerek Şekil 3.76(b)'de gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.76(c)'de 0,34 nm ile düzlemler arası mesafeyi ifade eden FLG için latis izleri gözlemlenmiştir. Şekil 3.76(b) ve (c)'deki ek görüntüler, Cu ve FLG için IFFT görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.76(a)'daki kırmızı kareden elde edilen SAD paterni, Şekil 3.76(d)'de ifade edilmektedir. SAD, Debye-Scherrer halkaları boyunca Cu'dan gelen yansımaları göstermektedir. Paternler, düzlemler arası mesafe olarak sırasıyla 0,208 nm, 0,180 nm, 0,127 nm ve 0,108 nm'ye karşılık gelen Cu₍₁₁₁₎, Cu₍₂₀₀₎, Cu₍₂₂₀₎, ve Cu₍₃₁₁₎ fazlarını içermektedir. Ayrıca, Şekil 3.41'de ifade edilen XRD sonuçlarıyla birlikte, SAD paternlerine göre kompozit tozlarında Cu'nun oksit fazı tespit edilememiştir. Şekil 3.73 (b) ve (d)'deki SEM görüntüsü, FLG'nin 7 sa MA uygulandıktan sonra Cu matrisine gömülebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, Cu ve FLG'nin, TEM görüntülerinde kümeler halinde homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, grafenin matris yapısında homojen dağılımı için; bilyalı öğütmenin uygun bir yöntem olduğu söylenebilir (Borand ve Uzunsoy, 2022; Li ve diğ., 2019).



Şekil 3.76 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG ile takviye edilen Cu kompozit tozlarının (a) Aydınlık alan TEM görüntüsü; (b), (c) (a)'daki kırmızı kareden elde edilen farklı büyütmelerdeki HRTEM görüntüleri; (d) SAD modeli ((b) ve (c)'deki ek IFFT görüntüleri, sırasıyla Cu ve FLG'yi ifade etmektedir.).

Şekil 3.77(a), (b), (c), (d) ve (e), 7 sa MA uygulandıktan sonra ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit tozlarının, TEM-EDS haritalama analizlerini göstermektedir. Yüksek açılı açısız karanlık alan (HAADF) görüntüsü, Şekil 3.77(a)'da belirtilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.77(b), birçok küçük boyutlu partikül içeren faz bölgelerini içermektedir. Şekil 3.77(c-e)'ye göre; tüm elementlerin yapıda homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ayrıca, FLG'nin Cu matrisindeki kümeler olarak dağıldığı ve Şekil 3.76(a)'daki TEM görüntüsü ile uyumlu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.77 : (a) 7 sa MA ile elde edilen ağı. %0,5 FLG takviyeli Cu tozlarının HAADF –STEM görüntüsü; (b) (c) Cu, (d) C ve (e) O elementlerinin üst üste bir şekilde TEM-EDS eşleşmelerinin görüntüsü.

3.4 Sinterlenmiş Numunelerin Karakterizasyonu

3.4.1 Yoğunluk tayini

3.4.1.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin yoğunluk tayini

FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin teorik ve relatif yoğunlukları, Çizelge 3.16'da gösterilmiştir. FDM'lerin relatif yoğunluklarının yaklaşık olarak %96 ile %97 arasında olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.16 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Al-4,5Cu-FLG	2,783	96,1
Al-4,5Cu-1,5Mg-FLG	2,759	97,9
Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn-FLG	2,768	97,9

FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin teorik ve relatif yoğunlukları, Çizelge 3.17'de gösterilmiştir. FDM'lerin relatif yoğunluklarının yaklaşık olarak %97 ile %98 arasında olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.17 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM’lerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Al-6Zn-FLG	2,800	97,2
Al-6Zn-2Cu-FLG	2,841	97,3
Al-6Zn-2Cu-2Mg-FLG	2,808	98,8

3.4.1.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin yoğunluk tayini

Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen kompozitlerin teorik yoğunlukları ve sinterleme sonrası elde edilen relatif yoğunluk değerleri, Çizelge 3.18’de verilmiştir. Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen kompozitlerin relatif yoğunlukları yaklaşık olarak, %88 ile %99 arasında değişkenlik göstermektedir. Relatif yoğunluk değerlerinin, öğütme sürelerine göre, değişkenlik gösterdiği görülmektedir. MA uygulanmamış numunelere kıyasla; MA uygulanmış ve FLG ile takviye edilen numunelerde, öğütme süresinin artması ile yoğunluğun arttığı fakat 4 sa MA sonrası, yoğunluğun bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.18 : Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Al-7,5Zn-0 sa		92,4
Al-7,5Zn-2 sa		90,5
Al-7,5Zn-4 sa	2,832	96,8
Al-7,5Zn-8 sa		90,0
Al-7,5Zn-0,5FLG-0 sa		90,5
Al-7,5Zn-0,5FLG-2 sa		96,5
Al-7,5Zn-0,5FLG-4 sa	2,824	97,8
Al-7,5Zn-0,5FLG-8 sa		93,6
Al-7,5Zn-1FLG-0 sa		89,9
Al-7,5Zn-1FLG-2 sa	2,816	98,2
Al-7,5Zn-1FLG-4 sa		98,7
Al-7,5Zn-1FLG-8 sa		94,6
Al-7,5Zn-2FLG-0 sa		88,4
Al-7,5Zn-2FLG-2 sa		99,9
Al-7,5Zn-2FLG-4 sa	2,801	97,4
Al-7,5Zn-2FLG-8 sa		95,1

Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen kompozitlerin teorik yoğunlukları ve sinterleme sonrası elde edilen relatif yoğunluk değerleri, Çizelge 3.19’da verilmiştir. Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen

kompozitlerin relatif yoğunlukları yaklaşık olarak %86 ile %99 arasında değişmektedir. Relatif yoğunluk değerlerinin, öğütme sürelerine göre değişkenlik gösterdiği bu alaşım serisinde de görülmektedir. MA uygulanmamış numunelere kıyasla; MA uygulanmış ve FLG ile takviye edilen numunelerde, MA süresinin artması ile yoğunluğun arttığı fakat 4 sa öğütme sonrası, yoğunluğun bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.19 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Al-7,5Zn-2,5Mg-0 sa		91,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-2 sa		99,1
Al-7,5Zn-2,5Mg-4 sa	2,791	95,1
Al-7,5Zn-2,5Mg-8 sa		90,9
Al-7,5Zn-2,5Mg-0,5FLG 0 sa		88,8
Al-7,5Zn-2,5Mg-0,5FLG 2 sa	2,784	97,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-0,5FLG 4 sa		93,7
Al-7,5Zn-2,5Mg-0,5FLG 8 sa		89,4
Al-7,5Zn-2,5Mg-1FLG 0 sa		87,1
Al-7,5Zn-2,5Mg-1FLG 2 sa	2,776	99,5
Al-7,5Zn-2,5Mg-1FLG 4 sa		97,5
Al-7,5Zn-2,5Mg-1FLG 8 sa		90,8
Al-7,5Zn-2,5Mg-2FLG 0 sa		88,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-2FLG 2 sa	2,761	99,9
Al-7,5Zn-2,5Mg-2FLG 4 sa		92,6
Al-7,5Zn-2,5Mg-2FLG 8 sa		89,2

Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen kompozitlerin teorik yoğunlukları ve sinterleme işlemleri sonrası ulaştığı relatif yoğunluk değerleri, Çizelge 3.20’de verilmiştir. Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen kompozitlerin relatif yoğunlukları yaklaşık olarak %86 ile %99 arasında değişkenlik göstermektedir. Relatif yoğunluk değerlerinin, öğütme sürelerine göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarında, MA uygulanmamış numunenin relatif yoğunluğu %89,4 iken; MA uygulanan numunelerde relatif yoğunluk bu numuneye kıyasla artma eğilimindedir. Fakat 4 sa öğütme sonrası, relatif yoğunluğun bir miktar azaldığı görülmektedir.

Çizelge 3.20 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG takviyeli kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-0 sa		89,4
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-2 sa	2,828	97,0
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-4 sa		91,1
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-8 sa		89,4
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-0,5FLG-0 sa		86,7
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-0,5FLG-2 sa	2,820	99,8
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-0,5FLG-4 sa		96,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-0,5FLG-8 sa		95,2
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-1FLG-0 sa		89,5
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-1FLG-2 sa	2,812	98,5
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-1FLG-4 sa		99,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-1FLG-8 sa		93,4
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-2FLG-0 sa		90,3
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-2FLG-2 sa	2,797	99,9
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-2FLG-4 sa		86,0
Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-2FLG-8 sa		88,0

3.4.1.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin yoğunluk tayini

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları, Çizelge 3.21’de gösterilmiştir. Kompozitlerin relatif yoğunluklarının yaklaşık olarak %90 ile %94 arasında değiştiği görülmektedir. FLG içeriğinin bir fonksiyonu olarak, FLG miktarı arttıkça kompozitlerin relatif yoğunluğunun arttığı söylenebilir. Bu sonuçlar, FLG'nin sinterleme sırasında oluşan boşlukları doldurma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluğu, gözenekliliğin azalmasına ve parçacıkların kristal büyümesine bağlıdır (Moustafa ve Taha, 2020). Ponraj ve diğ. (2018), Cu matrisinde artan grafen içeriği ile birlikte, %93 olarak elde edilen relatif yoğunluğu maksimum yoğunluk olarak belirtmişlerdir. Fakat, mevcut literatürde bazı araştırmalar, artan grafen içeriğinin gözenekliliği arttırdığını öne sürmektedir (Asgharzadeh ve Eslami, 2019; Fahimi ve Abachi, 2021; Moustafa ve Taha, 2020). Fahimi ve diğ. (2021), rGO içeriği arttıkça, Cu matris yapısında topaklanmanın daha kolay gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Böylece, yoğunlaştırma sırasında Cu, rGO'lar arasındaki boşluğa nüfuz edemez ve mikro gözenekler oluşturarak relatif yoğunluk azalabilmektedir. Ayrıca, rGO'nun aglomerasyonu, yapı içinde stres konsantrasyonuna neden olarak rGO takviyeli Cu esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini zayıflatmaktadır (Asgharzadeh ve Eslami, 2019; Chu ve Jia, 2014).

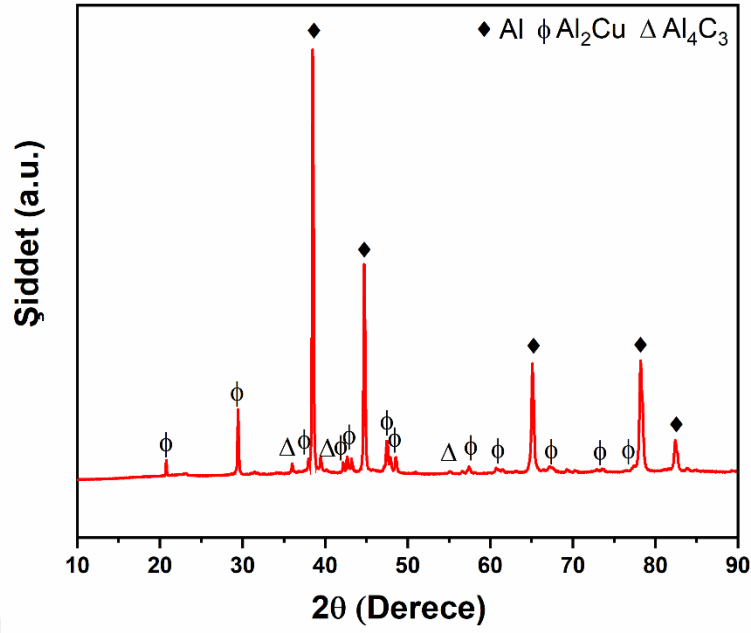
Çizelge 3.21 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin teorik ve relatif yoğunlukları.

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
Cu-5sa	8,96	87,57
Cu-7sa		87,03
Cu-0,1FLG-5sa	8,92	89,45
Cu-0,1FLG-7sa		88,18
Cu-0,3FLG-5sa	8,85	92,04
Cu-0,3FLG-7sa		93,99
Cu-0,5FLG-5sa	8,78	93,88
Cu-0,5FLG-7sa		93,28

3.4.2 XRD analizi

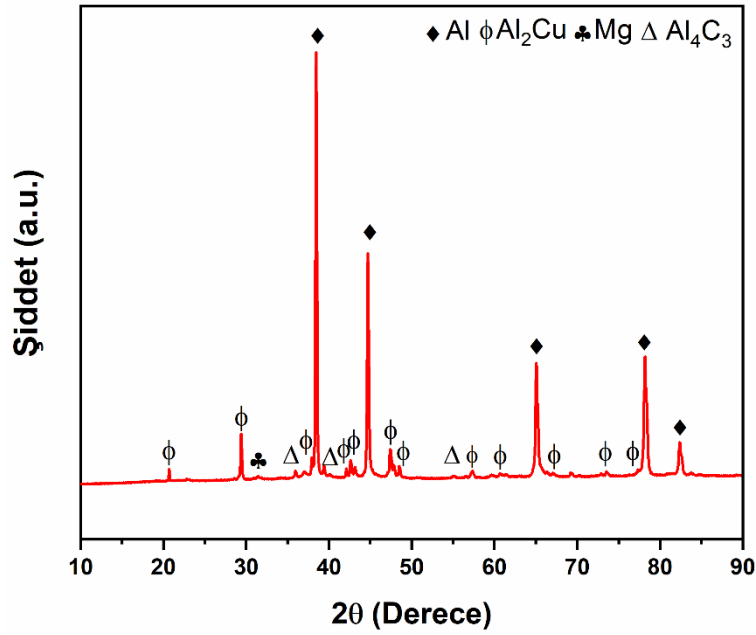
3.4.2.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin XRD analizi

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin sinterleme sonrası faz yapıları, XRD analizleri ile tespit edilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin faz yapılarını gösteren XRD paterni Şekil 3.78'de gösterilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'ye ait XRD paterni incelendiğinde; Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Al_2Cu (Bravais kafes: Hacim merkezli tetragonal, $a=b=0,606$ nm, $c=0,487$ nm) ve Al_4C_3 (Bravais kafes: primitif rombohedral, $a=b=0,3335$ nm, $c=2,4967$ nm) fazları belirlenmiştir. Al_2Cu intermetalik fazı, sinterlemeden sonra Cu'nun Al'da çözünmesi sonucu oluşmaktadır (Cheng ve diğ., 2019). Ayrıca, arayüzey bir oluşum olan Al_4C_3 fazı, karbon bazlı malzemelerle takviye edilen Al matrisli kompozitler için genellikle yüksek sıcaklıklarda ve yavaş soğuma hızlarında gözlenmektedir (Etter ve diğ., 2007; Laha ve diğ., 2007). Bu faz oluşumunu etkileyen birçok faktör vardır ve sinterleme sıcaklığı bunlardan biridir (Bartolucci ve diğ., 2011; Xiong ve diğ., 2020).



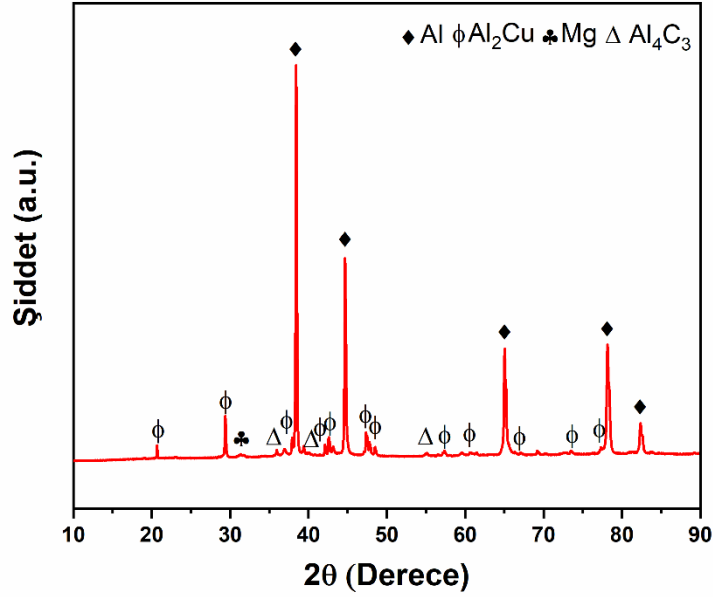
Şekil 3.78 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin XRD paterni.

Şekil 3.79, FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paternini göstermektedir. Şekil 3.79'daki XRD paternine göre, Al (Bravais kafes: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Al_2Cu (Bravais kafes: Hacim merkezli tetragonal, $a=b=0,606$ nm, $c=0,487$ nm), Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) ve Al_4C_3 (Bravais kafes: primitif rombohedral, $a=b=0,3335$ nm, $c=2,4967$ nm) fazları, bu FDM için tespit edilmiştir.



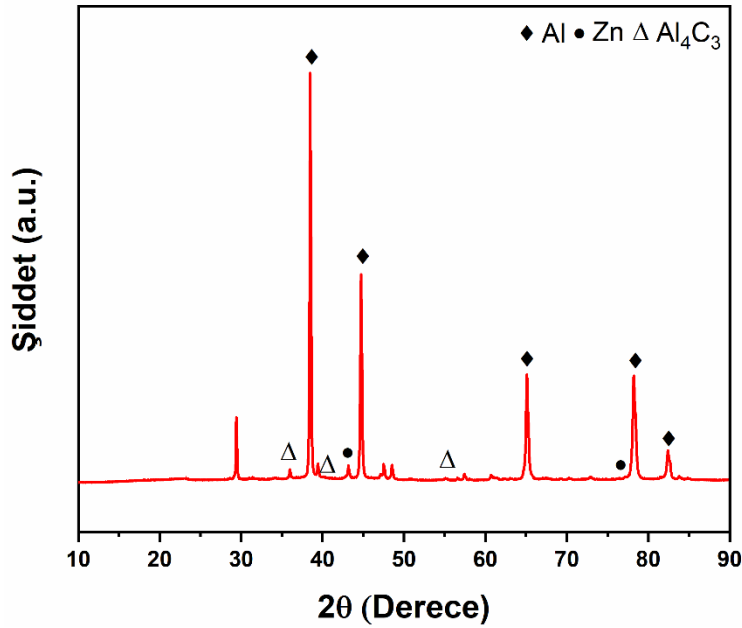
Şekil 3.79 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paterni.

Şekil 3.80, FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin XRD paternini göstermektedir. Şekil 3.80'deki XRD paternine göre, Al, Al_2Cu , Mg ve Al_4C_3 fazları, bu FLG takviyeli FDM numunesi için tespit edilmiştir. Mn fazının, XRD cihazının saptama limiti nedeniyle belirlenemediği düşünülmektedir.



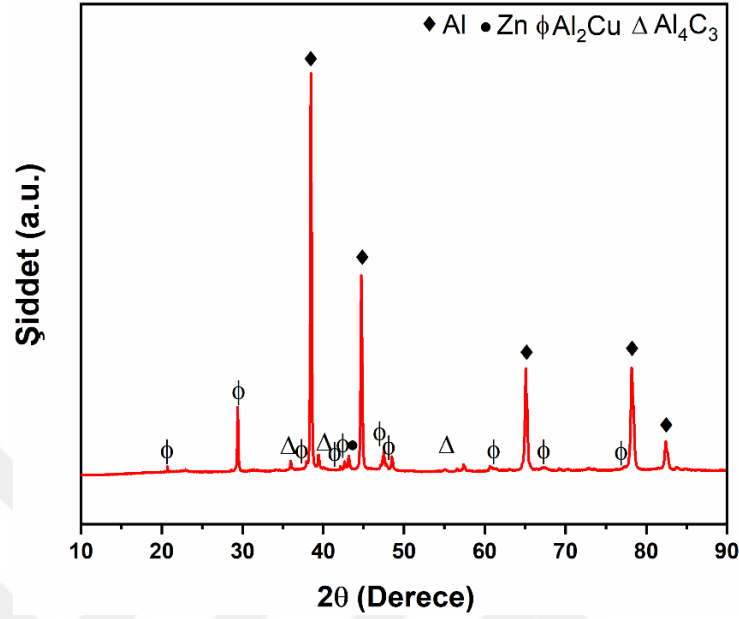
Şekil 3.80 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin XRD paterni.

FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin faz yapılarını gösteren XRD paterni Şekil 3.81'de gösterilmiştir. Şekil 3.81'deki XRD paternine göre, Al, Zn (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) ve Al_4C_3 fazları, tespit edilmiştir.



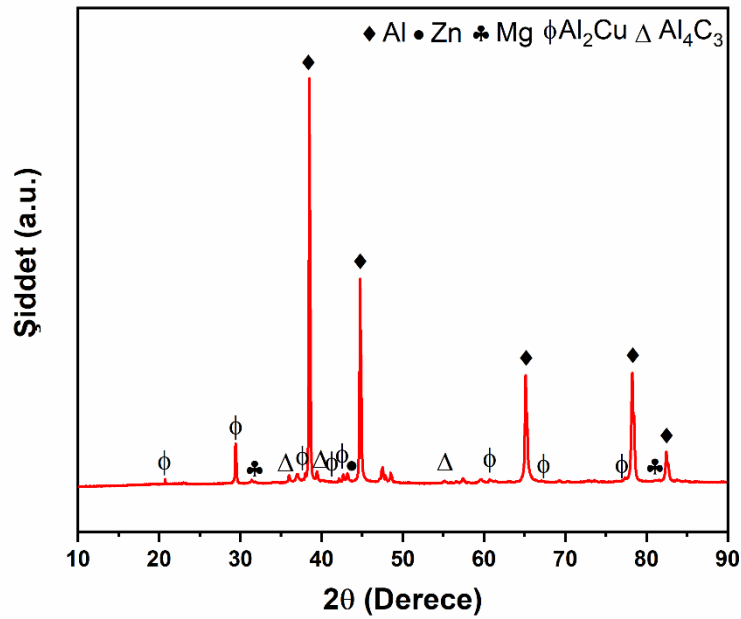
Şekil 3.81 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin XRD paterni.

Şekil 3.82, FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin XRD paternini göstermektedir. Şekil 3.82'deki XRD paternine göre; Al, Zn, ϕ Al₂Cu ve Al₄C₃ fazları bu FLG takviyeli FDM için tespit edilmiştir.



Şekil 3.82 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin XRD paterni.

Şekil 3.83, FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paternini göstermektedir. Şekil 3.83'deki XRD paternine göre; Al, Zn, Mg Mg (Bravais kafes: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm), Al₂Cu ve Al₄C₃ fazları FDM için belirlenmiştir.

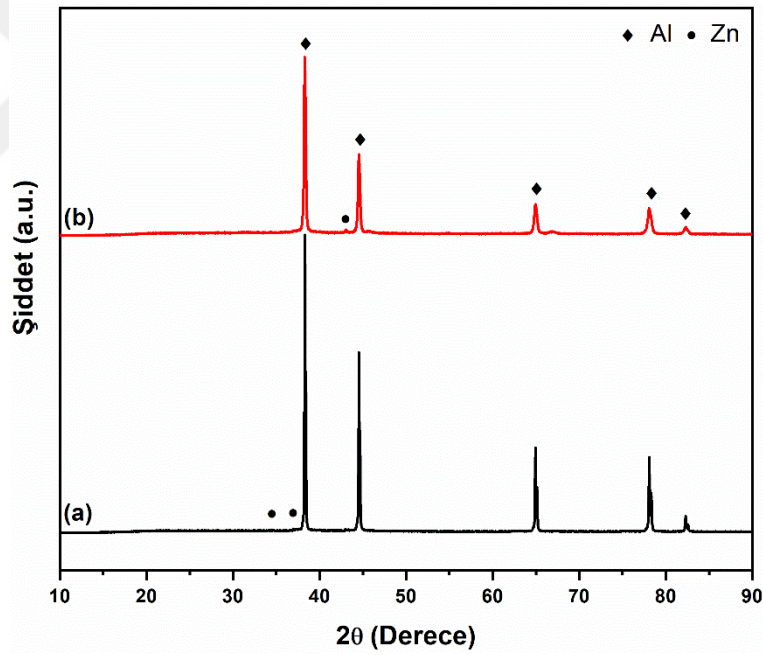


Şekil 3.83 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin XRD paterni.

3.4.2.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin XRD analizi

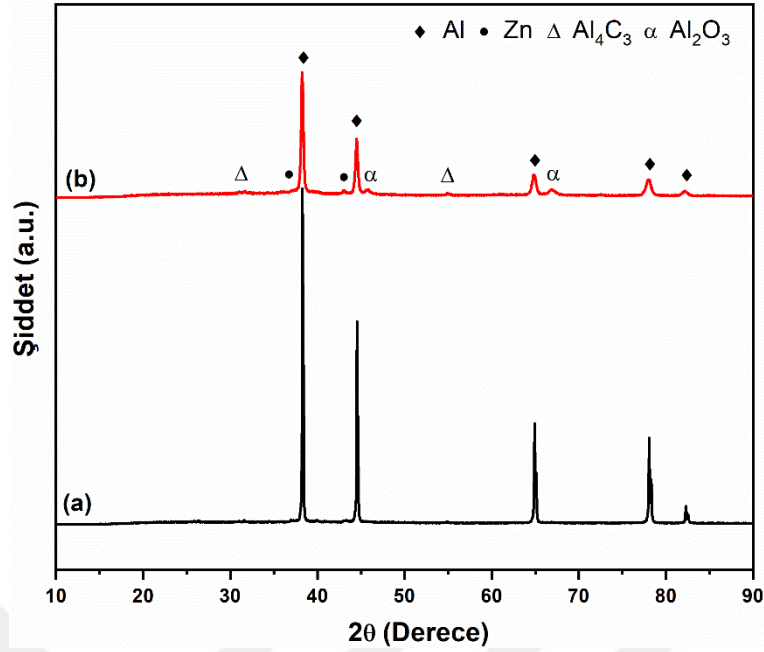
Al-7,5Zn esaslı alaşım ve kompozitlerin sinterleme sonrası faz yapıları, XRD analizleri ile belirlenmiştir. 0 ve 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn alaşımı ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerinin faz yapılarını gösteren XRD paternleri, sırasıyla, şekil 3.84 ve şekil 3.85’de belirtilmiştir.

AlZn-0sa ve AlZn-4sa alaşımlarının, sırasıyla, şekil 3.84(a) ve (b)’de verilen XRD paternlerinde Al (Bravais kafesi: YMK kúbik, $a=b=c=0,405$ nm) ve Zn (Bravais kafesi: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) fazları belirlenmiştir. MA ile elde edilen kompozitlerin yapısında, öğütme ortamının aşınmasından kaynaklanan Fe veya oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir empüriteye rastlanmadığı görülmüştür. Ayrıca, şekil 3.84(a) ve (b) kıyaslandığında 4 sa MA ile birlikte piklerin şiddetlerinin azalarak pik genişliklerinin arttığı da gözlenmektedir.



şekil 3.84 : Al-7,5Zn alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.

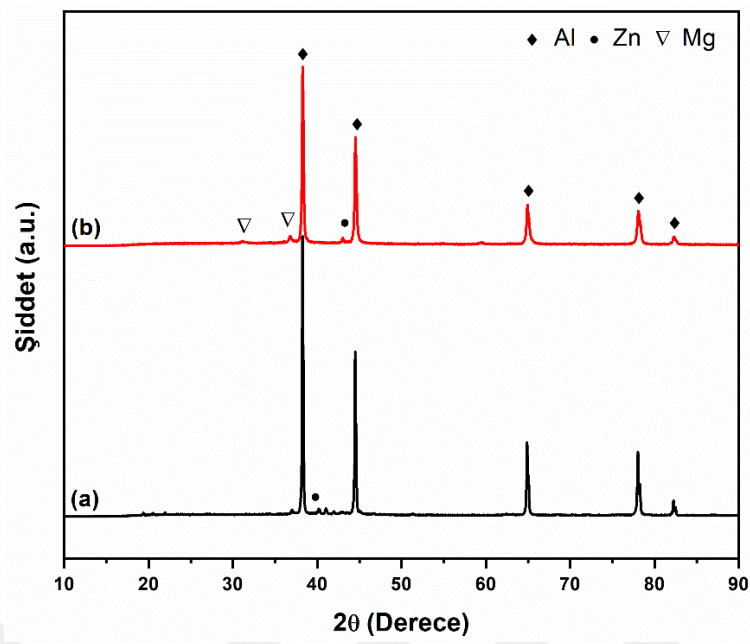
Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitin şekil 3.85’de verilen XRD paternlerinde, Al ve Zn fazıyla birlikte, ayrıca Al_4C_3 (Bravais kafesi: primitif rombohedral, $a = b = 0,3335$ nm, $c = 2,4967$ nm) ve Al_2O_3 (Bravais kafesi: YMK kúbik, $a=b=c=7,906$ nm) fazları tespit edilmiştir.



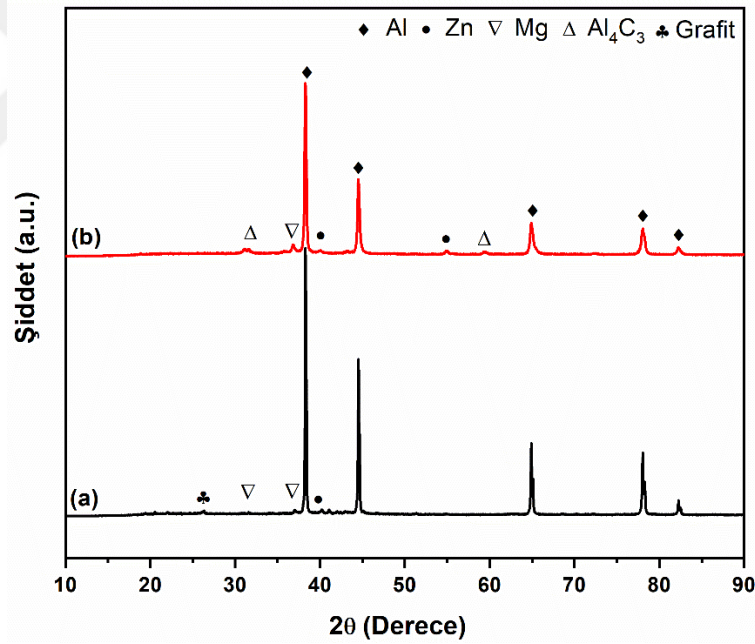
Şekil 3.85 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.

0 ve 4 sa MA ile üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımı ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin faz yapılarını gösteren XRD paternleri sırasıyla Şekil 3.86 ve Şekil 3.87’de verilmiştir. AlZnMg-0sa ve AlZnMg-4sa alaşımlarının, sırasıyla, Şekil 3.86(a) ve (b)’de verilen XRD paternlerinde, Al (Bravais kafesi: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafesi: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$ nm, $c=0,494$ nm) ve Mg (Bravais kafesi: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) fazları belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 3.86(a) ve (b) kıyaslandığında 4 sa MA uygulandıktan sonra, piklerin şiddetlerinin bir miktar azalarak pik genişliklerinin arttığı da gözlemlenmiştir.

Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin Şekil 3.87’de verilen XRD paternlerinde; Al, Zn, Mg fazlarıyla birlikte Al_4C_3 (Bravais kafesi: primitif rombohedral, $a = b = 0,3335$ nm, $c = 2,4967$ nm) fazı tespit edilmiştir. Harmanlanarak elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitinde; Şekil 3.2’de gösterilen FLG’ye ait XRD paterniyle uyumlu gözüken, grafitte ait bir pikin mevcudiyeti görülmüştür. Ayrıca, 0 ve 4 sa MA ile elde edilen kompozit tozlarının XRD paterni kıyaslandığında, 4 sa MA uygulanan kompozitlere ait XRD paterninde pik şiddetlerinin bir miktar azaldığı ve pik genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir.



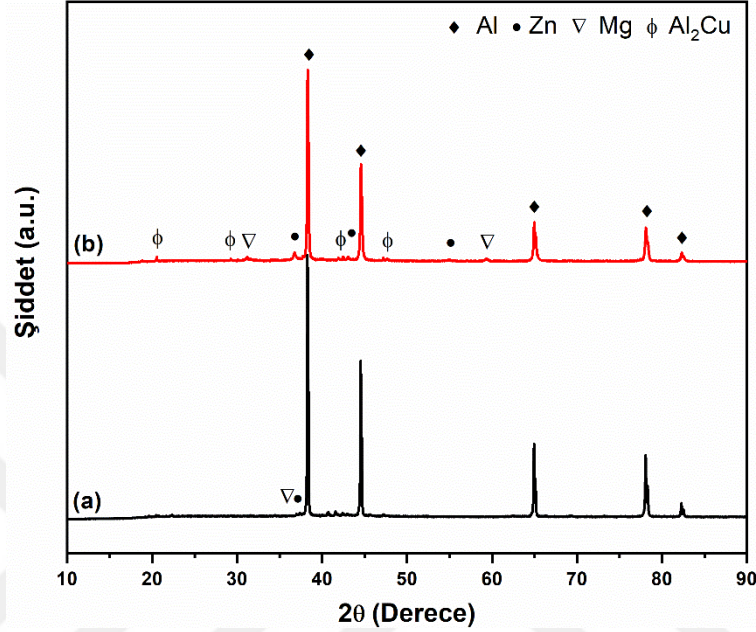
Şekil 3.86 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.



Şekil 3.87 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.

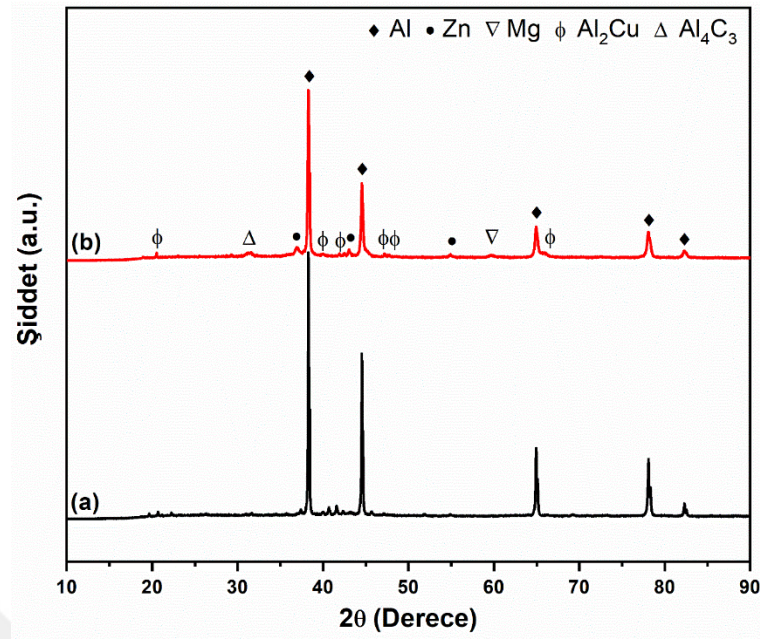
0 ve 4 sa MA ile üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımı ve ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin faz yapılarını gösteren XRD paternleri, sırasıyla, Şekil 3.88 ve Şekil 3.89’da verilmiştir. AlZnMgCu-0sa ve AlZnMgCu-4sa alaşımlarının, sırasıyla, Şekil 3.88(a) ve (b)’de verilen XRD paternlerinde, Al (Bravais kafesi: YMK, $a=b=c=0,405$ nm), Zn (Bravais kafesi: primitif hegzagonal, $a=b=0,266$

nm, $c=0,494$ nm), Mg (Bravais kafesi: primitif hegzagonal, $a=b=0,322$ nm, $c=0,523$ nm) ve Al_2Cu (Bravais kafesi: Hacim merkezli tetragonal, $a=b=0,606$ nm, $c=0,487$ nm) fazları belirlenmiştir. Ayrıca, 0 ve 4 sa MA ile elde edilen alaşım tozlarının XRD paterni kıyaslandığında, 4 sa MA uygulanan alaşımlara ait XRD paterninde pik şiddetlerinin bir miktar azaldığı ve pik genişliklerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 3.88 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.

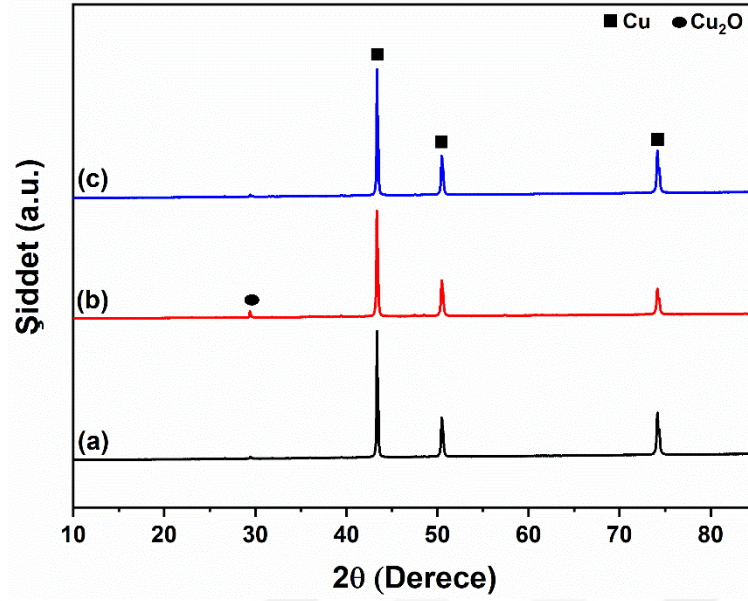
Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin Şekil 3.89’da verilen XRD paternlerinde; Al, Zn, Mg, Al_2Cu fazlarıyla birlikte, Al_4C_3 (Bravais kafesi: primitif rombohedral, $a = b = 0,3335$ nm, $c = 2,4967$ nm) fazları tespit edilmiştir. Ayrıca, 0 ve 4 sa MA ile elde edilen kompozit tozlarının XRD paternleri kıyaslandığında; 4 sa MA uygulanan kompozitlere ait XRD paterninde pik şiddetlerinin bir miktar azaldığı ve pik genişliklerinin arttığı bu kompozit tozlarında da gözlemlenmiştir.



Şekil 3.89 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin XRD paternleri: (a) 0 sa, (b) 4 sa.

3.4.2.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin XRD analizi

Farklı öğütme sürelerinde (5 ve 7 sa) üretilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin, sinterleme sonrası fazlarını ifade eden XRD paternleri, Şekil 3.90’da gösterilmiştir. Cu (Bravais kafes: YMK $a=b=c=3,62$ nm) fazına ait ana karakteristik pikler, XRD paternlerinde tespit edilmiştir. Matris yapısındaki düşük içeriği ve XRD ekipmanının duyarlılığı nedeniyle, FLG'ye ait karakteristik pikler gözlemlenmemiştir (Esawi ve diğ., 2010; Gao ve diğ., 2016; Zhang ve diğ., 2016). Ayrıca sinterleme sonrası, üretilen kompozitler hava ortamında bekletildiğinden, yüzeydeki Cu atomlarının oksijen ile temasından dolayı az miktarda bakır oksit (Cu_2O) fazı (Bravais kafes: YMK $a=b=c=0,426$ nm) XRD paternlerinde tespit edilmiştir.

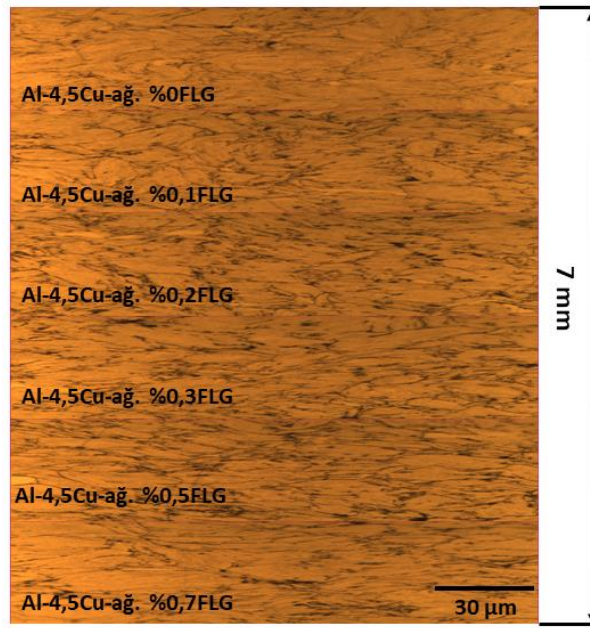


Şekil 3.90 : (a) Takviyesiz Cu; ağı. %0,5 FLG takviyeli (b) 5 sa ve (c) 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli kompozitlerin XRD paternleri.

3.4.3 Mikroyapı incelemesi

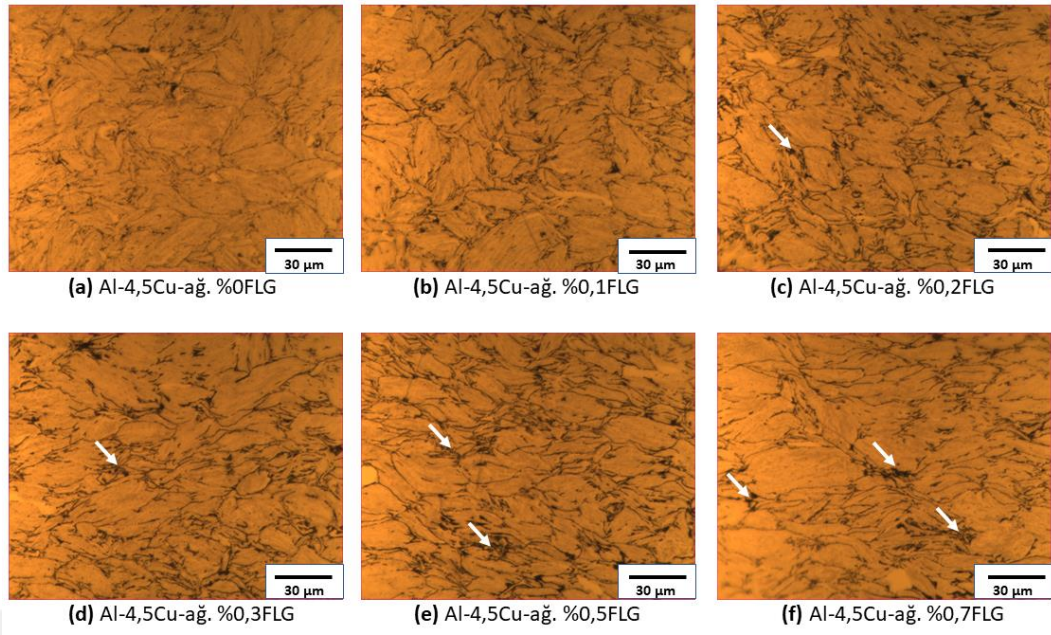
3.4.3.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin mikroyapısal karakterizasyonu

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin mikro yapı görüntüleri, FDM'lerin kesitleri baz alınarak, her bir katman boyunca, yaklaşık 7 mm kısmından inceleme yapılarak alınmıştır. Şekil 3.91'de T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'lerin sinterleme sonrası optik görüntüleri, artan FLG içeriklerine göre, Al-4,5Cu matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. FLG içeriği yoğun olan katmanlara doğru olan bölgelere gidildikçe, tane yapılarının daha ince ve yassı görüldüğü gözlemlenmiştir.



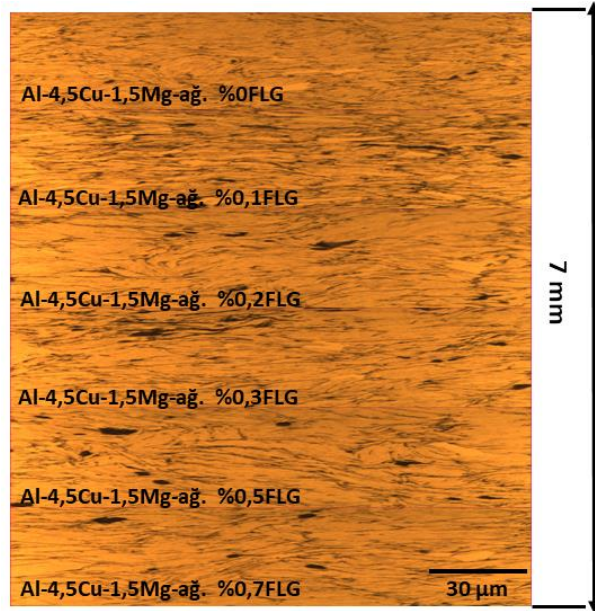
Şekil 3.91 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 3.92 (a)-(f), her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %0, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-4,5Cu esaslı FDM'nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini ifade etmektedir. FLG'nin, matris yapısında homojen olarak dağıldığı açıkça görülmektedir. Al-4,5Cu esaslı alaşım matrisindeki FLG içeriğinin ağ. %0'dan %0,7'ye doğru artması, FLG'nin matris yapısında birer bariyer görevi görmesini sağlar. Bu nedenle, tane boyutunun küçülmesine ve ince taneli yapıların oluşmasına neden olur (Latief ve Sherif, 2012). Ayrıca, optik görüntüler, daha ince taneli parçacıkların, yüksek gözenekliliğe işaret eden içi boş yapılara sahip olarak, topaklaşma eğiliminde olduğunu göstermektedir (Tatar ve Özdemir, 2010). Tane sınırlarında kümelenmiş bir şekilde FLG yapıları göze çarpmaktadır. Şekil 3.92(c)-(f)'de belirtilen beyaz oklar, bu kümelenmiş yapıları ifade etmektedir. Al-4,5Cu esaslı alaşım yapısında FLG'nin ağırlık fraksiyonu arttıkça; FLG'nin homojen dağılımı, FDM'nin derecelendirilmesine göre mekanik özelliklerde iyileşme sergilemektedir (Udupa ve diğ., 2015).



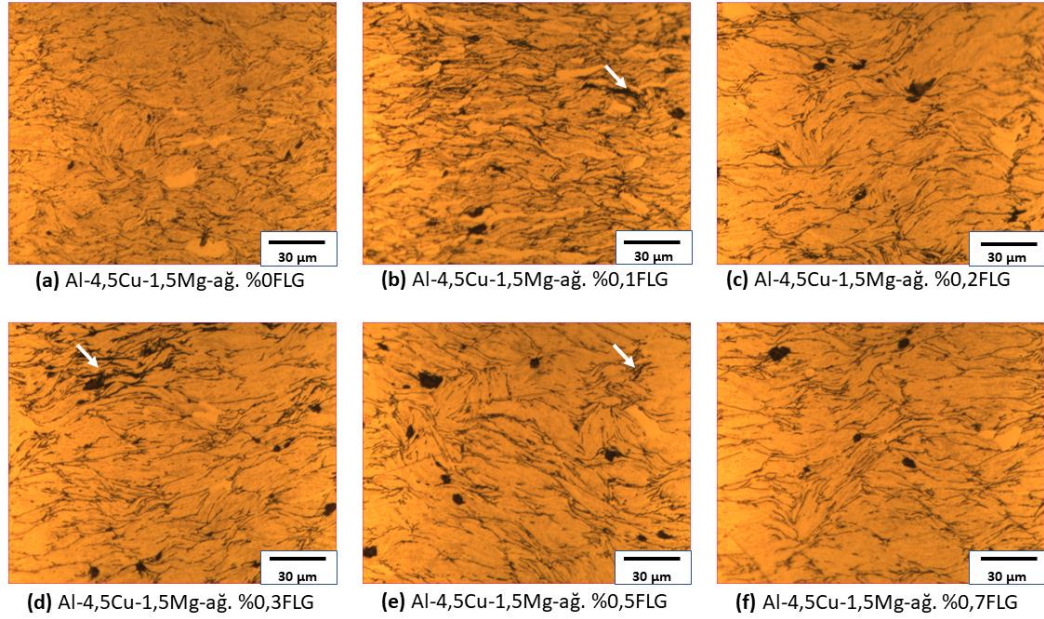
Şekil 3.92 : Ağ. (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

Şekil 3.93; T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM'nin sinterleme sonrası optik görüntüleri, artan FLG içeriklerine göre, Al-4,5Cu-1,5Mg matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. FLG'lerin matris yapısında homojen bir şekilde dağıldığı ve FLG içeriği arttıkça tanelerin boyutunun azaldığı görülmektedir.



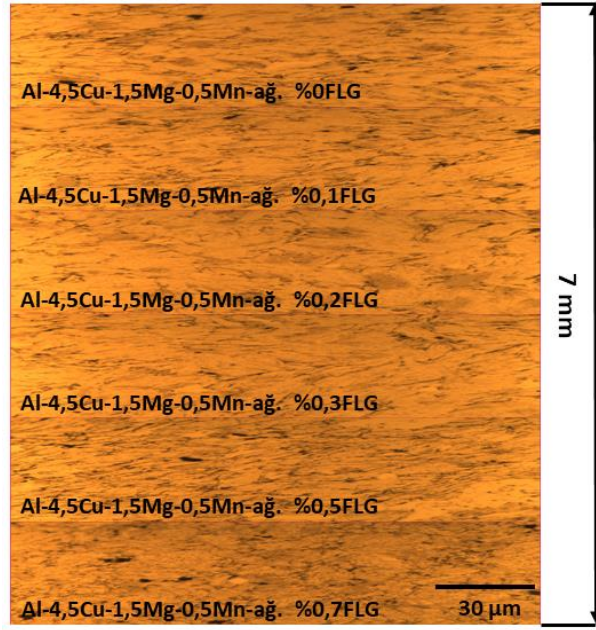
Şekil 3.93 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 3.94(a)-(f), her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM'nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini göstermektedir. FLG'lerin her bir katmanda homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Matris yapısında boşluklar göze çarparken, aynı zamanda bu boşluklara FLG'lerin kümelenmiş olabileceği düşünülmektedir. Beyaz okla gösterilen yapılar, bu kümelenmiş boşlukları ifade etmektedir. Tane boyutunun azalması, bu alaşım serisine ait FDM tasarımı da görülmektedir.



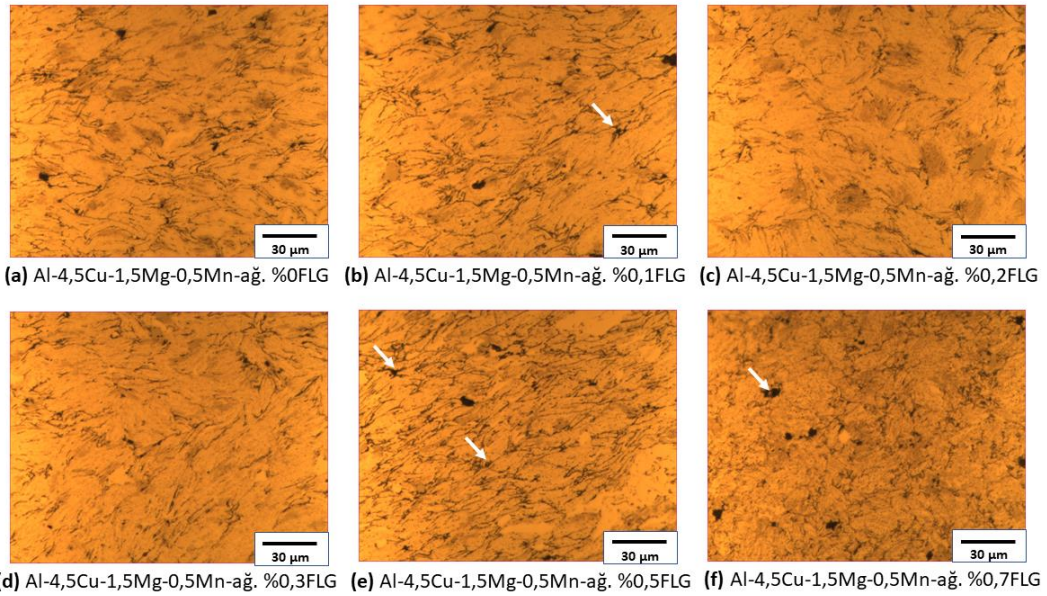
Şekil 3.94 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

Şekil 3.95'de verilen; T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM'nin sinterleme sonrası optik görüntüleri; artan FLG içeriklerine göre, Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. Yukarıdan aşağıya doğru katmanlar arası FLG'lerin alaşım matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Artan FLG içeriğine göre, katmanlar boyunca tane boyutunun azaldığı tespit edilmiştir.



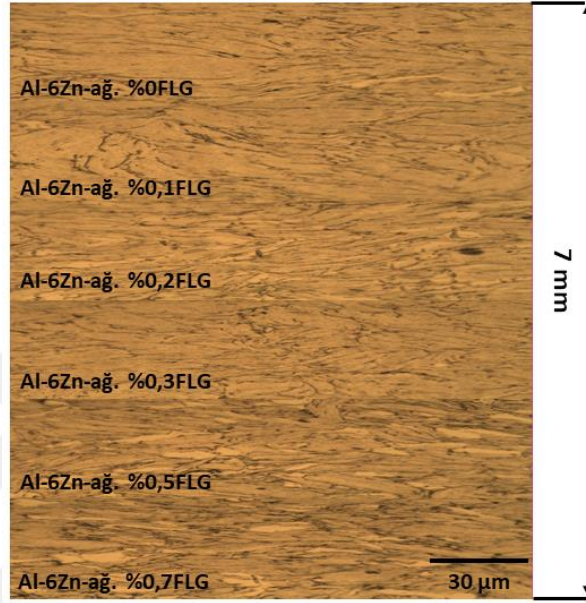
Şekil 3.95 : FLG içeriklerinin Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 3.96(a)-(f), her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %0, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM'nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini göstermektedir. Her bir katmanda FLG'lerin homojen dağılım gösterdiği ve bazı katmanlarda boşluklu yapılar görülmektedir. Beyaz oklarla gösterilen bu yapılarda FLG'lerin kümelenmiş olduğu bu alaşım serisinde de düşünülmektedir.



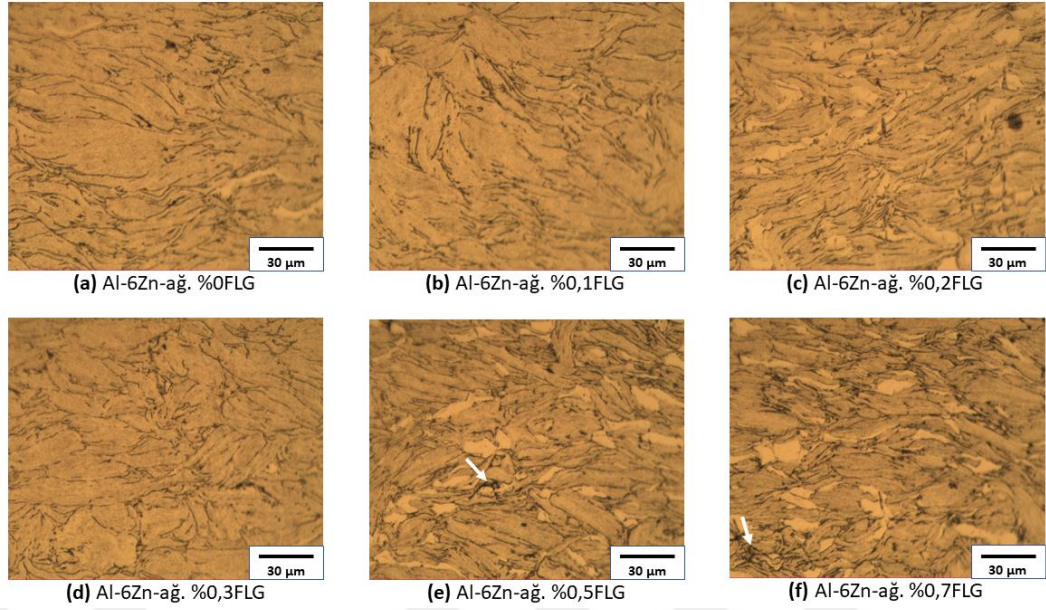
Şekil 3.96 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-4,5Cu-1,5Mg-0,5Mn esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

Şekil 3.97’de ifade edilen T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-6Zn esaslı FDM’nin sinterleme sonrası optik görüntüleri; artan FLG içeriklerine göre, Al-6Zn matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. FLG’lerin katmanlar boyunca homojen dağıldığı görülmektedir. Ayrıca, her bir katmanda, artan FLG içeriğine göre, tanelerin yassılaştığı ve tane boyutunun da azaldığı tespit edilmiştir.



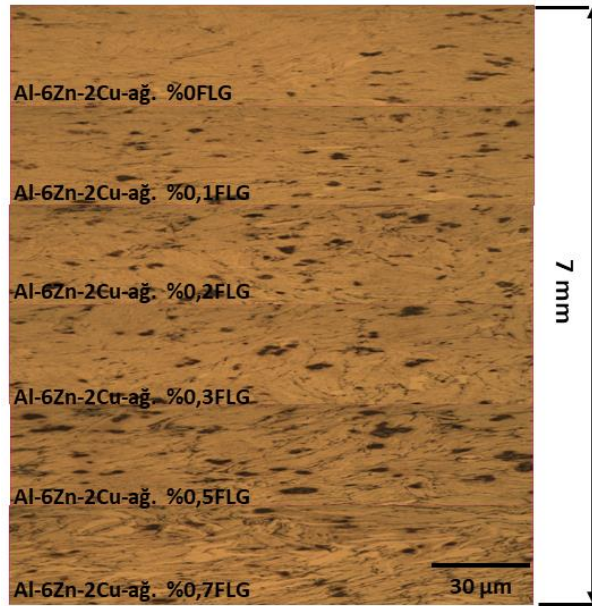
Şekil 3.97 : FLG içeriklerinin Al-6Zn esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 3.98(a)-(f), her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %0, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-6Zn esaslı FDM’nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini göstermektedir. Katmanlar boyunca, FLG’lerin homojen dağıldığı görülmektedir. Beyaz oklarla gösterilen yapılarda, FLG’lerin tane sınırlarında kümелendiği bu alaşım serisine ait FDM’ler için de düşünülmektedir. Her bir katman için mikro yapılara bakıldığında; alaşım matrisinde FDM’lerin tasarımına bağlı olarak, FLG içeriğinin yukarıdan aşağıya artmasıyla birlikte FLG’lerin yapıda taneleri sararak birer bariyer görevi görmektedir ve bu mikro yapıya bağlı olarak tane boyutunun azalmasıyla mekanik özelliklerinde iyileşme beklenmektedir (Kumar ve Xavier, 2017).



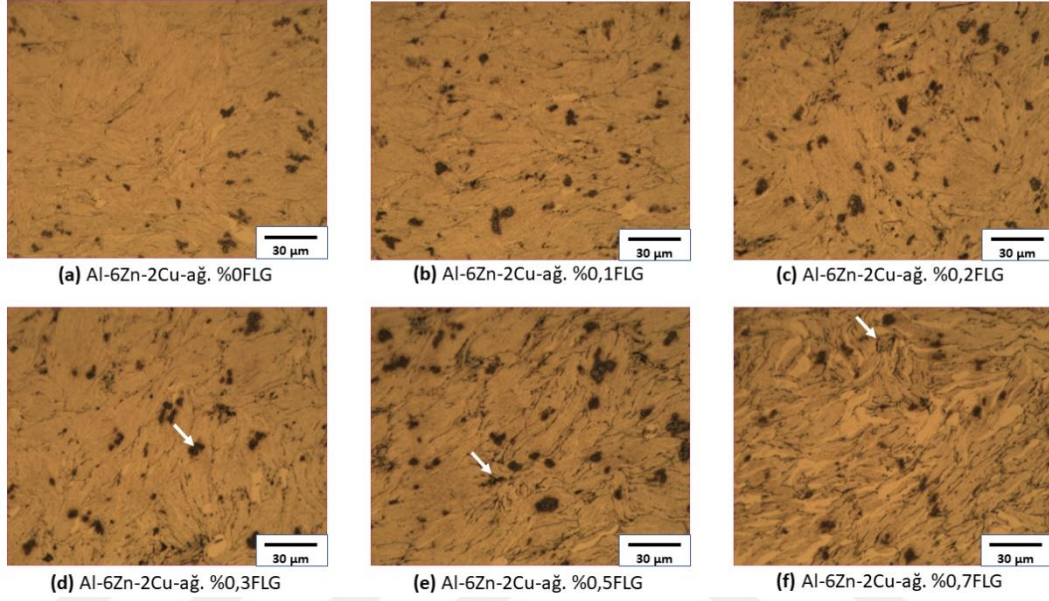
Şekil 3.98 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

Şekil 3.99'de verilen; T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı FDM'nin sinterleme sonrası optik görüntüleri, artan FLG içeriklerine göre, Al-6Zn-2Cu matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. FLG'lerin alaşım matrisinde, katman katman olacak şekilde, yukarıdan aşağıya doğru homojen bir dağılım içinde olduğu görülmektedir. Katmanlar boyunca artan FLG içeriğine göre, tane boyutunun azalması ve tanelerin yassılaşması tespit edilmiştir.



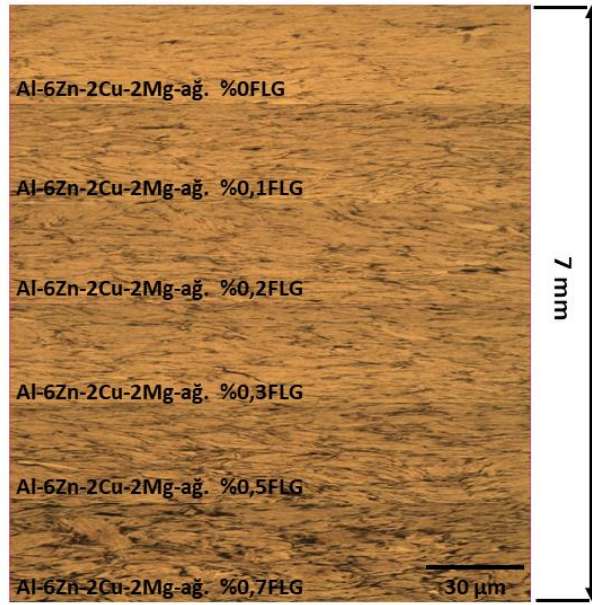
Şekil 3.99 : FLG içeriklerinin Al-6Zn-2Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 3.100(a)-(f); her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-6Zn-2Cu esaslı FDM'nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini göstermektedir. Her bir katmanda, tane boyutunun azaldığı ve tanelerin yassı bir görünüme sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, matriste yoğun olarak boşluklu yapılar göze çarpmaktadır. Beyaz okla gösterilen yapılarda, FLG'lerin kümelenmiş bir şekilde tane sınırlarına yerleştiği düşünülmektedir.



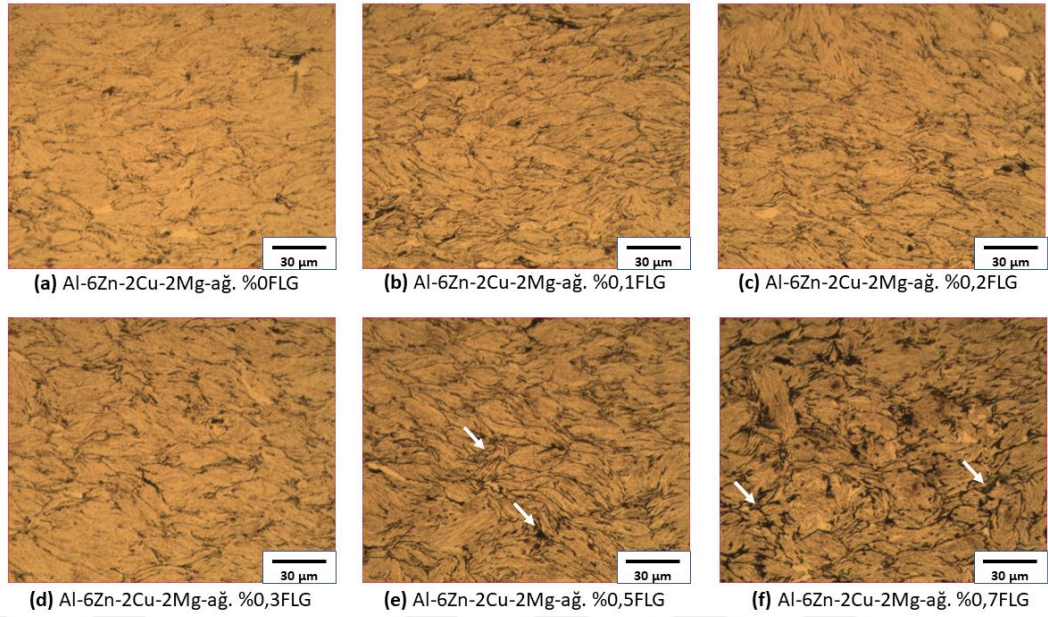
Şekil 3.100 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

Şekil 3.101'de verilen; T/M ile üretilen FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM'nin sinterleme sonrası optik görüntüleri; artan FLG içeriklerine göre, Al-6Zn-2Cu-2Mg matrisi içerisinde yukarıdan aşağı doğru nasıl bir şekilde derecelendirildiğini göstermektedir. Katmanlar boyunca, artan FLG içeriği baz alındığında, tane boyutunun azaldığı ve tanelerin gittikçe yassılaştığı açıkça görülmektedir. FLG'lerin matris yapısında homojen olarak dağıldığı düşünülmektedir.



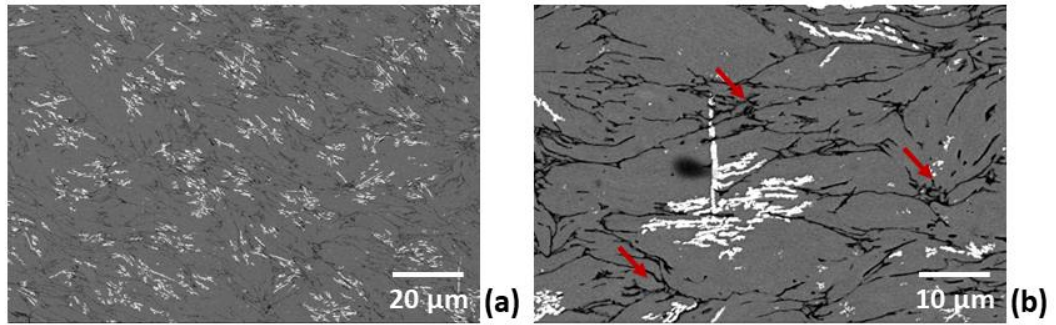
Şekil 3.101 : FLG içeriklerinin Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.

Şekil 102(a)-(f), her bir katmanında farklı oranlarda FLG içeriklerine sahip (ağ. %0, %0,1; %0,2; %0,3; %0,5 ve %0,7) Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM'nin, 50X büyütme ile optik görüntülerini göstermektedir. Her bir katman için, FLG'lerin matris yapısında homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Artan FLG içeriğine göre, katmanlar boyunca, tane boyutunun gittikçe azaldığı ve yassı bir görünüme sahip olduğu tespit edilmiştir. Beyaz oklarla gösterilen tane sınırlarında kümelenmiş FLG yapılarının, matriste bariyer görevi oluşturarak, aşağıdan yukarıya doğru, artan FLG içeriğine göre, FDM tasarımı baz alınarak, FDM'nin mekanik özelliklerinde iyileşme gösterebileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.102 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al-6Zn-2Cu-2Mg esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.

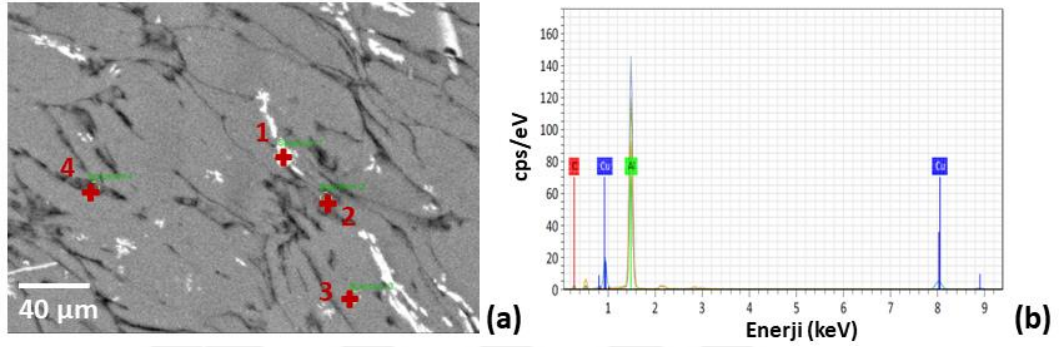
Şekil 3.103(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM numunelerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle uyumlu olduğu görülen SEM görüntülerinde, FLG'lerin Al-Cu esaslı matriste homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmektedir. FLG'lerin matriste arayüz olarak işlev gördüğü ve yapı içerisinde birer köprü görevinde olup, tane boyutunu azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 3.103 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen noktalardan elde edilen EDS spektrumu, Şekil 3.104'de gösterilmektedir. Çizelge 3.22, Şekil 3.104(a)'da kırmızı olarak işaretlenen noktalardan alınan EDS sonuçlarını ifade etmektedir. "1" ile işaretlenen noktasal bölgede, ince ve parçalanmış parlak parçaların XRD sonuçlarında da (Şekil 3.78) tespit edilen Al_2Cu intermetalik

fazının varlığına işaret ettiği görülmektedir. Ayrıca, FDM'lerin yapısındaki Al_2Cu fazının homojen ve ince dağılımı, MA prosesinden kaynaklanan, tane boyutunun azalmasını ve kafesin düzensizliğine atfedilebilir (Khoshghadam-Pireyousefan ve diğ., 2020; Suryanarayana, 2001). İşaretlenen 2 ve 4 bölgelerindeki, ağırlık %Al ve %C oranlarının mevcudiyeti düşünülerek, XRD sonuçlarıyla (Şekil 3.78) uyumlu olarak o bölgelerde, Al_4C_3 ara bileşiğinin varlığı düşünülebilir. Aynı zamanda, Al_4C_3 fazının, optik mikroskop görüntülerinde (Şekil 3.92) varsayılan kümelenmiş FLG ile birlikte yapıda da mevcudiyeti mümkün olabilir.

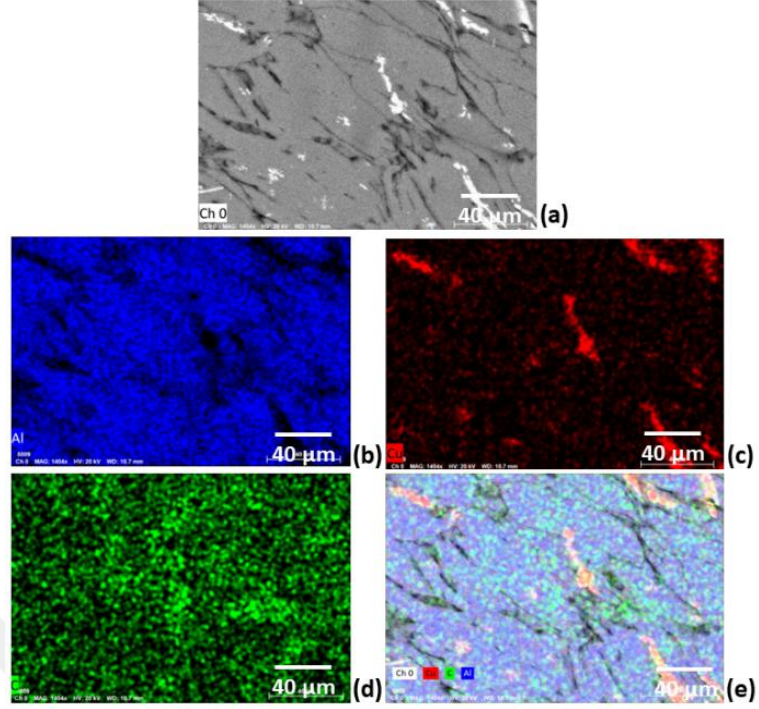


Şekil 3.104 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.22 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'e ait Şekil 3.104(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

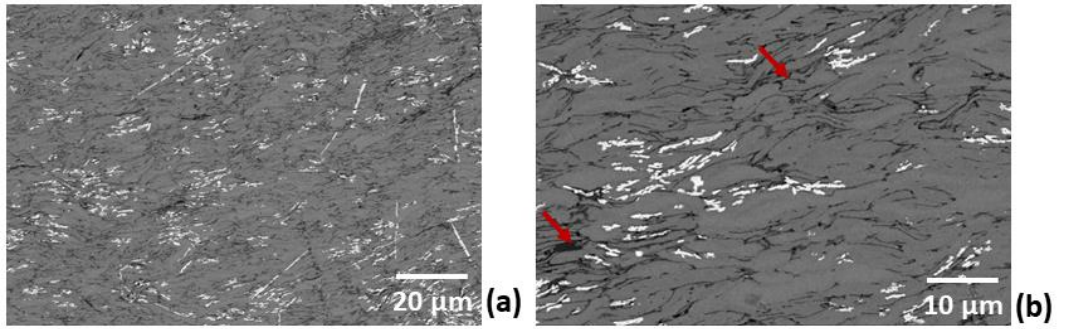
Nokta	Al (ağırlık %)	Cu (ağırlık %)	C (ağırlık %)
1	51,01	28,04	20,95
2	67,93	0,80	31,27
3	79,17	0,97	19,86
4	73,85	1,45	24,70

Şekil 3.105(a)-(e), FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin; Al, Cu ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Oldukça yoğun bir yapı açıkça görülmektedir ve C elementinin matris yapısındaki mevcudiyeti değerlendirilerek, FLG'nin, FDM'lerin matris yapısında homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir. Ayrıca, Al_2Cu intermetalik fazı, matris yapısında ince ve iyi bir dağılım göstermiştir.



Şekil 3.105 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

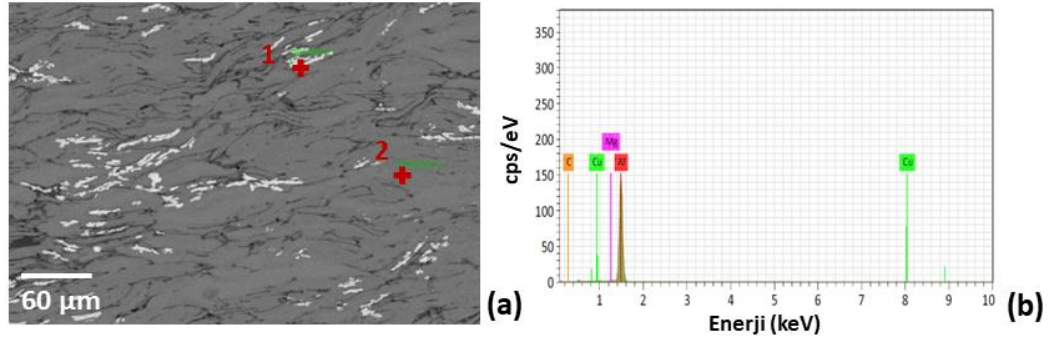
Şekil 3.106(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM numunelerinin, sırasıyla, farklı büyütmelerdeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle uyumlu görünen SEM görüntülerinde, FLG ve ince parçacık halinde parlak olarak gözükten Al_2Cu intermetalik fazının homojen bir şekilde yapıda olduğu görülmektedir. Kırmızı okla gösterilen yapıların, tane sınırlarında kümelenmiş FLG'ler olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.106 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen noktalardan elde edilen EDS spektrumu, sırasıyla, Şekil 3.107 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Çizelge 3.23; Şekil 3.107(a)'da kırmızı olarak işaretlenen

noktalardan alınan EDS sonuçlarını ifade etmektedir. “1” ile işaretlenen kırmızı noktada intermetalik Al_2Cu bileşiğinin mevcut olduğu ve matris yapısında homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

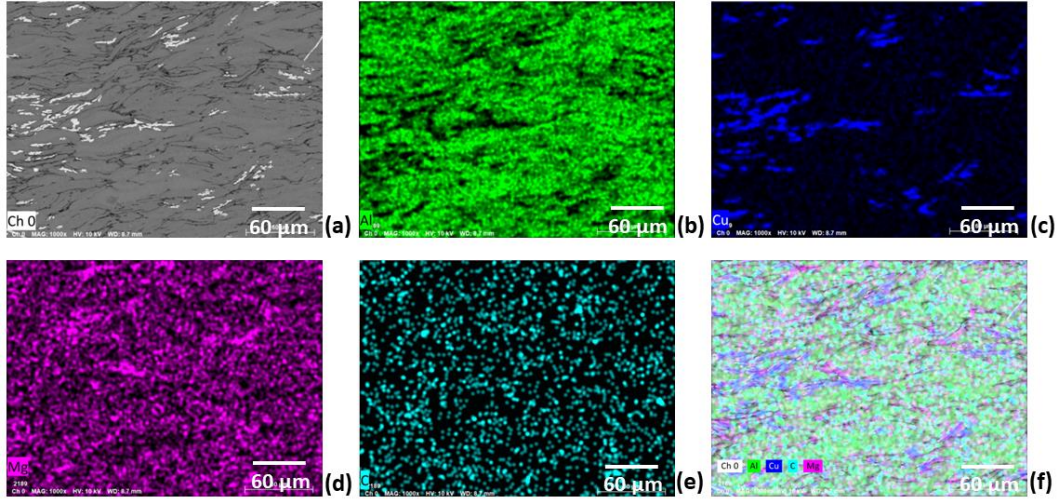


Şekil 3.107 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM’nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)’da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.23 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM’e ait Şekil 3.107(a)’daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

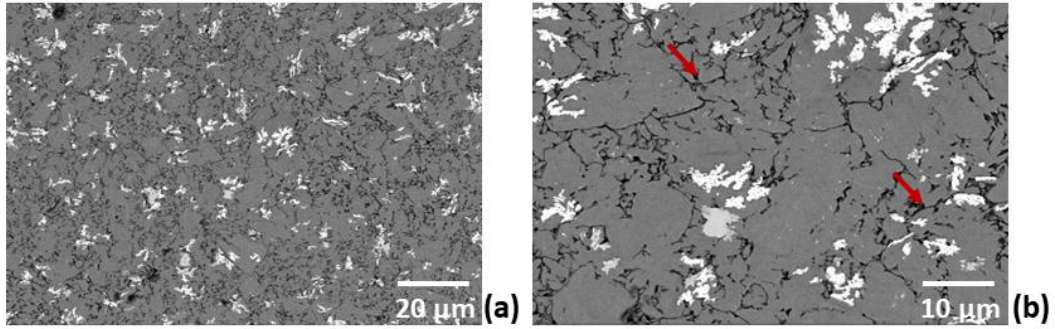
Nokta	Al (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	67.03	30,38	1,00	1,60
2	96,52	0,79	0,78	1,91

Şekil 3.108(a)-(f); FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM’nin; Al, Cu, Mg ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Al_2Cu intermetalik fazı, matris yapısında homojen olarak ince partiküller hâlinde dağılım göstermektedir. Ayrıca tane sınırlarında kümelenen FLG’nin, FDM’lerin matris yapısında homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir.



Şekil 3.108 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) Mg, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

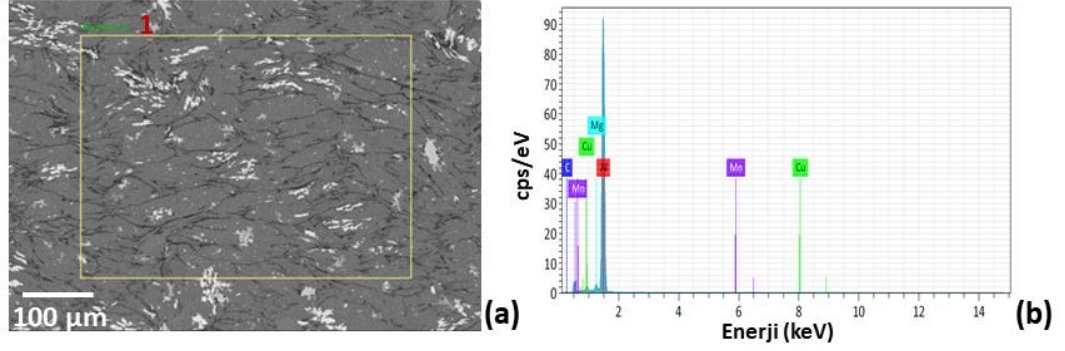
Şekil 3.109(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin, sırasıyla, 300X ve 1000X farklı büyütmelerindeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle (Şekil 3.96) uyumlu görünen SEM görüntülerinde, kırmızı oklarla gösterilen yapıların tane sınırlarında biriken FLG'ler; diğer alaşım serilerine ait FDM tasarımlarda olduğu gibi burada da göze çarpmaktadır.



Şekil 3.109 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen alandan elde edilen EDS spektrumu, sırasıyla, Şekil 3.110(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Matris yapısındaki ikincil fazların dağılımı, Çizelge 3.24'de, Şekil 3.110(a)'da belirlenen alandan alınan EDS sonuçları ile ifade edilmiştir. Şekil 3.111(a)-(g), FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin; Al, Cu, Mg, Mn ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Matris yapısındaki ikinci fazların dağılımının homojen olduğu görülmektedir. Tane

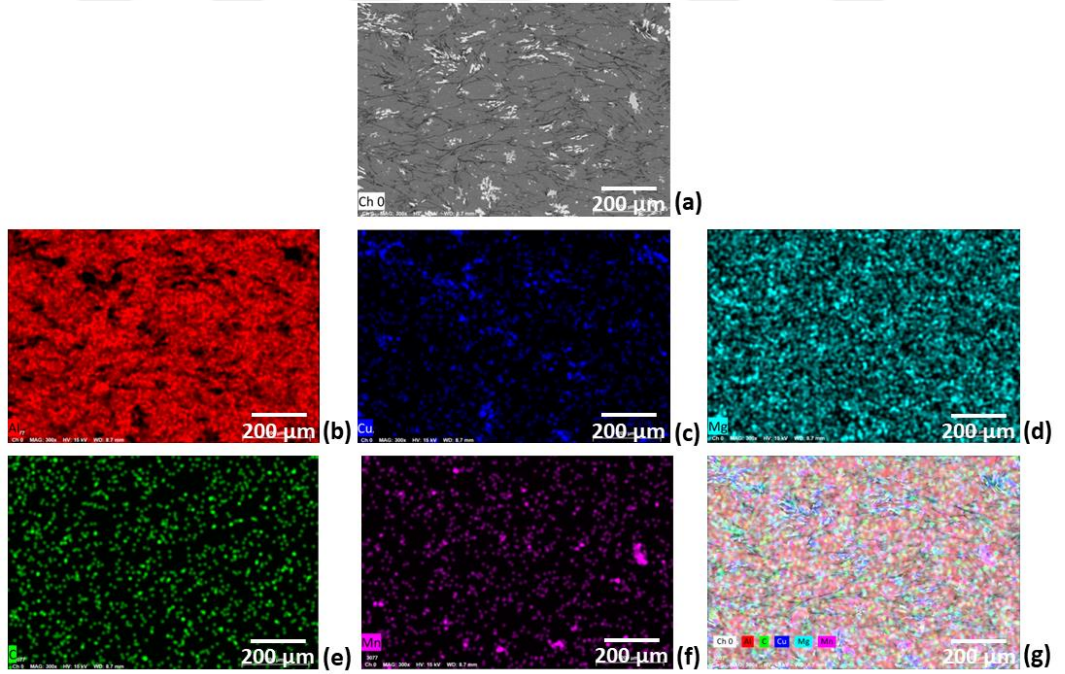
sınırlarında kümелendiği düşünölen FLG'lerin, matris yapısında iyi bir şekilde dağıldığı düşünölmektedir.



Şekil 3.110 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

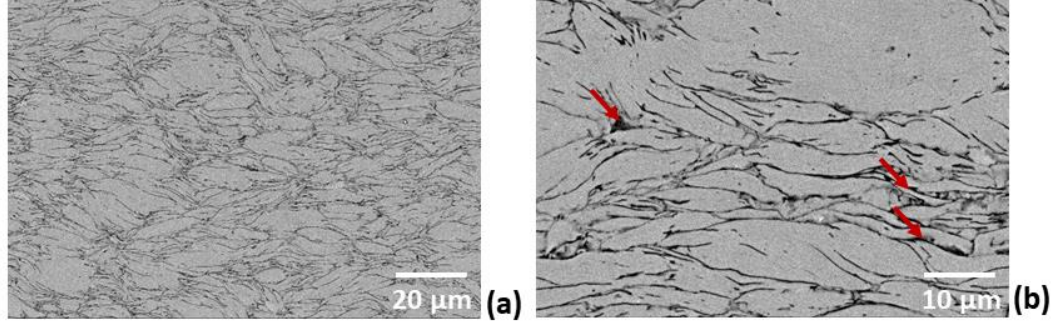
Çizelge 3.24 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'e ait Şekil 3.110(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

Alan	Al (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Mn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	84,27	1,44	2,31	0,12	11,87



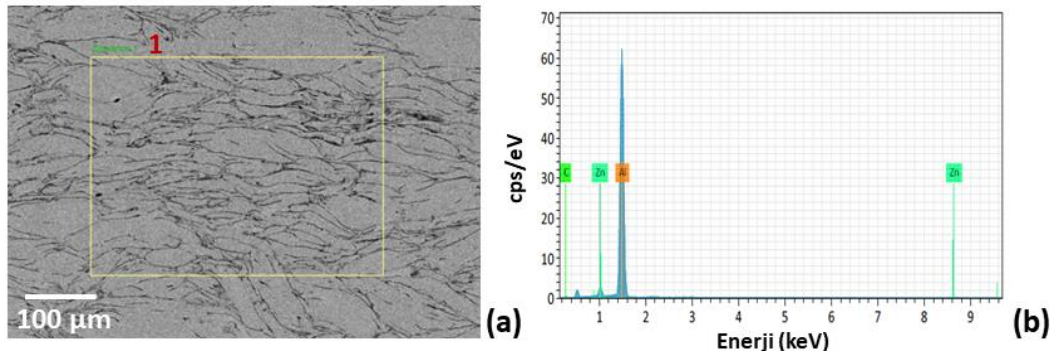
Şekil 3.111 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) Mg, (e) Mn (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

Şekil 3.112(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin sırasıyla, 300X ve 1000X farklı büyütmelerindeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle (Şekil 3.98) uyumlu olan SEM görüntülerinde, yassılaştırmış tane boyutları göze çarpmaktadır. Kırmızı oklarla gösterilen boşluklu yapılarda, FLG'lerin kümelenmiş bir şekilde olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.112 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen alandan elde edilen EDS spektrumu, sırasıyla, Şekil 3.113(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Matris yapısındaki ikincil fazların dağılımı, Çizelge 3.25'de, Şekil 3.113(a)'da belirlenen alandan alınan EDS analiz sonuçları ile ifade edilmiştir. Matris yapısında, ikincil alaşım elementi olan Zn ve FLG takviyesinin homojen olarak dağılım gösterdiği söylenebilir.

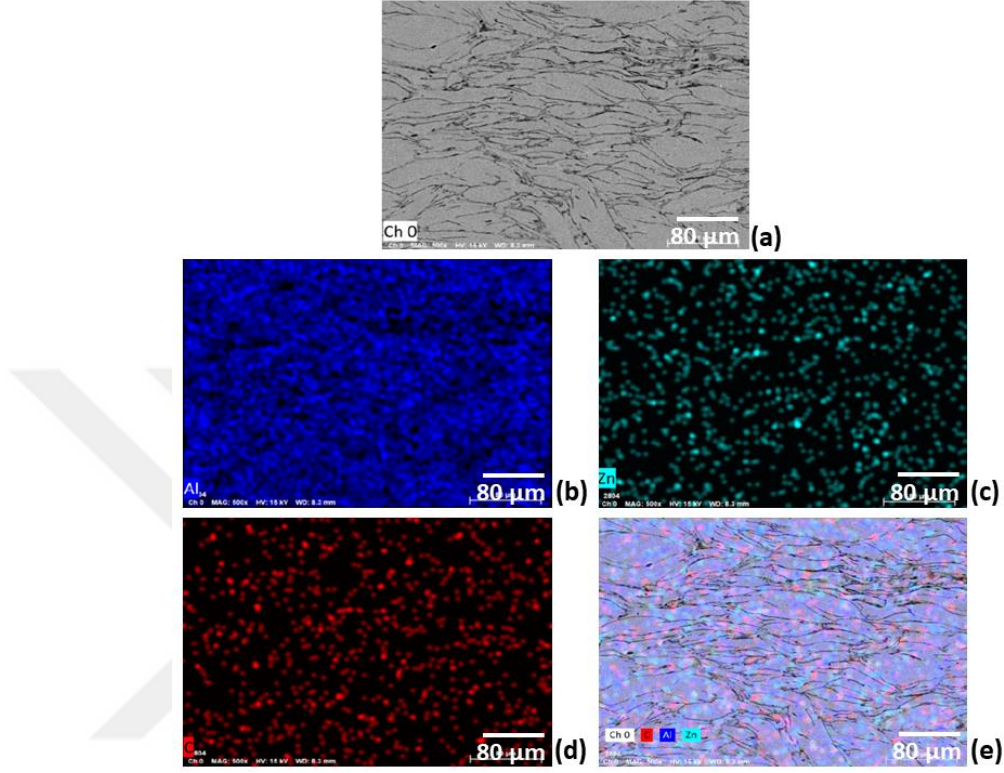


Şekil 3.113 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.25 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'e ait Şekil 3.113(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

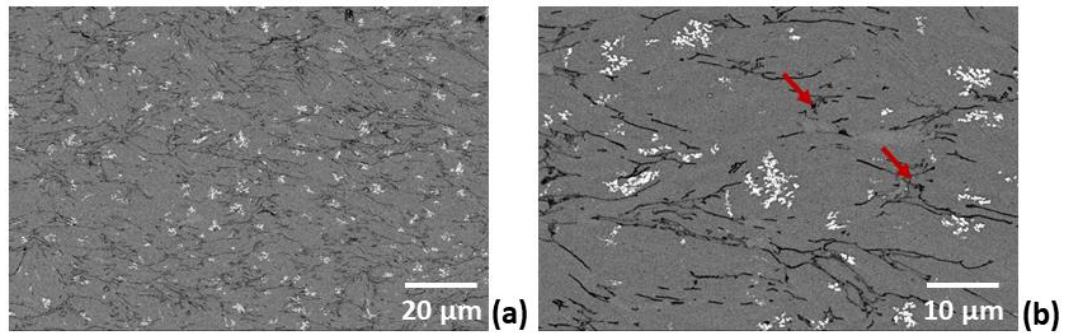
Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	87,96	5,21	6,84

Şekil 3.114 (a)-(e), FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin; Al, Zn ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Yassılaştırmış tane sınırlarında beliren FLG'lerin kümelenmiş bir şekilde matris yapısında dağılım gösterdiği düşünülmektedir.



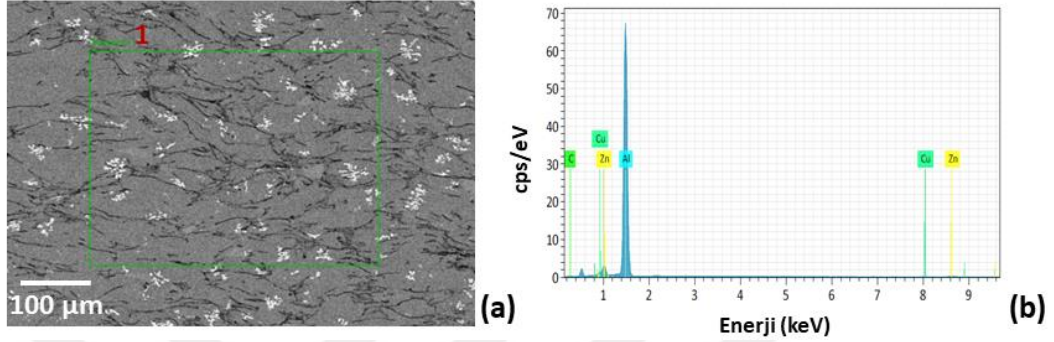
Şekil 3.114 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

Şekil 3.115(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin sırasıyla, 300X ve 1000X farklı büyütmelerindeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle (Şekil 3.99) uyumlu olan SEM görüntülerinde, kırmızı oklarla gösterilen boşluklu yapılarda, FLG'lerin kümelenmiş bir şekilde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.115 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen alandan elde edilen EDS spektrumu, sırasıyla, Şekil 3.116(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Matris yapısındaki ikincil fazların dağılımı, Çizelge 3.26'da, Şekil 3.116(a)'dan belirlenen alandan alınan EDS sonuçları ile ifade edilmiştir. Al₂Cu intermetalik bileşiğinin ve tane sınırlarında belirlenen FLG'nin homojen bir şekilde matris yapısında dağıldığı söylenebilir.

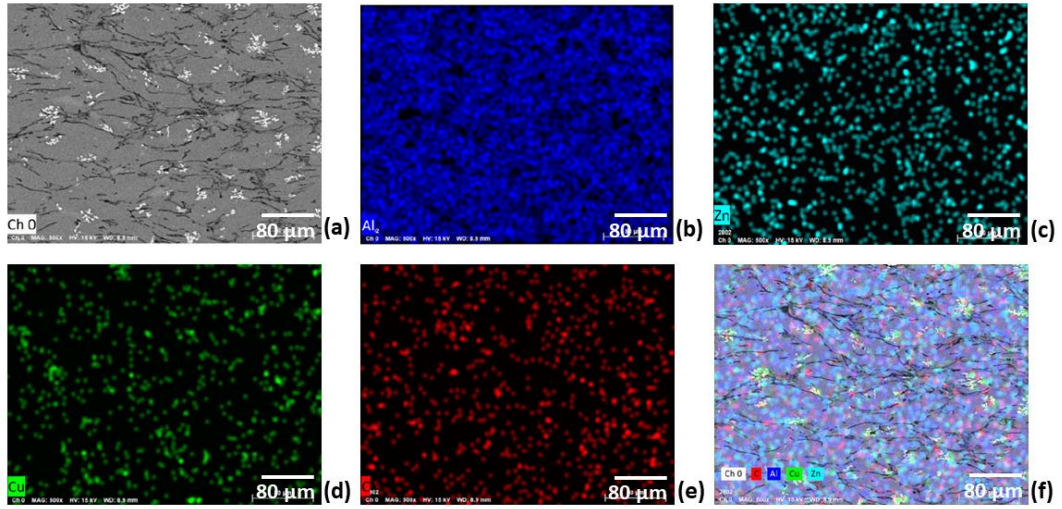


Şekil 3.116 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.26 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'e ait Şekil 3.116(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

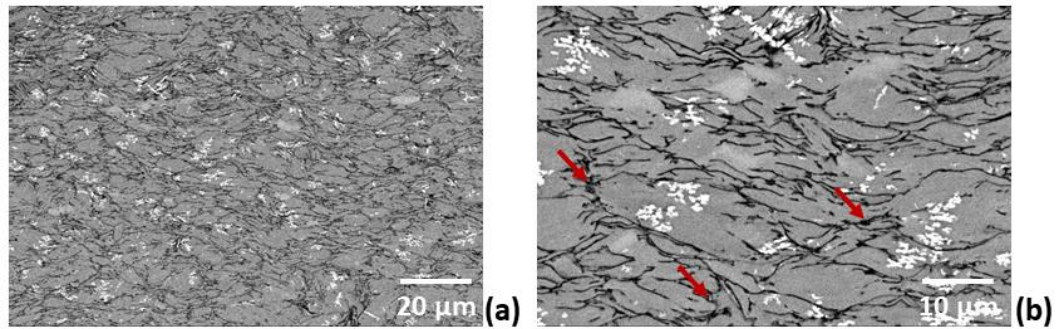
Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	87,79	5,07	2,00	5,14

Şekil 3.117(a)-(f); FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin; Al, Zn, Cu ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Matris yapısında, ikincil fazların homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir.



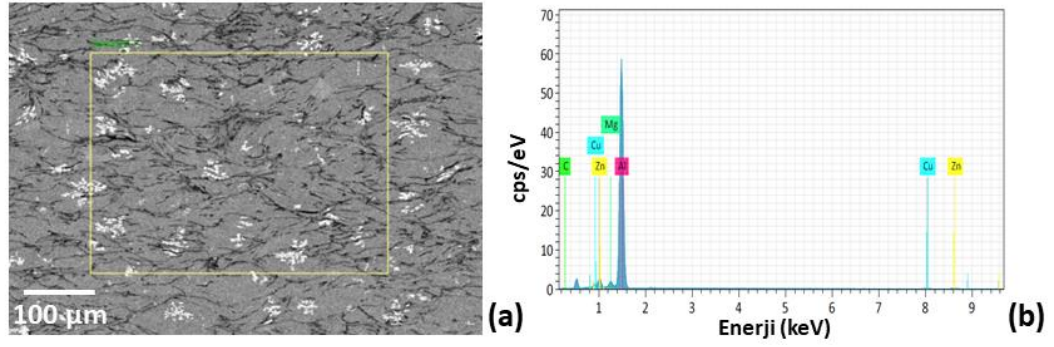
Şekil 3.117 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Cu, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

Şekil 3.118(a) ve (b), FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin, sırasıyla, 300X ve 1000X farklı büyütmelerindeki SEM görüntülerini göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleriyle (Şekil 3.102) uyumlu olan SEM görüntülerinde, tanelerin yassılaştığı ve boyutlarının azalmış olduğu görülmektedir. Kırmızı oklarla gösterilen boşluklu yapılar, FLG'lerin kümelenmiş bir şekilde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.118 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin SEM görüntüsü ve SEM görüntüsünde belirlenen alandan elde edilen EDS spektrumu, sırasıyla, Şekil 3.119(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Matris yapısındaki ikincil fazların dağılımı, Çizelge 3.27'de, Şekil 3.119(a)'dan belirlenen alandan alınan EDS analiz sonuçları ile ifade edilmiştir. Beyaz parlak partiküllerin, XRD sonuçlarında da (Şekil 3.83) belirtilen, Al_2Cu intermetalik fazına ait olduğu tespit edilmiştir.

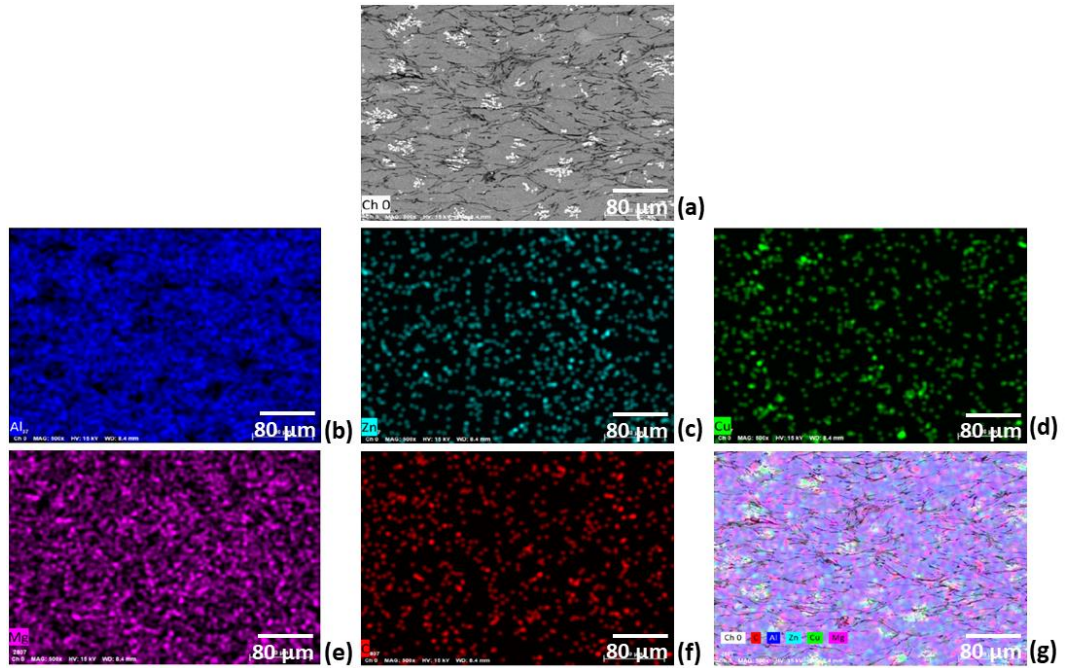


Şekil 3.119 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.27 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'ye ait Şekil 3.119(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

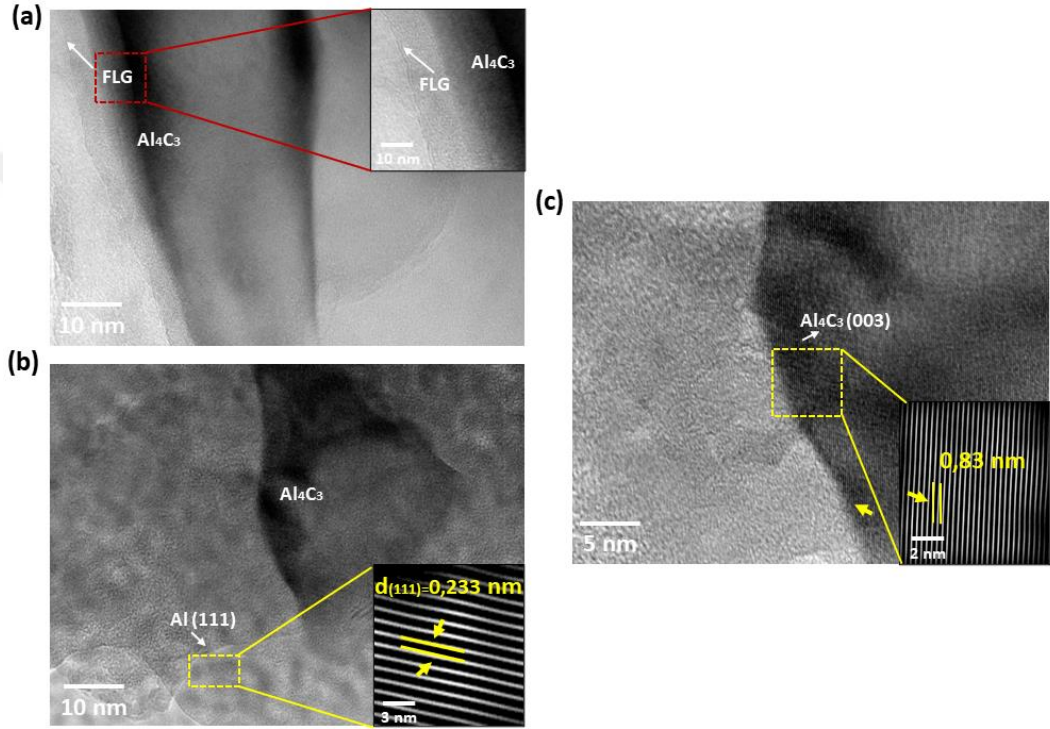
Alan	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Cu (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	87,64	1,99	2,99	1,73	5,65

Şekil 3.120 (a)-(g); FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin; Al, Zn, Cu, Mg ve C elementleri için SEM ve SEM-EDS haritalama görüntülerini göstermektedir. Matris yapısında, ikincil fazların homojen bir şekilde dağıldığı bu alaşım serisine ait FDM tasarımı da görülmektedir.



Şekil 3.120 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Cu, (e) Mg (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

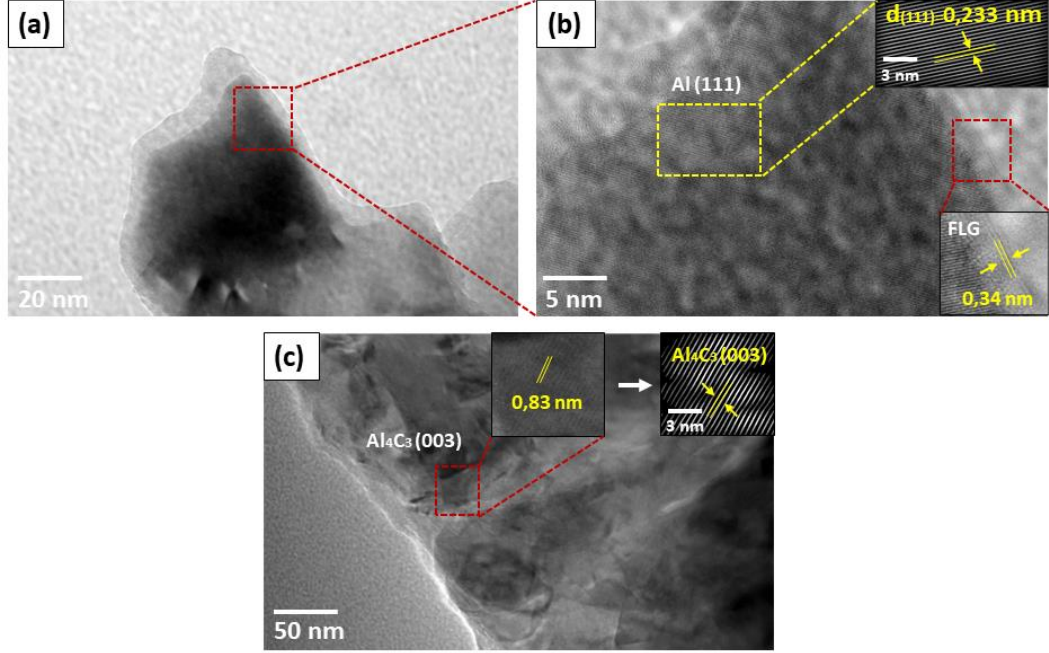
Şekil 3.121(a)-(c), FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin TEM görüntülerini göstermektedir. Grafenin arayüz olarak buruşuk, kıvrımlı ve az katmanlı yapısı, Şekil 3.121(a)'da gösterilen aydınlık alan TEM görüntüsünde, göze çarpmıştır (Li ve diğ., 2018; Zhang ve diğ., 2016). Ayrıca, Al ve FLG arasında Şekil 3.78'de XRD analiz sonuçlarını doğrulayan yaklaşık 0,83 nm düzlemler arası mesafeye sahip Al_4C_3 fazının bulunduğu görülmektedir (Shao ve diğ., 2018; Xiong ve diğ., 2020; Zhou ve diğ., 2019). Şekil 3.121(b) ve Şekil 3.121(c)'de bulunan ekler, HRTEM görüntülerinde tespit edilen Al ve Al_4C_3 fazları için, karşılık gelen IFFT görüntüsüdür.



Şekil 3.121 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin aydınlık alan TEM görüntüleri: (a) Düşük büyütme (Ekteki görüntü, kırmızı karedeki alanın büyütülmüş görüntüsüdür.), (b) ve (c) Yüksek büyütme (Ekteki görüntüler, Al ve Al_4C_3 fazlarına ait IFFT görüntülerini ifade etmektedir.).

Şekil 3.122(a)-(c), FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'nin TEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 3.122(a); FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM yapısını ifade etmektedir. Şekil 3.122(a)'da kırmızı kare ile işaretli bölgenin HRTEM görüntüsü, Şekil 3.122(b)'de gösterilmiştir. Grafenin arayüz ve bariyer görevi gördüğü, TEM görüntüleriyle uyumlu (Şekil 3.5) birkaç katmanlı buruşuk yapısı, Şekil 3.122(b)'de tespit edilmiştir. Ayrıca, yapıda ana matris elementi olan Al ve takviye malzemesi FLG'nin mevcudiyetini ifade eden IFFT görüntüsü de gösterilmiştir. Şekil 3.122(c), FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg FDM yapısında, XRD sonuçlarında da tespit edilen

(Şekil 3.83), 0,83 nm düzlemler arası mesafeye sahip Al_4C_3 bileşiğinin mevcudiyetini ifade etmektedir. Şekil 3.122 (b) ve (c)'deki ekler, sırasıyla, tespit edilen Al fazı ve Al_4C_3 bileşiği için, karşılık gelen IFFT görüntüsüdür.



Şekil 3.122 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin aydınlık alan TEM görüntüleri: (a) ve (c) Düşük, (Ekteki görüntüler, Al_4C_3 fazına ait IFFT görüntülerini ifade etmektedir.), (b) (a)'daki kırmızı kareden alınan yüksek büyütme (Ekteki görüntü Al ve FLG'ye ait IFFT görüntülerini temsil etmektedir.).

Al_4C_3 fazının oluşumu, Al matrisi ile grafen arasında meydana gelebilir ve aşağıdaki reaksiyonla (3.1) ifade edilmektedir (Li ve Xiong, 2017):

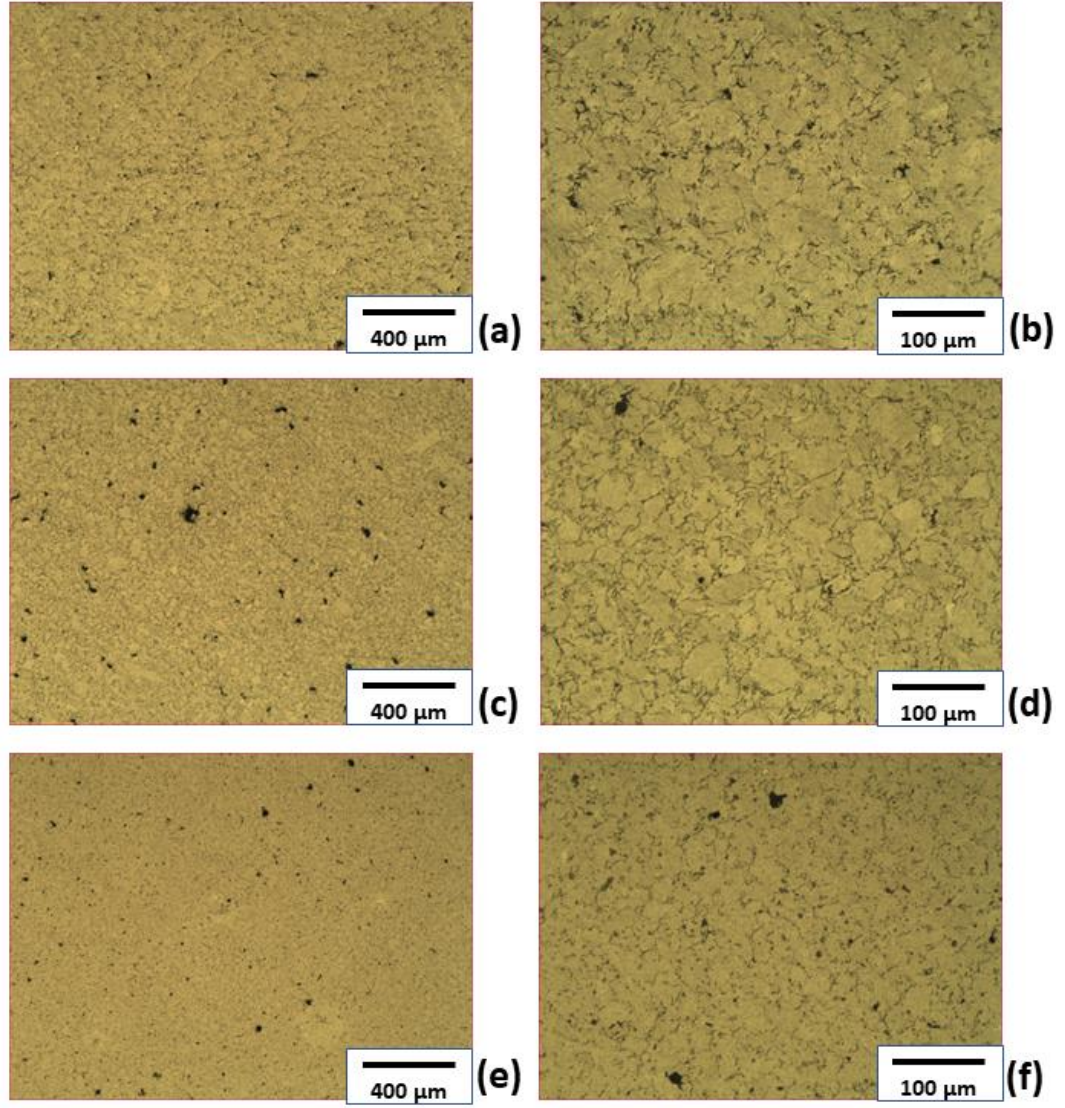


Al_4C_3 fazı Al esaslı matriste kırılğan ve nem çekici yapısı nedeniyle istenmeyen bir faz olmasına rağmen; matris yapısında homojen olarak dağılmışsa, matristen yük aktarımına katkıda bulunabilmektedir (Kwon ve diğ., 2014). Al esaslı matristen FLG'ye yük aktarımı yapılırken, yük aktarım verimini etkileyecek olan stresin küçük bir kısmının Al_4C_3 fazlarından geçmesi gerekmektedir. Al_4C_3 ve FLG arasında güçlü arayüz bağı da oluşmaktadır. Çünkü Al_4C_3 fazı ve FLG, Al esaslı matristen kaynaklanan basma gerilmesine maruz kalmaktadır (Xiong ve diğ., 2020). FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerde TEM görüntülerinde belirgin bir şekilde tespit edilen Al_4C_3 oluşumu, matris ve takviye arasında güçlü bir arayüzey bağının oluşması için elverişli olduğunu göstermektedir.

CNT gibi karbon esaslı malzemelerin takviye edilerek T/M ile elde edilen ve Al matrisinde tasarlanan FDM'lerin mikroyapıları literatürde değerlendirilmiştir (Kwon vd., 2011; Udupa vd., 2015). Kwon ve diğ. (2011); hacimce %5; %10 ve %15 CNT takviyeli T/M ile üretilen FDM'nin mikroyapısı hacimce %10 ile %15 CNT arasındaki katmanlarda düzensiz bir morfoloji gösterdiğini ve CNT içeriğinin yoğun olduğu bölgelerde, CNT takviyeli kompozitlerde gözlemlenen ince pulsu partiküllerin oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, gerçekleştirdikleri XRD ve TEM analizlerinde, sıcak presleme prosesi boyunca oluşan Al ve C'nin reaksiyonuyla birlikte, Al_4C_3 varlığı tespit edilmiştir ve genelde istenmeyen bu yapının, Al ve CNT arasında iyi bir bağlanma sağladığı, Al matrisi ve CNT takviyesi arasında yük aktarımına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. FDM tasarımında, katmanlar boyunca, CNT eklenmesiyle birlikte, sertlik değerlerinin artışı yük transferiyle ilişkili olduğunu bildirmişlerdir. Udupa ve diğ. (2015); T/M ile ürettikleri CNT takviyeli Al esaslı FDM'nin optik mikroskop görüntülerini değerlendirdiğinde, katmanlar boyunca mikroyapının değişimini belirtmişlerdir. Al matrisine ağırlıkça %0,1'den ağırlıkça %0,5'e kadar artacak şekilde CNT takviye edilerek, katmanlar boyunca tane boyutunun $127\ \mu m$ 'den $53,4\ \mu m$ 'ya kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Katmanlar boyunca CNT içeriğinin artırılmasıyla, tane boyutunun küçülmesi ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı da tespit edilmiştir.

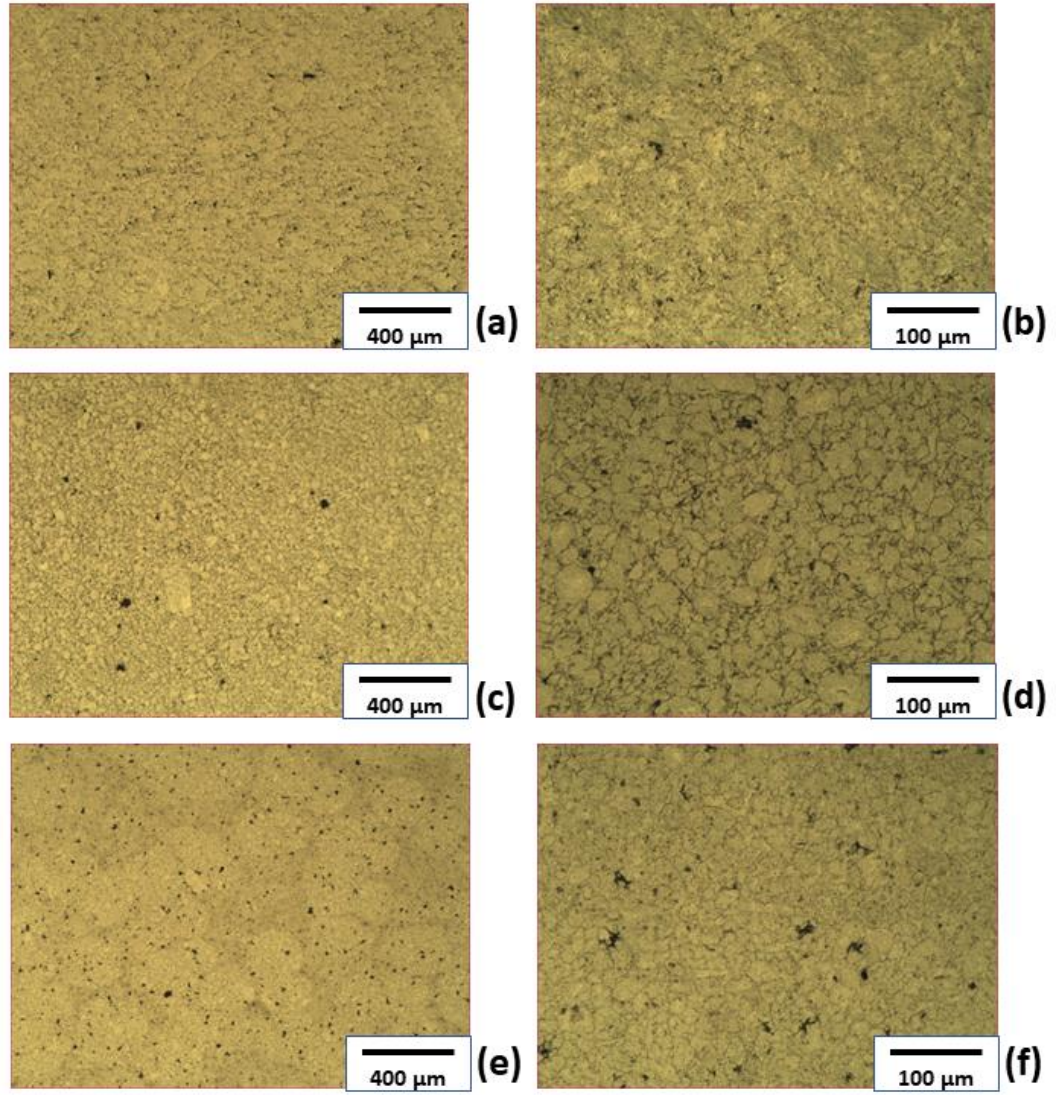
3.4.3.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu

Farklı sürelerde MA ile elde edilen tozlardan üretilen Al-7,5Zn-xFLG (x= ağırlıkça %0, 0,5, 1 ve 2) kompozitlerinin genel mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. 2, 4 ve 8 sa MA ile elde edilen tozların sinterlenmesi ile üretilen Al-7,5Zn alaşımlarının optik mikroskopta belirlenen farklı büyütme ölçeklerindeki mikroyapıları Şekil 3.123(a)-(f)'de gösterilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden, Al-7,5Zn numunelerinin sinterleme sonrası yüksek yoğunluklu yapılar olarak üretildiği anlaşılmaktadır.

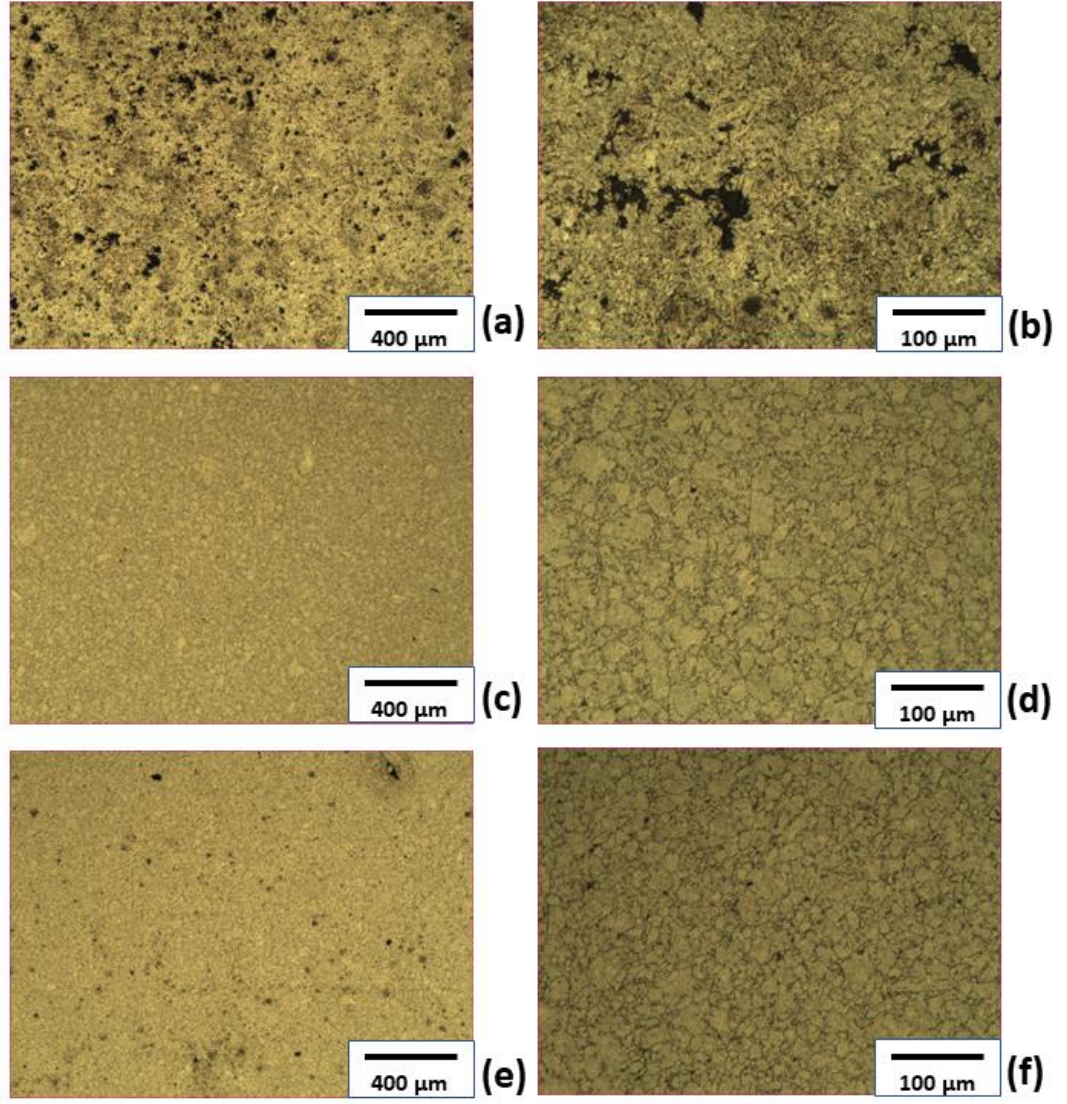


Şekil 3.123 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen Al-7,5Zn alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.

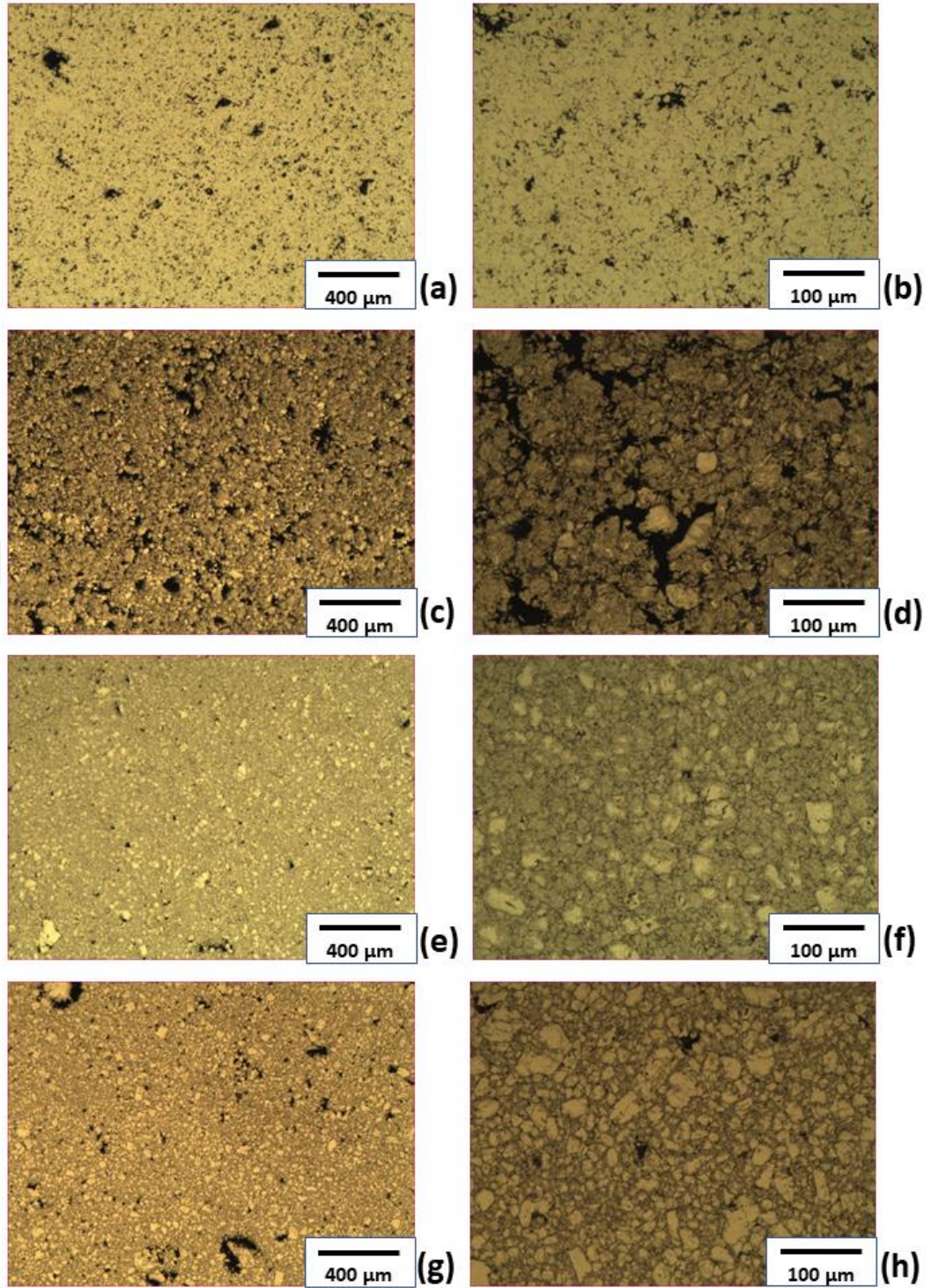
Ayrıca; 2, 4 ve 8 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-0,5FLG, Al-7,5Zn-1FLG ve Al-7,5Zn-2FLG kompozitlerinin optik mikroskopta farklı büyütme oranlarında incelenen mikroyapıları, sırasıyla, Şekil 3.124, Şekil 3.125 ve Şekil 3.126’da gösterilmiştir. Sinter sonrası numunelerin, Çizelge 3.18’de verilen relatif yoğunluk değerleri ile uyumlu olarak, yüksek yoğunluklu kompozitler üretildiği fakat bununla birlikte bazı numunelerde boşlukların bulunduğu anlaşılmaktadır. Bazı optik görüntülerde belirlenen bu koyu renkli bölgelerin, XRD analizinde (Şekil 3.85) tespit edilen Al_4C_3 fazına veya boşluklu yapıya ait olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.124 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.



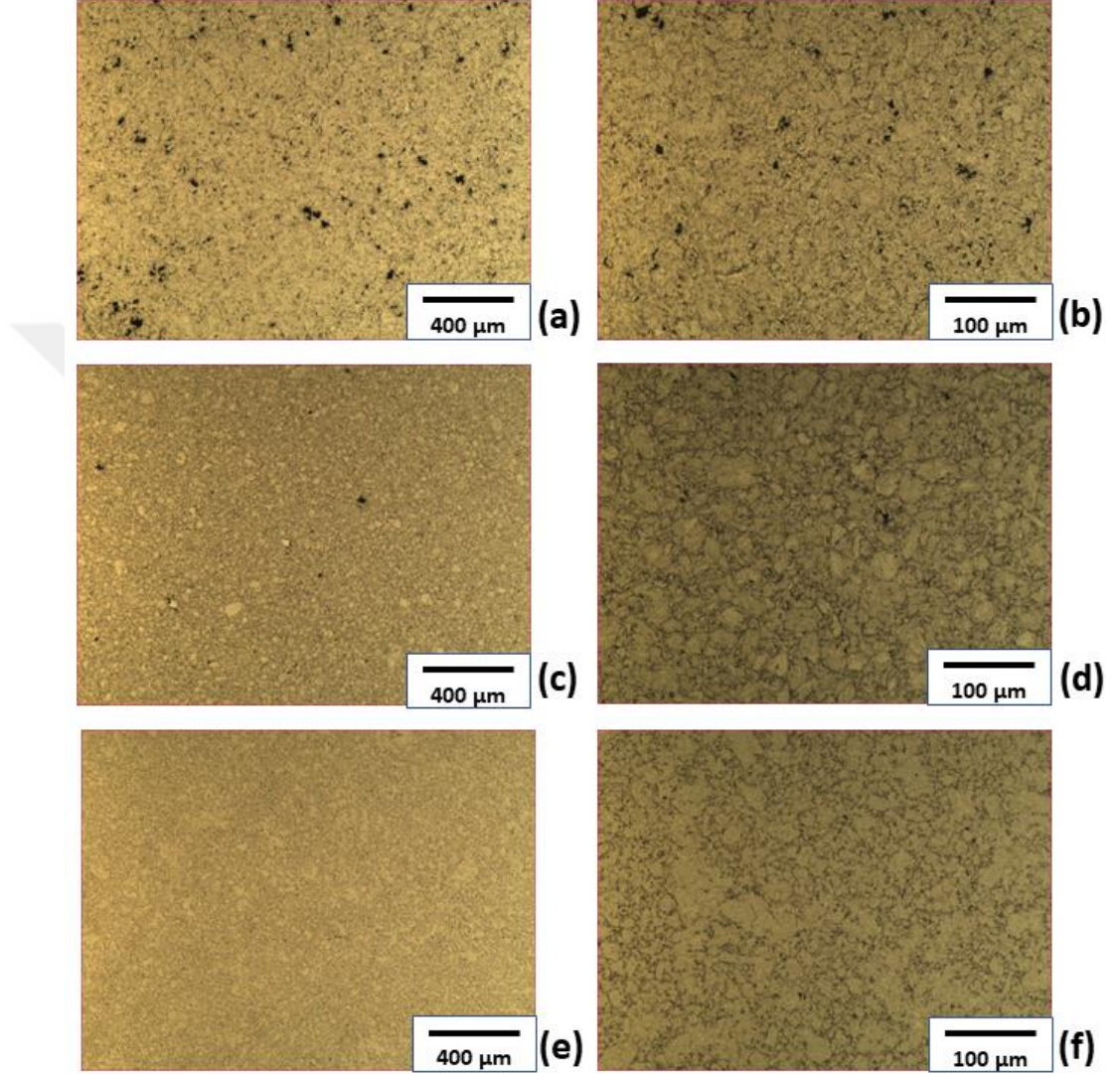
Şekil 3.125 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.



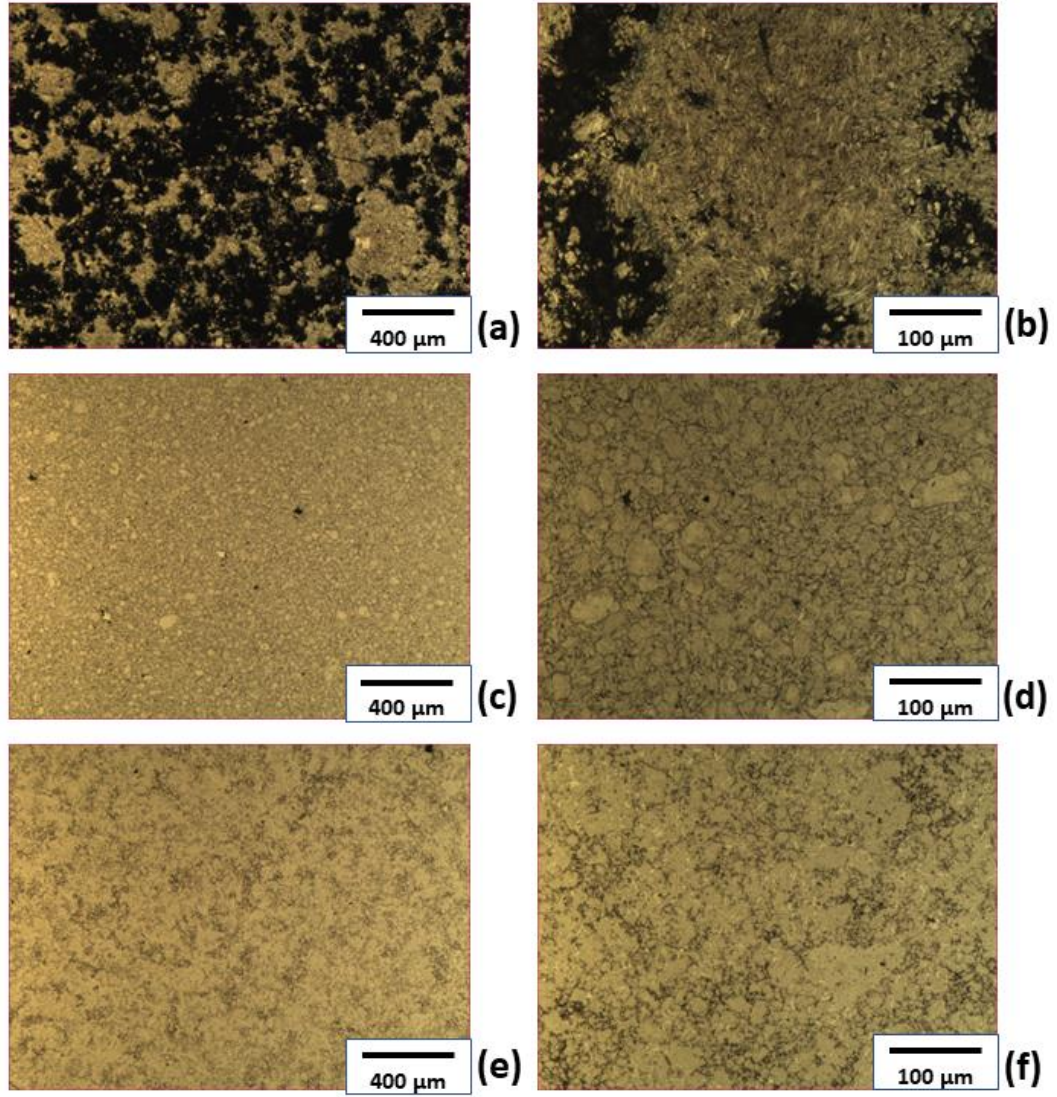
Şekil 3.126 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (b) 2 sa, (c) 4 sa ve (d) 8 sa; (200X): (e) 0 sa, (f) 2 sa, (g) 4 sa ve (h) 8 sa.

Farklı sürelerde (2, 4 ve 8 sa) MA ile elde edilen tozlardan üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG ($x =$ ağ. %0,5, ve 2) kompozitlerin; optik mikroskopta farklı büyütmelerde belirlenen genel mikroyapıları, sırasıyla, Şekil 3.127 ve Şekil 3.128’de gösterilmiştir. Sinterleme işleminden sonra, Çizelge 3.19’da ifade edilen relatif yoğunluk

değerleriyle uyumlu bir şekilde yüksek yoğunluğa sahip olarak kompozitlerin üretildiği görülmektedir. Bununla birlikte, yapıda koyu renkli bölgelerin boşluklara ve XRD analizinde (Şekil 3.87) tespit edilen Al_4C_3 fazına ait olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, ikincil fazların yapıda homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

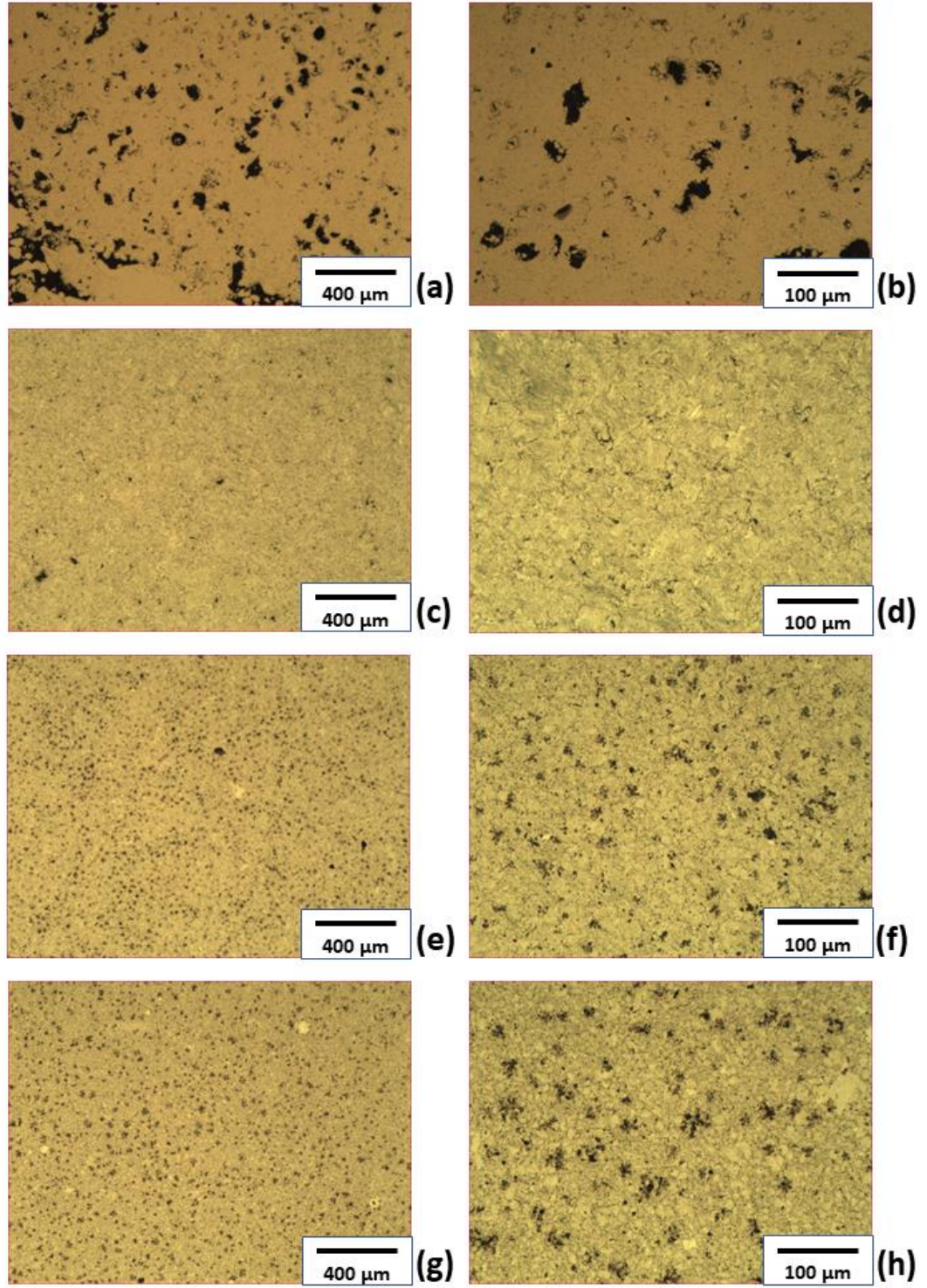


Şekil 3.127 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.



Şekil 3.128 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takvyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.

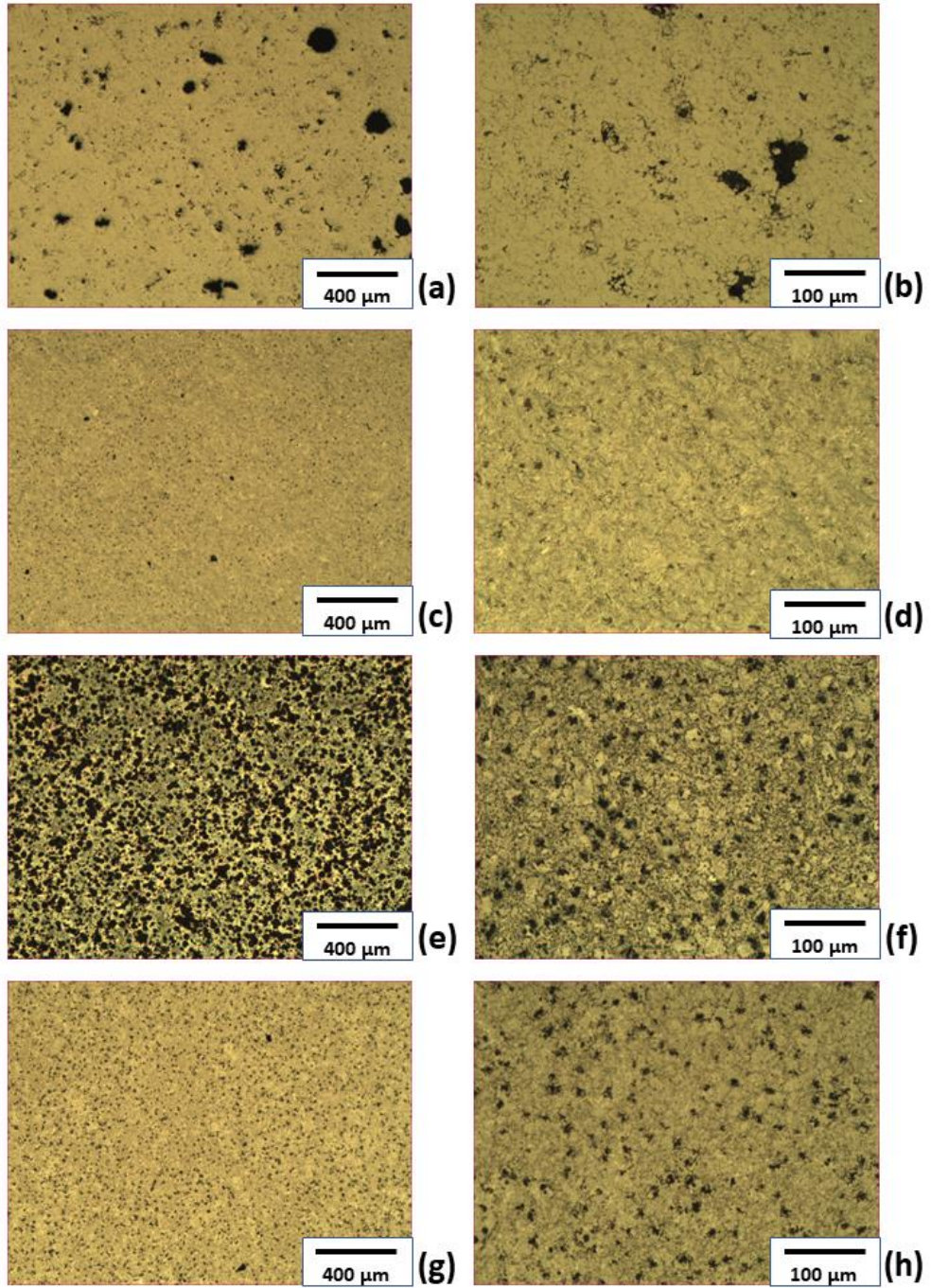
Farklı sürelerde MA ile elde edilen tozlardan üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg1,8Cu-xFLG ($x =$ ağ. %0; 0,5, 1 ve 2) kompozitlerinin genel mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. Harmanlanmış ve 2, 4 ve 8 sa MA uygulanmış tozların sinterlenmesi ile üretilen Al-7,5Zn2,5Mg1,8Cu alaşımlarının optik mikroskopta farklı büyütmelerde belirlenen mikroyapıları Şekil 3.129(a)-(h)'de verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden, Al-7,5Zn-2,5Mg1,8Cu alaşımlarının sinterleme sonrası yüksek yoğunluklu yapılar olarak elde edildiği görülmektedir.



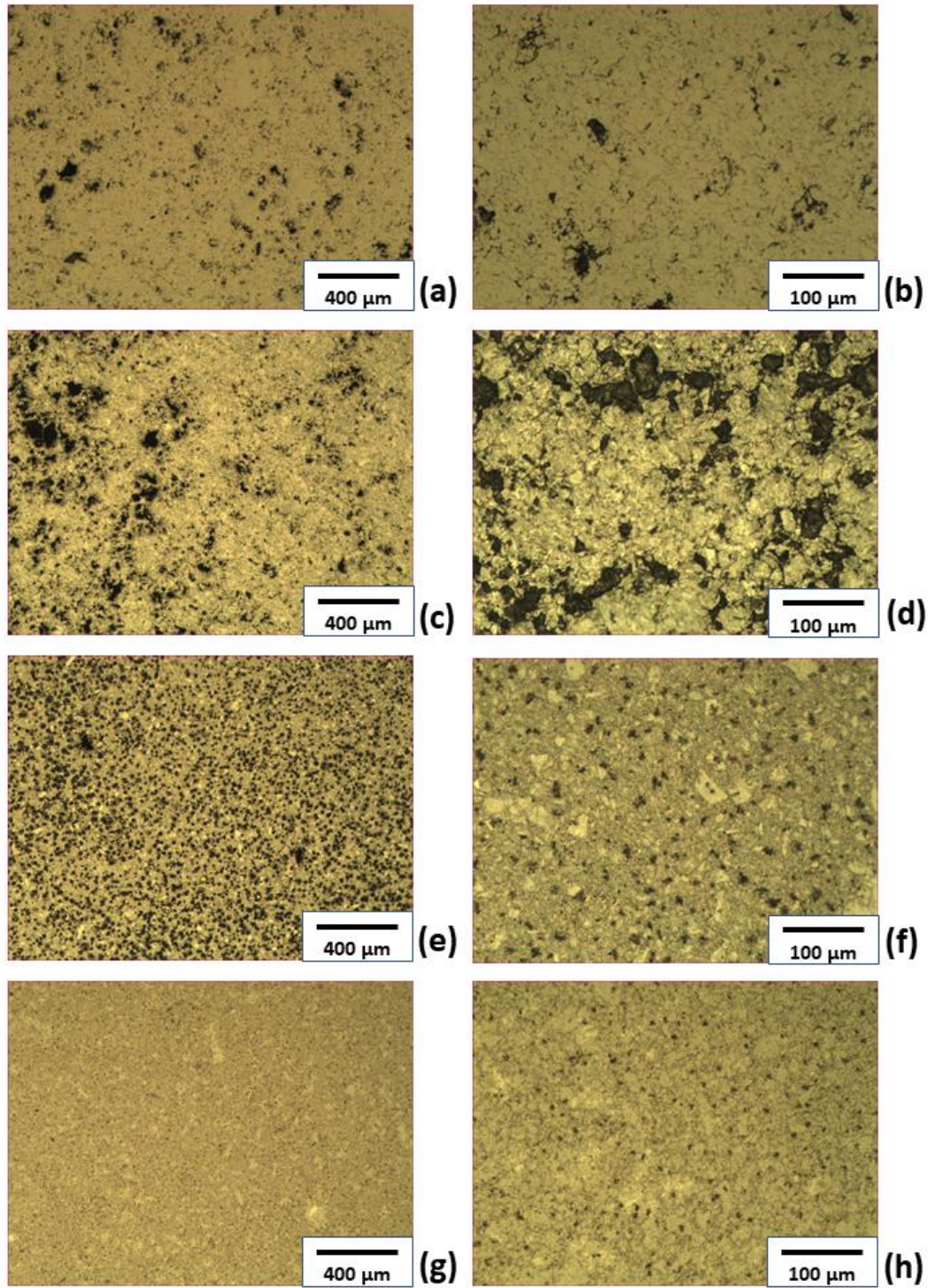
Şekil 3.129 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b) 0 sa, (d) 2 sa (f) 4 sa ve (h) 8 sa.

Ayrıca, harmanlanmış ve 2, 4 ve 8 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg1,8Cu-0,5FLG, Al-7,5Zn-2,5Mg1,8Cu-1FLG ve Al-7,5Zn-2,5Mg-2FLG kompozitlerinin optik mikroskopta farklı büyütmelerde belirlenen mikroyapıları, sırasıyla, Şekil 3.130,

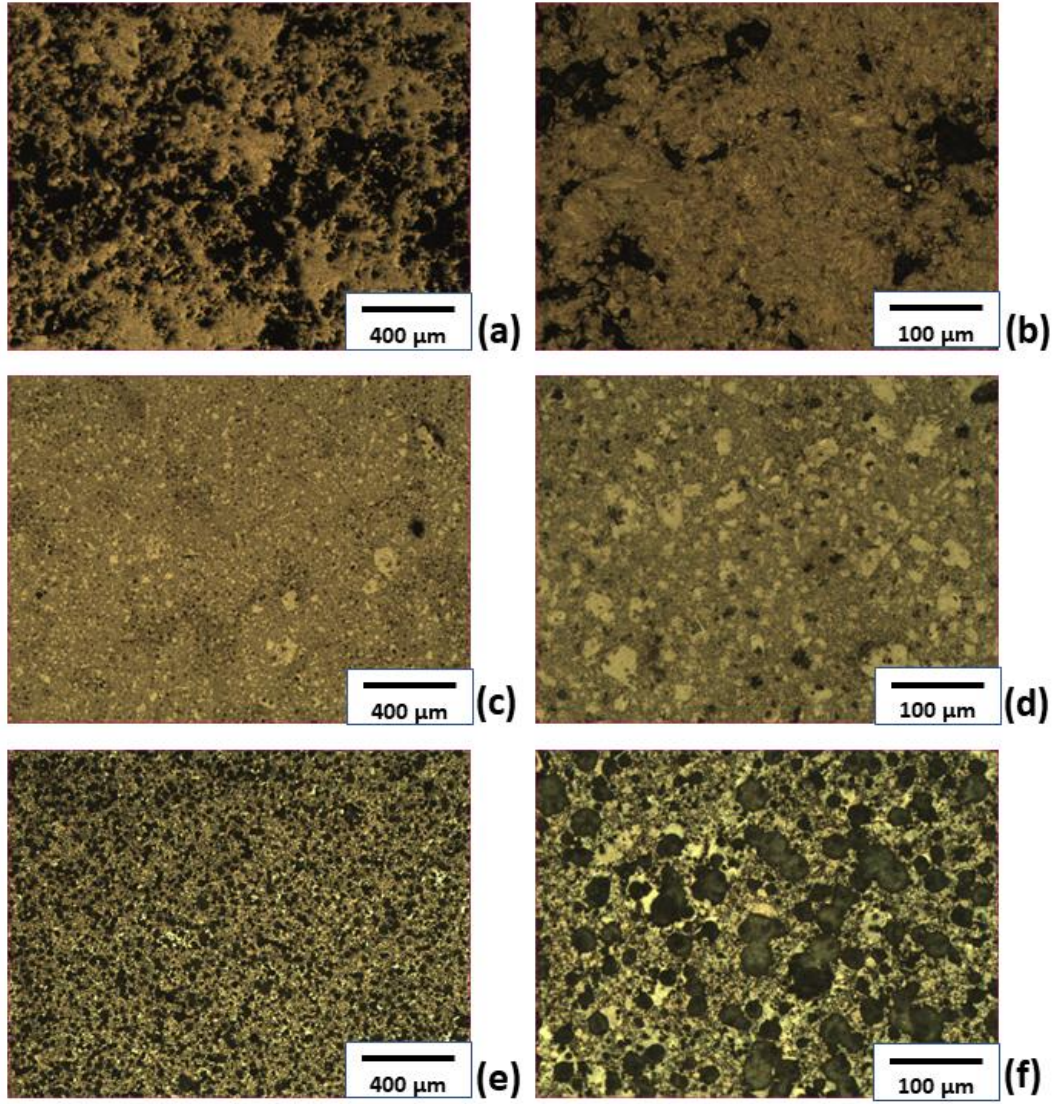
Şekil 3.131, ve Şekil 3.132’de gösterilmiştir. Sinterleme işleminden sonra kompozitlerin, Çizelge 3.20’de ifade edilen relatif yoğunluk değerleri ile uyumlu olarak, yüksek yoğunluklu kompozitler olarak üretildiği fakat bununla birlikte bazı numunelerde optik görüntülerde koyu olarak gösterilen bölgelerin boşluklara ait olduğu görülmektedir. XRD analizleri ile belirlenen Al_2Cu (Şekil 3.88, Şekil 3.89) fazının yapı içerisinde oldukça homojen bir şekilde dağıldığı düşünülmektedir.



Şekil 3.130 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b) 0 sa, (d) 2 sa (f) 4 sa ve (h) 8 sa.



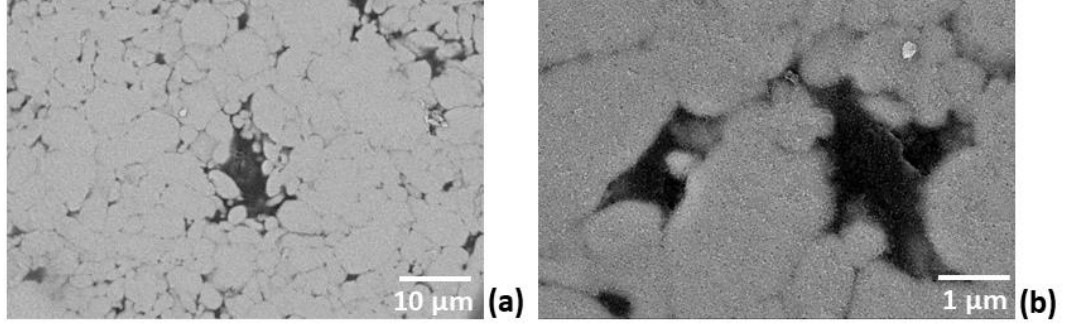
Şekil 3.131 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %1 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 0 sa, (c) 2 sa, (e) 4 sa ve (g) 8 sa; (200X): (b)0 sa, (d) 2 sa (f) 4 sa ve (h) 8 sa.



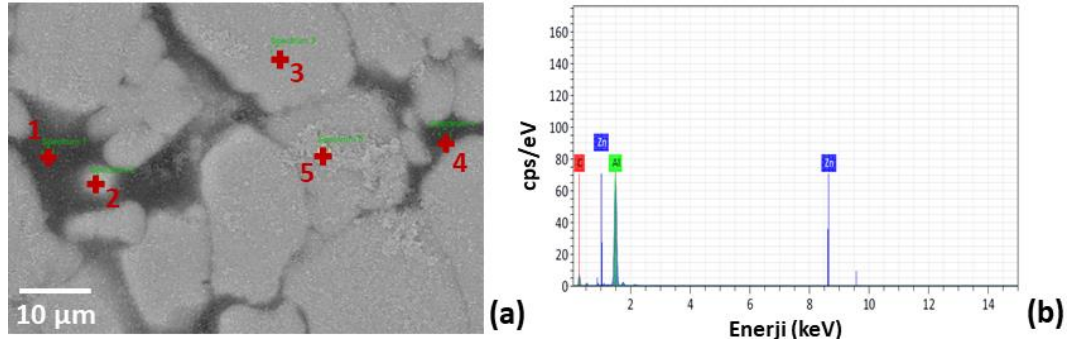
Şekil 3.132 : Farklı sürelerde MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri: (50X): (a) 2 sa, (c) 4 sa ve (e) 8 sa; (200X): (b) 2 sa, (d) 4 sa ve (f) 8 sa.

Ağ. %2 FLG ile takviye edilen harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozitin, sırasıyla, 1000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM görüntüleri, Şekil 3.133 (a) ve (b)'de verilmiştir. SEM görüntülerinde matris yapısı içerisinde dağılmış ikincil fazların bulunduğu görülmektedir. Mikroyapı içerisinde dağılmış fazların karakterize edilmesi için, kompozitlere SEM-EDS analizleri uygulanarak Al, Zn ve C elementlerinin yapı içerisindeki miktar ve dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.134(a); ağ. %2 FLG ile takviye edilen harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozitin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.134(b) ise; Şekil 3.134(a)'da görülen kırmızı ile işaretli noktaların EDS analiz spektrumunu ifade etmektedir. Şekil 3.134(b)'de görülen nokta EDS analizine göre, Şekil 3.134(a)'da yapı içerisinde dağılmış ince ve

koyu renkli fazların Al_4C_3 fazı olabileceği düşünülmektedir. Bu durumun, XRD bulguları (Şekil 3.85) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ağ. %2 FLG ile takviye edilmiş harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozitin Şekil 3.134(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları Çizelge 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.133 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.



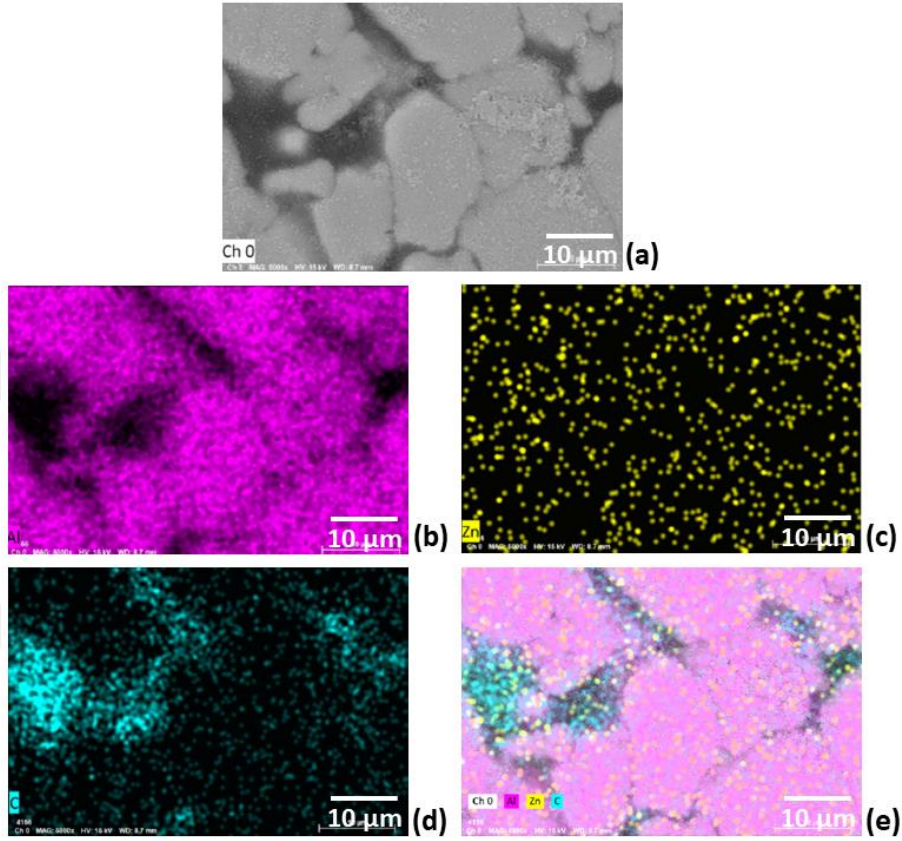
Şekil 3.134 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.28 : Ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı harmanlanmış kompozite ait Şekil 3.134(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	26,90	3,96	69,15
2	65,00	0,47	34,53
3	91,28	2,46	6,26
4	48,23	4,93	46,84
5	91,63	1,03	7,34

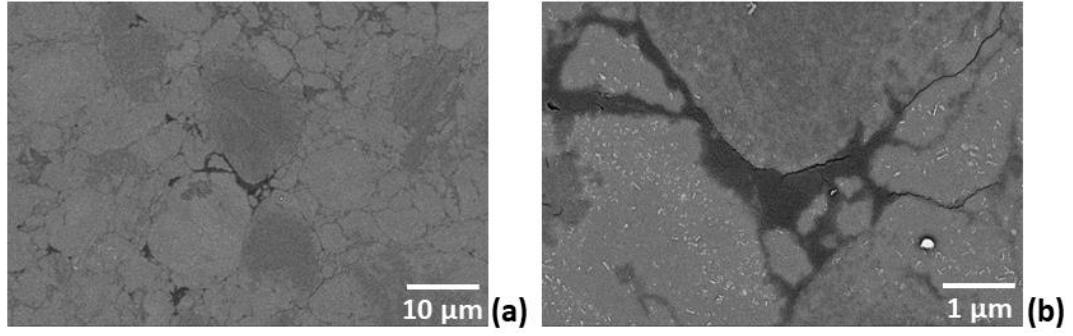
Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin mikroyapısında bulunan fazların ve elementlerin yapı içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi için SEM-EDS haritalama analizi uygulanmıştır. Şekil 3.135 (a), ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin, 2000X büyütmedeki SEM görüntüsünü ifade etmektedir. Şekil 3.135 (b), (c), (d) ve (e)'de ise; Şekil 3.135(a)'da görülen mikroyapı için sırasıyla

Al, Zn ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analizi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.135(b)-(e)'de verilen SEM-EDS haritalama sonuçları incelendiğinde, Zn ve C elementlerinin dağılımlarında, boşluklu yapılar da göze çarpmaktadır. Benzer olarak, Şekil 3.135(e)'de görülen haritalama analizinde de, XRD ve SEM-EDS (Şekil 3.85 ve Şekil 3.134(b)) analizlerinde gözlenen Al_4C_3 fazının, boşluklu yapılarda yoğun olarak görüldüğü tespit edilmiştir.



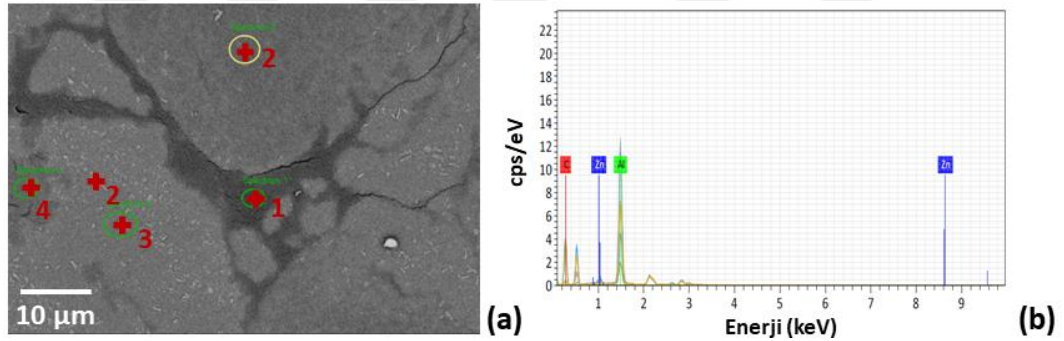
Şekil 3.135 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitinin, 1000X ve 5000X büyütmelelerdeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.136 (a) ve (b)'de verilmiştir. 4 sa MA uygulanmış FLG takviyeli Al-7,5Zn kompozitinin SEM görüntülerinde, matris yapısı içerisinde dağılmış ikincil fazların bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.136 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.

Mikroyapı içerisinde dağılmış fazların tespit edilebilmesi için kompozitlere, SEM-EDS analizleri uygulanarak Al, Zn ve C elementlerinin yapı içerisindeki miktar ve dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.137(a), 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn kompozitinin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü vermektedir. Şekil 3.137(b) ise, Şekil 3.137(a)'da görülen kırmızı ile işaretli bölgelerin SEM-EDS analiz spektrumlarını göstermektedir. SEM-EDS analizine göre, Şekil 3.137(a)'da görülen koyu ve ince bölgelerin, XRD bulgularıyla da uyumlu olan (Şekil 3.85), Al_4C_3 fazının mevcudiyetine işaret ettiği düşünülebilir.



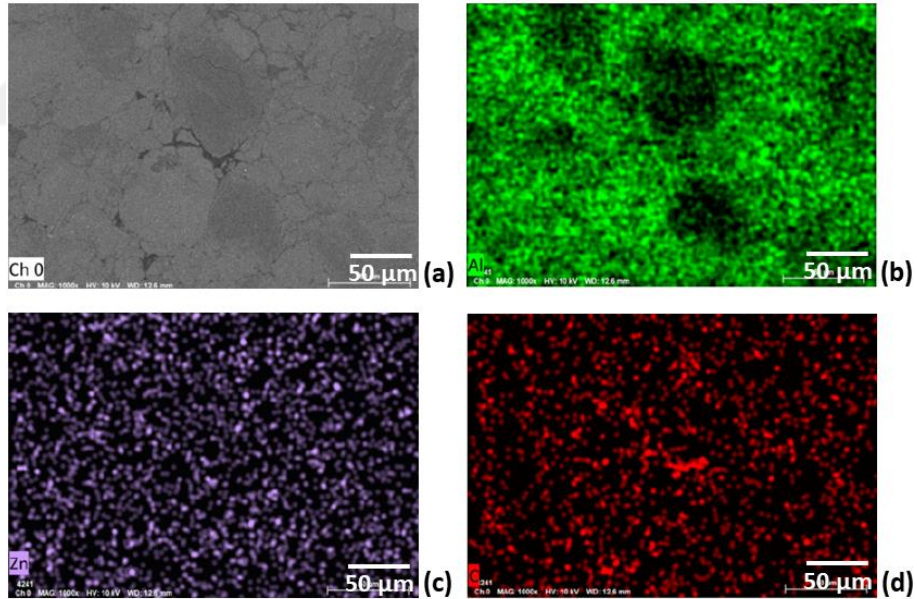
Şekil 3.137 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitinin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirlenen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.29, 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn kompozitinin, Şekil 3.137(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen bölgelerin EDS analizi sonuçlarını ifade etmektedir.

Çizelge 3.29 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn esaslı kompozite ait Şekil 3.137(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

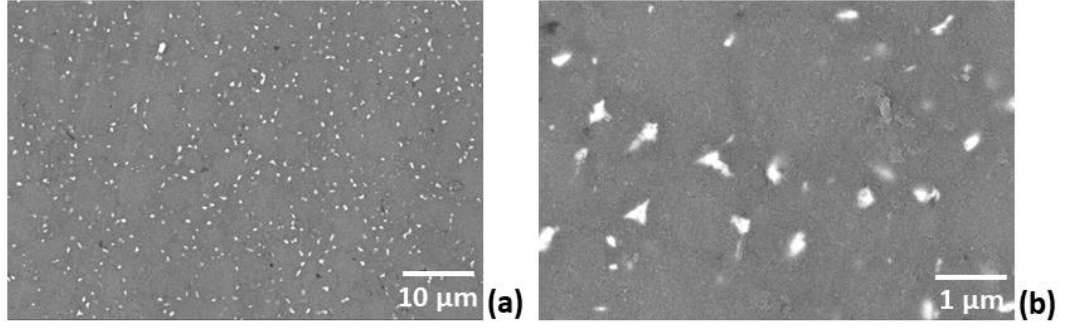
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	C (ağ. %)
1	57,23	12,32	30,45
2	17,81	1,27	80,92
3	78,79	5,01	16,20
4	71,21	3,71	25,08

Bununla birlikte, kompozitin mikroyapısında bulunan fazların ve elementlerin dağılımı SEM-EDS haritalama analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 3.138(a), 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn kompozitinin, 1000X büyütmedeki SEM görüntüsünü ifade etmektedir. Şekil 3.138 (b), (c), (d)'de ise Şekil 3.138(a)'da görülen mikroyapı için sırasıyla Al, Zn ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analizi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.138(b)-(d)'de verilen SEM-EDS haritalama sonuçları incelendiğinde, Zn ve C elementlerinin yapıda homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir.



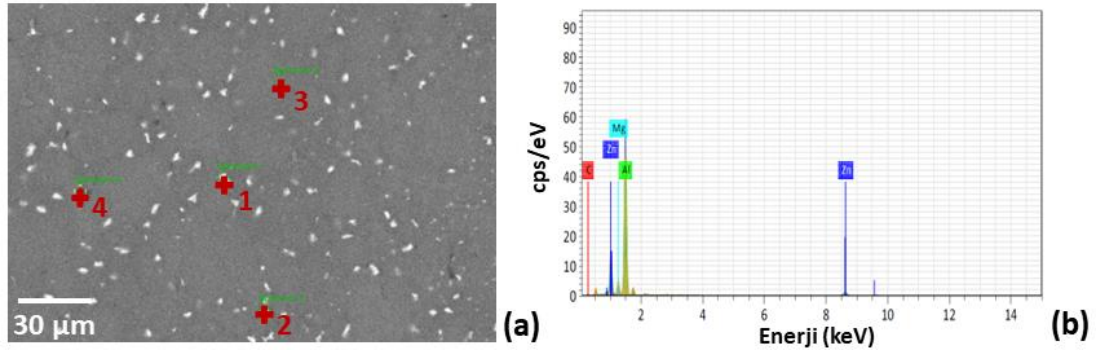
Şekil 3.138 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) C elementel haritalama analizleri.

Ağ. %2 FLG ile takviye edilen harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin, 1000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.139(a) ve (b)'de gösterilmiştir. SEM görüntülerine göre, matris yapısı içerisinde homojen bir şekilde dağılmış ikincil fazların mevcudiyeti görülmektedir.



Şekil 3.139 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.

Matris yapısı içinde dağılmış fazların tespit edilebilmesi için kompozitlere, SEM-EDS analizleri uygulanarak Al, Zn, Mg ve C elementlerinin yapı içerisindeki miktar ve dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.140(a), ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al - 7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin 2000X büyütmedeki SEM görüntüsünü vermektedir. Şekil 3.140(b) ise, Şekil 3.140(a)'da işaretli kırmızı noktaların SEM-EDS analiz spektrumlarını göstermektedir. EDS analizine göre, özellikle 4 numaralı noktada belirtilmiş olan ve yapı içerisinde dağılmış koyu renkli bölgelerin XRD sonuçlarıyla da uyumlu olan (Şekil 3.87) Al_4C_3 fazına ait olabileceği düşünülmektedir.



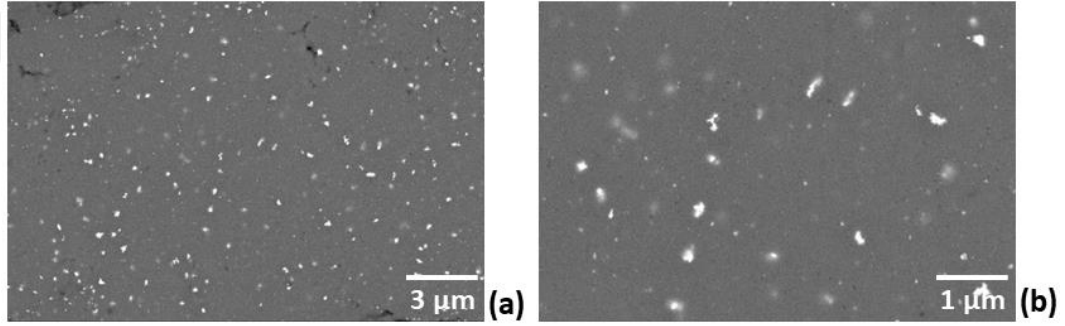
Şekil 3.140 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.30, 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitinin, Şekil 3.140(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen kırmızı noktalı bölgelerin SEM- EDS analiz sonuçlarını ifade etmektedir.

Çizelge 3.30 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozite ait Şekil 3.140(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

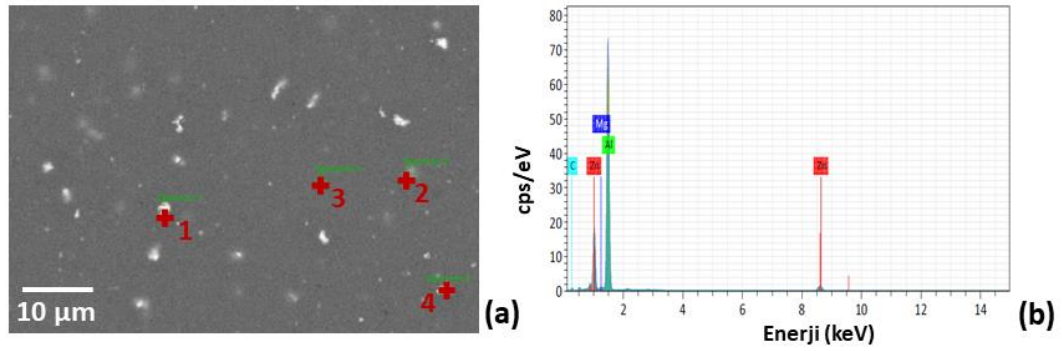
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	65,69	24,23	5,06	5,02
2	77,78	11,31	6,74	4,17
3	88,88	6,04	0,68	4,41
4	81,48	4,04	7,27	7,21

4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin, 2000X ve 5000X büyütmelelerdeki SEM görüntüleri, sırasıyla, Şekil 3.141 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Matris yapısı içerisinde, ikincil fazların homojen olarak dağıldığını SEM görüntülerine bakarak söyleyebiliriz.



Şekil 3.141 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 2000X ve (b) 5000X.

Ayrıca, ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozit için, SEM-EDS analizleri uygulanarak; Al, Zn, Mg ve C elementlerinin yapı içerisindeki miktar ve dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.142(a), kompozitin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.142(b) ise, Şekil 3.142(a)'da görülen kırmızı ile işaretli noktaların SEM-EDS analiz spektrumlarını ifade etmektedir. İkincil fazların, matris yapısı içerisinde homojen olarak dağıldığını söyleyebiliriz. Çizelge 3.31; 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin Şekil 3.142(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların SEM-EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.

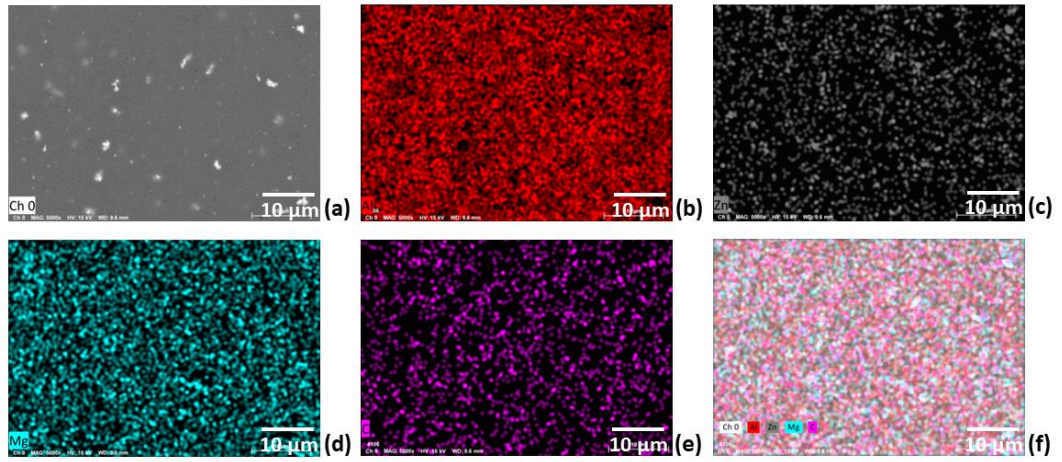


Şekil 3.142 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.

Çizelge 3.31 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozite ait Şekil 3.142(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

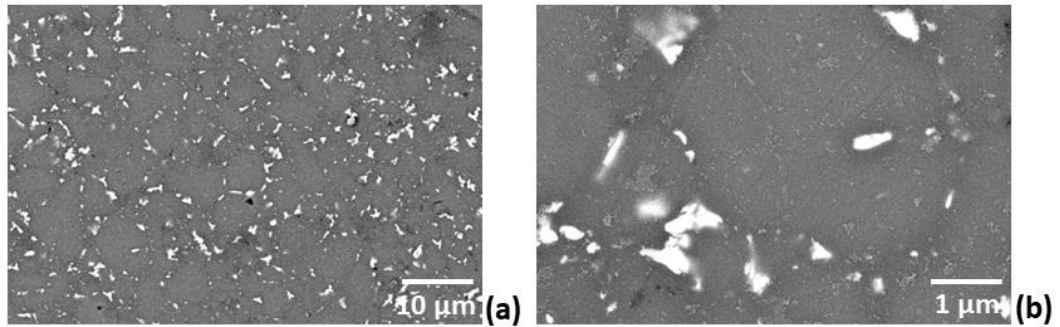
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	C (ağ. %)
1	68,75	22,18	0,89	8,18
2	88,63	5,52	0,62	5,24
3	87,42	3,89	0,47	8,22
4	52,29	38,58	0,89	8,24

Şekil 3.143(a), 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü vermektedir. Şekil 3.143(b), (c), (d) ve (e)' de ise; Şekil 3.143(a)'da görülen mikroyapı için, sırasıyla, Al, Zn, Mg ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analiz sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.143(b)-(f)'de verilen SEM_EDS haritalama sonuçları incelendiğinde, Zn, Mg ve C elementlerinin homojen bir şekilde matris yapısında dağıldığı görülmektedir.



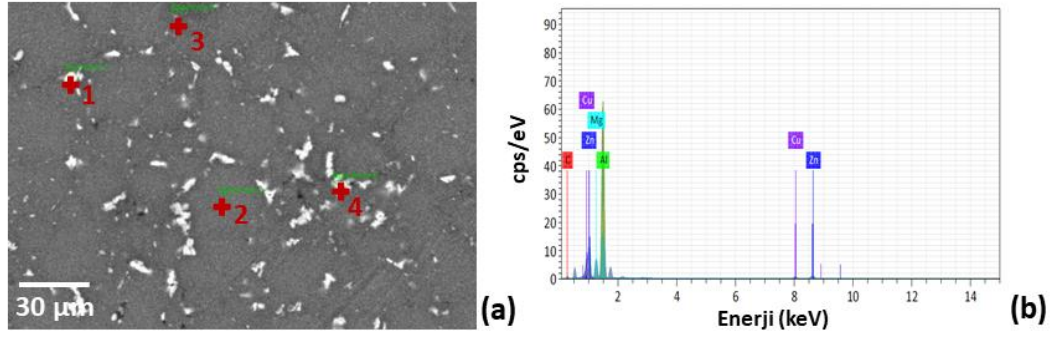
Şekil 3.143 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitinin: (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg, (e) C elementel haritalama analizleri ve (f) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin, sırasıyla, 1000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM görüntüsü Şekil 3.144 (a) ve (b)'de verilmiştir. Kompozite ait SEM görüntülerinde, matris yapısı içinde ikincil fazların mevcudiyeti ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 3.144 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 1000X ve (b) 5000X.

Şekil 3.145(a); ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin 2000X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.145(b) ise, Şekil 3.145(a)'da kırmızı ile işaretlenen noktaların SEM-EDS analizi spektrumlarını göstermektedir. XRD sonuçlarında da (Şekil 3.89) tespit edilen, SEM görüntülerinde parlak renkli olarak beliren Al_2Cu intermetalik bileşiğinin matris yapısında homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Kompozite ait Şekil 3.145(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların, SEM-EDS analiz sonuçları, Çizelge 3.32'de ifade edilmiştir.

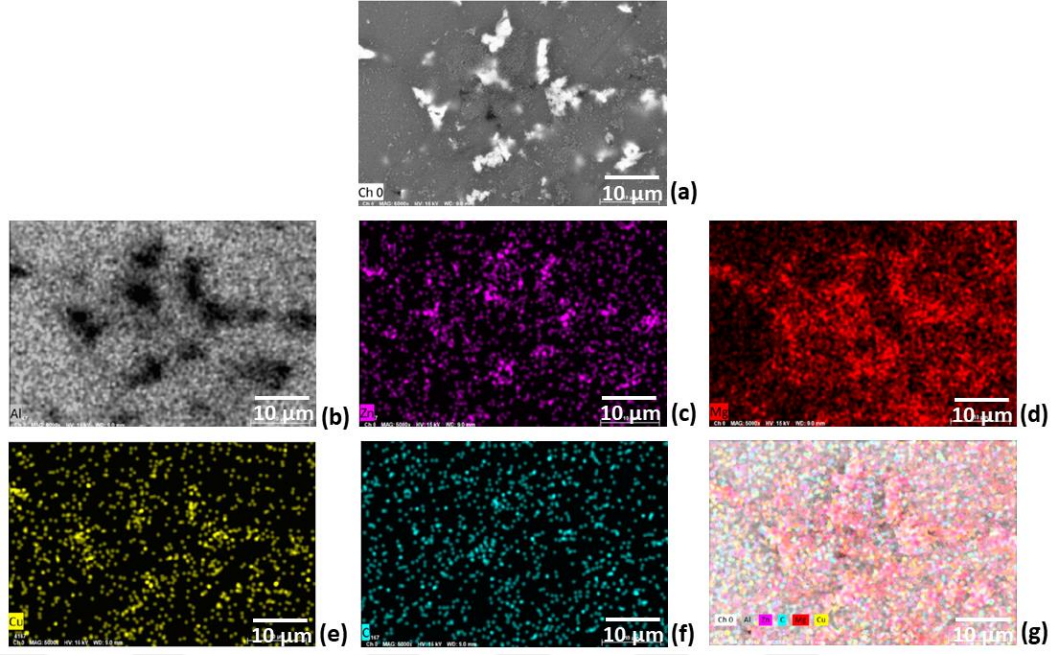


Şekil 3.145 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.

Çizelge 3.32 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.145(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

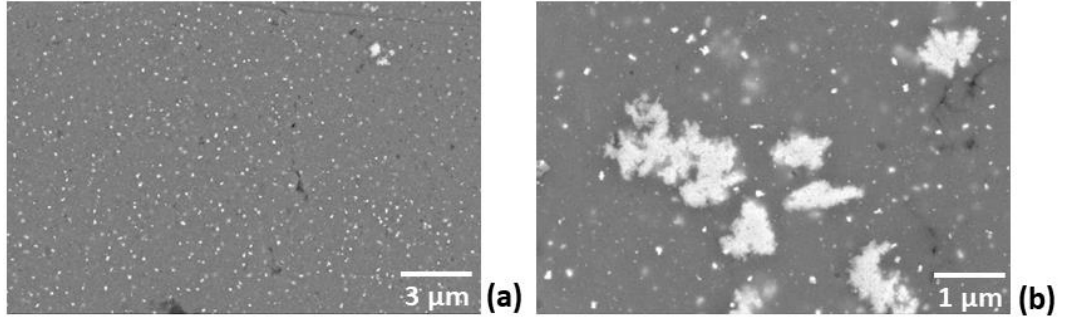
Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	24,66	46,38	12,82	12,45	3,69
2	87,14	1,80	0,48	2,13	8,45
3	82,89	1,32	2,78	2,94	10,07
4	53,73	17,45	10,51	8,64	9,66

Şekil 3.146(a), ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü ifade etmektedir. Şekil 3.146(b), (c), (d) ve (e)' de ise; Şekil 3.146(a)'da görülen mikroyapı için, sırasıyla Al, Zn, Mg, Cu ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analiz sonuçları gösterilmektedir. SEM-EDS haritalamaya göre, matris yapısındaki ikincil fazların homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 3.146 : Ağ. %2 FLG takviyeli harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg (e) Cu (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

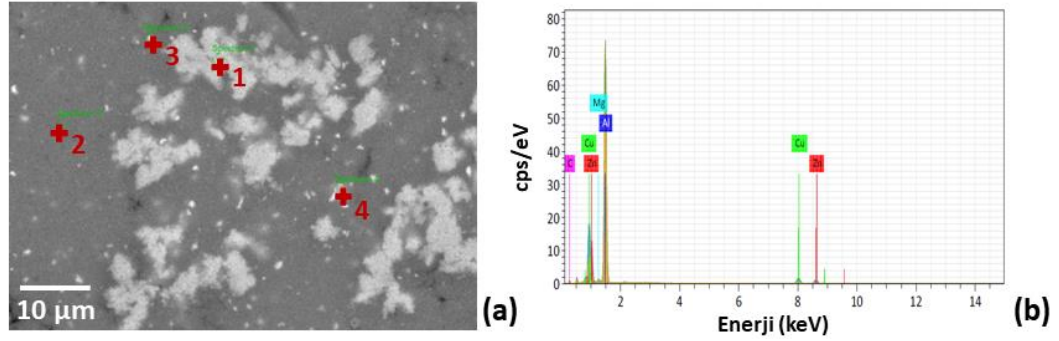
Şekil 3.147(a) ve (b), 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin, sırasıyla, 3000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM görüntülerini ifade etmektedir. Matris yapısında ikincil fazların mevcudiyeti, göze çarpmaktadır.



Şekil 3.147 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 2000X ve (b) 5000X.

Şekil 3.148(a), 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.148(b) ise, Şekil 3.148(a)'da kırmızı ile belirtilen noktaların SEM-EDS analizi spektrumlarını göstermektedir. SEM-EDS analizine göre; ikincil fazların, homojen bir şekilde matris yapısında dağıldığı düşünülmektedir. Çizelge 3.33, Şekil 3.148(a)'daki

SEM görüntüsünde kırmızı ile işaretlenen noktaların, SEM-EDS analizi sonuçlarını vermektedir.

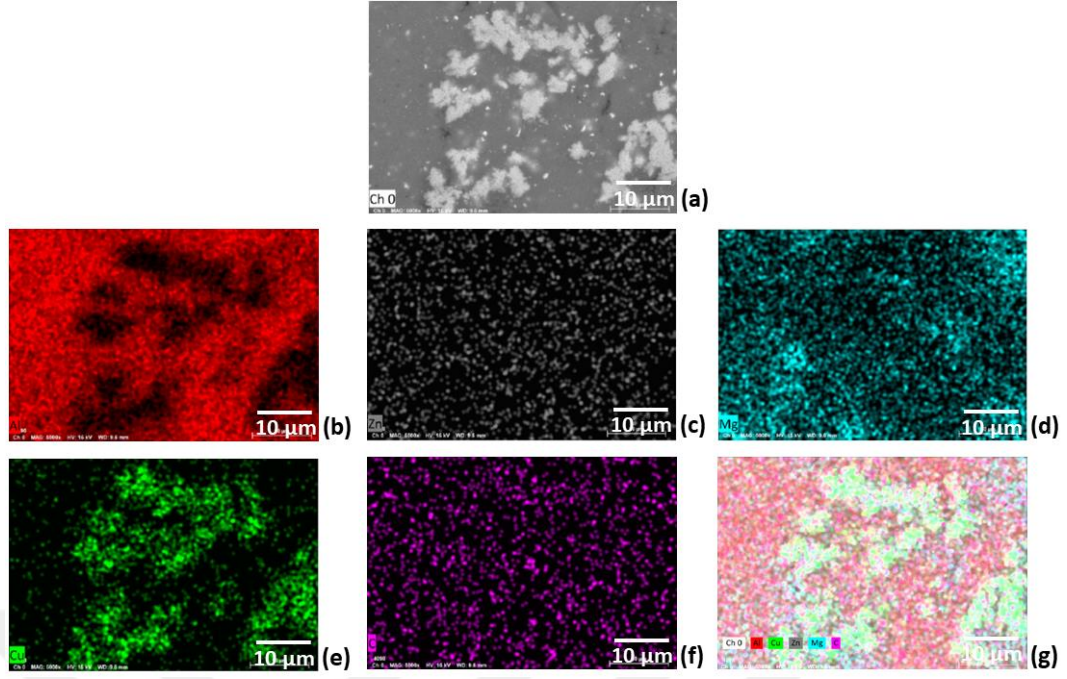


Şekil 3.148 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen noktaların EDS analiz spektrumları.

Çizelge 3.33 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.148(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen noktaların EDS analiz sonuçları.

Nokta	Al (ağ. %)	Zn (ağ. %)	Mg (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	51,06	0,00	1,24	43,30	4,39
2	84,30	2,61	0,28	1,53	11,29
3	58,32	35,49	0,78	0,47	4,95
4	68,30	5,23	1,06	18,08	7,34

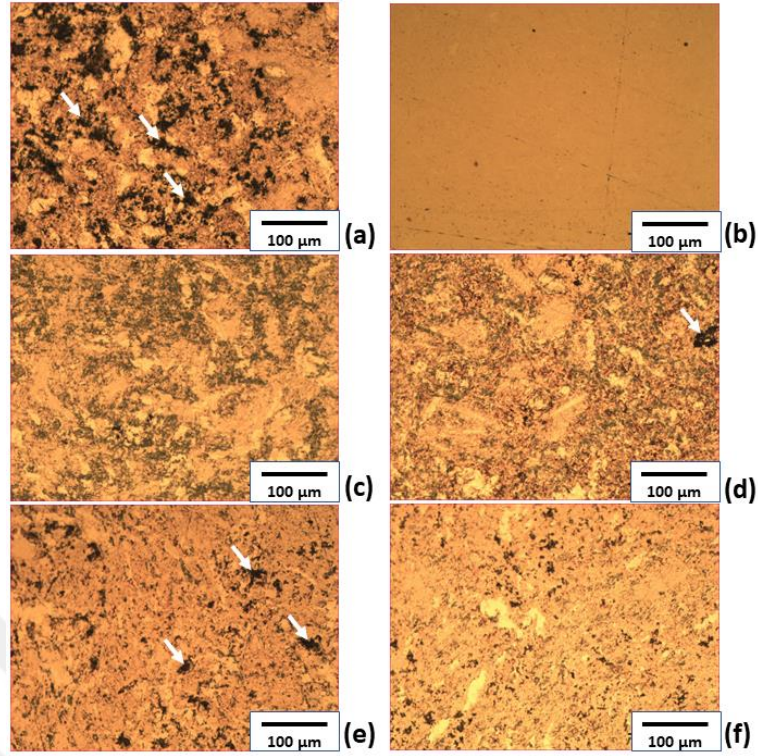
Bununla birlikte, 4 sa MA ile elde edilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozit mikroyapısında bulunan fazların ve elementlerin yapı içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi için, SEM-EDS haritalama analizleri uygulanmıştır. Şekil 3.149(a)'da, kompozitin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.149(b), (c), (d), (e) ve (f)'de; Şekil 3.149(a)'da görülen mikroyapı için, sırasıyla, Al, Zn, Mg, Cu ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analiz sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.149(b)-(f)'de verilen SEM-EDS haritalama sonuçlarına göre; Zn, Mg, Cu ve C elementlerinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Buna göre MA prosesinin etkin bir şekilde uygulanarak, homojen dağılıma sahip kompozitlerin üretilebileceği söylenebilir.



Şekil 3.149 : Ağ. %2 FLG takviyeli 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozitinin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Zn, (d) Mg (e) Cu (f) C elementel haritalama analizleri ve (g) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

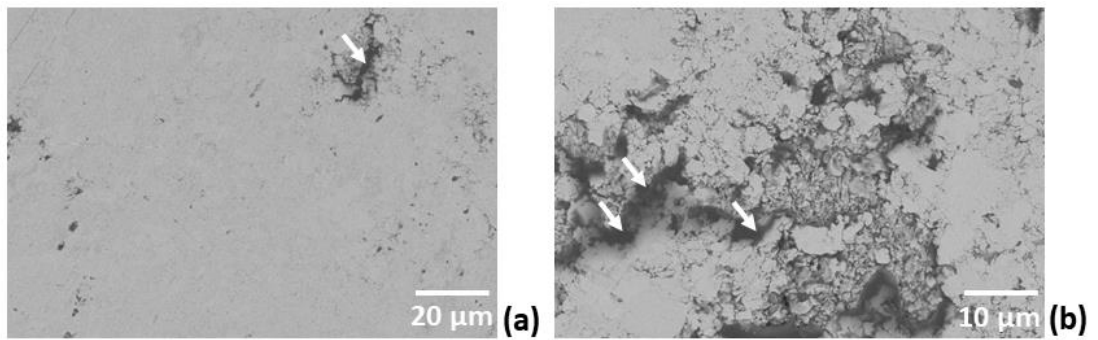
3.4.3.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu

Şekil 3.150; 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu matris kompozitlerin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Beyaz oklarla gösterilen koyu renkli bölgelerin boşlukları ve bu boşluklara biriken kümelenmiş FLG'yi temsil ettiği düşünülmektedir. 7 sa öğütme sonrası, üretilen kompozitler için FLG'nin nispeten daha homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Özellikle ağ. %0,1 FLG içeren Cu esaslı kompozitlerde boşluk miktarının daha az olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ağ. %0,5 FLG içeren kompozitin daha fazla porozite içerdiği gözlenmiştir. Ancak FLG'nin matris yapısında homojen dağılımı mekanik özellikleri iyileştirebilecek bir durumdur (Moustafa ve Taha, 2020).



Şekil 3.150 : 5 ve 7 sa MA için, sırasıyla, (a-b) ağ. %0,1 (c-d) ağ. %0,3 (e-f) ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri.

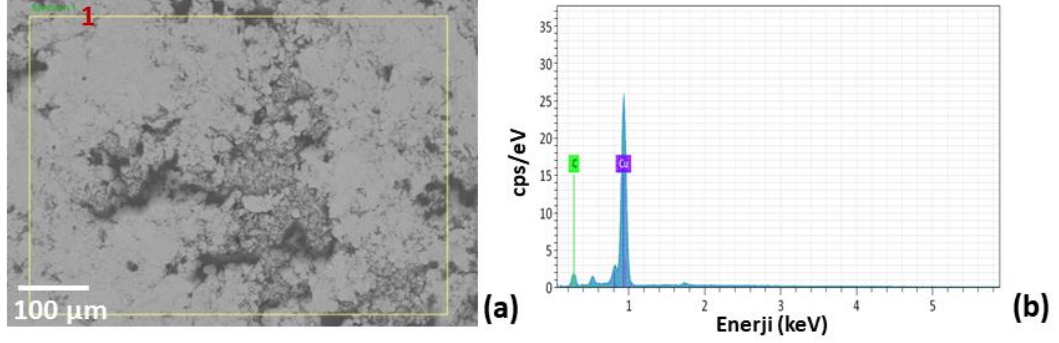
Şekil 3.151(a) ve (b), 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin, sırasıyla, 400X ve 800X büyütmelerdeki SEM görüntülerini ifade etmektedir. Beyaz oklarla belirtilen bölgelerde, matris yapısında deformasyonlar göze çarpmaktadır. Bu koyu renkli bölgelerdeki mevcut deformasyonun, matris yapısında FLG'lerin aglomerasyonundan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.151 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 400X (b) 800X.

Şekil 3.152(a); 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin 500X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.152(b) ise, Şekil 3.152(a)'da belirlenen alanın SEM-EDS analiz spektrumlarını göstermektedir. SEM-

EDS analizine göre; C element yoğunluğunun yüksek oluşu, koyu renk bölgelerde FLG'lerin kümелendiğini, matris yapısında buna bağlı olarak deformasyona neden olduğu düşünülmektedir. Çizelge 3.34, Şekil 3.152(a)'daki SEM görüntüsünde belirlenen alanın SEM-EDS analizi sonuçlarını ifade etmektedir.

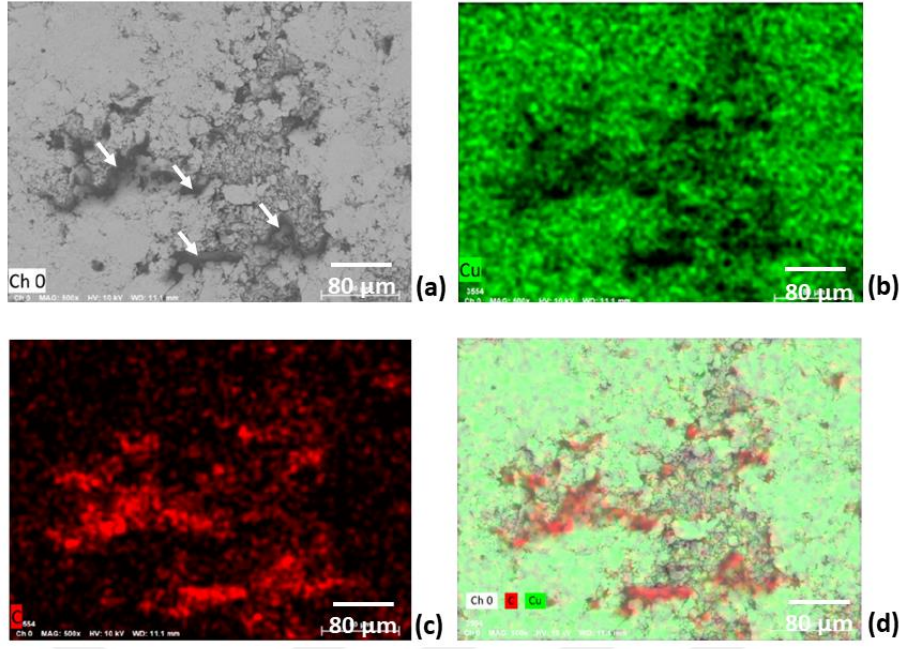


Şekil 3.152 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.34 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.152(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

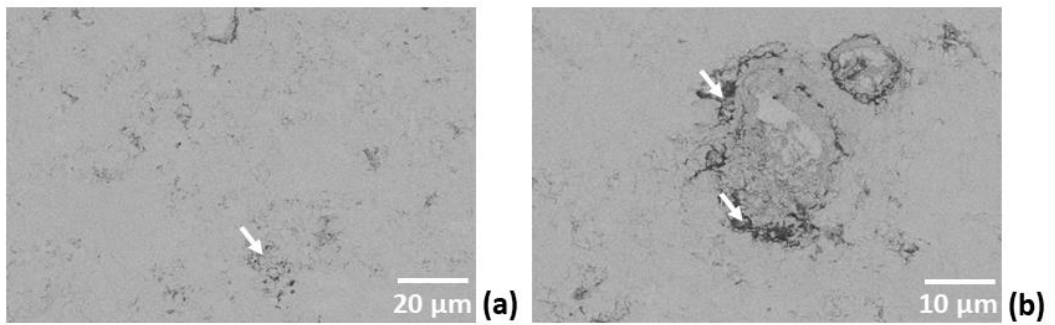
Alan	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	89,04	10,96

Bununla birlikte, 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG Cu esaslı kompozit mikroyapısında bulunan elementlerin yapı içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi için SEM-EDS haritalama analizi uygulanmıştır. Şekil 3.153(a)'da kompozitin 5000X büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.153(b) ve (c)'de; Şekil 3.153(a)'da görülen mikroyapı için, sırasıyla, Cu ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analiz sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.153(b)-(d)'de verilen SEM-EDS haritalama sonuçlarına göre; FLG'lerin matris yapısında yoğun bir şekilde aglomerasyona uğradığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.153 : 5 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı (a) SEM görüntüsü, (b) Cu, (c) C, elementel haritalama analizleri ve (d) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

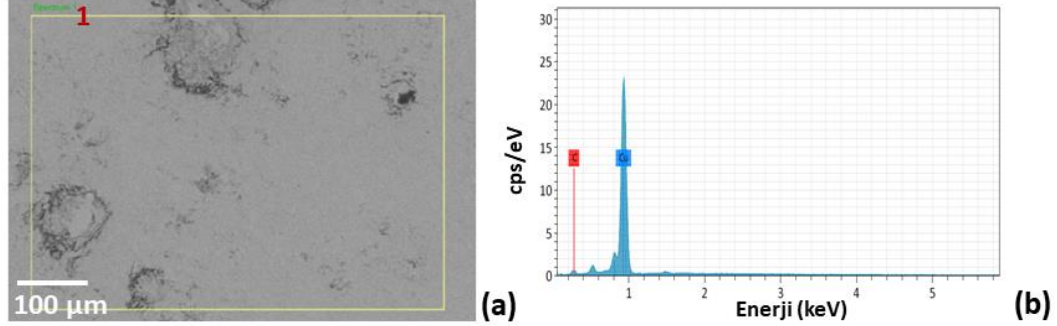
Şekil 3.154(a) ve (b), 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin, sırasıyla, 400X ve 800X büyütmelerdeki SEM görüntülerini göstermektedir. Beyaz oklarla belirtilen bölgelerde, matris yapısında FLG'lerin aglomerasyona uğradığı düşünülmektedir. Fakat, bu koyu renkli bölgelerdeki mevcut aglomerasyonun, 5 sa MA ile elde edilen kompozitin, matris yapısına göre (Şekil 3.151) daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.154 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 400X (b) 800X.

Şekil 3.155(a); 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin 500X büyütmedeki SEM görüntüsünü ifade etmektedir. Şekil 3.155(b) ise, Şekil 3.155(a)'da belirlenen alanın SEM-EDS analiz spektrumlarını göstermektedir. SEM-EDS analizine göre; FLG'lerin aglomerasyon yoğunluğunun, 5 sa MA ile elde edilen

kompozite göre daha az olduğu tespit edilmiştir. FLG'lerin matris yapısında kümelenmesinden kaynaklanan yoğun deformasyon, bu kompozit yapısında görülmemektedir. Çizelge 3.35; Şekil 3.155(a)'daki SEM görüntüsünde belirlenen alanın SEM-EDS analizi sonuçlarını göstermektedir.

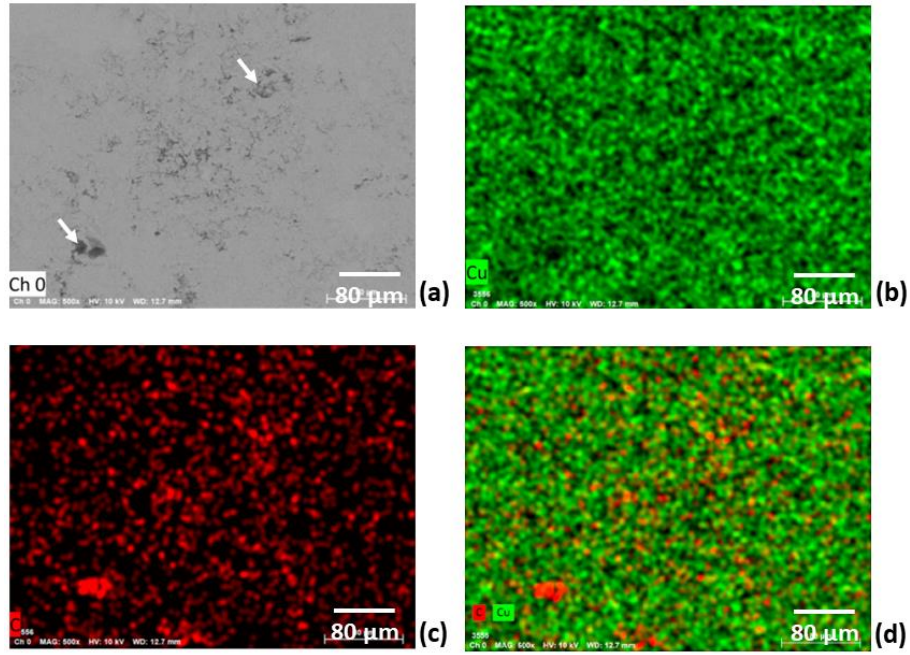


Şekil 3.155 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge 3.35 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı kompozite ait Şekil 3.155(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

Alan	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	95,73	4,27

Ayrıca, 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG Cu esaslı kompozit mikroyapısında bulunan elementlerin yapı içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi için SEM-EDS haritalama analizi uygulanmıştır. Şekil 3.156(a), kompozitin 500X büyütmedeki SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.156(b) ve (c)'de; Şekil 3.156(a)'da görülen mikroyapı için, sırasıyla, Cu ve C elementlerinin SEM-EDS haritalama analiz sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.156(b)-(d)'de verilen SEM-EDS haritalama sonuçlarına göre; FLG'lerin matris yapısında, 5 sa MA ile üretilen kompozit yapısına göre daha homojen olarak dağıldığı söylenebilir.



Şekil 3.156 : 7 sa MA ile elde edilen ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu esaslı (a) SEM görüntüsü, (b) Cu, (c) C, elementel haritalama analizleri ve (d) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

3.4.4 Sertlik ölçümü

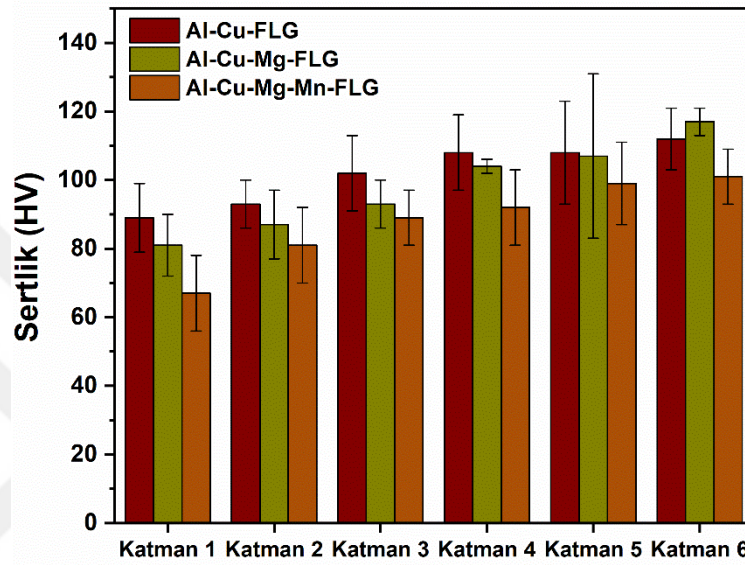
3.4.4.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin sertlik ölçümleri

FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM numunelerinin sertlik değerleri, Çizelge 3.36'da gösterilmiştir. Şekil 2.33'de gösterildiği gibi, bakalit üzerinden altı katmandan alınan her beş ölçümün aritmetik olarak ortalaması ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. FLG takviyeli FDM'ler için, yüksek FLG içeriğine sahip katmanlarda mikrosertlik değerlerinde artış açıkça gözlemlenmiştir. Katmanlardaki bu sertlik değerindeki artış, FLG'nin matris yapısında iyi dağılımına ve yüksek enerjili bilyalı öğütme işlemiyle birlikte oluşan deformasyon sertleşmesiyle ilişkilendirilebilir (Kwon ve diğ., 2011). Artan FLG içeriği ile birlikte; FLG takviyeli Al-Cu, Al-Cu-Mg ve Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin sertlik değerinde ilk katmandan son katmana doğru yaklaşık olarak, sırasıyla, %25,84; %44,44; %50,74 oranında artış görülmüştür. Şekil 3.157; FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.36 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM numunelerinin katmanlar boyunca sertlik değerleri (HV).

Numune	Katman 1 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 2 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 3 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 4 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 5 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 6 ($\bar{x} \pm \sigma$)
Al-Cu-FLG	89±10	93±7	102±11	108±11	108±15	112±9
Al-Cu-Mg-FLG	81±9	87±10	93±7	104±2	107±24	117±4
Al-Cu-Mg-Mn-FLG	67±11	81±11	89±8	92±11	99±12	101±8

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



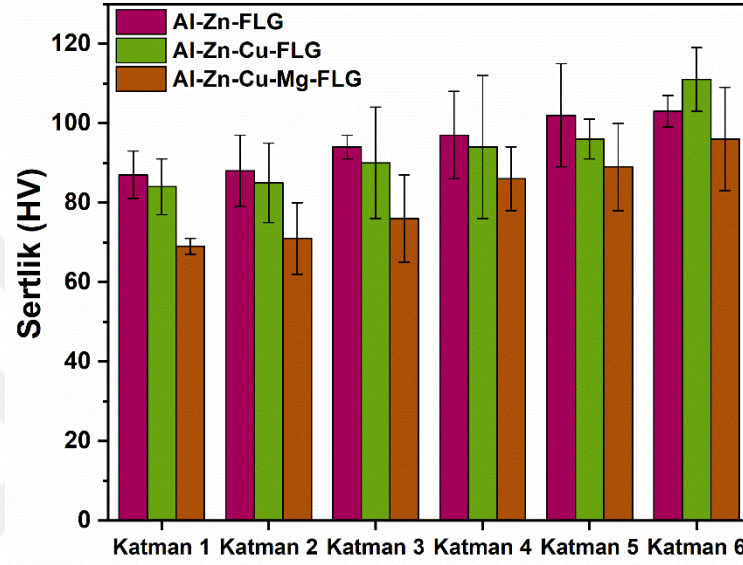
Şekil 3.157 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.

FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin sertlik değerleri Çizelge 3.37'de gösterilmiştir. Al-Zn esaslı FDM serisinde de, Al-Cu esaslı FDM serisinde olduğu gibi, artan FLG içeriğine göre katmanlar boyunca sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Artan FLG içeriği ile birlikte; FLG takviyeli Al-Zn, Al-Zn-Cu ve Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin sertlik değerinde ilk katmandan son katmana doğru yaklaşık olarak, sırasıyla, %18,39; %32,14; %39,13 oranında artış görülmüştür. Şekil 3.158, FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.37 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM numunelerinin katmanlar boyunca sertlik değerleri (HV).

Numune	Katman 1 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 2 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 3 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 4 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 5 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Katman 6 ($\bar{x} \pm \sigma$)
Al-Zn-FLG	87±6	88±9	94±3	97±11	102±13	103±4
Al-Zn-Cu-FLG	84±7	85±10	90±14	94±18	96±5	111±8
Al-Zn-Cu-Mg-FLG	69±2	71±9	76±11	86±8	89±11	96±13

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



Şekil 3.158 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.

CNT gibi karbon esaslı malzemelerin takviye edilerek T/M ile elde edilen ve Al matrisinde tasarlanan FDM'lerin, sertlik değerleri literatürde değerlendirilmiştir. Kwon ve diğ. (2011), T/M yöntemi ile tasarladıkları CNT takviyeli Al matris esaslı FDM'nin artan CNT içeriğine göre, katmanlar boyunca sertlik değerlerinde artış tespit etmişlerdir. Takviyesiz ilk katmandan (33,2 HV), hacimce %15 CNT içeriğine sahip son katmana doğru (258,1 HV), yaklaşık olarak, %677 oranında sertlik değerlerinde artış elde etmişlerdir. Artan CNT takviyesi ile birlikte, tane boyutunun küçülmesinin sertlikte artışı önemli derecede etkilediğini vurgulamışlardır. Udupa ve diğ. (2015), ağ. %0'dan ağ. %0,5 CNT'ye kadar tasarımını T/M yöntemi ile gerçekleştirdikleri Al esaslı FDM için, ilk katmandan (31 HV) son katmana (71 HV) doğru sertlik değerinde %129'a ulaşabilecek bir artış gözlemlemişlerdir. Bunun nedeninin, mikroyapı incelemelerinde de tespit edilen CNT'nin tane sınırlarındaki kümelenmiş kademeli yapısından kaynaklandığını vurgulamışlardır.

FLG içeriğinin mevcudiyeti, karışımlar kuralı ile ifade edilebilen bir eşitlikle (Denklem 3.2) her katman için FDM'lerin sertliğini arttırmaktadır (AbuShanab ve diğ., 2020; Reddy ve diğ., 2017).

$$H_c = H_m f_m + H_r f_r \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de ifade edilen eşitliğe göre; H_c her katmana ait kompozit yapının, H_m matrisin, H_r takviye malzemenin sertliğini temsil ederken; f_m matrisin , f_r ise takviye malzemenin hacim fraksiyonunu göstermektedir.

Grafenin metal matris içinde homojen bir şekilde dağıldığı düşünüldüğünde, grafen takviyeli metal matris esaslı kompozit yapılar için olası güçlendirme mekanizmalarından söz edilebilir: Tane boyutu küçültme, yük aktarımı, Orowan ve termal genleşme katsayısı uyumsuzluk mekanizması (Kwon ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2020; Rashad ve diğ., 2015; Wang ve diğ., 2012; Zhao ve diğ., 2015). Tane boyutu küçültme veya tane sınırı güçlendirme, ilk olarak, yoğun bir deformasyon sonucu grafenin iyi dağılmasına neden olan MA işlemine atfedilebilir (Suryanarayana, 2011). FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’lerde, her katman boyunca artan sertlik değerlerinin, sünek faza takviye edilen FLG’nin dislokasyon yoğunluğunun ve tane boyutu küçültmesinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. FLG, sinterleme sırasında matris için tane büyümesini engellemektedir. FLG, ara yüzeyde dislokasyonların hareketini kısıtlayarak dislokasyonların birikmesine yol açmaktadır. Bu durum, katmanlar boyunca artan FLG içeriği ile birlikte, mevcut FDM yapısının sertliğinin artmasına neden olmaktadır (Moghadam ve diğ., 2015; Saboori ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2018). Her katmandaki FLG içeriği nedeniyle, tane boyutu küçültmenin FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’ler için en etkili güçlendirme mekanizması olduğu söylenebilir. Matris ve takviye arasındaki ara yüzey bağı ile ilgili olan yük aktarımı ise, FDM’ler için ikinci önemli güçlendirme mekanizması olarak kabul edilebilir. Güçlü bir arayüz bağı, grafenin yük aktarımını ve güçlendirici etkisini arttırmaktadır. FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’lerin TEM görüntülerine (sırasıyla, Şekil 3.121 ve Şekil 3.122) göre, FLG ile matris arasında iyi bir arayüz mevcudiyeti görülmektedir. Ayrıca, EAD ile sentezlenen (Borand ve diğ., 2021) FLG’nin sahip olduğu yüksek yüzey alanı ($\sim 153 \text{ m}^2/\text{g}$), yük aktarımından dolayı matris ve FLG arasında bir ara yüzey bölgesi oluşturmaktadır (Asgharzadeh ve Sedigh, 2017). Kendi laboratuvarlarımızda sentezlediğimiz FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM

ile kıyaslamak için, ayrıca ticari grafen takviyeli Al-Cu esaslı FDM üretimi aynı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerlerinde katmanlar boyunca, FDM tasarımı için, lineer bir artış gözlemlenmemiştir (Şekil E.7). Ticari grafenin ölçülen yüzey alanının 42,7202 m²/g olması ve sentezlediğimiz FLG'nin yüzey alanına göre düşük olması, ticari grafen takviyeli bu FDM tasarımı için, yük aktarımının verimli bir mekanizma olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca, optik mikroskop (Şekil E.1 ve Şekil E.2) incelemelerinde, daha boşluklu bir yapı ve tane boyutu küçültme mekanizmasının katmanlar boyunca homojen bir şekilde gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lere ait XRD analizi ve TEM görüntülerinde (sırasıyla, Şekil 3.78, Şekil 3.83 ve Şekil 3.121, Şekil 3.122) tespit edilen Al₄C₃ fazının, matris yapısında homojen olarak dağılımı, matristen yük aktarımına katkıda bulunmaktadır (Kwon ve diğ., 2014). Orowan güçlendirme mekanizması, matris yapısındaki sertleştirme takviyesinin dağılımı ile ilgilidir. Matris yapısında yoğun bir şekilde homojen olarak dağılmış grafen, tane içlerinde dislokasyon hareketini önlemektedir (Kim ve diğ., 2014). Grafen ile Al, Al₄C₃ ile Al ve grafen ile Al₄C₃ arasında oluşan termal genleşme katsayısının uyumsuzluğu nedeniyle oluşan termal uyumsuzluk güçlendirme mekanizması, dislokasyon hareketini önleyerek mukavemetin artırılmasını sağlamaktadır (Akçamlı ve diğ., 2022; Xiong ve diğ., 2020). Mevcut tez çalışmasında, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'ler için etkin olan mekanizmalar; elde edilen bulgulara göre, tane boyutu küçültme ve yük aktarımı olarak belirlenmiştir.

3.4.4.2 Al-Zn esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı alaşım ve kompozitlerin sertlik ölçümleri

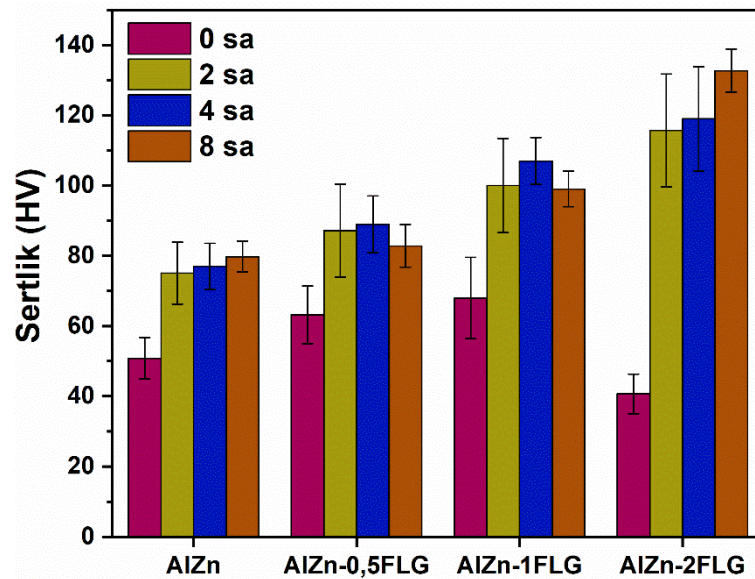
Çizelge 3.38, Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin, FLG içerikleri ve öğütme süresine bağlı olarak sertlik değerlerinin (HV) değişimini göstermektedir. FLG içeriği arttıkça, sertlik değerlerinin genel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, öğütme sürelerine göre değerlendirildiğinde, öğütme süresinin artışıyla birlikte, sertlik değerlerinde artış mevcuttur. Örneğin, harmanlanmış Al-7,5Zn alaşımının sertlik değeri 51±6 HV olarak ölçülmüşken, 4 sa MA ile elde edilen kompozitin sertlik değeri 77±7 HV olarak belirlenmiştir. Ağ. %0,5; %1, ve %2 oranında FLG içeren 4 sa boyunca MA uygulanan kompozitlerin sertlik değerleri, sırasıyla, 89± 8 HV; 107 ±7 HV ve 119 ±15 HV olarak ölçülmüştür. 4 sa MA ile üretilmiş olan FLG takviyesiz Al-7,5Zn alaşımına kıyasla, ağ. %2 FLG içeren Al-

7,5Zn esaslı kompozitin sertlik değeri %58,3 olarak artış göstermiştir. Bununla birlikte; 2 sa MA ile elde edilen, Al-7,5Zn alaşımlarının ve ağırlık %0,5; %1, ve %2 oranında FLG içeren kompozitlerin sertlik değerleri ise, sırasıyla, 75 ± 9 HV, 87 ± 13 HV, 100 ± 13 HV ve 116 ± 16 HV olarak belirlenmiştir. Al-7,5Zn alaşımına kıyasla, ağırlık %2 FLG içeren Al-7,5Zn esaslı kompozitin sertlik değerinin, %54,6 olarak artış gösterdiği görülmektedir. 8 sa MA ile üretilmiş olan Al-7,5Zn alaşımlarının ve ağırlık 0,5, 1, ve %2 FLG içeren Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin sertlik değerleri de, sırasıyla, 80 ± 4 HV, 83 ± 6 HV, 99 ± 5 HV ve 133 ± 6 HV olarak ölçülmüştür. 8 sa MA ile birlikte, Al-7,5Zn alaşımına kıyasla, ağırlık %2 FLG içeren Al-7,5Zn esaslı kompozitin sertlik değerinin, %66,25 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 3.159; Al-7,5Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin, öğütme ve FLG içeriklerine göre, sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.38 : Al-7,5Zn alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).

Numune	0 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	2 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	4 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	8 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZn-0FLG	51 ± 6	75 ± 9	77 ± 7	80 ± 4
AlZn-0,5FLG	63 ± 8	87 ± 13	89 ± 8	83 ± 6
AlZn-1FLG	68 ± 12	100 ± 13	107 ± 7	99 ± 5
AlZn-2FLG	41 ± 6	116 ± 16	119 ± 15	133 ± 6

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



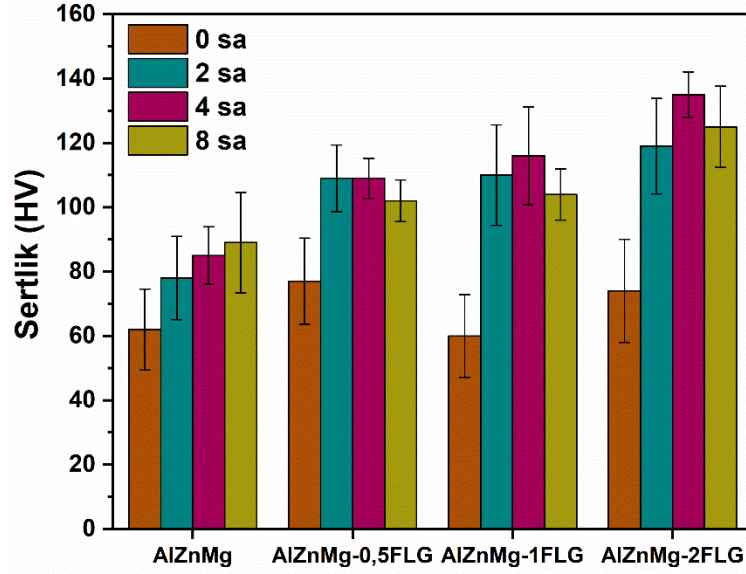
Şekil 3.159 : Al-7,5Zn alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.

Çizelge 3.39, Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerinin, FLG içerikleri ve öğütme süresine bağlı olarak, sertlik değerlerinin (HV) değişimini göstermektedir. Öğütme süreleri arttıkça, genel olarak, sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Örneğin, harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımının sertlik değeri 62 ± 13 HV olarak ölçülmüşken; 4 ve 8 sa MA ile elde edilen alaşımın sertlik değeri, sırasıyla, 85 ± 9 HV ve 89 ± 16 HV olarak belirlenmiştir. 4 sa MA ile üretilmiş olan Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımı ve ağı. %0,5; %1 ve %2 oranında FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitlerin sertlik değerleri ise, sırasıyla, 85 ± 9 HV, 109 ± 6 HV, 116 ± 15 HV ve 135 ± 7 HV olarak ölçülmüştür. Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımına kıyasla, ağı. %2 FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin sertlik değerinin, %58,82 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, 2 sa MA ile üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg alaşım ve ağı. %0,5; %1 ve %2 oranında FLG içeren kompozitlerin sertlik değerleri ise, sırasıyla, 78 ± 13 HV, 109 ± 10 HV, 110 ± 16 HV ve 119 ± 15 HV olarak ölçülmüştür. 2 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımına kıyasla, ağı. %2 FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin sertlik değerinin, %52,56 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte; 8 sa MA ile üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımı ve ağı. %0,5; %1 ve 2 oranında FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitlerinin sertlik değerleri, sırasıyla, 89 ± 16 HV, 102 ± 6 HV, 104 ± 8 HV ve 125 ± 13 HV olarak ölçülmüştür. Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımına kıyasla, ağı. %2 FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitin sertlik değerinin, %40,44 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Şekil 3.160; Al-7,5Zn-2,5Mg alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin, öğütme ve FLG içeriklerine göre, sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.39 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).

Numune	0 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	2 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	4 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	8 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZnMg-0FLG	62 ± 13	78 ± 13	85 ± 9	89 ± 16
AlZnMg-0,5FLG	77 ± 13	109 ± 10	109 ± 6	102 ± 6
AlZnMg-1FLG	60 ± 13	110 ± 16	116 ± 15	104 ± 8
AlZnMg-2FLG	74 ± 16	119 ± 15	135 ± 7	125 ± 13

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



Şekil 3.160 : Al-7,5Zn-2,5Mg alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.

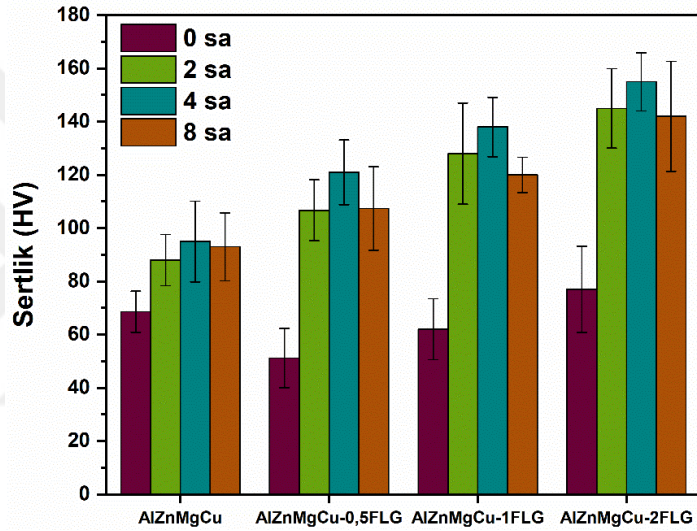
Çizelge 3.40; Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşım ve FLG ile takviye edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin, FLG içerikleri ve öğütme süresine bağlı olarak, sertlik değerlerinin (HV) değişimini göstermektedir. Harmanlanmış Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımının sertlik değeri 69 ± 8 HV olarak ölçülmüşken; 2 sa MA ile elde edilen alaşımın sertlik değeri ise 88 ± 10 HV olarak belirlenmiştir. Ağ. % 0,5; %1, ve %2 oranında FLG ile takviye edilen ve 2 sa MA uygulanan kompozitlerin sertlik değerleri, sırasıyla, 107 ± 11 HV, 128 ± 19 HV ve 145 ± 15 HV olarak ölçülmüştür. 2 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımına kıyasla, ağ. %2 FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin sertlik değerinin, %64,77 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, 4 sa MA ile üretilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımı ve ağ. %0,5; %1 ve %2 oranında FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerleri ise, sırasıyla, 95 ± 15 HV, 121 ± 12 HV, 138 ± 11 HV ve 155 ± 11 HV belirlenmiştir. 4 sa MA ile elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımına kıyasla, ağ. %2 FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitin sertlik değerini ise %63,15 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, 8 sa MA ile üretilmiş olan Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımı ve ağ. %0,5; %1 ve %2 oranında FLG içeren Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu kompozit numunelerinin sertlik değerleri ise, sırasıyla, 93 ± 13 HV, 107 ± 16 HV, 120 ± 7 HV ve 142 ± 21 HV olarak ölçülmüştür. Ağ. %2 FLG takviyesiyle birlikte, Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımına nazaran, sertlik değerinde %52,68 oranında artış görülmüştür. Şekil 3.161; Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı

kompozitlerin, öğütme ve FLG içeriklerine göre, sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.40 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşım ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerleri (HV).

Numune	0 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	2 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	4 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	8 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZnMgCu-0FLG	69±8	88±10	95±15	93±13
AlZnMgCu-0,5FLG	51±11	107±11	121±12	107±16
AlZnMgCu-1FLG	62±11	128±19	138±11	120±7
AlZnMgCu-2FLG	77±16	145±15	155±11	142±21

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



Şekil 3.161 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşımlarının ve FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.

T/M yöntemi ile elde edilen grafen takviyeli Al esaslı kompozitlerin sertlik değerleri literatürde değerlendirilmiştir. Pérez-Bustamante ve diğ. (2014); 5 sa bilyalı öğütme sonrası sertik değeri 79 HV olan Al'in, %1 GNP takviyesi ile birlikte bu kompozitin değerinin 93 HV'ye kadar ulaştığını raporlamışlardır. Rashad ve diğ. (2014); saf Al'a asetonunda homojen bir şekilde bir saat karıştırarak ağ. %0,3 GNP takviye edilmesiyle birlikte, sertlik değerini, 76 HV'den 85 HV'ye çıkarmışlardır. Liu ve diğ. (2016); farklı çözeltilerde (aseton, etil alkol) Al ve GNP'leri karıştırarak elde ettikleri kompozit tozların şekillendirilmesiyle, ağ. %0,3 rGO takviyesiyle birlikte saf Al'a (26 HV) göre, yaklaşık olarak %32 (34 HV) oranında sertlik değerlerinde artış elde edebilmişlerdir. Akçamlı ve diğ. (2016); 4 sa MA sonrası elde edilen ağ. %1 GNP takviyeli Al esaslı kompozit için, saf Al'a göre, sertlik değeri 44 HV'den 56 HV'ye yükseldiğini tespit

etmişlerdir. Li ve diğ. (2017); yüksek enerjili bilyalı öğütme ve vakum esaslı HP ile birlikte ürettikleri GNS takviyeli Al esaslı kompozitte, ağ. %1 GNS takviyesiyle, sertlik değerini, saf Al'a (62 HV) kıyasla, 81 HV'ye kadar ulaştığını raporlamışlardır. Zhang ve diğ. (2018); bilyalı öğütme sonrası HP uyguladıkları hacimce %1 GNS takviyeli Al-Si esaslı kompozitlerde ise sertlik değerini saf Al-Si alaşımına (81,2 HV) göre yaklaşık olarak %115,1 arttırarak, 174,7 HV'ye kadar ulaşmışlardır. Raj ve diğ. (2021); ıslak ortamda MA uygularak Al alaşımına (AA7075) ağ.%1 grafen takviye edilmesiyle birlikte, saf alaşıma (34,20 HV) kıyasla kompozitin sertlik değerinin 106,4 HV'ye ulaştığını tespit etmişlerdir. Kaykılarlı ve diğ. (2022); EAD yöntemiyle sentezledikleri FLG'yi Al-Cu alaşımına takviye ederek, kompozitin sertlik değerini 7 sa MA ile birlikte, yaklaşık 110 HV'ye kadar ulaştırmayı başarmışlardır.

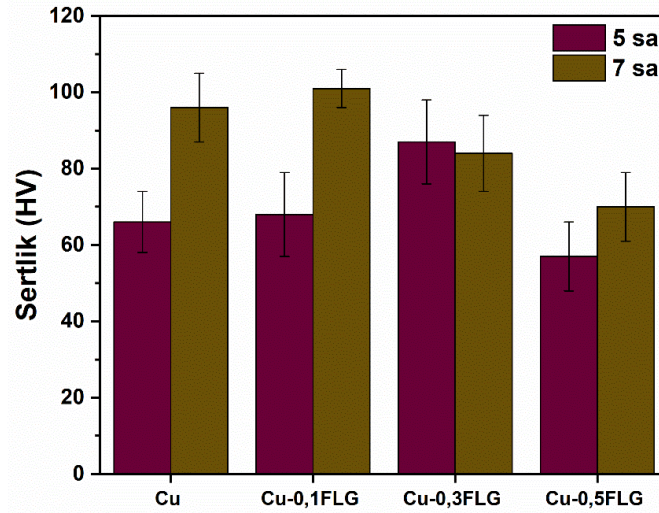
3.4.4.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik ölçümleri

Çizelge 3.41, farklı oranlarda FLG içerikleri ve farklı öğütme süreleri kullanılarak üretilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerlerini göstermektedir. En yüksek sertlik değeri (101 HV), 7 sa MA sonrası sinterlenen, ağ. %0,1 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit için elde edilmiştir. Ayrıca, takviyesiz Cu ile karşılaştırıldığında, 7 sa MA sonrası sinterlenen ağ. %0,3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozit için sertlik değerinde yaklaşık %31,8 oranında bir artış elde edilmiştir. Fakat, artan FLG içeriği ile Cu ve FLG arasındaki bağın zayıflığı ile ilgili olduğu düşünülen, ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu kompozitlerin sertlik değerinde önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, FLG'nin aglomerasyonu ve Cu matrisinde kümelenmiş bir şekilde mevcut oluşu, sertlik değerlerini düşürmektedir (Erdemir ve diğ., 2015). Şekil 3.162; 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin kompozitlerin, öğütme ve FLG içeriklerine göre, sertlik (HV) ve standart sapma değerlerini hata çubuklarıyla birlikte ifade eden grafiği göstermektedir.

Çizelge 3.41 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.

Numune	5 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)	7 sa ($\bar{x} \pm \sigma$)
Cu-0FLG	66 $\pm$ 8	96 $\pm$ 9
Cu-0,1FLG	68 $\pm$ 11	101 $\pm$ 5
Cu-0,3FLG	87 $\pm$ 11	84 $\pm$ 10
Cu-0,5FLG	57 $\pm$ 9	70 $\pm$ 9

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.



Şekil 3.162 : 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik (HV) değerleri.

T/M yöntemi ile elde edilen grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertlik değerleri literatürde değerlendirilmiştir. Genel olarak, sıcak presleme (HP) ve spark plazma sinterleme (SPS) uygulanarak üretilen kompozitlerin sertlik değerlerinde yüksek değerler elde edilebilmiştir (Chen ve diğ., 2016; Khobragade ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2017). Chen ve diğ. (2016); in situ (yerinde) oluşumla Cu matrisinde grafen üreterek elde ettikleri kompozite HP (800°C, 1 sa, vakum) uygulayarak; sertlik değerini ağ. %0,95 grafen takviyeli Cu esaslı kompozitte 143 HV'ye kadar çıkarmışlardır. Khobragade ve diğ. (2017); HP ve ardından düşük sıcaklıkta sinterleme (400°C, 2 sa) uygulayarak elde ettikleri GO takviyeli Cu esaslı matriste hacimce %15 grafen takviyeli kompozit için yaklaşık olarak 155 HV değerine ulaşmışlardır. Wang ve diğ. (2017), SPS (600°C, 5dk, 40 MPa) uygulayarak elde ettikleri hacimce %2,5 RGO takviyeli Cu esaslı kompozitte 188,8 HV sertlik değeri elde edebilmişlerdir. Grafenin CTAB ile modifiye edilerek, Cu matrisine takviye edildiği çalışmalarda ise, genel olarak, düşük sertlik değerleri elde edilmiştir (Gao ve diğ., 2016, 2018). Gao ve diğ. (2016), CTAB ile modifiye edilen ağ. %0,3 grafen takviyeli Cu matrisli kompozit için, 50 HV sertlik değerine ulaşabilmişlerdir. Gao ve diğ. (2018); CTAB ile modifiye edilen GO'nun ağ. %0,3 olarak Cu matrisine takviye edilmesiyle birlikte, kompozitlerin sertlik değerinin 51 HV'ye ulaştığını tespit etmişlerdir. He ve diğ. (2018); elektrokimyasal eksfoliyasyonla elde edilen grafen takviyeli Cu esaslı kompozitte, en yüksek sertlik değeri için, 70,2 HV'ye kadar ulaşmışlardır. Wu ve diğ. (2019); Cu matrisine hacimce %0,5 ve %1 grafen takviyesiyle, sertlik değerleri 75 HV'ye kadar

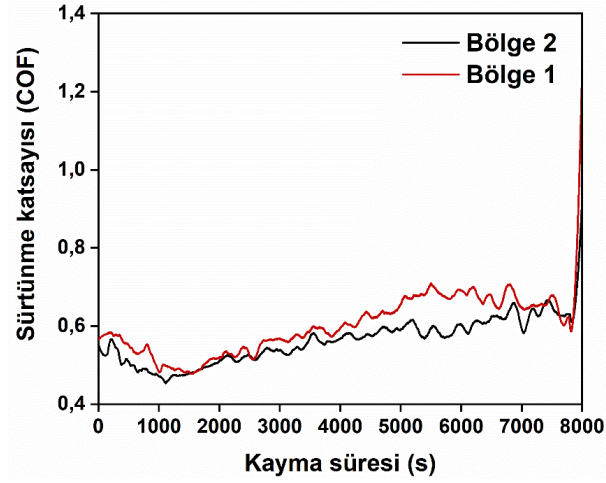
ulaşmışlardır. Hacimce %2 grafen takviyesi ise, kompozitlerin sertlik değerlerini 70 HV'ye kadar düşürmüştür. Hu ve diğ. (2021); elde ettikleri MLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin sertliğinin ağı. %2,5 MLG takviyesiyle 64,4 HV değerine ulaşabildiğini raporlamışlardır.

3.4.5 Aşınma testi

3.4.5.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin aşınma özellikleri

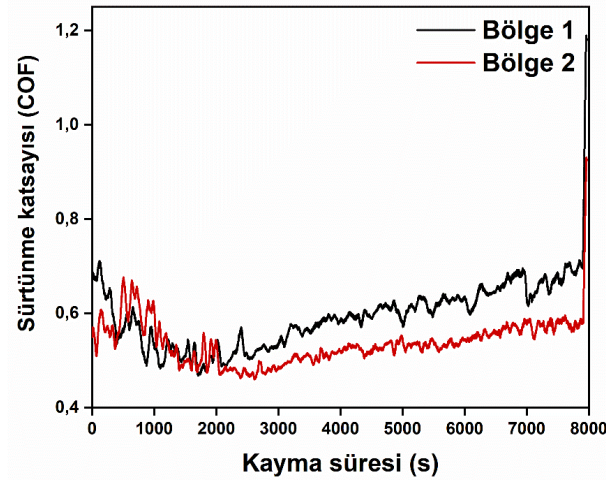
FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin, bölgesel olarak FLG dağılımları düşünülerek aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma testinden elde edilen sonuçlarla, her FDM için FLG yoğunluğuna göre sürtünme davranışları incelenmiştir. Birinci bölgede, FLG içeriği daha azken, temsilen ikinci bölgede ise FLG içeriği daha yoğun olarak bulunmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak, her bölge için COF değerleri belirlenmiştir. Her malzeme için farklı olan sürtünme katsayısı (COF), iki yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranının bir ölçüsüdür (Fahimi ve Abachi, 2021). COF düşük olduğunda, kayma kuvveti için gereken kuvvet daha az, COF yüksek olduğunda ise bu kayma kuvveti daha yüksek olmaktadır (Bird ve Chivers, 2014).

Şekil 3.162; FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'ler için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. FLG içeriğinin yoğun olduğu katman bölgelerinde COF değerinin bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. FDM'lerin derecelendirmesinden dolayı FLG içeriğinin artırılması, sürtünme katsayısından kaynaklanan dalgalanmaların azaldığı gözlemlenmektedir (Raj ve diğ., 2021). FLG'nin az yoğun olduğu bölgede COF değeri; 0,603 olarak bulunurken, katmanlar boyunca FLG içeriğinin arttığı bölgede ise COF değeri 0,562 olarak belirlenmiştir. Böylece, FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM numunesinde, katmanlar boyunca artan FLG içeriğine bağlı olarak COF değeri, yaklaşık olarak, %6,79 oranında düşmüştür.



Şekil 3.163 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

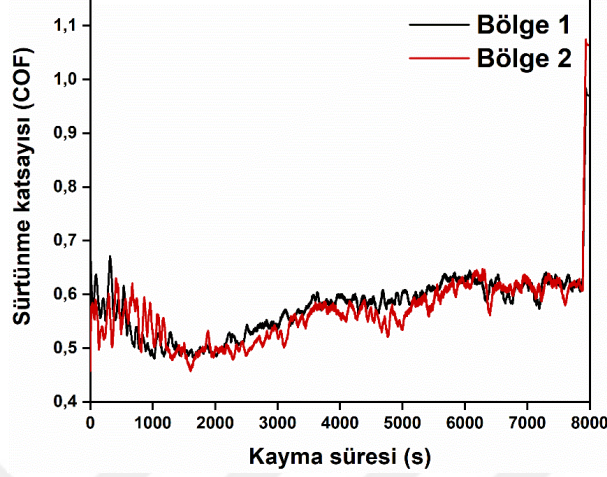
Şekil 3.164; FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. FLG içeriği az olan bölgelerde biraz daha yüksek dalgalanmalar görülmektedir. Katmanlar boyunca FLG içeriği arttıkça, dalgalanmaların azaldığı belirgindir. FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin birinci bölgesinde COF değeri, 0,596 elde edilirken; FLG'nin yoğun olduğu katmanlarda 0,539 olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak, katmanlar boyunca %9,5 oranında COF değerinde düşüş görülmüştür.



Şekil 3.164 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu-Mg esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

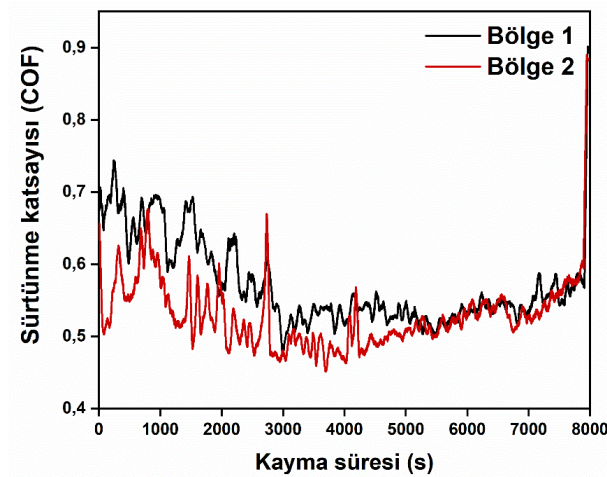
Şekil 3.165; FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. FLG'nin az olduğu bölgede, COF değeri 0,577 iken; FLG'nin yoğun olduğu

katmanlarda COF değeri 0,568 olarak tespit edilmiştir. Katmanlar boyunca FLG içeriği arttıkça, COF değerinde yaklaşık olarak %1,55 oranında düşüş görülmüştür. Ayrıca, COF değerlerindeki dalgalanma farkının bölgeler arasında çok şiddetli olmadığı tespit edilmiştir.



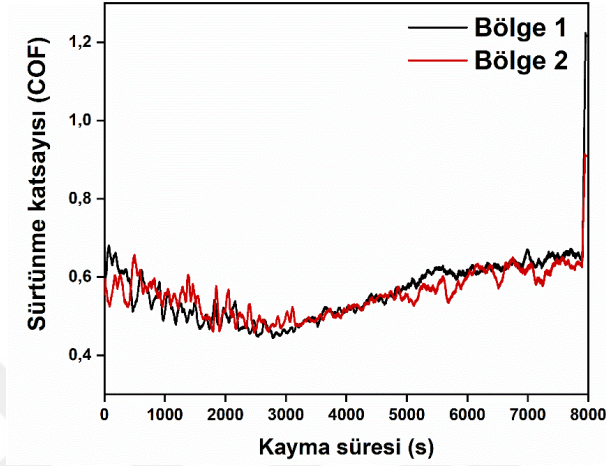
Şekil 3.165 : FLG içerik bölgelerinden Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

Şekil 3.166; FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. FDM'nin birinci bölgesinde COF değeri, 0,573 iken, FLG içeriği artan ikinci bölgede 0,530 olarak tespit edilmiştir. Katmanlar boyunca FLG içeriği arttıkça COF değeri yaklaşık olarak %7,5 oranında düşüş göstermiştir. Grafikteki dalgalanmalar, FLG içeriğinin az olduğu bölgelerde daha yüksek olarak seyir etmektedir.



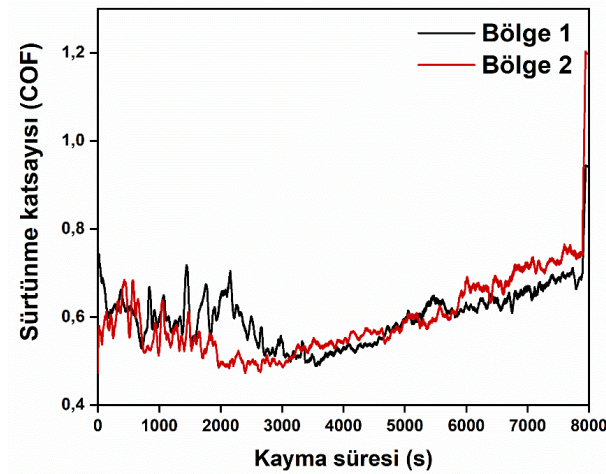
Şekil 3.166 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

Şekil 3.167; FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. Dalgalanmalar, FLG içeriği az olan bölgelerde bir miktar daha yüksek görünmektedir. FDM'nin birinci bölgesinde COF değeri 0,565 iken, FLG içeriğinin arttığı bölgede 0,557 olarak tespit edilmiştir. Katmanlar boyunca FLG içeriği artan bölgeye doğru COF değeri yaklaşık olarak %1,41 oranında düşüş göstermiştir.



Şekil 3.167 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn-Cu esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

Şekil 3.168; FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM için FLG içeriği içeren farklı alanların bir fonksiyonu olarak COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. FLG içeriğinin az olduğu bölgede dalgalanmanın yüksek olduğu görülmektedir. FDM'nin birinci bölgesinde COF değeri 0,601 iken, ikinci bölgede ise bu değer 0,597 olarak hesaplanmıştır. Katmanlar boyunca FLG içeriğinin artan bölgesine doğru COF değeri yaklaşık olarak, %0,6 olarak düşüş göstermiştir.



Şekil 3.168 : FLG içerik bölgelerinden Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

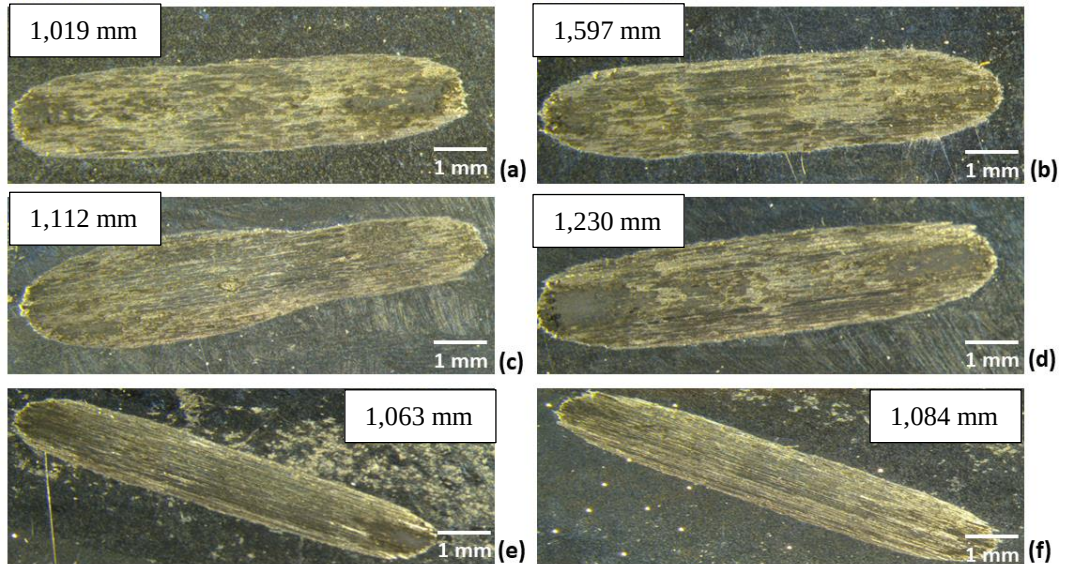
Çizelge 3.42, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin bölgesel olarak COF değerlerini ifade etmektedir. Bölge 1, az yoğun FLG bölgesini ifade ederken; bölge 2 çok yoğun olan FLG bölgesini temsil etmektedir. Bölge 1'den bölge 2'ye doğru, katmanlar boyunca COF değerlerinin bir miktar düştüğü açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.42 : FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin bölgesel olarak COF değerleri.

Numune	Bölge 1 ($\bar{x} \pm \sigma$)	Bölge 2 ($\bar{x} \pm \sigma$)
Al-Cu-FLG	0,603±0,121	0,562±0,101
Al-Cu-Mg-FLG	0,596±0,090	0,539±0,117
Al-Cu-Mg-Mn-FLG	0,577±0,103	0,568±0,129
Al-Zn-FLG	0,573±0,098	0,530±0,103
Al-Zn-Cu-FLG	0,565±0,129	0,557±0,108
Al-Zn-Cu-Mg-FLG	0,601±0,114	0,597±0,133

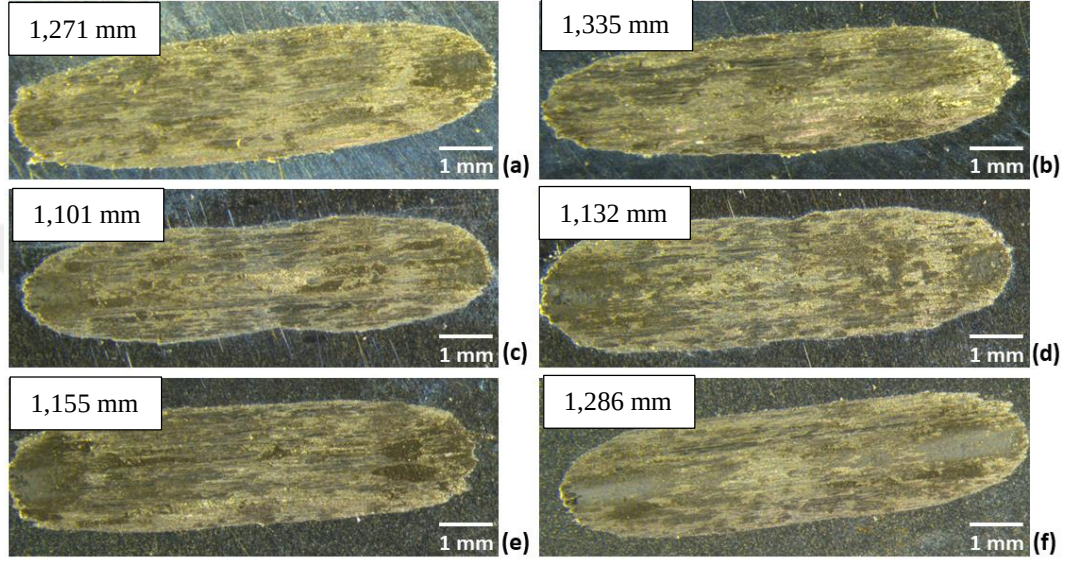
Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.

Aşınma sonrası FLG takviyeli Al-Cu, Al-Cu-Mg ve Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin stereo mikroskop görüntüleri, Şekil 3.169(a)-(f)'de gösterilmiştir. Stereo mikroskoptan elde edilen aşınma izi görüntülerine göre, FLG'lerin yoğun olduğu bölgelerde, aşınma iz genişliğinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Aşınma izinin genişlik değerleri, görüntülerin üstlerinde yer almaktadır. Ayrıca, daha düşük FLG oranlarının olduğu bölgelerde, yapıdan kopan parçaların mevcut olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.169 : FLG takviyeli Al-Cu (a-b), Al-Cu-Mg (c-d) ve Al-Cu-Mg-Mn (e-f) esaslı FDM'lerin aşınma izlerinin elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: (a-c-e) Yüksek FLG, (b-d-f) Düşük FLG içerik bölgesi.

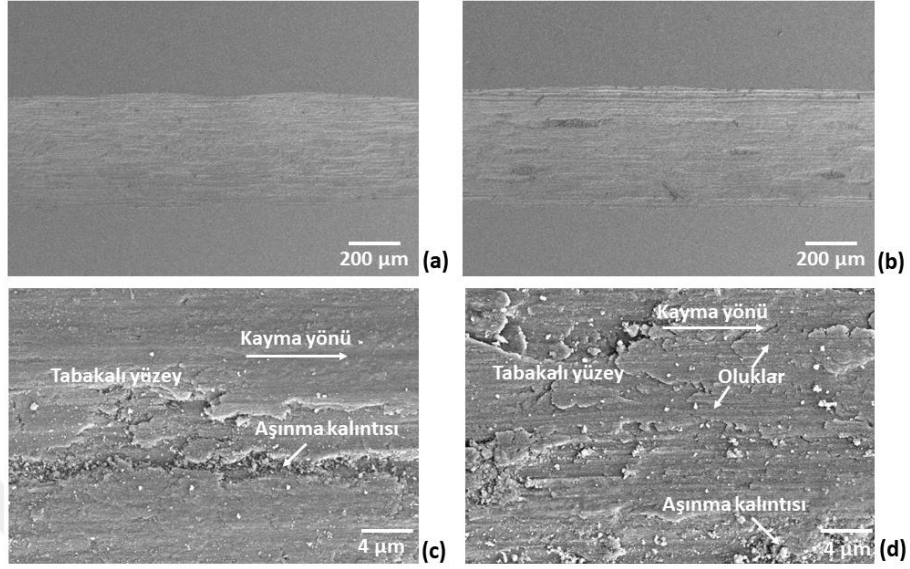
Aşınma sonrası FLG takviyeli Al-Zn, Al-Zn-Cu ve Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin stereo mikroskop görüntüleri, Şekil 3.170(a)-(f)'de gösterilmiştir. Aşınma izi görüntülerine göre, FLG miktarının daha yoğun olduğu katman bölgelerinde aşınma izi genişliğini bir miktar azaldığı söylenebilir. Aşınma izinin genişlik değerleri, görüntülerin üstlerinde yer almaktadır. Bununla birlikte, FLG içeriğinin az olduğu bölgelerde, yapıdan kopan parçaların olduğu görülmektedir.



Şekil 3.170 : FLG takviyeli Al-Zn (a-b), Al-Zn-Cu (c-d) ve Al-Zn-Cu-Mg (e-f) esaslı FDM'lerin aşınma izlerinin elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: (a-c-e) Yüksek FLG, (b-d-f) Düşük FLG içerik bölgesi.

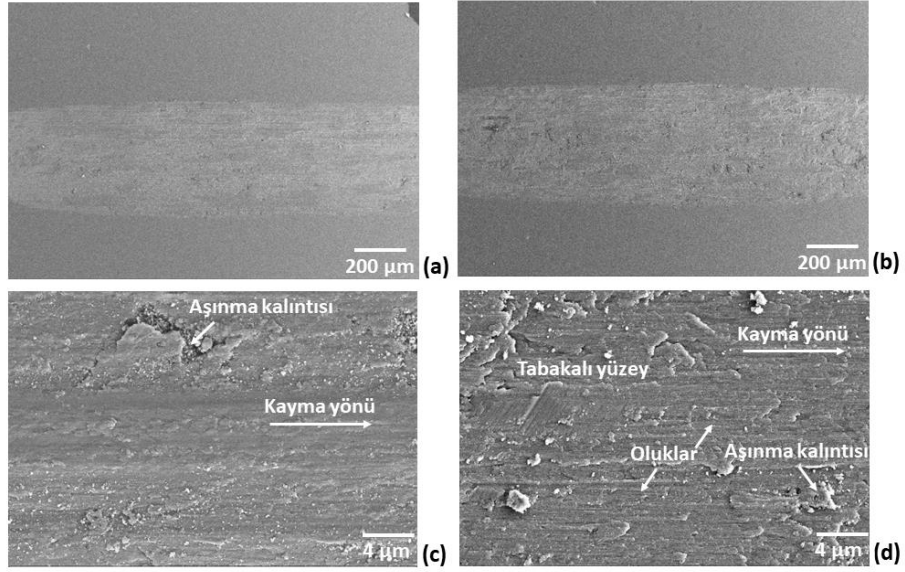
Aşınma testinden sonra, FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM için, aşınmış yüzeylerin ikincil elektron SEM görüntüleri, farklı büyütme ölçeklerinde, Şekil 3.171(a)-(d)'de gösterilmiştir. FLG içeriğinin düşük olduğu bölgede, aşınmanın daha şiddetli gerçekleştiği söylenebilir. Her iki alan için de FLG içeriği yeterince yüksek olabileceğinden, iki bölge arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Fakat FLG'nin bir miktar yüksek olduğu bölgede, aşınma izi genişliğinin azaldığı söylenebilir. Ayrıca, aşınma izi boyunca her iki bölge için abrasif ve adhezif aşınma göze çarpmaktadır. Kayma sırasında, plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu durum, matriste yüksek FLG içeriğine sahip bölge ile birlikte, COF değerinde azalmaya neden olarak metal kalıntıları ve çelik bilya arasındaki temasın azalmasıyla sonuçlanan bir film oluşturmaktadır. Sürtünme sırasında kayma süresi arttıkça sürekli olarak yağlayıcı film oluşumu devam etmektedir. Yağlayıcı film, grafen partüküllerinin içeriğinden, dağılımından ve boyutundan etkilendiğinden dolayı; eğer

grafen miktarı düşük olursa, temas yüzeyinde sürekli grafen filminin oluşumu yetersiz kalmaktadır ve sürtünme sırasında yok edilmesi kolaylaşmaktadır. (Nie vd., 2018; Xavior vd., 2018).



Şekil 3.171 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM için farklı büyütmelerde aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri: (a-c) Yüksek FLG, (b-d) Düşük FLG içerik bölgesi.

FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM için, aşınmış yüzeylerin ikincil elektron SEM görüntüleri, farklı büyütmelerde, Şekil 3.172(a)-(d)'de gösterilmiştir. FLG içeriğinin düşük olduğu bölgelerde daha tabakalı bir aşınma yapısı olduğu söylenebilir. Ayrıca, FLG'nin bir miktar yüksek olduğu katman bölgelerinde aşınma izi genişliğinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.172 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM için farklı büyütmelerde aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri: (a-c) Yüksek FLG, (b-d) Düşük FLG içerik bölgesi.

Grafen, malzemelerin performansında mükemmel özelliklere sahip bir yağlayıcı katı olarak işlev görmektedir (Berman ve diğ., 2013; El-Ghazaly ve diğ., 2017; Zhai ve diğ., 2014). Gazali ve diğ. (Ghazaly ve diğ., 2016), Al matrisindeki ağ. %5 grafen miktarının COF değerini düşürmesi nedeniyle COF'un grafen içeriğinden etkilendiğini düşünmüşlerdir. Tabandeh-Khorshid ve diğ. (Tabandeh-Khorshid ve diğ., 2016) ağ. %1 grafen içeriğine sahip Al kompozitlerinin, COF değerini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

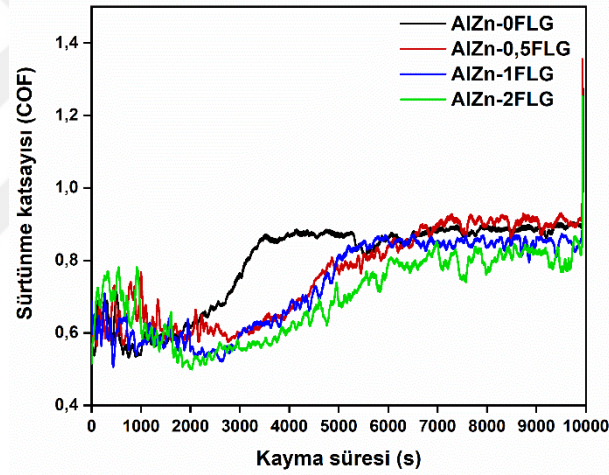
FDM'lerin mevcut tasarımları düşünülerek, aşınma testi uygulanan Al esaslı FDM'lerin literatürde genellikle bölgesel olarak az katmanlı oldukları dikkat çekmektedir. Literatürde özellikle döküm yöntemiyle tasarlanan ve üretilen FDM'lerin genellikle bölgesel olarak aşınma testi uygulandığı görülmektedir. Radhika (2018); silisyum nitrür (Si_3N_4) takviyeli Al (LM25) esaslı alaşım FDM'leri sıvı metalurjisi ve santrifüj döküm ile üreterek FDM'nin dış, orta ve iç yüzeylerine aşınma testi uygulamışlar ve FDM'nin dış yüzeyinde homojen bir şekilde dağılan Si_3N_4 'e bağlı olarak, aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Radhika ve Raghu (2018); ağ. %10 silisyum karbür (SiC) takviyeli Al-5Si-3Cu esaslı FDM'leri karıştırmalı ve santrifüj döküm yöntemleri ileri farklı santrifüj hızları ile üretmişlerdir ve mevcut hızlarda FDM'nin dış yüzeyinde SiC 'nin homojen ve yoğun bir şekilde dağılıp, sertliği ve aşınma özelliklerini iyileştirdiğini görmüşlerdir. Jolith ve Radhika (2020); santrifüj

ile ürettikleri ağ. %10 bor karbür (B_4C) takviyeli FDM'lerin kesilen dış yüzeyine T6 ısıl işlemi uygulamış ve FDM'lerin dış katmanının, döküm ile üretilen katmanlara kıyasla daha üstün aşınma özelliklerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

3.4.5.2 FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin aşınma özellikleri

4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin, FLG içeriklerine göre, aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testinden elde edilen sonuçlarla, her kompozit için FLG içeriğine göre sürtünme davranışları incelenmiştir.

Şekil 3.173; FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitler için, FLG içeriğinin bir fonksiyonu olarak, COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. Al-Zn alaşımı için, büyük bir dalgalanma gözükürken; FLG içeriği arttıkça bu dalgalanmalar azalmaya başlamıştır. Artan FLG içeriği ile birlikte, ortalama COF değerinde düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 3.173 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

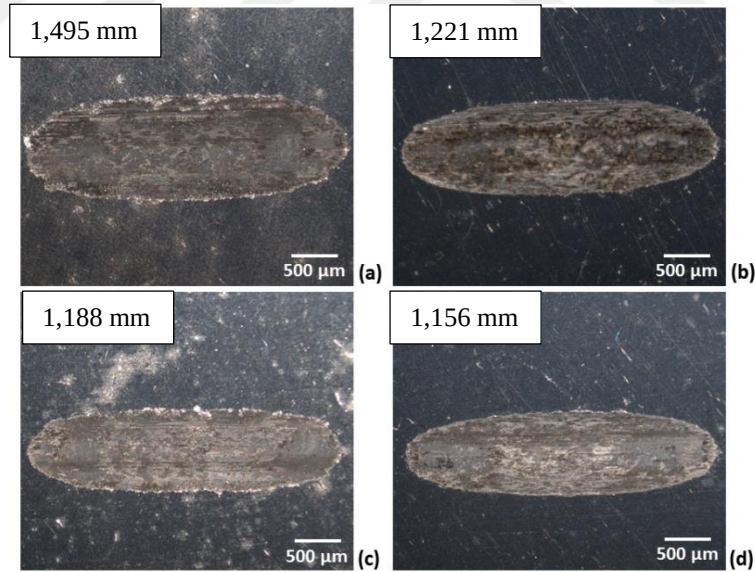
4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-xFLG (x: ağ. %0; 0,5; 1 ve 2) kompozitlerinin sürtünme katsayısı (COF) değerleri, Çizelge 3.43de gösterilmiştir. FLG içeriğinin artmasıyla birlikte COF değerlerinde bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.43 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-xFLG (x: ağı. %, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.

Numune	COF ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZn-0FLG	0,795 $\pm$ 0,178
AlZn-0,5FLG	0,759 $\pm$ 0,179
Al-Zn-1FLG	0,731 $\pm$ 0,156
Al-Zn-2FLG	0,698 $\pm$ 0,148

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.

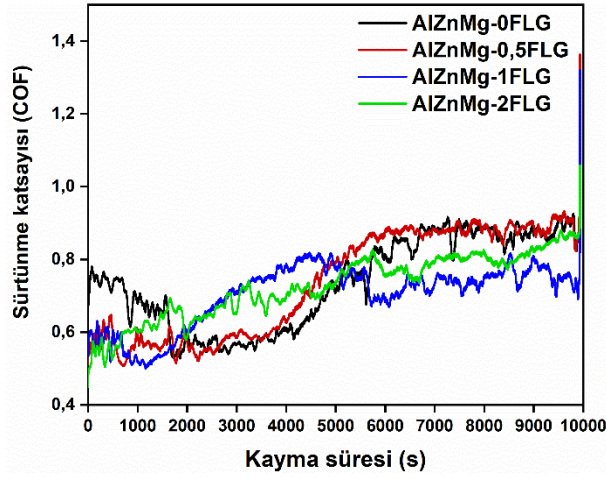
Aşınma sonrası numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri stereo mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Şekil 3.174(a), (b), (c) ve (d) sırasıyla AlZn-4sa, AlZn-0,5FLG-4sa, AlZn-1FLG-4sa ve AlZn-2FLG-4sa numunelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin genel görünümünü göstermektedir. Şekil 3.174(a)-(d)'de verilen genel aşınma izi görüntülerinden FLG miktarı artışı ile birlikte, numunenin aşınma oranının azaldığı ve grafen içermeyen yada düşük grafen miktarında daha derin aşınma izlerinin oluştuğu ve yapıdan kopan mikro parçaların varlığı görülmektedir. Aşınma izlerinin genişlik değerleri, görüntülerin üstlerinde yer almaktadır. Buna göre, artan grafen miktarına bağlı olarak aşınma direncinin arttığı düşünülebilir.



Şekil 3.174 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağı.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.

Şekil 3.175; FLG takviyeli Al-Zn-Mg esaslı kompozitler için, FLG içeriğinin bir fonksiyonu olarak, COF değişimini zamana bağlı olarak ifade etmektedir. Al-Zn-Mg alaşımı için, daha geniş bir dalgalanma genliği mevcutken; FLG içeriği arttıkça bu

dalgalanmalar biraz azalma eğilimi göstermektedir. Artan FLG içeriği ile birlikte, ortalama COF değerinde bir miktar düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 3.175 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn-Mg esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG (x: ağırlık %0; 0,5; 1 ve 2) kompozitlerinin sürtünme katsayısı (COF) değerleri, Çizelge 3.44’de gösterilmiştir. FLG içeriğinin artmasıyla birlikte, Ağırlık %2 FLG içeriğine kadar, COF değerlerinde bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. Fakat ağırlık %2 FLG takviyeli Al-7,5Zn-2,5Mg kompozitinin COF değerinde artış eğilimi görülmüştür.

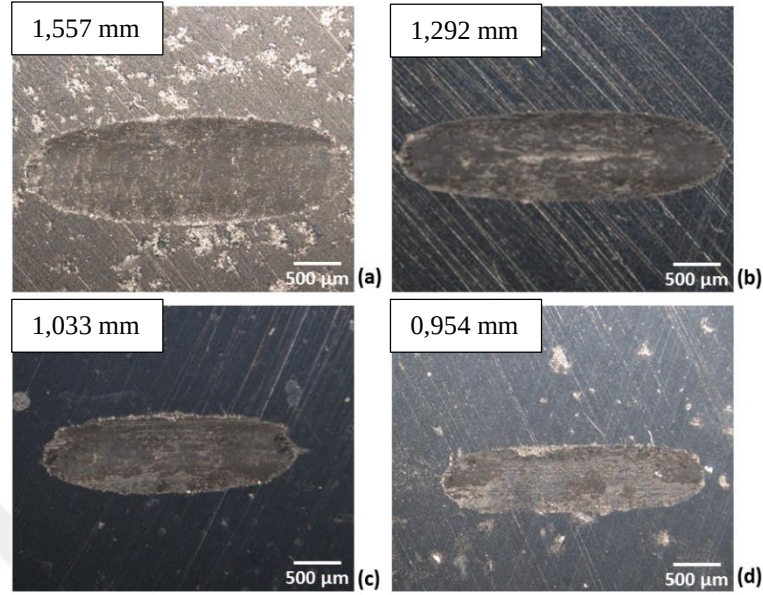
Çizelge 3.44 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG (x: ağırlık %0, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.

Numune	COF ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZnMg-0FLG	0,739 $\pm$ 0,169
AlZnMg-0,5FLG	0,738 $\pm$ 0,181
AlZnMg-1FLG	0,702 $\pm$ 0,127
AlZnMg-2FLG	0,727 $\pm$ 0,126

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.

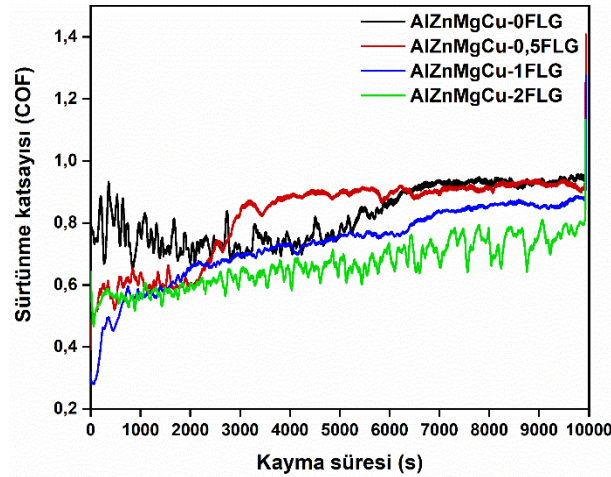
Şekil 3.176(a), (b), (c) ve (d) sırasıyla AlZnMg-4sa, AlZnMg-0,5FLG-4sa, AlZnMg-1FLG-4sa ve AlZnMg-2FLG-4sa numunelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin genel görünümünü, stereo mikroskoptan elde edilen görüntülerle ifade etmektedir. Şekil 3.176(a)-(d)’de verilen genel aşınma izi görüntülerinden, FLG miktarının düşük olduğu aşınma izlerinde yapıdan mikro parçaların sıyrıldığı ve FLG miktarı artışı ile birlikte, aşınma oranının azaldığı görülmektedir. Böylece, FLG miktarına bağlı olarak,

aşınma direncinin arttığı söylenebilir. Aşınma izlerinin genişlik değerleri, görüntülerin üstlerinde yer almaktadır.



Şekil 3.176 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağ.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.

Şekil 3.177; FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitler için, FLG içeriğinin bir fonksiyonu olarak, COF değişimini zamana bağlı olarak göstermektedir. Al-Zn-Mg-Cu alaşımı için geniş bir dalgalanma genliği seyir ederken, FLG içeriği arttıkça daha sabit ve azalmış bir dalgalanma grafiği mevcuttur.



Şekil 3. 177 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG (x: ağ. %0; 0,5; 1 ve 2) kompozitlerinin sürtünme katsayısı (COF) değerleri, Çizelge 3.45'de

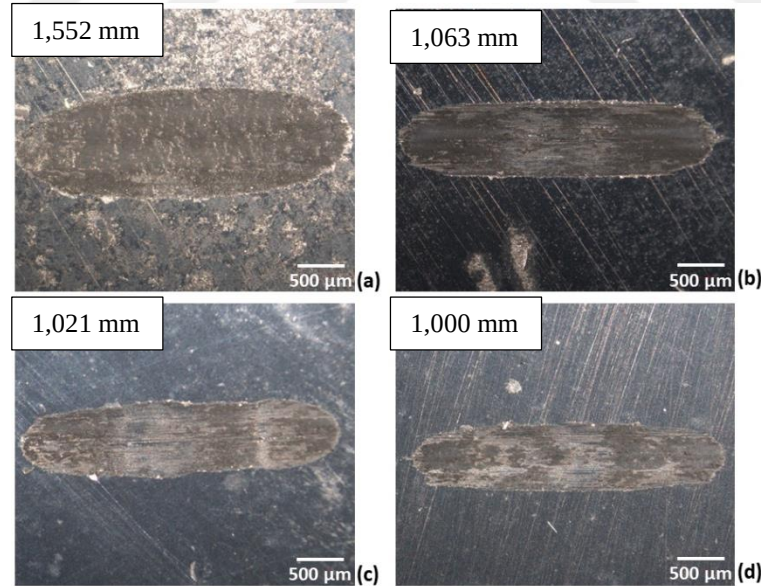
gösterilmiştir. FLG içeriğinin artmasıyla birlikte, COF değerlerinde bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.45 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG (x: ağı. %0, %0,5; %1 ve %2) kompozitlerinin COF değerleri.

Numune	COF ($\bar{x} \pm \sigma$)
AlZnMgCu-0FLG	0,825 $\pm$ 0,204
AlZnMgCu-0,5FLG	0,819 $\pm$ 0,205
AlZnMgCu-1FLG	0,731 $\pm$ 0,153
AlZnMgCu-2FLG	0,663 $\pm$ 0,108

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.

Şekil 3.178(a), (b), (c) ve (d) sırasıyla AlZnMgCu-4sa, AlZnMgCu-0,5FLG-4sa, AlZnMgCu-1FLG-4sa ve AlZnMgCu-2FLG-4sa numunelerinin aşınma sonrası yüzeylerinin genel görünümünü göstermektedir. Şekil 3.178(a)-(d)'de verilen genel aşınma izi görüntülerinden FLG miktarı artışı ile birlikte numunenin aşınma izinin azaldığı ve FLG içermeyen yada düşük FLG miktarında daha derin aşınma izlerinin olduğu görülmektedir. Aşınma izlerinin genişlik değerleri, görüntülerin üstlerinde yer almaktadır. Ayrıca, FLG miktarının az olduğu bölgelerde, yapıdan kopan mikro parçaların varlığı tespit edilmiştir.

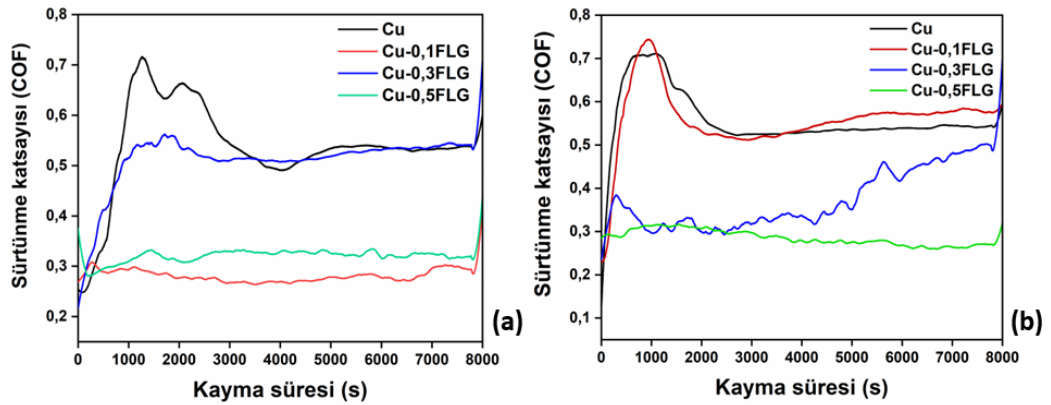


Şekil 3.178 : 4 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG kompozitlerinin aşınma izlerinin 30X büyütmede elde edilen stereo mikroskop görüntüleri: x (ağı.%)= (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.

3.4.5.3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin aşınma özellikleri

Şekil 3.179(a) ve (b), sırasıyla, 5 ve 7 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitler için FLG içeriğinin bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının (COF) değişimini göstermektedir. Şekil 3.179(a) ve (b)'de görüldüğü gibi saf Cu'nun ortalama COF değerinin her iki koşul için de yaklaşık 0,6'ya yakın olduğu söylenebilir. Cu'nun yüksek COF değeri, mekanik deformasyon ve sürtünme yüzeyleri arasındaki şiddetli yapışma nedeniyle gerinim sertleştirme etkisine bağlanabilir (Wu ve diğ., 2019). Cu matrisine FLG eklenmesiyle COF değerleri değişmiştir. En düşük COF değeri 0,281 olarak, 5 sa öğütme ile üretilen kompozitler arasında ağ. %0,1 FLG içeriğine sahip kompozitte görülmüştür. Fakat FLG'nin eklenmesiyle doğrusal bir düşüş beklenirken, bu kompozit serisi için eşit olmayan COF sonuçları elde edilmiştir. Optik mikroskop ve SEM görüntülerine bakıldığında, ağ. %0,1 FLG takviyeli Cu kompozitinin yüzeyinde bazı kusurlar mevcuttu. FLG'nin matris yapısındaki aglomerasyonla birlikte Cu ile zayıf bağlanması, aşırı bir kayma kuvvetinin uygulanmasına neden olduğunu düşünülmektedir. Böylece, ağ. %0,5 FLG takviyeli Cu kompozitinin COF değeri büyük ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte, 7 sa MA sonrası elde edilen kompozitler için, COF değerlerinde doğrusal bir düşüş elde edilmiştir. En düşük COF değeri ağ. 0,5 FLG içeren kompozit için 0,285 olarak tespit edilmiştir. Literatürde mevcut son araştırmalar, grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinin artan grafen miktarı ile düştüğünü iddia etmektedir (Ayyappadas ve diğ., 2017; Chen ve diğ., 2016; Fahimi ve Abachi, 2021; Gao ve diğ., 2018; He ve diğ., 2018; Hu ve diğ., 2021; Li ve diğ., 2015; Pratik ve diğ., 2020; Wu ve diğ., 2019). COF değeri, grafen içeriğindeki artışla genellikle yaklaşık en düşük olarak 0,2'ye düşebilmektedir. Pratik ve diğ. (2020) ağ. %0,5 rGO takviyeli Cu esaslı kompozitin COF değerinin, takviyesiz Cu'ya göre %77,5 oranında azalttıklarını belirtmişlerdir (Pratik ve diğ., 2020). Ayrıca, Gao ve diğ. (2018), takviyesiz Cu'ya kıyasla yaklaşık %65 oranında bir azalma ile en düşük COF'un ağ. %0,3 grafenle takviye edilen Cu esaslı kompozit için elde edildiğini gözlemlemişlerdir. COF değerindeki bu azalma, sertleştirilmiş disk üzerinde yağlayıcı bir kaplama oluşturan ve COF'u düşüren FLG'nin katmanlar arası kaymasına bağlanmaktadır (Zhang ve Chen, 2006). Şekil 3.154(b)'de görüldüğü gibi FLG; 7 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen ağ. %0,5 FLG ile takviye edilen Cu esaslı kompozitin Cu matrisinde, daha homojen bir şekilde dağılmış görünmektedir. Bu homojen dağılım sertlik değerlerinde etkili olmazken ağ. %0,5 FLG takviyeli

kompozitin aşınma özelliklerinde iyileşme sağlamıştır. Grafen içeriği arttıkça, yüksek stres koşulları altında, grafen, karbon ve oksijen açısından zengin bir tabaka oluşturmak için bakır oksit ile birleşmektedir (Chen ve diğ., 2016; Pratik ve diğ., 2020). Bu karbon açısından zengin katman, bir yağlayıcı görevi görmekte ve FLG ile takviye edilen Cu esaslı kompozitlerin COF değerini azaltmaktadır (Liu ve diğ., 2019). Bununla birlikte, Şekil 3.179(a) ve (b)'de ifade edilen grafiklerde, takviyesiz Cu'nun her iki öğütme süresi için de büyük bir dalgalanmaya sahip olduğu söylenebilir. Fakat FLG içeriği arttıkça, bu dalgalanmalar daha küçük genliklerle oluşmuştur. Ayrıca, 7 sa MA uygulanarak elde edilen ağ. %0,1 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin COF değeri, takviyesiz Cu'ya yakındır ve bu dalgalanma, takviyesiz Cu gibi daha büyük bir genliğe sahiptir. FLG içeriği arttıkça, eğrinin genliği COF değeri ile birlikte azalmakta ve daha kararlı hale gelmektedir. Bu durumda FLG'nin yanı sıra, aşınma özelliklerinin de FLG ve Cu arasındaki arayüzey bağına bağlı olarak değiştiği söylenebilir (Wu ve diğ., 2019). Çizelge 3.46; FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerini, standart sapmalarıyla birlikte belirtmektedir.



Şekil 3.179 : (a)5 ve (b)7 sa MA uygulanan tozlardan elde edilen FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

Çizelge 3.46 : FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin COF değerleri.

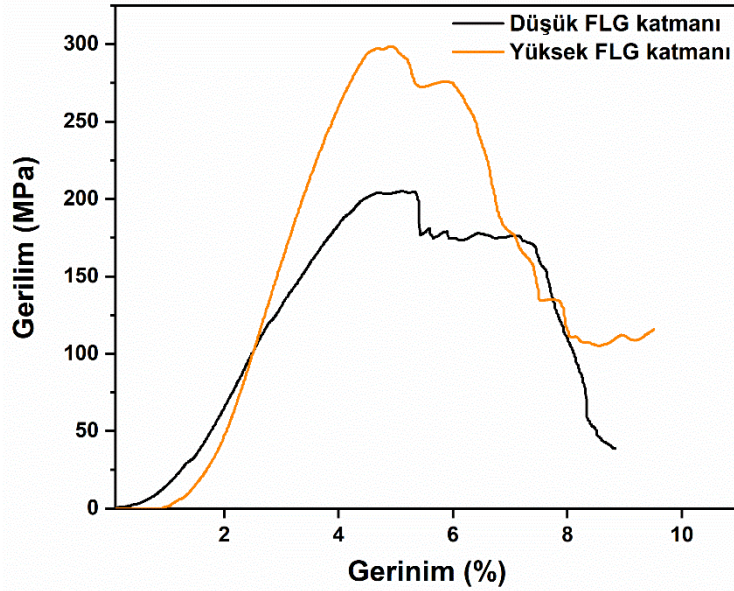
Numune	COF ($\bar{x} \pm \sigma$)
Cu-5sa	0,537 $\pm$ 0,108
Cu-7sa	0,557 $\pm$ 0,086
Cu-0,1FLG-5sa	0,281 $\pm$ 0,022
Cu-0,1FLG-7sa	0,558 $\pm$ 0,093
Cu-0,3FLG-5sa	0,511 $\pm$ 0,077
Cu-0,3FLG-7sa	0,375 $\pm$ 0,080
Cu-0,5FLG-5sa	0,321 $\pm$ 0,031
Cu-0,5FLG-7sa	0,285 $\pm$ 0,021

Not: $\bar{x}$: Aritmetik ortalama; σ : Standart sapma.

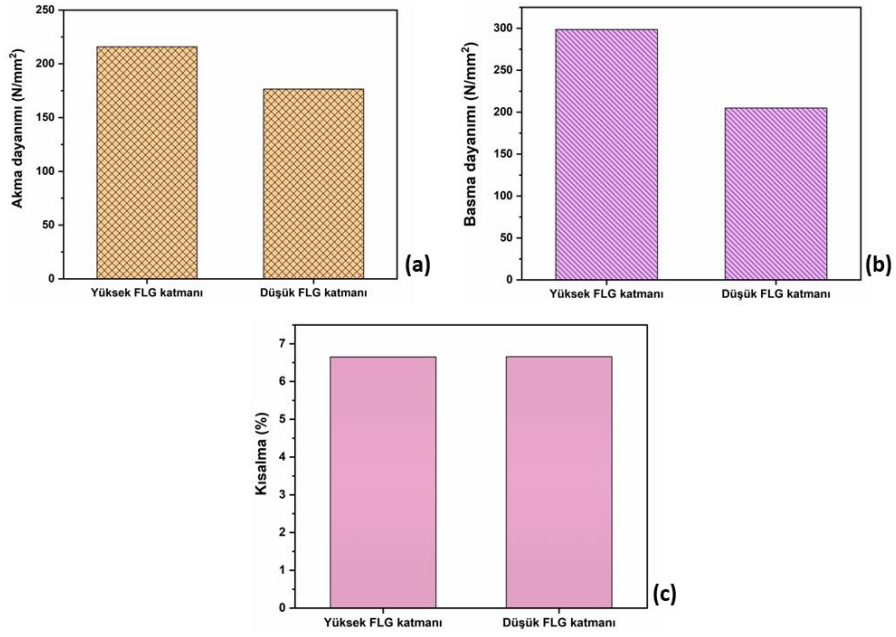
3.4.6 Basma testi

3.4.6.1 FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin basma testi sonuçları

FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin basma testi için, FDM'nin katmanlar boyunca artan FLG içeriğine yönelik tasarımları göz önünde bulundurularak, FLG'nin yoğun olduğu bölge ile FLG yoğunluğunun az olduğu katman bölgelerine doğru kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.180, FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM için, basma eğrilerini göstermektedir. Ayrıca, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne göre akma, basma mukavemeti ve %kısalma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.181(a), (b) ve (c)'de ifade edilmiştir. Bu grafiklere göre, en yüksek akma ve basma mukavemetine FLG miktarının yoğun olduğu katmanlarda ulaşılmıştır. FLG içeriğinin yoğun olduğu katmanlarda, yaklaşık 298 MPa basma mukavemeti elde edilirken, daha düşük FLG içeriğine sahip katmanlarda 204 MPa basma mukavemeti elde edilmiştir. Akma dayanımında da, FLG içeriğinin yoğun olduğu bölgede, yaklaşık olarak 215 MPa'a ulaşılmıştır. FLG'nin yoğun olduğu bölgelerde, FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerde %kısalma değerlerinde, her iki bölge için anlamlı bir değişiklik tespit edilmemiştir. Bu durum, FDM'nin FLG içeriğine göre katmanlar boyunca tasarımıyla ilişkilendirilebilir.

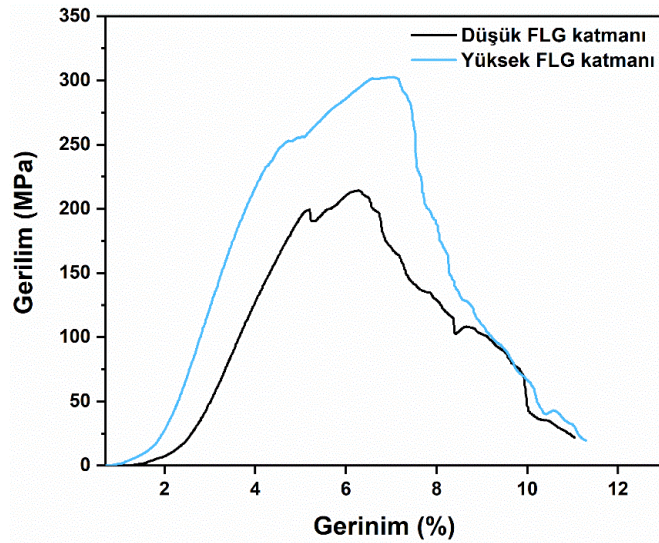


Şekil 3.180 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.

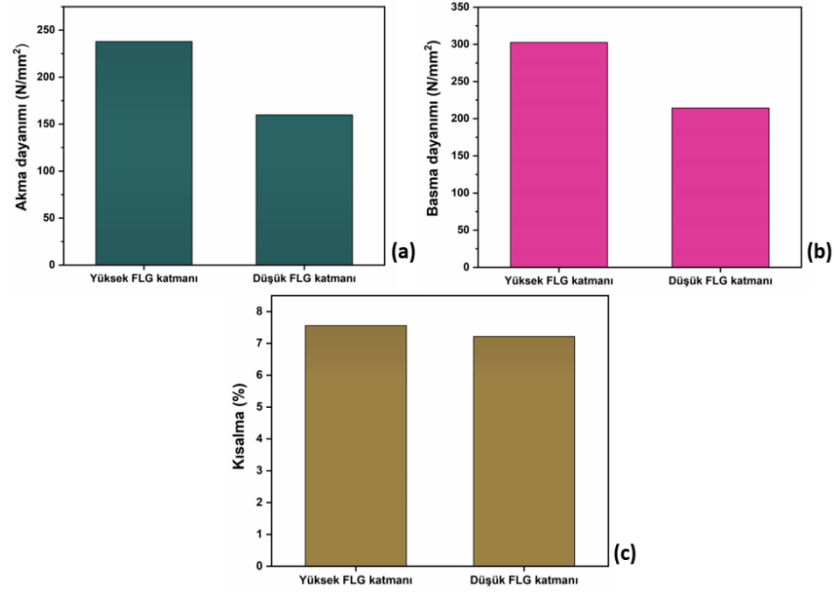


Şekil 3.181 : FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısalma değerlerinin değişimi.

Şekil 3.182, FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM’ye ait, basma eğrilerini göstermektedir. Bununla birlikte, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne göre akma, basma mukavemeti ve %kısalma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.183(a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Akma ve basma mukavemetinde artış, FLG içeriğinin yoğun olduğu katmanlarda meydana gelmiştir. Buna göre, FLG içeriğinin daha yoğun olduğu katmanlarda, sırasıyla, yaklaşık olarak 238 MPa ve 302 MPa; akma ve basma dayanım değerleri elde edilmiştir. FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM tasarımı düşünülerek, yüzde kısalma değerlerinde her iki bölge için anlamlı bir değişiklik tespit edilmemiştir.

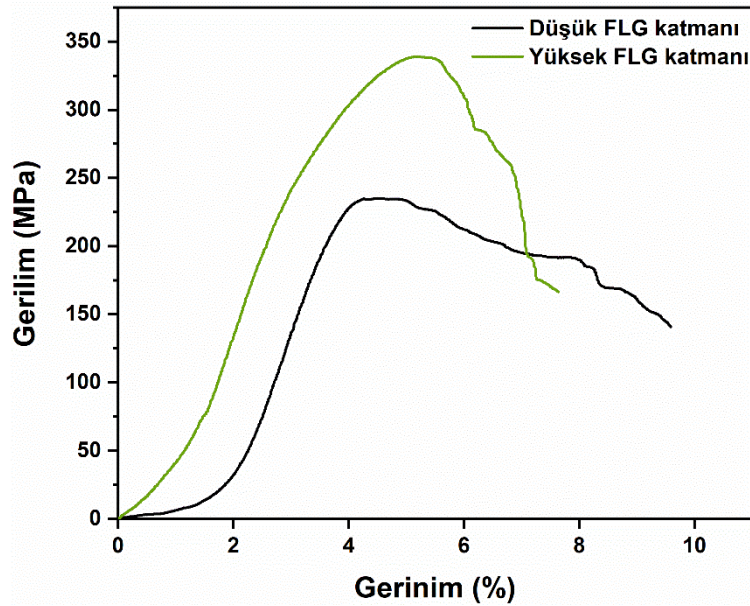


Şekil 3.182 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.

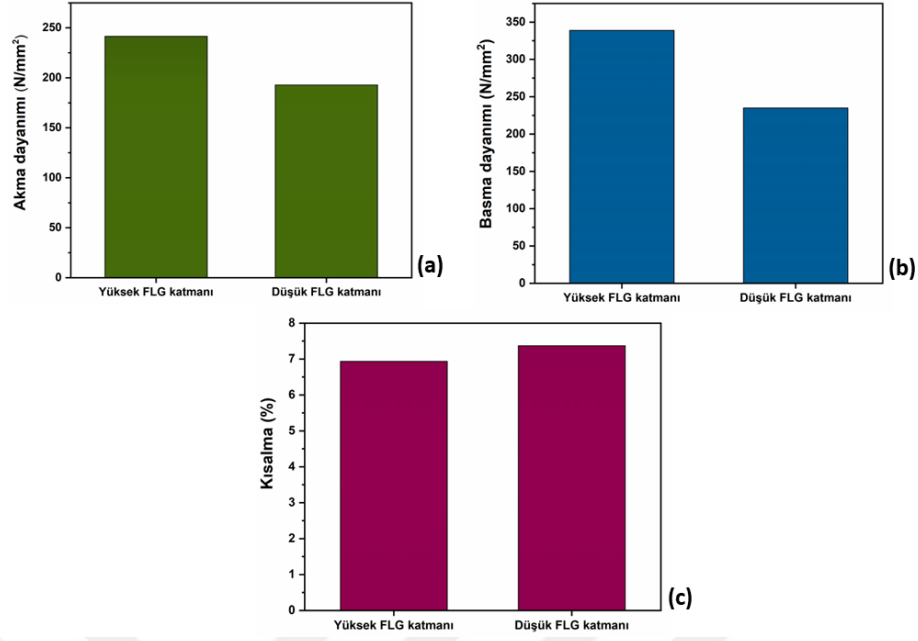


Şekil 3.183 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'ye ait basma eğrileri Şekil 3.184'de gösterilmiştir. Ayrıca, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne göre akma, basma mukavemeti ve %kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.184(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. FLG içeriğinin yoğun olduğu katman bölgesinde, sırasıyla, yaklaşık olarak 241 MPa ve 339 MPa akma ve basma mukavemetine ulaşılmıştır. Yüksek FLG içeriğinin olduğu bölgede, %kısılma değeri bir miktar düşmüştür. Bunun nedeni, FLG'nin yapıya gevreklik özelliği katmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

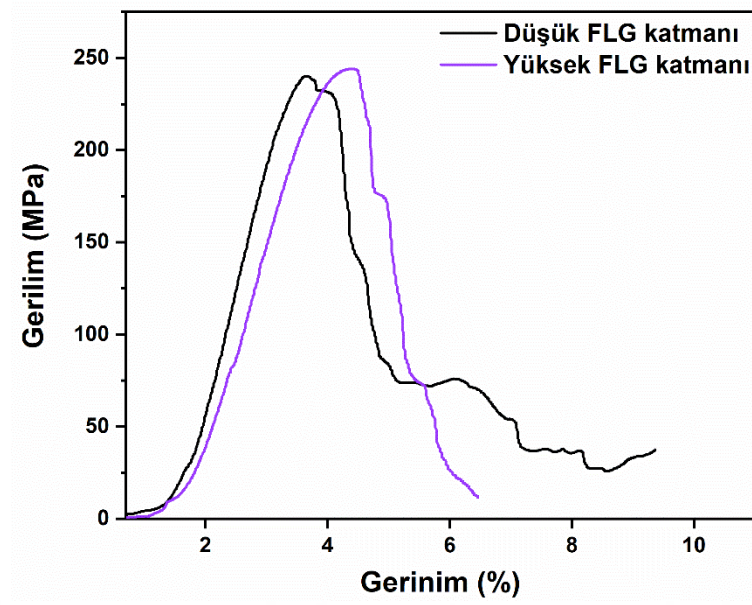


Şekil 3.184 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.

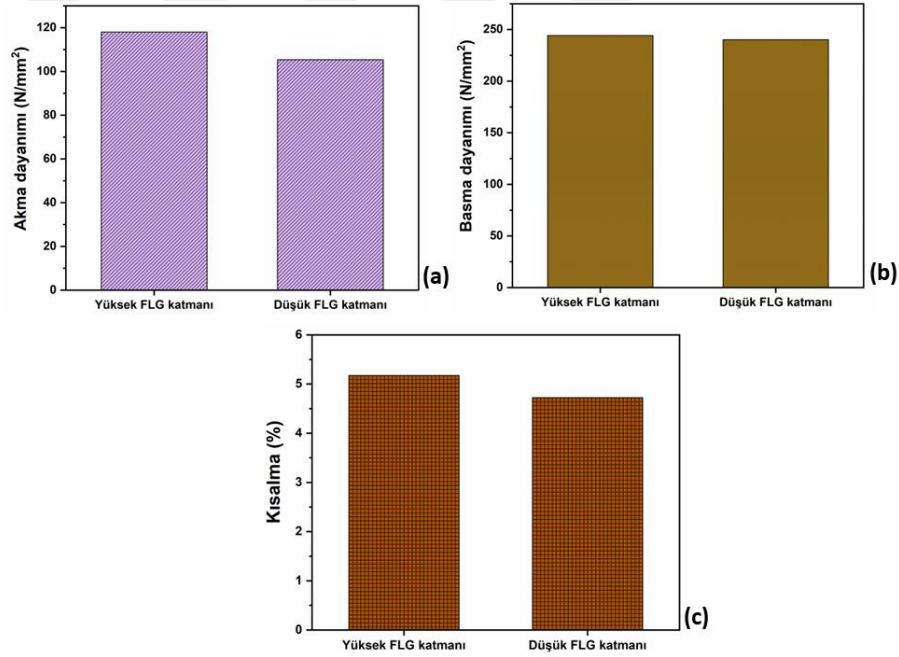


Şekil 3.185 : FLG takviyeli Al-Cu-Mg-Mn esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

Şekil 3.186, FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM’ye ait, basma eğrilerini göstermektedir. Bununla birlikte, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne göre akma, basma mukavemeti ve %kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.187(a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Diğer FDM tasarımlarına kıyasla, FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM için, akma ve basma mukavemetinde ciddi bir değişim görülmemektedir. Yüksek FLG içeriğine sahip olan katman bölgelerinde, sırasıyla, yaklaşık olarak, 118 MPa ve 244 MPa, akma ve basma mukavemeti değerlerine ulaşılmıştır. Düşük FLG içeriğine sahip katman bölgelerinde ise, sırasıyla, yaklaşık olarak, 105 MPa ve 240 MPa, akma ve basma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, FDM tasarımı göz önünde bulundurularak, FLG içeriklerine göre, iki bölge arasında anlamlı bir %kısılma değeri tespit edilmemiştir.



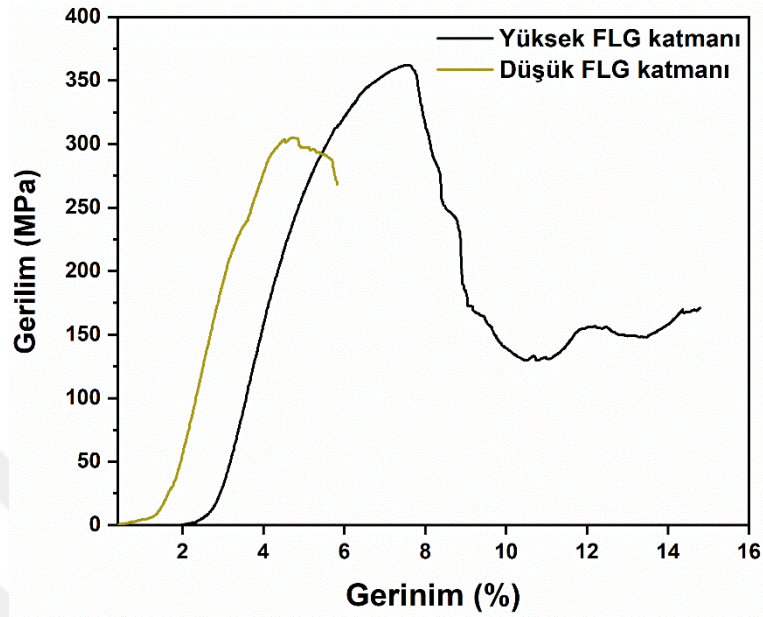
Şekil 3.186 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.



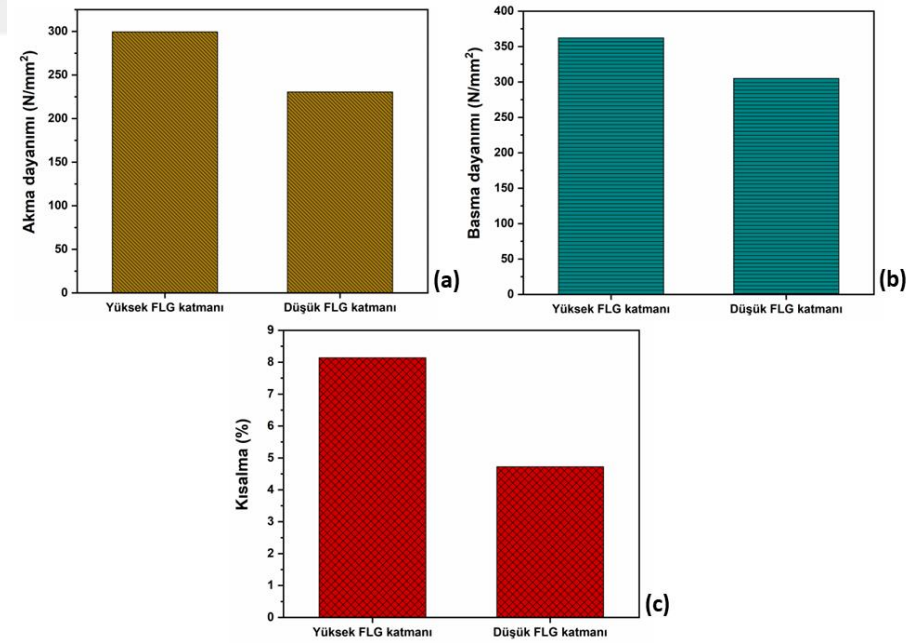
Şekil 3.187 : FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM’ye ait basma eğrileri Şekil 3.188’de gösterilmiştir. Ayrıca, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne göre akma, basma mukavemeti ve %kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.189(a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Buna göre, daha yoğun FLG içeriğine sahip katman bölgesinde, sırasıyla, yaklaşık olarak, 299 MPa akma ve 362 MPa basma mukavemeti değerlerine

ulaşmıştır. Aynı zamanda, bu değer, bu tez çalışmasında elde edilen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM’lerde en yüksek akma ve basma mukavemet değerleri olarak değerlendirilmiştir.



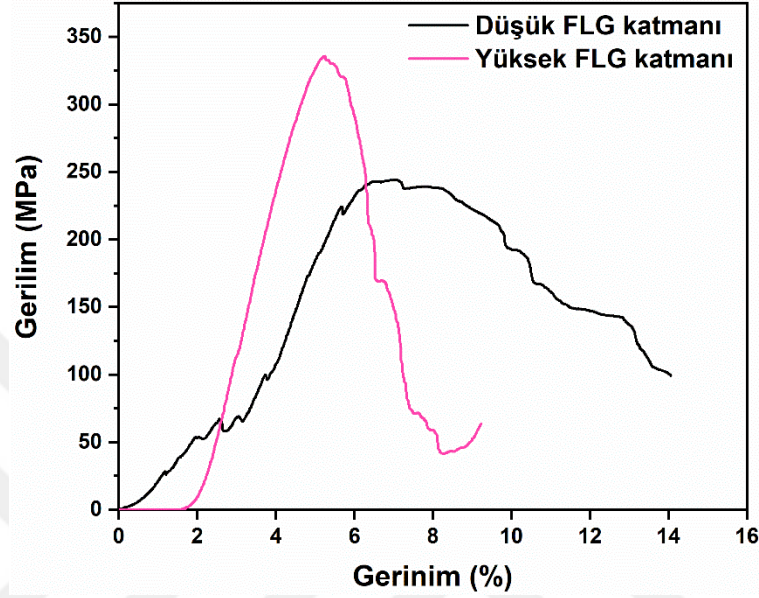
Şekil 3.188 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.



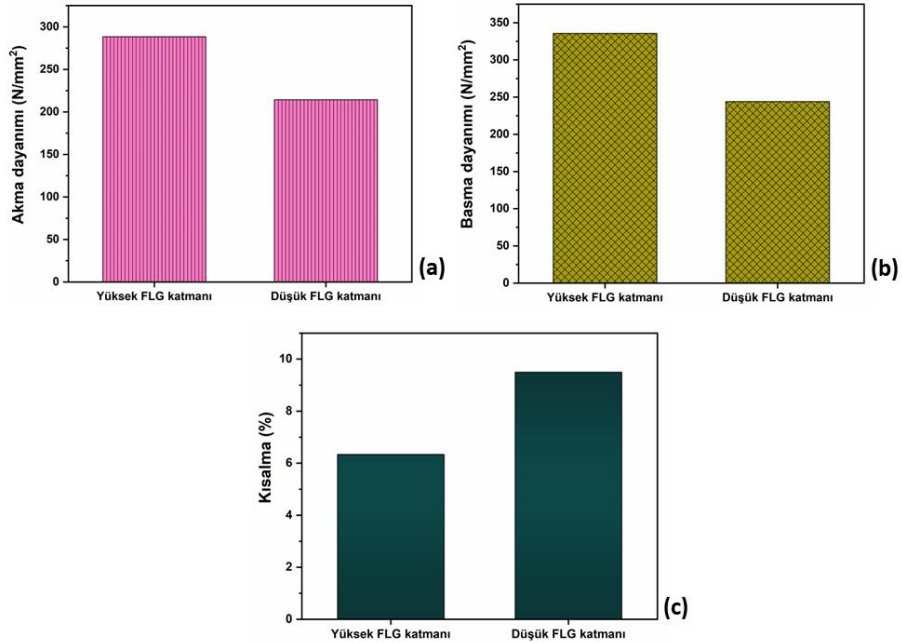
Şekil 3.189 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu esaslı FDM’lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

Şekil 3.190; FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM’ye ait, basma eğrilerini göstermektedir. Bununla birlikte, FLG miktarına bağlı olarak, yük uygulama yönüne

göre akma, basma mukavemeti ve %kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.191(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Buna göre, FLG'nin yoğun olduğu bölgede, sırasıyla, yaklaşık olarak, 288 MPa ve 336 MPa akma ve basma mukavemeti değerlerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte, artan FLG içeriğine bağlı olarak, %kısılma değerlerinde bir miktar düşüş yaşanmıştır.

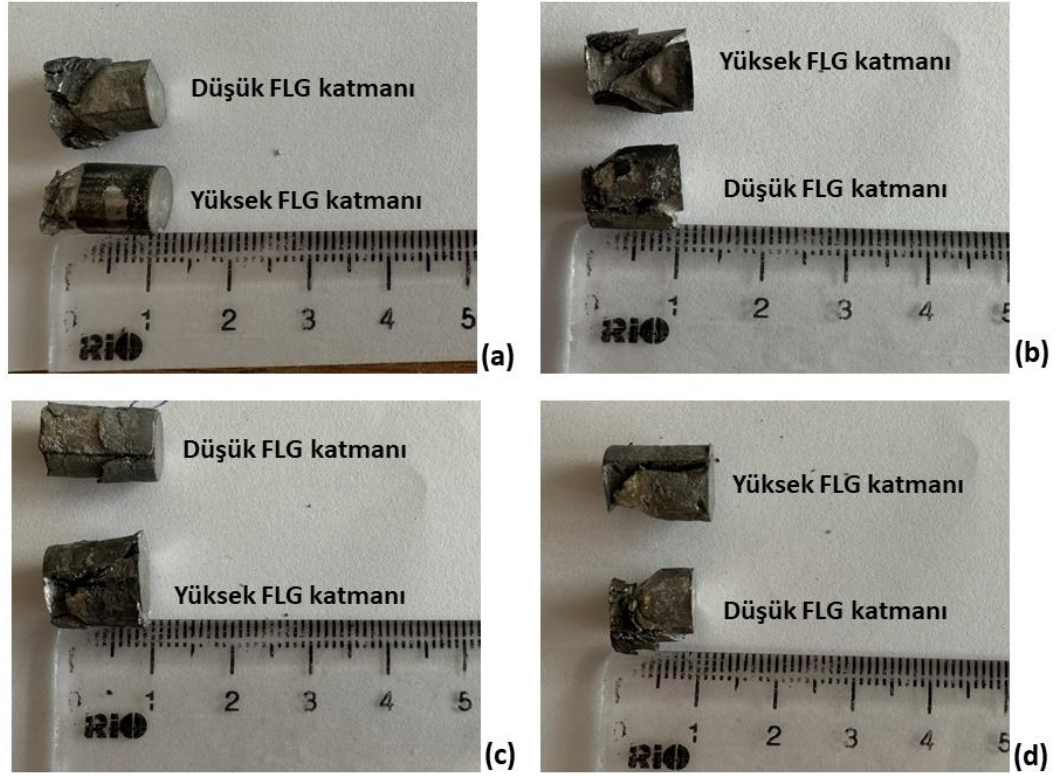


Şekil 3.190 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre basma eğrileri.



Şekil 3.191 : FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg esaslı FDM'lerin FLG içeriklerine göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

Basma testinden sonra, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin fotoğrafları şekil 3.192'de gösterilmiştir. Fotoğraflara göre, basma testinden sonra oluşan kırık yüzeyler, FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerde kırılğan bir model gösterdiğini ifade etmektedir.

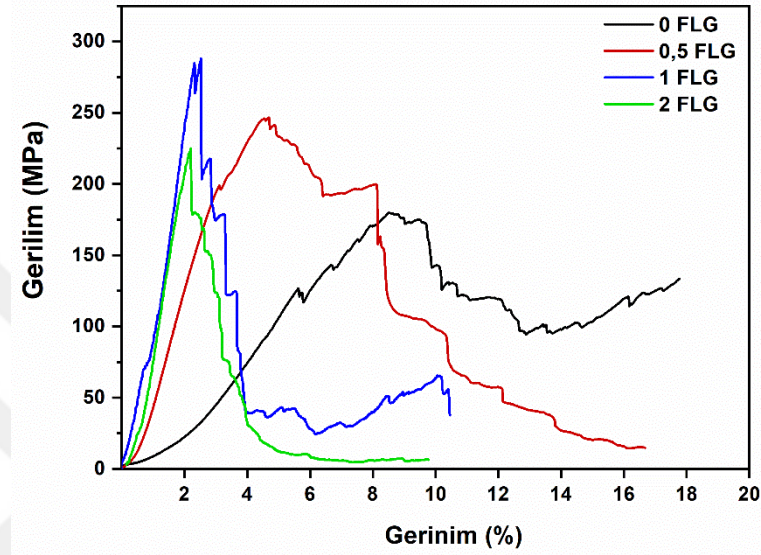


Şekil 3. 192 : Basma testinden sonra FLG takviyeli FDM'lerin gösterimi : (a) FLG takviyeli Al-Cu; (b) FLG takviyeli Al-Cu-Mg; (c) FLG takviyeli Al-Zn-Cu; (d) FLG takviyeli Al-Zn-Cu-Mg.

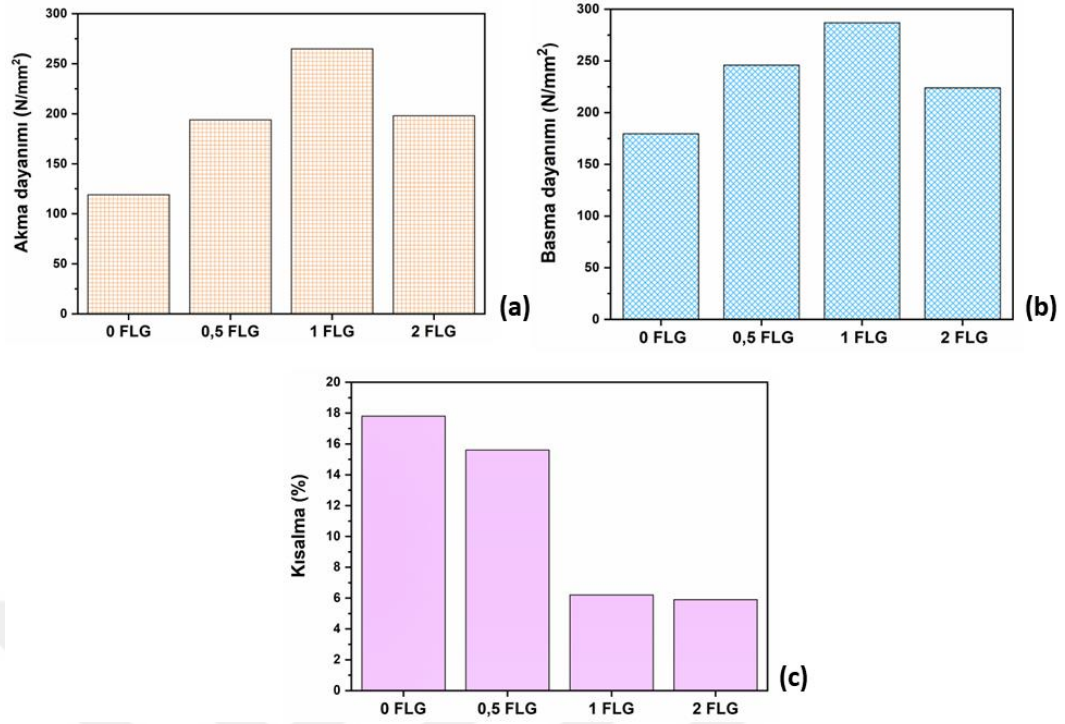
3.4.6.2 FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin basma testi sonuçları

FLG takviyeli Al-Zn-xFLG-4sa ($x = \text{ağ.}\% 0, 0,5, 1 \text{ ve } 2$) kompozitlerinin basma eğrileri Şekil 3.193'de verilmiştir. Ayrıca, Al-7,5Zn alaşım grubundan 4 sa MA uygulanmış numuneler için değişen grafen miktarına bağlı olarak akma mukavemeti, basma mukavemeti ve % kısalma değerleri sırasıyla Şekil 3.194(a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Basma testi sonuçlarına göre, AlZn-4sa, AlZn-0,5FLG-4sa, AlZn-1FLG-4sa ve AlZn-2FLG-4sa numunelerinin basma mukavemetleri sırasıyla, 179 MPa; 246 MPa; 287 MPa ve 224 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre en yüksek basma mukavemeti değeri AlZn-1FLG-4sa numunesi ile elde edilmiştir. Ayrıca, AlZn-2FLG-4sa numunesi AlZn-1FLG-4sa numunesine kıyasla daha düşük basma mukavemeti değeri ve %kısalma göstermiştir. Bu durumun artan grafen miktarının yapıda gevreklik

oluşturmasından ileri geldiği düşünülebilir. Akma mukavemeti değerleri de basma mukavemeti ile paralel davranış göstererek ağırlık %1 FLG ilavesi ile maksimum değer göstermiş ve sonrasında bir miktar azalmıştır. Ayrıca, Şekil 3.194(c)'de görüldüğü gibi artan FLG miktarı ile kompozitlerin gösterdiği % kısalma değerleri giderek azalmış ve Al-7,5Zn alaşımı için belirlenen %17,8 değeri, ağırlık %2 FLG ilavesi ile birlikte %5,9'a inmiştir.

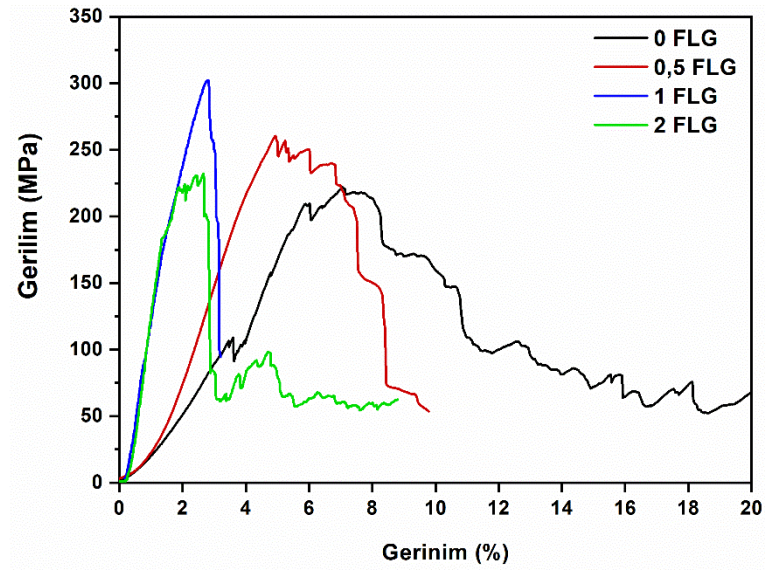


Şekil 3.193 : Al-7,5Zn-xFLG-4sa (x=ağırlık.%0; 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.

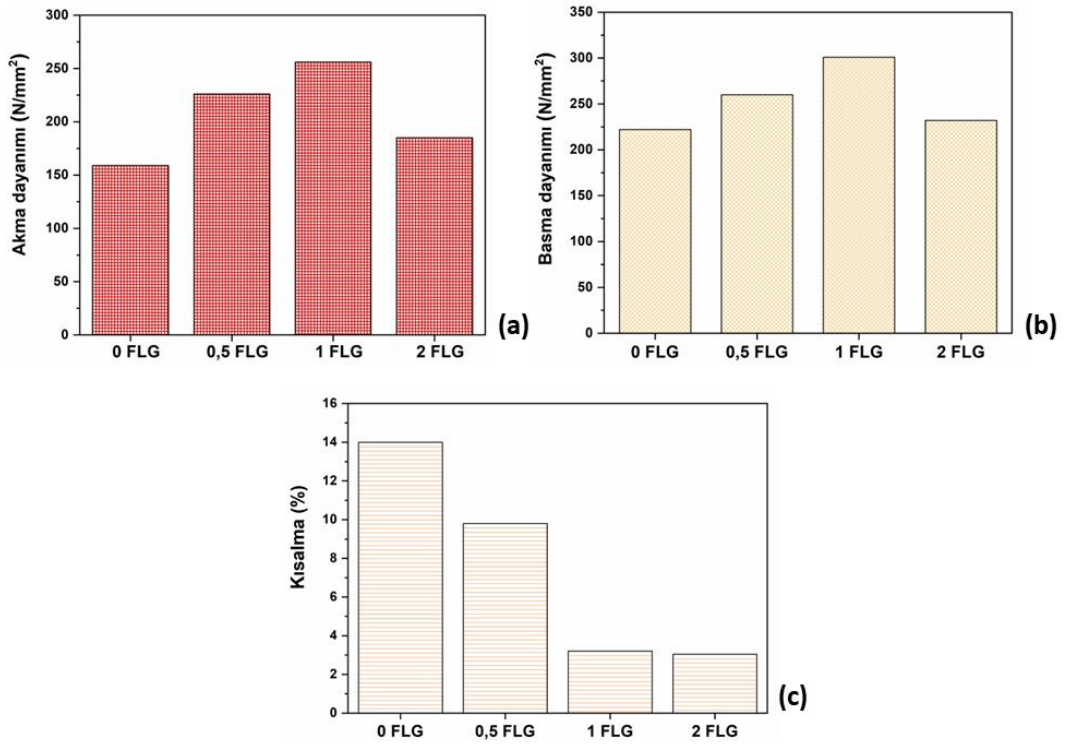


Şekil 3.194 : Al-7,5Zn esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

FLG takviyeli Al-Zn-Mg-xFLG-4sa ($x =$ ağırlık % 0, 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri, Şekil 3.195’de verilmiştir. Ayrıca, Al-7,5Zn-2,5Mg alaşım grubundan 4 sa MA uygulanmış numuneler için değişen FLG miktarına bağlı olarak akma mukavemeti, basma mukavemeti ve %kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.196(a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Basma testi sonuçlarına göre, AlZnMg-4sa, AlZnMg-0,5FLG-4sa, AlZnMg-1FLG-4sa ve AlZnMg-2FLG-4sa numunelerinin basma mukavemetleri sırasıyla, 222 MPa; 260 MPa; 301 MPa ve 232 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre en yüksek basma mukavemeti değeri AlZnMg-1FLG-4sa numunesi için elde edilmiştir. Ayrıca, AlZnMg-2FLG-4sa numunesi AlZnMg-1FLG-4sa numunesine kıyasla daha düşük basma mukavemeti değeri ve % kısılma göstermiştir. Bu durumun artan FLG miktarının yapıda gevreklik oluşturmamasından ileri geldiği düşünülebilir. Akma mukavemeti değerleri de basma mukavemeti ile paralel davranış göstererek ağırlık %1 FLG ilavesi ile maksimum değer göstermiş ve sonrasında bir miktar azalmıştır. Ayrıca, Şekil 3.196(c)’de görüldüğü gibi artan FLG miktarı ile kompozitlerin gösterdiği % kısılma değerleri giderek azalmış ve Al-7,5Zn-2,5Mg için belirlenen %14 değeri, ağırlık %2 FLG ilavesi ile birlikte %3,1’e inmiştir.



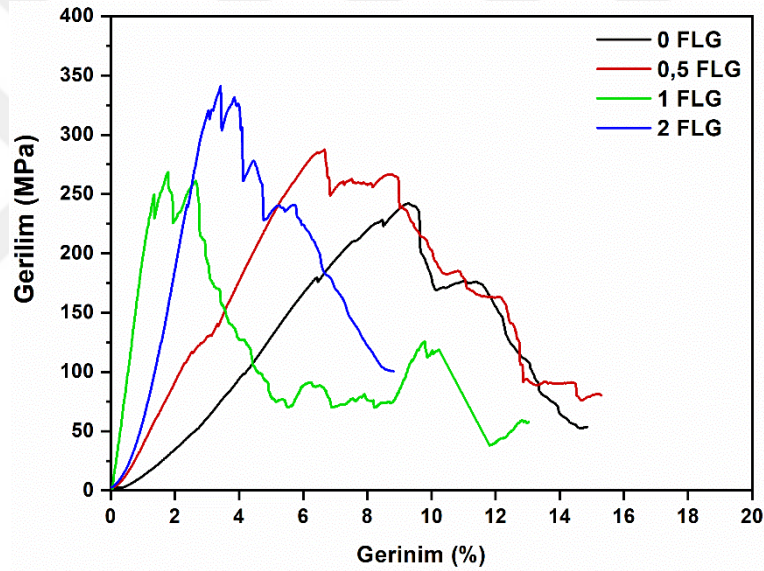
Şekil 3.195 : Al-7,5Zn2,5Mg-xFLG-4sa (x=ağ.%0; 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.



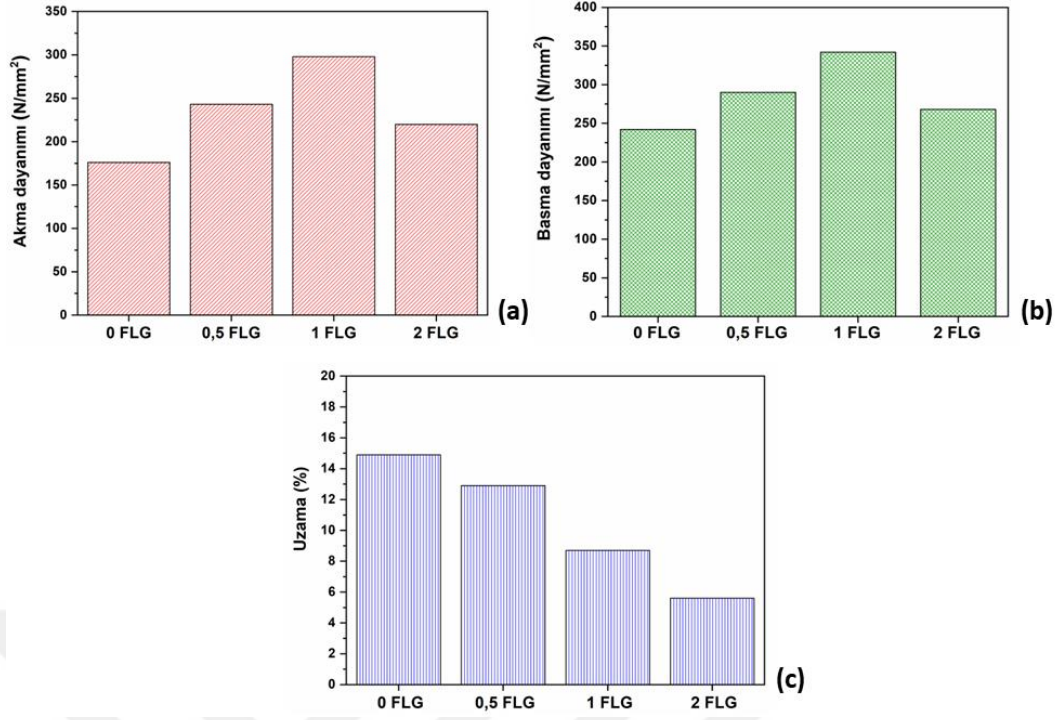
Şekil 3.196 : Al-7,5Zn-2,5Mg esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %kısılma değerlerinin değişimi.

FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu-xFLG-4sa (x= ağ. % 0, 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri, Şekil 3.197’de verilmiştir. Ayrıca, Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu alaşım grubundan 4 sa MA uygulanmış numuneler için değişen FLG miktarına bağlı olarak akma mukavemeti, basma mukavemeti ve % kısılma değerleri, sırasıyla, Şekil 3.198(a), (b) ve (c)’de verilmiştir. Basma testi sonuçlarına göre, AlZnMgCu-4sa, AlZnMgCu-

0,5FLG-4sa, AlZnMgCu-1FLG-4sa ve AlZnMgCu-2FLG-4sa numunelerinin basma mukavemetleri sırasıyla, 242 MPa; 290 MPa; 342 MPa ve 268 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre en yüksek basma mukavemeti değeri AlZnMgCu-1FLG-4sa numunesi için elde edilmiştir. Ayrıca, AlZnMgCu-2FLG-4sa kompoziti AlZnMgCu-1FLG-4sa kompozitine kıyasla, daha düşük basma mukavemeti değeri ve % kısalma göstermiştir. Bu durumun artan FLG miktarının yapıda gevreklik oluşturmaktan ileri geldiği düşünülebilir. Akma mukavemeti değerleri de basma mukavemeti ile paralel davranış göstererek ağırlık %1 FLG ilavesi ile maksimum değer göstermiş ve sonrasında bir miktar azalmıştır. Ayrıca, Şekil 3.198(c)'de görüldüğü gibi artan FLG miktarı ile kompozitlerin gösterdiği %kısalma değerleri giderek azalmış ve Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu için belirlenen %14,9 değeri, ağırlık %2 FLG ilavesi ile birlikte %5,6'a indiği görülmüştür.



Şekil 3.197 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG-4sa (x=ağırlık.%0; 0,5, 1 ve 2) numunelerinin basma eğrileri.



Şekil 3.198 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu esaslı kompozitlerin takviye edilen FLG miktarına göre: (a) akma dayanımı, (b) basma dayanımı, (c) %uzama değerlerinin değişimi.

T/M yöntemi ile elde edilen grafen takviyeli Al esaslı kompozitlerin basma testi ile ilgili çalışmaları literatürde değerlendirilmiştir. Rashad ve diğ. (2014); gerçekleştirdikleri çekme testi sonuçlarının aksine, basma testinde, saf Al'a göre (493 MPa), ağı. %0,3 GNP takviyeli kompozitin basma mukavemetini (457 MPa), 2D boyutlu grafen levhalarının burkulma ihtimalinden dolayı olduğunu düşünerek, daha düşük olarak elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Li ve diğ. (2018); Al'a homojen bir şekilde hacimce %0,5; %1 ve %2 GNP takviye ederek basma mukavemetini, sırasıyla, 297, 345 ve 527 MPa olarak elde etmişlerdir. Akçamlı ve diğ. (2022); Al-10Si alaşımına ağı. %0,5 ve %2 FLG (EAD sentezi) takviyesi ile birlikte, sırasıyla, Al-Si alaşımına (260 MPa) kıyasla, basma mukavemetinde yaklaşık olarak %50 (395 MPa) ve %20 (316 MPa) bir artış tespit etmişlerdir. Kaykılarlı ve diğ. (2022); Al-4Cu alaşımına ağı. %0,25; %0,5 ve %1 FLG (EAD sentezi) ile birlikte, basma mukavemetinde düşüş gözlemlemişlerdir. Özellikle, Al-4Cu alaşımına ağı. %1 FLG ilavesinin, basma mukavemetinde keskin bir düşüşe neden olduğunu raporlamışlardır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasının tümünü kapsayan; elektrik ark deşarj yöntemi ile birkaç katmanlı grafen sentezine, birkaç katmanlı grafen takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimine, birkaç katmanlı grafen takviyeli Al-Zn esaslı ve birkaç katmanlı grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretimine yönelik değerlendirilen sonuçlar aşağıdaki başlıklar altında özetlenmiştir:

(a) Elektrik ark deşarj yöntemi ile birkaç katmanlı grafen sentezi:

- Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı matris yapıları için takviye malzemesi olarak kullanılan grafen, EAD yöntemiyle yüksek saflıkta başarılı bir şekilde sentezlenmiştir.
- HRTEM görüntüleri, sentezlenen grafenin birkaç katmanlı olarak üretildiğini ifade etmektedir.
- FLG'nin yüzey alanı, $153,52 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak tespit edilmiştir.
- Sentezlenen FLG'nin yoğunluk değeri ortalama olarak $1,77 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

(b) Birkaç katmanlı grafen takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi:

- FLG takviyeli FDM üretmek için hazırlanan Al-Cu ve Al-Zn esaslı tozlar, gezegen tipli bilyalı öğütme yardımıyla üretilmişlerdir. SEM görüntülerine göre, MA sonrası tozlar plastik deformasyona uğradığı için, daha yassı bir görünüme sahiptirler. SEM görüntülerinde MA sonrası tozların üzerinde herhangi bir grafen kalıntısı olmadığı, FLG'lerin matris tozlarında gömüldüğü düşünülmektedir. Ayrıca, Raman analiz sonuçları FLG'nin matris yapısında homojen dağılıma sahip yüksek enerjili bilyalı öğütme nedeniyle deforme olduğunu kanıtlamıştır.
- MA ile elde edilen ağ. %0,7 FLG takviyeli Al-Cu esaslı kompozit tozların TEM görüntülerine bakıldığında, FLG'lerin matris yapısında homojen bir

şekilde dağıldığı doğrulanmaktadır. SEM-EDS haritalamasında da alaşım tozlarına gömülü olduğu düşünülen FLG'nin, kompozit toz yapısını oluşturan Al ve Cu fazları ile birlikte kümelenmiş olarak homojen bir şekilde yapıda dağıldığı HRTEM görüntülerinde tespit edilmiştir.

- FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin optik görüntülerine göre, FLG'nin matris yapısında katmanlar boyunca homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Tasarlanan FDM'lere göre, altı katman boyunca FLG'lerin içeriğinin arttığı açıkça görülmektedir. Katmanlar boyunca artan FLG içeriği, FLG'nin matris yapısında birer bariyer görevi görmesine neden olmaktadır. FLG'nin buruşuk yüzey morfolojisi, matris ile iyi bir bağlanma oluşturmalarını sağlamaktadır. Bu nedenle tane boyutunun küçülmesine ve buna bağlı olarak ince taneli yapıların oluşmasına neden olmaktadır.
- FLG takviyeli Al-Cu esaslı FDM'lerin relatif yoğunlukları %96-%97 olarak değişirken, FLG takviyeli Al-Zn esaslı FDM'lerin relatif yoğunlukları %97-%98 arasında değişmektedir. FDM'lerin oldukça yoğun yapıda üretildikleri gözlemlenmiştir.
- FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin SEM görüntüleri değerlendirildiğinde, optik görüntülerle uyumlu olduğu görülmektedir. FLG'nin matris yapısında homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. FLG'nin matriste arayüz ve yapı içinde köprü görevi görerek tane boyutunu azalttığı düşünülmektedir.
- FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin her birinde, FLG içeriği yüksek olan katmanlarda sertlik (HV) değerlerinde artış açıkça görülmüştür. FLG takviyeli Al-Cu, Al-Cu-Mg ve Al-Cu-Mg-Mn FDM'ler için, ilk katmandan son katmana doğru, sırasıyla, sertlik değerlerinde %25,84; %44,44 ve %50,74 oranında artış tespit edilmiştir. FLG takviyeli Al-Zn, Al-Zn-Cu ve Al-Zn-Cu-Mg FDM'ler için ise, ilk katmandan son katmana doğru, sırasıyla, sertlik değerlerinde %18,39; %32,14 ve %39,13 oranında artış belirlenmiştir.
- Tane boyutunu küçültme, her katman boyunca artan FLG içeriğine göre, Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'ler için en etkili güçlendirme mekanizmasıdır. MA prosesi ile matris yapısında iyi bir şekilde dağılan FLG, ara yüzeyde dislokasyonların hareketini kısıtlayarak, dislokasyonların birikmesine yol

açmaktadır. Bu durum, artan FLG içeriğine sahip FDM'ler için katmanlar boyunca sertliğin artmasına neden olmaktadır.

- FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerde Al_4C_3 oluşumu XRD ve TEM analizlerinde tespit edilmiştir. Al_4C_3 'ün arayüz fazı, dislokasyonların hareketini engelleyen, matris ve FLG arasında iyi bir yük aktarımı sağlayabileceği düşünülmektedir. Katmanlar boyunca FLG içeriği ile birlikte artan sertlik, yapıdaki Al_4C_3 fazının mevcudiyeti ile de ilişkilendirilebilmektedir.
- FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerde, FLG içeriği artan alanlarda, COF değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. FLG'nin kendiliğinden yağlayıcı olmasından dolayı, tribolojik davranışları geliştiren bir yapıya sahiptir. Bu nedenle kayma sırasında, plastik deformasyon meydana gelmektedir ve bu durumda matriste yüksek FLG içeriğe sahip alanda COF'un bir miktar azalmasına sebep olmaktadır.

(c) Birkaç katmanlı grafen takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin üretimi

- Al-Zn, Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Cu-Mg esaslı alaşımlar ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozit üretmek için hazırlanan Al-Zn esaslı tozlar, SPEX tipli bilyalı öğütme yardımıyla, farklı sürelerde üretilmişlerdir. MA ile elde edilen tozların XRD analizlerinde, herhangi bir karbür fazı oluşumuna rastlanmamıştır. MA sırasında oksitlenmeden kaynaklanan veya öğütme ortamının aşınması ile Fe gibi empürilerin yapıda bulunmadığı belirlenmiştir.
- Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu esaslı alaşım ve FLG takviyeli Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu esaslı kompozitlerin relatif yoğunlukları, sırasıyla, %88-%99, %86-%99 ve %86-%99 arasında değişmektedir. Kompozitlerin oldukça yoğun yapıda üretildikleri görülürken, relatif yoğunluk değerlerinin öğütme sürelerine göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.
- 4 sa MA ile üretilen ağ. %2 FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitin, sertlik değeri 119 HV olarak elde edilmiş ve Al-Zn alaşımına kıyasla %58,3 oranında sertlik değerinde artış görülmüştür. 4 sa MA ile üretilmiş olan ağ. %2 FLG takviyeli Al-Zn-Mg esaslı kompozitin sertlik değeri 135 HV'ye ulaşmış ve Al-Zn-Mg alaşımına kıyasla sertlik değerinde %58,82 oranında artış elde edilmiştir. 4 sa MA ile üretilmiş olan ağ. %2 FLG takviyeli Al-Zn-Mg-Cu

esaslı kompozitin sertlik değeri 155 HV olarak elde edilmiş ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımına göre sertlik değerinde %63,15 oranında artış gösterdiği görülmüştür.

(d) Birkaç katmanlı grafen takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretimi

- FLG takviyeli Cu esaslı kompozit üretmek için hazırlanan Cu esaslı tozlar, gezegen tipli bilyalı öğütme yardımıyla üretilmişlerdir. 5 ve 7 sa MA ile elde edilen Cu esaslı kompozit tozlara, ağırlık %0,1; %0,3 ve %0,5 FLG takviye edilmiştir. SEM görüntülerine göre, MA sonrası kompozit tozları bilyalı öğütmeden dolayı plastik deformasyona uğradığı için, daha yassı bir görünüme sahiptirler. SEM görüntülerinde MA sonrası tozların üzerinde herhangi bir grafen kalıntısı olmadığı, FLG'lerin matris tozlarında gömüldüğü düşünülmektedir.
- Raman analiz sonuçlarına göre, öğütme süresi arttıkça FLG'nin hasar derecesinin arttığı doğrulanmıştır.
- FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri %88 ile %94 arasında değişmektedir. Basıncsız sinterlemeye bağlı olarak, kompozitlerde porozite gözlemlenmiştir.
- En yüksek sertlik değerine 101 HV olarak 7 sa MA ile üretilen ağırlık %0,1 FLG takviyeli Cu kompozit ile ulaşılmıştır. Fakat 5 sa MA sonrasında ağırlık %0,3 FLG takviyeli Cu esaslı kompozitin sertlik değerinin takviyesiz Cu'ya göre %31,8 arttığı gözlenmiştir.
- FLG takviyesi ile 7 sa MA sonunda elde edilen kompozitlerin COF değerlerinde azalma gözlenmiştir. Grafenin yağlayıcı etkisinden dolayı, Cu esaslı kompozitlerin aşınma özellikleri iyileştirildiği tespit edilmiştir.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlara göre; EAD yöntemiyle üretilen yüksek saflığa sahip FLG'lerin hem FDM'ler hem de kompozitler için takviye malzemesi olarak hammadde ihtiyacını karşıladığı görülmüştür. Benzer özelliklere sahip, birkaç katmanlı ticari grafenle yapılan bazı çalışmalarla kıyaslandığında, sentezlediğimiz grafenin Al-Cu esaslı matris yapısında daha elverişli mekanik sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Fakat FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerde, FLG'lerin matris yapısına iyi bağlanamamasından dolayı, kompozit yüzeyinde belirgin olarak görülen FLG'lerin topaklanmasından kaynaklandığı düşünülen bazı deformasyonlar gözlemlenmiştir. Dolayısıyla EAD ile üretilen FLG'lerin, Cu matris yapısına

bağlanabilmesi için, FLG'nin matris yapısında dağıtabilecek bazı kimyasal yöntemler ilereleyen yeni çalışmalarda uygulanabilir. CTAB veya SDS gibi modifiye edici malzemelerle, Cu matris yapısında FLG'lerin yapışması sağlanabilir.

FLG takviyeli Al-Cu, Al-Zn ve Cu esaslı kompozit tozlarının bilyalı öğütme prosesleri üzerine daha fazla optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. Böylece daha az sürede, daha çok tozun öğütme işlemleri endüstriyel koşullarda sağlanabilir.

Tez çalışmasında T/M ile üretimi başarıyla gerçekleşen FLG takviyeli Al-Cu ve Al-Zn esaslı FDM'lerin, FLG miktarlarına bağlı olarak katman boyunca gelişen mekanik özellikleri düşünülerek, elektriksel veya termal iletkenlik, korozyon direnci gibi farklı özellikleri geliştirebilecek yeni FDM tasarımları düşünülebilir. Özellikle katman sayıları azaltarak, grafenin aşınma özellikleri üzerine çeşitli malzeme kombinasyonlarıyla nasıl etkin bir mekanizma gösterdiği tartışılabilir. Farklı alaşım grupları üzerine FDM tasarımları gerçekleştirilebilir, FLG ile birlikte farklı takviye malzemelerini içeren hibrit modellere sahip katmanlar oluşturulabilir. Mevcut tez çalışmasıyla birlikte, detaylandırılmış bu tür FDM tasarımlarının, otomotiv ve uçak endüstrisinde olmak üzere, ileri teknolojik ürün ihtiyacına yönelik kullanımı arttırılabilir.

T/M ile üretimi başarıyla gerçekleşen Al-Zn alaşımı ve FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin, öğütme sürelerine, FLG miktarlarına ve sinterleme koşullarına göre daha detaylı optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Ayrıca, FLG ile birlikte farklı takviye malzemeleri Al-Zn esaslı kompozit üretiminde kullanılarak, hibrit modeller geliştirilebilir.

FLG takviyeli Cu esaslı kompozitlerin üretimi için, nihai ürünün mekanik özelliklerini arttırmak için; farklı öğütme süre ve hızları ile birlikte sinterleme sıcaklıkları üzerine farklı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. Ayrıca, mevcut literatür değerlendirildiğinde, grafen takviyeli Cu esaslı alaşım kompozit üretimi üzerine daha fazla detaylı çalışmalar yapılarak, mekanik ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi ve endüstriyel koşullarda kullanımı arttırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- AbuShanab, W.S., Moustafa, E.B., Ghandourah, E. & Taha, M.A.** (2020). Effect of graphene nanoparticles on the physical and mechanical properties of the Al₂O₃-graphene nanocomposites fabricated by powder metallurgy, *Results in Physics*, 19,103343.
- Adetayo, A. & Runsewe, D.** (2019). Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: A review,*Open Journal of Composite Materials*, 9(02),207.
- Akçamlı, N., Gökçe, H. & Uzunsoy, D.** (2016). Processing and characterization of graphene nano-platelet (GNP) reinforced aluminum matrix composites,*Materials Testing*, 58(11–12),946–952.
- Akçamlı, N., Küçükelyas, B., Kaykılarlı, C. & Uzunsoy, D.** (2019). Investigation of microstructural, mechanical and corrosion properties of graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites,*Materials Research Express*, 6(11),115627.
- Akçamlı, N., Şenyurt, B., Gökçe, H. & Ağaoğulları, D.** (2022). Powder metallurgical fabrication of graphene reinforced near-eutectic Al-Si matrix composites: Microstructural, mechanical and electrochemical characterization,*Engineering Science and Technology, an International Journal*, 31,101052.
- Akçe, M.A. & Kadioğlu, Y.K.** (2020). Raman spektroskopisinin ilkeleri ve mineral tanımlamalarında kullanılması,*Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2),99–115.
- Antisari, M.V., Montone, A., Jovic, N., Piscopiello, E., Alvani, C., Pilloni, L.** (2006). Low energy pure shear milling: a method for the preparation of graphite nano-sheets,*Scripta Materialia*, 55(11),1047–1050.
- Armstrong, R.W.** (2014). 60 years of Hall-Petch: past to present nano-scale connections,*Materials Transactions*, 55(1),2–12.
- Asgharzadeh, H. & Eslami, S.** (2019). Effect of reduced graphene oxide nanoplatelets content on the mechanical and electrical properties of copper matrix composite,*Journal of Alloys and Compounds*, 806,553–565.
- Asgharzadeh, H. & Sedigh, M.** (2017). Synthesis and mechanical properties of Al matrix composites reinforced with few-layer graphene and graphene oxide,*Journal of Alloys and Compounds*, 728,47–62.
- Ayyappadas, C. ao, Muthuchamy, A., Annamalai, A.R. & Agrawal, D.K.** (2017). An investigation on the effect of sintering mode on various properties

- of copper-graphene metal matrix composite, *Advanced Powder Technology*, 28(7), 1760–1768.
- Azimi, A., Fallahdoost, H. & Nejadseyfi, O.** (2015). Microstructure, mechanical and tribological behavior of hot-pressed mechanically alloyed Al–Zn–Mg–Cu powders, *Materials & Design*, 75, 1–8.
- Bagheri, G.H.A.** (2016). The effect of reinforcement percentages on properties of copper matrix composites reinforced with TiC particles, *Journal of Alloys and Compounds*, 676, 120–126.
- Baig, Z., Mamat, O., Mustapha, M., Mumtaz, A., Sarfraz, M., Haider, Sajjad.** (2018). An efficient approach to address issues of graphene nanoplatelets (GNPs) incorporation in aluminium powders and their compaction behaviour, *Metals*, 8(2), 90.
- Balandin, A.A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., Lau, C.N.** (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
- Banks, C.E. & Brownson, D.A.C.** (2018). *2D Materials: Characterization, Production and Applications*. CRC Press.
- Bartolucci, S.F., Paras, J., Rafiee, M.A., Rafiee, J., Lee, S., Kapoor, D., Koratkar, N.** (2011). Graphene–aluminum nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, 528(27), 7933–7937.
- Basir, A., Sulong, A.B., Jamadon, N.H., Muhamad, N. & Emeka, U.B.** (2021). Process parameters used in macro/micro powder injection molding: an overview, *Metals and Materials International*, 27, 2023–2045.
- Bastwros, M., Kim, G-Y., Zhu, C., Zhang, K., Wang, S., Tang, Xiaoduan, T., Wang, X.** (2014). Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering, *Composites Part B: Engineering*, 60, 111–118.
- Berman, D., Erdemir, A. & Sumant, A. V.** (2013). Reduced wear and friction enabled by graphene layers on sliding steel surfaces in dry nitrogen, *Carbon*, 59, 167–175.
- Bever, M.B. & Duwez, P.E.** (1972). Gradients in composite materials, *Materials Science and Engineering*, 10, 1–8.
- Bhadauria, A., Singh, L.K. & Laha, T.** (2018). Effect of physio-chemically functionalized graphene nanoplatelet reinforcement on tensile properties of aluminum nanocomposite synthesized via spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 783–793.
- Bhadauria, A., Singh, L.K. & Laha, T.** (2019). Combined strengthening effect of nanocrystalline matrix and graphene nanoplatelet reinforcement on the mechanical properties of spark plasma sintered aluminum based nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, 749, 14–26.
- Bharathi, R.J. & Kumar, C.S.** (2018). Microwave Processing And Mechanical Property Evaluation Of Functionally Graded Materials With Al/SiC Powders., *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14481–14488.

- Bianco, A., Cheng, H-M., Enoki, T., Gogotsi, Y., Hurt, R.H., Koratkar, N., Kyotani, T., Monthieux, M., Park, C.R., Tascon, J.M.D., Zhan, J.** (2013). *All in the Graphene Family—A Recommended Nomenclature for Two-Dimensional Carbon Materials*. Volume 65, Elsevier / Carbon, PP: 1–6.
- Bird, J.O. & Chivers, P.J.** (2014). *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book*. Newnes.
- Borand, G., Akçamlı, N. & Uzunsoy, D.** (2021). Structural characterization of graphene nanostructures produced via arc discharge method, *Ceramics International*, 47(6), 8044–8052.
- Borand, G. & Uzunsoy, D.** (2022). Fabrication of functionally graded few-layered graphene reinforced Al-4.5 Cu alloy by powder metallurgy, *Journal of Alloys and Compounds*, 923, 166348.
- Brodie, B.C.** (1859). XIII. On the atomic weight of graphite, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (149), 249–259.
- Çalışkan, F., Cömert, S. & Kocaman, E.** (2017). Fabrication of functional graded Al2124 composite reinforced with Al2O3 particles, *Acta Phys. Pol, A*, 131, 437–439.
- Canakci, A., Varol, T., Özkaya, S. & Erdemir, F.** (2014). Microstructure and properties of Al-B4C functionally graded materials produced by powder metallurgy method, *Universal Journal of Materials Science*, 2(5), 90–95.
- Castro, R. & Van Benthem, K.** (2012). *Sintering: Mechanisms of Convention Nanodensification and Field Assisted Processes*. Volume 35, Springer Science & Business Media.
- Castro Neto, A.H., Guinea, F., Peres, N.M.R., Novoselov, K.S. & Geim, A.K.** (2009). The electronic properties of graphene, *Reviews of Modern Physics*, 81(1), 109–162.
- Ceschini, L., Dahle, A., Gupta, M., Jarfors, A.E.W., Jayalakshmi, S., Morri, A., Rotundo, F., Toschi, S., Singh, R.A.** (2017). *Aluminum and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites*. Springer.
- Chen, Y., Zhao, H., Sheng, L., Yu, L., Am, K., Xu, Jiaqiang, X., Ando, Y., Zhao, X.** (2012). Mass-production of highly-crystalline few-layer graphene sheets by arc discharge in various H₂–inert gas mixtures, *Chemical Physics Letters*, 538, 72–76.
- Chen, F., Ying, J., Wang, Y., Du, S., Liu, Z., Huang, Q.** (2016). Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites, *Carbon*, 96, 836–842.
- Chen, Y., Zhang, X., Liu, E., He, C., Shi, C., Li, J., Nash, P., Zhao, N.** (2016). Fabrication of in-situ grown graphene reinforced Cu matrix composites, *Scientific Reports*, 6(1), 1–9.
- Chen, W., Yang, T., Dong, L., Elmasry, A., Song, J., Deng, N., Elmarakbi, A., Liu, T., Lv, H.B., Fu, Y.Q.** (2020). Advances in graphene reinforced metal matrix nanocomposites: Mechanisms, processing, modelling, properties and applications, *Nanotechnology and Precision*

Engineering, 3(4),189–210.

- Chen, F., Gupta, N., Behera, R.K. & Rohatgi, P.K.** (2018). Graphene-reinforced aluminum matrix composites: a review of synthesis methods and properties, *Jom*, 70(6),837–845.
- Chen, X., Zhao, L., Jiang, L. & Wang, H.** (2021). Microstructures and Properties of Cu-rGO Composites Prepared by Microwave Sintering, *Materials*, 14(17),4899.
- Cheng, J., Cai, Q., Zhao, B., Yang, S., Chen, F., Li, B.** (2019). Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al-Zn-Mg-Cu alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering, *Materials*, 12(8),1255.
- Chernick, V. & Kendig, E.L.** (2006). *Kendig's Disorders of the Respiratory Tract in Children*. Saunders/Elsevier.
- Chmielewski, M., Michalczewski, R., Piekoszewski, W. & Kalbarczyk, M.** (2016). Tribological behaviour of copper-graphene composite materials. on "Key Engineering Materials". PP: 219–224.
- Chu, K. & Jia, C.** (2014). Enhanced strength in bulk graphene–copper composites, *Physica Status Solidi (A)*, 211(1),184–190.
- Cong, Q., Xu, F., Tan, Y., Shi, X., Dong, W., Li, J., Zhang, J.** (2011). Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al/Al-Cu graded materials, *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 24(2),118–124.
- Cotul, U., Parmak, E.D.S., Kaykılarlı, C., Saray, O., Colak, O., Uzunsoy, D.** (2018). Development of high purity, few-layer graphene synthesis by electric arc discharge technique, *Acta Physica Polonica A*, 134(1),289–291.
- Cui, Y., Wang, L., Li, B., Cao, G. & Fei, W.** (2014). Effect of ball milling on the defect of few-layer graphene and properties of copper matrix composites, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27(5),937–943.
- Dasari, B.L., Morshed, M., Nouri, J.M., Brabazon, D. & Naher, S.** (2018). Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B: Engineering*, 145,136–144.
- Davis, J.R.** (2001). *Alloying: Understanding the Basics*. ASM international.
- Davis, J.R.** (2001). *Copper and Copper Alloys*. ASM international.
- Deng, C.F., Wang, D.Z., Zhang, X.X. & Li, A.B.** (2007). Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composites, *Materials Science and Engineering: A*, 444(1–2),138–145.
- Deng, C.F., Zhang, X.X., Wang, D.Z. & Ma, Y.X.** (2007). Calorimetric study of carbon nanotubes and aluminum, *Materials Letters*, 61(14–15),3221–3223.
- Deuis, R.L., Subramanian, C. & Yellup, J.M.** (1997). Dry sliding wear of aluminium composites—a review, *Composites Science and Technology*, 57(4),415–435.

- Dursun, T. & Soutis, C.** (2014).Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys,*Materials & Design (1980-2015)*, 56,862–871.
- Dutkiewicz, J., Ozga, P., Maziarz, W., Psturs, J., Kania, B., Bobrowski, P., Stolarska, J.** (2015).Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets,*Materials Science and Engineering: A*, 628,124–134.
- Edwards, R.S. & Coleman, K.S.** (2013).Graphene synthesis: relationship to applications,*Nanoscale*, 5(1),38–51.
- El-Eskandarany, M.S.** (2001). *Mechanical Alloying: For Fabrication of Advanced Engineering Materials*. William Andrew.
- El-Eskandarany, M.S.** (2015). *Mechanical Alloying: Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy*. Elsevier.
- El-Eskandarany, M.S.** (2020). *Mechanical Alloying: Energy Storage, Protective Coatings, and Medical Applications*. William Andrew.
- El-Galy, I.M., Saleh, B.I. & Ahmed, M.H.** (2019).Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view,*SN Applied Sciences*, 1(11),1–23.
- El-Ghazaly, A., Anis, G. & Salem, H.G.** (2017).Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured AA2124 self-lubricating metal matrix composite,*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95,325–336.
- Erdemir, F., Canakci, A. & Varol, T.** (2015).Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al2024/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques,*Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(11),3569–3577.
- Esawi, A. & Morsi, K.** (2007).Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder,*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2),646–650.
- Esawi, A.M.K., Morsi, K., Sayed, A., Gawad, A.A. & Borah, P.** (2009).Fabrication and properties of dispersed carbon nanotube–aluminum composites,*Materials Science and Engineering: A*, 508(1–2),167–173.
- Esawi, A.M.K., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M. & Lanka, S.** (2010).Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites,*Composites Science and Technology*, 70(16),2237–2241.
- Esposito, P.-H., Leroux, C., Heresanu, V., Neisius, T., Madigou, V., Denoyel, R., Coulet, M-V.** (2020).Influence of texture and microstructure on the reactivity of aluminum powders,*Materialia*, 14,100880.
- Etter, T., Schulz, P., Weber, M., Metz, J., Wimmeler, M., Löffler, J.F., Uggowitzer, P.J.** (2007). Aluminium carbide formation in interpenetrating graphite/aluminium composites,*Materials Science and Engineering: A*, 448(1–2),1–6.
- Fahimi, N. & Abachi, P.** (2021).The role of powder preparation route on physical and mechanical properties of Cu-rGO bulk nanocomposites,*Materials*

- Fang, Z.Z.** (2010). *Sintering of Advanced Materials*. Elsevier.
- Ferrari, A.C.** (2007). Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects, *Solid State Communications*, 143(1–2), 47–57.
- Fronczak, M. & Bystrzejewski, M.** (2017). Exfoliation of Graphite in Carbon Arc Discharge, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, 10(1).
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L., Wang, B.** (2016a). Mechanical properties and thermal conductivity of graphene reinforced copper matrix composites, *Powder Technology*, 301, 601–607.
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L., Wang, B.** (2016b). Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites, *Materials & Design*, 94, 54–60.
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, S., Yao, L., Lin, X., Wang, B., Guan, E.** (2018). Tribological properties of copper matrix composites reinforced with homogeneously dispersed graphene nanosheets, *Journal of Materials Science & Technology*, 34(10), 1925–1931.
- Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K.K., Hussain, C.M., Gupta, P.** (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4924–4939.
- Geim, A.K. & Novoselov, K.S.** (2010). The rise of graphene. *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*. World Scientific, PP: 11–19.
- German, R.M.** (1984). Powder metallurgy science, *Metal Powder Industries Federation*, 105 College Rd. E, Princeton, N. J. 08540, U. S. A, 1984. 279 (in press).
- German, R.M.** (1996). *Sintering Theory and Practice*. New York, Wiley.
- German, R.M.** (2005). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing: The Processes, Materials, Products, Properties and Applications*. Metal powder industries federation.
- German, R.M., Suri, P. & Park, S.J.** (2009). Liquid phase sintering, *Journal of Materials Science*, 44, 1–39.
- Ghazaly, A., Seif, B. & Salem, H.G.** (2016). Mechanical and tribological properties of AA2124-graphene self lubricating nanocomposite. *Light Metals 2013*. Springer, PP: 411–415.
- Ghodrati, H. & Ghomashchi, R.** (2019). Effect of graphene dispersion and interfacial bonding on the mechanical properties of metal matrix composites: an overview, *FlatChem*, 16, 100113.
- Gill, P., Moghadam, T.T. & Ranjbar, B.** (2010). Differential scanning calorimetry techniques: applications in biology and nanoscience, *Journal of Biomolecular Techniques: JBT*, 21(4), 167.

- Groover, M.P.** (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons.
- Günay, M.** (2009). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara* (in press).
- Guo, G.F., Huang, H., Xue, F.H., Liu, C.J., Yu, H.T., Quan, X., Dong, X.L.** (2013). Electrochemical hydrogen storage of the graphene sheets prepared by DC arc-discharge method, *Surface and Coatings Technology*, 228, S120–S125.
- Gupta, A. & Talha, M.** (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures, *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 1–14.
- Han, Z., Gan, C., Li, X., Feng, P., Ma, X., Fan, X., Zhu, M.** (2021). Electrochemical preparation of modified-graphene additive towards lubrication requirement, *Tribology International*, 161, 107057.
- Hao, Y., Wang, Y., Wang, L., Ni, Z., Wang, Z., Wang, R., Koo, C.K., Shen, Z., Thong, J.T.L.** (2010). Probing layer number and stacking order of few-layer graphene by Raman spectroscopy, *Small*, 6(2), 195–200.
- He, X., Zou, G., Xu, Y., Zhu, H., Jiang, H., Jiang, X., Xia, W., Chen, J., Wu, J., Yang, S.** (2018). Nano-mechanical and tribological properties of copper matrix composites reinforced by graphene nanosheets, *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(4), 416–421.
- Hernandez, Y. Nicolosi, V., Lotya, M., Blighe, M.F., Sun, Z., De, S., McGovern, I.Y., Holland, B., Byrne, M., Gun'Ko, Y.K., Boland, J.J., Niraj, P., Duesberg, G., Krishnamurthy, S., Goodhue, R., Hurtchison, J., Vittorio, S., Ferrari, A.C., Coleman, J.N.** (2008). High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite, *Nature Nanotechnology*, 3(9), 563–568.
- Hu, Z., Dai, R., Wang, D., Wang, X., Chen, F., Fan, X., Chen, C., Liao, Y., Nian, Q.** (2021). Preparation of graphene/copper nanocomposites by ball milling followed by pressureless vacuum sintering, *New Carbon Materials*, 36(2), 420–428.
- Huang, H.-H., De Silva, K.K.H., Kumara, G.R.A. & Yoshimura, M.** (2018). Structural evolution of hydrothermally derived reduced graphene oxide, *Scientific Reports*, 8(1), 6849.
- Hummers Jr, W.S. & Offeman, R.E.** (1958). Preparation of graphitic oxide, *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339.
- Hung, Y.-F., Cheng, C., Huang, C.-K., Yang, C.-R. & Tseng, S.-F.** (2021). Investigation of electrochemical reduction effects on graphene oxide powders for high-performance supercapacitors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 1203–1213.
- Hwang, J., Yoon, T., Jin, S.H., Lee, J., Kim, T.-S., Hong, S.H., Jeon, S.** (2013). Enhanced mechanical properties of graphene/copper nanocomposites using a molecular-level mixing process, *Advanced Materials*, 25(46), 6724–6729.

- Igarashi, T., Nishino, K. & Nayar, S.K.** (2005). The appearance of human skin.
- Iijima, S.** (1991). Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354(6348), 56–58.
- Jagannadham, K.** (2011). Orientation dependence of thermal conductivity in copper-graphene composites, *Journal of Applied Physics*, 110(7), 74901.
- Jang, H., Yoo, S., Quevedo, M. & Choi, H.** (2018). Effect of processing route on mechanical and thermal properties of few-layered graphene (FLG)-reinforced copper matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 754, 7–13.
- Jha, D.K., Kant, T. & Singh, R.K.** (2013). A critical review of recent research on functionally graded plates, *Composite Structures*, 96, 833–849.
- Jiang, Y., Tan, Z., Xu, R., Fan, G., Xiaong, D-B., Guo, Q., Su, Y., Li, Z., Zhang, D.** (2018). Tailoring the structure and mechanical properties of graphene nanosheet/aluminum composites by flake powder metallurgy via shift-speed ball milling, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 111, 73–82.
- Jiang, R., Zhou, X., Fang, Q. & Liu, Z.** (2016). Copper–graphene bulk composites with homogeneous graphene dispersion and enhanced mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, 654, 124–130.
- Johnson, D.W., Dobson, B.P. & Coleman, K.S.** (2015). A manufacturing perspective on graphene dispersions, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 20(5–6), 367–382.
- Jojith, R. & Radhika, N.** (2020). Investigation of mechanical and tribological behaviour of heat-treated functionally graded Al-7Si/B4C composite, *Silicon*, 12(9), 2073–2085.
- Jones, D.R.H. & Ashby, M.F.** (2018). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Butterworth-Heinemann.
- Ju, J.-M., Wang, G. & Sim, K.-H.** (2017). Facile synthesis of graphene reinforced Al matrix composites with improved dispersion of graphene and enhanced mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 704, 585–592.
- Kalra, C., Tiwari, S., Sapra, A., Mahajan, S. & Gupta, P.** (2018). Processing and characterization of hybrid metal matrix composites, *Journal of Materials and Environmental Science*, 9(7), 1979–1986.
- Kang, S.-J.L.** (2004). *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*. Elsevier.
- Karmakar, S., Nawale, A.B., Lalla, N.P., Sathe, V.G., Kolekar, S.K., Mathe, V.L., Das, A.K., Bhoraskar, S.V.** (2013). Gas phase condensation of few-layer graphene with rotational stacking faults in an electric-arc, *Carbon*, 55, 209–220.
- Kaufman, J.G. & Rooy, E.L.** (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. Asm International.
- Kawasaki, A. & Watanabe, R.** (1997). Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials, *Ceramics International*, 23(1), 73–83.

- Kaykılarlı, C., Küçükelyas, B., Akçamlı, N., Uzunsoy, D. & Cansever, N.** (2022). Processing and Characterization of Al-4Cu Matrix Composites Reinforced with Few Layered Graphene, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1–10.
- Khobragade, N., Kumar, B., Bera, S. & Roy, D.** (2017). Studies on graphene reinforced Cu base composites prepared by two step thermal processing method, *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8045–8051.
- Khoshghadam-Pireyousefan, M., Rahmanifard, R., Orovcik, L., Švec, P. & Klemm, V.** (2020). Application of a novel method for fabrication of graphene reinforced aluminum matrix nanocomposites: synthesis, microstructure, and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138820.
- Khrapach, I., Withers, F., Bointon, T.H., Polyushkin, D.K., Barnes, W.L., Russo, S., Craciun, M.F.** (2012). Novel highly conductive and transparent graphene-based conductors, *Advanced Materials*, 24(21), 2844–2849.
- Kieback, B., Neubrand, A. & Riedel, H.** (2003). Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science and Engineering: A*, 362(1–2), 81–106.
- Kim, W.J., Lee, T.J. & Han, S.H.** (2014). Multi-layer graphene/copper composites: Preparation using high-ratio differential speed rolling, microstructure and mechanical properties, *Carbon*, 69, 55–65.
- Koizumi, M.** (1997). FGM activities in Japan, *Composites Part B: Engineering*, 28(1–2), 1–4.
- Konakov, V.G., Kurapova, O.Y. & Archakov, I.Y.** (2020). Improvement of copper–graphene composites properties due to the lubricating effect of graphene in the powder metallurgy fabrication process, *Metals and Materials International*, 26(12), 1899–1907.
- Kumar, R., Singh, R.K., Dubey, P.K., Kumar, P., Tiwari, R.S., Oh, Il-K.** (2013). Pressure-dependent synthesis of high-quality few-layer graphene by plasma-enhanced arc discharge and their thermal stability, *Journal of Nanoparticle Research*, 15(9), 1–10.
- Kumar, S.N.N., Devarajaiah, R.M. & Prabhu, T.R.** (2021). Review on aluminium based functionally graded composites, *Materials Today: Proceedings*, 39, 1743–1749.
- Kumar, P. & Wani, M.F.** (2017). Synthesis and tribological properties of graphene: A review, *Jurnal Tribologi*, 13, 36–71.
- Kumar, H.G. & Xavior, M.A.** (2016). Fatigue and wear behavior of Al6061–graphene composites synthesized by powder metallurgy, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(2), 415–419.
- Kumar, H.G.P. & Xavior, M.A.** (2017). Effect of graphene addition on flexural properties of Al 6061 nanocomposites, *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8127–8133.
- Kwon, H., Mondal, J., AlOgab, K.A., Sammelselg, V., Takamichi, M., Kawaski, A., Leoaroux, M.** (2017). Graphene oxide-reinforced aluminum alloy matrix composite materials fabricated by powder metallurgy, *Journal of*

- Kwon, H., Bradbury, C.R. & Leparoux, M.** (2011).Fabrication of functionally graded carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composite,*Advanced Engineering Materials*, 13(4),325–329.
- Kwon, H., Leparoux, M. & Kawasaki, A.** (2014).Functionally graded dual-nanoparticulate-reinforced aluminium matrix bulk materials fabricated by spark plasma sintering,*Journal of Materials Science & Technology*, 30(8),736–742.
- Laha, T., Kuchibhatla, S., Seal, S., Li, W. & Agarwal, A.** (2007).Interfacial phenomena in thermally sprayed multiwalled carbon nanotube reinforced aluminum nanocomposite,*Acta Materialia*, 55(3),1059–1066.
- Lalet, G., Kurita, H., Heintz, J-M., Lacombe, G., Kawasaki, A., Silvain, J-F.** (2014).Thermal expansion coefficient and thermal fatigue of discontinuous carbon fiber-reinforced copper and aluminum matrix composites without interfacial chemical bond,*Journal of Materials Science*, 49,397–402.
- Lampman, S.R. & Zorc, T.B.** (1990).ASM Handbook Volume 02: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,*Materials Park, Ohio, USA: ASM International*, ,1592–1633.
- Larciprete, R., Fabris, S., Sun, T., Lacovig, P., Baraldi, A., Lizzit, S.** (2011).Dual path mechanism in the thermal reduction of graphene oxide,*Journal of the American Chemical Society*, 133(43),17315–17321.
- Larkin, P.** (2017). *Infrared and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation*. Elsevier.
- Latief, F.H. & Sherif, E.-S.M.** (2012).Effects of sintering temperature and graphite addition on the mechanical properties of aluminum,*Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(6),2129–2134.
- Lee, X.J., Zhang, H.B.Y., Chiew, L.K., Yee, L.L., Suyin, G., Thangalazhy-Gopakumar, S., Rigby, S.** (2019).Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation,*Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98,163–180.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W. & Hone, J.** (2008).Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene,*Science*, 321(5887),385–388.
- Li, M., Gao, H., Liang, J., Gu, S., You, W., Shu, D., Wang, J., Sun, B.** (2018).Microstructure evolution and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites,*Materials Characterization*, 140,172–178.
- Li, W., Li, D., Fu, Q. & Pan, C.** (2015).Conductive enhancement of copper/graphene composites based on high-quality graphene,*RSC Advances*, 5(98),80428–80433.
- Li, B., Nan, Y., Zhang, P. & Song, X.** (2016).Structural characterization of individual graphene sheets formed by arc discharge and their growth

- mechanisms, *Rsc Advances*, 6(24),19797–19806.
- Li, M., Xie, J., Li, Y. & Xu, H.** (2015b).Reduced graphene oxide dispersed in copper matrix composites: Facile preparation and enhanced mechanical properties,*Physica Status Solidi (A)*, 212(10),2154–2161.
- Li, G. & Xiong, B.** (2017).Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets/aluminum composites,*Journal of Alloys and Compounds*, 697,31–36.
- Li, X., Yan, S., Chen, X., Hong, Q. & Wang, N.** (2020).Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced copper matrix composites prepared by in-situ CVD, ball-milling, and spark plasma sintering,*Journal of Alloys and Compounds*, 834,155182.
- Li, D., Ye, Y., Liao, X. & Qin, Q.H.** (2018).A novel method for preparing and characterizing graphene nanoplatelets/aluminum nanocomposites, *Nano Research*, 11,1642–1650.
- Li, J., Zhang, X. & Geng, L.** (2018).Improving graphene distribution and mechanical properties of GNP/Al composites by cold drawing,*Materials & Design*, 144,159–168.
- Li, J., Zhang, X. & Geng, L.** (2019).Effect of heat treatment on interfacial bonding and strengthening efficiency of graphene in GNP/Al composites,*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121,487–498.
- Li, J., Zhang, L., Xiao, J. & Zhou, K.** (2015).Sliding wear behavior of copper-based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite,*Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(10),3354–3362.
- Liu, S., Amin-Ahmadi, B., Liu, R., Zheng, Q. & Zhang, X.** (2023).Automated phase segmentation and quantification of high-resolution TEM image for alloy design,*Materials Characterization*, 199,112779.
- Liu, Q., Castillo-Rodríguez, M., Galisteo, A.J., Guzmán de Villoria, R. & Torralba, J.M.** (2019).Wear behavior of copper–graphite composites processed by field-assisted hot pressing,*Journal of Composites Science*, 3(1),29.
- Liu, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S. & Brabazon, D.** (2016).Powder processing methodology for production of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites,*Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(4),437–450.
- Liu, Y., Goolaup, S., Murapaka, C., Lew, W.S. & Wong, S.K.** (2010).Effect of magnetic field on the electronic transport in trilayer graphene,*Acs Nano*, 4(12),7087–7092.
- Loh, G.H., Pei, E., Harrison, D. & Monzón, M.D.** (2018).An overview of functionally graded additive manufacturing,*Additive Manufacturing*, 23,34–44.
- Loos, M.** (2014). *Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology*. Elsevier.

- Lü, L. & Lai, M.O.** (1997). *Mechanical Alloying*. Springer Science & Business Media.
- Mahmoud, D. & Elbestawi, M.A.** (2017). Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(2),13.
- Mannan, S., Paul Knox, J. & Basu, S.** (2017). Correlations between axial stiffness and microstructure of a species of bamboo, *Royal Society Open Science*, 4(1),160412.
- Md Ali, A., Omar, M.Z., Hashim, H., Salleh, M.S. & Mohamed, I.F.** (2021). Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1),801–817.
- Melgarejo, Z.H., Suárez, O.M. & Sridharan, K.** (2006). Wear resistance of a functionally-graded aluminum matrix composite, *Scripta Materialia*, 55(1),95–98.
- Melgarejo, Z.H., Suárez, O.M. & Sridharan, K.** (2008). Microstructure and properties of functionally graded Al–Mg–B composites fabricated by centrifugal casting, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7),1150–1158.
- Moghadam, A.D., Omrani, E., Menezes, P.L. & Rohatgi, P.K.** (2015). Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene— a review, *Composites Part B: Engineering*, 77,402–420.
- Mohan, V.B., Lau, K., Hui, D. & Bhattacharyya, D.** (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations, *Composites Part B: Engineering*, 142,200–220.
- Mohiuddin, T.M.G., Lombardo, A., Nair, R.R., Bonetti, A., Savini, G., Jalil, R., Bonini, N., Basko, D.M., Galiotis, C., Marzari, N., Novoselov, K.S., Geim, A.K., Ferrari, A.C.** (2009). Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation, *Physical Review B*, 79(20),205433.
- Morgado, T.L.M., Navas, H. & Brites, R.** (2016). Wear study of innovative Ti-Ta alloys, *Procedia Structural Integrity*, 2,1266–1276.
- Morsi, K. & Esawi, A.** (2007). Effect of mechanical alloying time and carbon nanotube (CNT) content on the evolution of aluminum (Al)–CNT composite powders, *Journal of Materials Science*, 42,4954–4959.
- Moustafa, E.B. & Taha, M.A.** (2020). Preparation of high strength graphene reinforced Cu-based nanocomposites via mechanical alloying method: microstructural, mechanical and electrical properties, *Applied Physics A*, 126(3),1–16.
- Muñoz-Rojas, P.A.** (2016). *Computational Modeling, Optimization and Manufacturing Simulation of Advanced Engineering Materials*. Volume 49, Springer.
- Mussatto, A., Ahad, I.U.I., Mousavian, R.T., Delaure, Y. & Brabazon, D.** (2021). Advanced production routes for metal matrix

- composites, *Engineering Reports*, 3(5), e12330.
- Naebe, M. & Shirvanimoghaddam, K.** (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties, *Applied Materials Today*, 5, 223–245.
- Naik, S.N. & Walley, S.M.** (2020). The Hall–Petch and inverse Hall–Petch relations and the hardness of nanocrystalline metals, *Journal of Materials Science*, 55(7), 2661–2681.
- Naseer, A., Ahmad, F., Aslam, M., Guan, B.H., Harun, W.S.W., Muhamad, N., Raza, M.R., German, R.** (2019). A review of processing techniques for graphene-reinforced metal matrix composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 34(9), 957–985.
- Natarajan, N., Krishnaraj, V. & Davim, J.P.** (2014). *Metal Matrix Composites: Synthesis, Wear Characteristics, Machinability Study of MMC Brake Drum*. Springer.
- Ni, Z., Wang, Y., Yu, T. & Shen, Z.** (2008). Raman spectroscopy and imaging of graphene, *Nano Research*, 1(4), 273–291.
- Nie, H., Fu, L., Zhu, J., Yang, W., Li, D., Zhou, L.** (2018). Excellent tribological properties of lower reduced graphene oxide content copper composite by using a one-step reduction molecular-level mixing process, *Materials*, 11(4), 600.
- Nieto, A., Bisht, A., Lahiri, D., Zhang, C. & Agarwal, A.** (2017). Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review, *International Materials Reviews*, 62(5), 241–302.
- Niino, M. & Maeda, S.** (1990). Recent development status of functionally gradient materials, *Isij International*, 30(9), 699–703.
- Niteesh Kumar, S.J., Keshavamurthy, R., Haseebuddin, M.R. & Koppad, P.G.** (2017). Mechanical properties of aluminium-graphene composite synthesized by powder metallurgy and hot extrusion, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, 605–613.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, IV., Firsov, AA.** (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 306(5696), 666–669.
- Papageorgiou, D.G., Kinloch, I.A. & Young, R.J.** (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, *Progress in Materials Science*, 90, 75–127.
- Parida, S.P. & Jena, P.C.** (2019). An overview: different manufacturing techniques used for fabricating functionally graded material, *Materials Today: Proceedings*, 18, 2942–2951.
- Parihar, R.S., Setti, S.G. & Sahu, R.K.** (2018). Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review, *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 309–336.
- Parvez, K., Yang, S., Feng, X. & Müllen, K.** (2015). Exfoliation of graphene via wet chemical routes, *Synthetic Metals*, 210, 123–132.
- Pasha, A. & Rajaprakash, B.M.** (2022). Fabrication and mechanical properties of

functionally graded materials: A review, *Materials Today: Proceedings*, 52,379–387.

- Peciar, P., Jezso, K., Kohutova, M., Gustafik, A., Kratky, L., Fekete, R., Jirout, T., Peciar, M.** (2022). Particle Size Distribution Analysis of Beech Chips Depending on the Measurement Method, *Chemical Engineering Transactions*, 92,43–48.
- Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I. & Martínez-Sánchez, R.** (2014). Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, 615,S578–S582.
- Phiri, J., Gane, P. & Maloney, T.C.** (2017). General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites, *Materials Science and Engineering: B*, 215,9–28.
- Pimenta, M.A., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M.S., Cançado, L.G., Jorio, A., Saito, R.** (2007). Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9(11),1276–1290.
- Pratik, A., Biswal, S.K. & Haridoss, P.** (2020). Impact of enhanced interfacial strength on physical, mechanical and tribological properties of copper/reduced graphene oxide composites: Microstructural investigation, *Ceramics International*, 46(14),22539–22549.
- Qin, B., Zhang, T., Chen, H. & Ma, Y.** (2016). The growth mechanism of few-layer graphene in the arc discharge process, *Carbon*, 102,494–498.
- Radhika, N.** (2018). Comparison of the mechanical and wear behaviour of aluminium alloy with homogeneous and functionally graded silicon nitride composites, *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2),261–271.
- Radhika, N. & Raghu, R.** (2018). Effect of centrifugal speed in abrasive wear behavior of Al-Si5Cu3/SiC functionally graded composite fabricated by centrifugal casting, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71,715–726.
- Raj, R.R., Yoganandh, J., Saravanan, M.S. & Kumar, S.S.** (2021). Effect of graphene addition on the mechanical characteristics of AA7075 aluminium nanocomposites, *Carbon Letters*, 31(1),125–136.
- Rajasekhar, K., Babu, V.S. & Davidson, M.J.** (2021). Interfacial microstructure and properties of Al-Cu functionally graded materials fabricated by powder metallurgy method, *Materials Today: Proceedings*, 46,9212–9216.
- Rajković, V., Božić, D., Popović, M. & Jovanović, M.** (2009). Properties of Cu-Al₂O₃ powder and compact composites of various starting particle size obtained by high-energy milling, *Association of Metallurgical Engineers of Serbia, MJoM*, 15(1),45–52.
- Rashad, M., Pan, F., Hu, H., Asif, M., Hussain, S., She, J.** (2015). Enhanced tensile properties of magnesium composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Materials Science and Engineering: A*, 630,36–44.

- Rashad, M., Pan, F-S., Asif, M.** (2015). Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(5), 460–470.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A. & Asif, M.** (2014). Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method, *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(2), 101–108.
- Reddy, M.P., Shakoor, R.A., Parande, G., Manakari, V., Ubaid, F., Mohamed, A.M.A., Gupta, M.** (2017). Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques, *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(5), 606–614.
- Reddy, K.S., Sreedhar, D., Kumar, K.D. & Kumar, G.P.** (2015). Role of reduced graphene oxide on mechanical-thermal properties of aluminum metal matrix nano composites, *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 1270–1275.
- Ruiz-Navas, E.M., Gordo, E. & García, R.** (2005). Development and characterization of 430L matrix composites gradient materials, *Materials Research*, 8(1), 1–4.
- Saboori, A., Dadkhah, M., Fino, P. & Pavese, M.** (2018). An overview of metal matrix nanocomposites reinforced with graphene nanoplatelets; mechanical, electrical and thermophysical properties, *Metals*, 8(6), 423.
- Saboori, A., Pavese, M., Badini, C. & Fino, P.** (2017). Development of Al-and Cu-based nanocomposites reinforced by graphene nanoplatelets: Fabrication and characterization, *Frontiers of Materials Science*, 11(2), 171–181.
- Saboori, A., Pavese, M., Badini, C. & Fino, P.** (2018). A novel approach to enhance the mechanical strength and electrical and thermal conductivity of Cu-GNP nanocomposites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(1), 333–345.
- Saiyathibrahim, A., Nazirudeen, M.S.S. & Dhanapal, P.** (2015). Processing techniques of functionally graded materials—a review. on "International Conference on Systems, Science, Control, Communication, Engineering and Technology". PP: 98–105.
- Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-habai, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D., Ma, A.** (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges, *Composites Part B: Engineering*, 201, 108376.
- Salvo, C., Mangalaraja, R. V., Udayabashkar, R., Lopez, M. & Aguilar, C.** (2019). Enhanced mechanical and electrical properties of novel graphene reinforced copper matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 777, 309–316.
- Sanchez-Castillo, F.X., Anwar, J. & Heyes, D.M.** (2003). Molecular dynamics simulations of granular compaction: The single granule case, *The*

- Schubert, T., Brendel, A., Schmid, K., Koeck, Th., Ciupinski, L., Zielinski, W., Weißgärber, T., Kieback, B. (2007). Interfacial design of Cu/SiC composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(12),2398–2403.
- Şenyurt, B., Küçükelyas, B., Bellek, M., Kavak, S., Borand, G., Uzunsoy, D., Ağaoğulları, D., Akçamlı, N. (2022). Few-layered graphene reinforced Al-10 wt% Si-2 wt% Cu matrix composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 21,486–501.
- Seyed Pourmand, N. & Asgharzadeh, H. (2020). Aluminum matrix composites reinforced with graphene: a review on production, microstructure, and properties, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(4),289–337.
- Shao, P., Yang, W., Zhang, Q., Meng, Q., Tan, X., Xiu, Z., Qiao, J., Yu, Z., Wu, G. (2018). Microstructure and tensile properties of 5083 Al matrix composites reinforced with graphene oxide and graphene nanoplates prepared by pressure infiltration method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109,151–162.
- Shen, B., Ding, J., Yan, X., Feng, W., Li, J. Xue, Q. (2012). Influence of different buffer gases on synthesis of few-layered graphene by arc discharge method, *Applied Surface Science*, 258(10),4523–4531.
- Shen, M. & Bever, M.B. (1972). Gradients in polymeric materials, *Journal of Materials Science*, 7(7),741–746.
- Shen, B., Chen, J., Yan, X. & Xue, Q. (2012). Synthesis of fluorine-doped multi-layered graphene sheets by arc-discharge, *RSC Advances*, 2(17),6761–6764.
- Shin, S.E. & Bae, D.H. (2015). Deformation behavior of aluminum alloy matrix composites reinforced with few-layer graphene, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78,42–47.
- Shin, S.E., Choi, H.J., Shin, J.H. & Bae, D.H. (2015). Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites, *Carbon*, 82,143–151.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I., Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future, *Progress in Materials Science*, 56(8),1178–1271.
- Smith, E. & Dent, G. (2019). *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. John Wiley & Sons.
- Soldano, C., Mahmood, A. & Dujardin, E. (2010). Production, properties and potential of graphene, *Carbon*, 48(8),2127–2150.
- Souza, L.P. de F. & Mansur, H.S. (2004). Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes, *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1),14–20.
- Staudenmaier, L. (1898). Verfahren zur darstellung der graphitsäure, *Berichte Der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 31(2),1481–1487.

- Stein, J., Lenczowski, B., Fréty, N. & Anglaret, E.** (2012). Mechanical reinforcement of a high-performance aluminium alloy AA5083 with homogeneously dispersed multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 50(6), 2264–2272.
- Stoller, M.D., Park, S., Zhu, Y., An, J. & Ruoff, R.S.** (2008). Graphene-based ultracapacitors, *Nano Letters*, 8(10), 3498–3502.
- Stroyuk, A.L., Andryushina, N.S., Shcherban, N.D., Il'in, V.G., Efanov, V.S., Yanchuk, I.B., Kuchmii S.Ya., Pokhodenko, V.D.** (2012). Photochemical reduction of graphene oxide in colloidal solution, *Theoretical and Experimental Chemistry*, 48, 2–13.
- Subrahmanyam, K.S., Panchakarla, L.S., Govindaraj, A. & Rao, C.N.R.** (2009). Simple method of preparing graphene flakes by an arc-discharge method, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4257–4259.
- Sun, D.L., Hong, R.Y., Liu, J.Y., Wang, F. & Wang, Y.F.** (2016). Preparation of carbon nanomaterials using two-group arc discharge plasma, *Chemical Engineering Journal*, 303, 217–230.
- Suryanarayana, C.** (2001). Mechanical alloying and milling, *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 1–184.
- Suryanarayana, C.** (2011). Synthesis of nanocomposites by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, S229–S234.
- Suryanarayana, C. & Al-Aqeeli, N.** (2013). Mechanically alloyed nanocomposites, *Progress in Materials Science*, 58(4), 383–502.
- Swikker, K.R.J., Kanagasabapathy, H., Manickam, I.N., Nadar, N.V.P. & Alwin, S.** (2020). Effect of sintering temperature on grain growth and mechanical properties of copper/graphene nanosheet composite, *Diamond and Related Materials*, 110, 108111.
- Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P.L. & Rohatgi, P.K.** (2016). Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelets, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 463–469.
- Tahmasbi, K. & Mahmoodi, M.** (2018). Evaluation of microstructure and mechanical properties of aluminum AA7022 produced by friction stir extrusion, *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 151–159.
- Tam, D.K.Y., Ruan, S., Gao, P. & Yu, T.** (2012). High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. *Advances in Military Textiles and Personal Equipment*. Elsevier, PP: 213–237.
- Tatar, C. & Özdemir, N.** (2010). Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α -Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites (Al/Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method, *Physica B: Condensed Matter*, 405(3), 896–899.
- Tekade, R.K.** (2018). *Basic Fundamentals of Drug Delivery*. Academic Press.
- Tjong, S.C.** (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(10), 281–350.

- Totten, G.E. & MacKenzie, D.S.** (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing*. CRC press.
- Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M.K., Camuşçu, N., Yildirim, R.O., Keleş, Ö.** (2014).The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy,*Materials & Design (1980-2015)*, 56,31–36.
- Udupa, G., Rao, S.S. & Gangadharan, K. V.** (2015).Fabrication of functionally graded carbon nanotube-reinforced aluminium matrix laminate by mechanical powder metallurgy technique-Part I,*J Mater Sci Eng*, 4(3),1000169.
- Upadhyaya, G.S.** (1997). *Powder Metallurgy Technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- Vani, V.V. & Chak, S.K.** (2018).The effect of process parameters in aluminum metal matrix composites with powder metallurgy,*Manufacturing Review*, 5,7.
- Varol, T.** (2016).Nano partikül takviyeli bakir esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu.
- Varol, T. & Canakci, A.** (2015).Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy,*Metals and Materials International*, 21(4),704–712.
- Varol, T. & Canakci, A.** (2015).The effect of type and ratio of reinforcement on the synthesis and characterization Cu-based nanocomposites by flake powder metallurgy,*Journal of Alloys and Compounds*, 649,1066–1074.
- Vijay Ponraj, N., Azhagurajan, A., Vettivel, S.C., Sahaya Shajan, X. & Nabhiraj, P.Y.** (2018).Study of processing and microstructure of copper composite reinforced with graphene nanosheet by powder metallurgy technique,*Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 56,523–534.
- Walton, K.S. & Snurr, R.Q.** (2007).Applicability of the BET method for determining surface areas of microporous metal– organic frameworks,*Journal of the American Chemical Society*, 129(27),8552–8556.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z., Zhang, D.** (2012).Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites, *Scripta Materialia*,66 (8), 594-597.
- Wang, L., Yang, Z., Cui, Y., Wei, B., Xu, S., Sheng, J., Wang, M., Zhu, Y., Fei, W.** (2017).Graphene-copper composite with micro-layered grains and ultrahigh strength,*Scientific Reports*, 7(1),1–10.
- Wang, C., Sun, L., Dai, X., Li, D., Chen, X., Xia, W., Xia, W.** (2019).Continuous synthesis of graphene nano-flakes by a magnetically rotating arc at atmospheric pressure,*Carbon*, 148,394–402.
- Wang, C., Song, M., Chen, X., Li, D., Xia, W., Xia, W.** (2020).Effects of buffer gases on graphene flakes synthesis in thermal plasma process at atmospheric pressure,*Nanomaterials*, 10(2),309.
- Whitener Jr, K.E. & Sheehan, P.E.** (2014).Graphene synthesis,*Diamond and Related Materials*, 46,25–34.
- Wu, Y., Wang, B., Ma, Y., Huang, Y., Li, N., Zhang, F., Chen, Y.** (2010).Efficient

and large-scale synthesis of few-layered graphene using an arc-discharge method and conductivity studies of the resulting films, *Nano Research*, 3(9),661–669.

- Wu, M., Chen, Z., Huang, C., Huang, K., Jiang, K., Liu, J.** (2019). Graphene platelet reinforced copper composites for improved tribological and thermal properties, *RSC Advances*, 9(68),39883–39892.
- Wu, Y., Kim, G.-Y. & Russell, A.M.** (2012). Effects of mechanical alloying on an Al6061–CNT composite fabricated by semi-solid powder processing, *Materials Science and Engineering: A*, 538,164–172.
- Wu, X., Liu, Y., Yang, H. & Shi, Z.** (2016). Large-scale synthesis of high-quality graphene sheets by an improved alternating current arc-discharge method, *RSC Advances*, 6(95),93119–93124.
- Xavior, M.A., Kumar, H.G.P. & Kumar, K.A.** (2018). Tribological studies on AA 2024–Graphene/CNT Nanocomposites processed through Powder Metallurgy, *Materials Today: Proceedings*, 5(2),6588–6596.
- Xie, L., Sha, J., Ma, Y. & Han, J.** (2013). Thermal Reduction of Graphene Oxide in Organic Solvents for Producing Colloidal Suspensions of Reduced Graphene Oxide Sheets, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 21(10),901–915.
- Xiong, B., Liu, K., Yan, Q., Xiong, W. & Wu, X.** (2020). Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites fabricated by spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 837,155495.
- Xu, F.M., Zhu, S.J., Zhao, J., Qi, M., Wang, F.G., Li, S.X., Wang, Z.G.** (2004). Effect of stress ratio on fatigue crack propagation in a functionally graded metal matrix composite, *Composites Science and Technology*, 64(12),1795–1803.
- Yan, S.J., Dai, S.L., Zhang, X.Y., Yang, C., Hong, Q.H., Chen, J.Z., Lin, Z.M.** (2014). Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes, *Materials Science and Engineering: A*, 612,440–444.
- Yu, H., Wang, L., Li, J. & Jia, D.** (2015). To promote the nucleation and growth of graphene in arc discharge process by magnetic field and H₂, *Materials Letters*, 159,43–46.
- Yue, H., Yao, L., Gao, X., Zhang, S., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Wang, B.** (2017). Effect of ball-milling and graphene contents on the mechanical properties and fracture mechanisms of graphene nanosheets reinforced copper matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 691,755–762.
- Zhai, W., Shi, X., Wang, M., Xu, Z., Yao, J., Siyuan, S., Wang, Y.** (2014). Grain refinement: a mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of Ni₃Al matrix self-lubricating composites, *Wear*, 310(1–2),33–40.
- Zhang, X., Wu, K., He, M., Ye, Z., Tang, S., Jiang, Z.** (2016). Facile synthesis and characterization of reduced graphene oxide/copper composites using freeze-drying and spark plasma sintering, *Materials Letters*, 166,67–70.

- Zhang, L., Hou, G., Zhai, W., Ai, Q., Feng, J., Zhang, L., Si, P., Ci, L. (2018). Aluminum/graphene composites with enhanced heat-dissipation properties by in-situ reduction of graphene oxide on aluminum particles, *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 854–860.
- Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., Lin, Y., Liu, W., Chen, B., Shen, Q., Zhang, L., Lavernia, E.J. (2019). Additive manufacturing of functionally graded materials: A review, *Materials Science and Engineering: A*, 764, 138209.
- Zhang, D., Ye, K., Yao, Y., Liang, F., Qu, T., Ma, W., Yang, B., Dai, Y., Watanabe, T. (2019). Controllable synthesis of carbon nanomaterials by direct current arc discharge from the inner wall of the chamber, *Carbon*, 142, 278–284.
- Zhang, Z. & Chen, D.L. (2006). Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength, *Scripta Materialia*, 54(7), 1321–1326.
- Zhang, X., Chen, Y. & Hu, J. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials, *Progress in Aerospace Sciences*, 97, 22–34.
- Zhang, J., Chen, Z., Zhao, J. & Jiang, Z. (2018c). Microstructure and mechanical properties of aluminium-graphene composite powders produced by mechanical milling, *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 4(1), 1–9.
- Zhang, Z.W., Liu, Z.Y., Xiao, B.L., Ni, D.R. & Ma, Z.Y. (2018). High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing, *Carbon*, 135, 215–223.
- Zhang, Y., Xu, Y. & Liu, R. (2021). Regulating cations and solvents of the electrolyte for ultra-efficient electrochemical production of high-quality graphene, *Carbon*, 176, 157–167.
- Zhang, H., Xu, C., Xiao, W., Ameyama, K. & Ma, C. (2016). Enhanced mechanical properties of Al5083 alloy with graphene nanoplates prepared by ball milling and hot extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, 658, 8–15.
- Zhao, W., Fang, M., Wu, F., Wu, H., Wang, L., Chen, G. (2010). Preparation of graphene by exfoliation of graphite using wet ball milling, *Journal of Materials Chemistry*, 20(28), 5817–5819.
- Zhao, L., Lu, H. & Gao, Z. (2015). Microstructure and mechanical properties of Al/graphene composite produced by high-pressure torsion, *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 976–981.
- Zhao, W., Wu, F., Wu, H. & Chen, G. (2010). Preparation of colloidal dispersions of graphene sheets in organic solvents by using ball milling, *Journal of Nanomaterials*, 2010, 1–4.
- Zhou, W., Mikulova, P., Fan, Y., Kikuchi, K., Nomura, N., Kawasaki, A. (2019). Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high-performance conductor, *Composites Part B: Engineering*, 167, 93–99.

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J.W., Potts, J.R., Ruoff, R.S. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications, *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924.

Zhu, L., Zhao, X., Li, Y., Yu, X., Li, C., Zhang, Q. (2013). High-quality production of graphene by liquid-phase exfoliation of expanded graphite, *Materials Chemistry and Physics*, 137(3), 984–990.



EKLER

EK A: Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli Al ve Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

EK B: Birkaç katmanlı grafen ile ilgili Raman sonuçları.

EK C: 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al esaslı tozların karakterizasyonu.

EK D: FLG takviyeli Al esaslı FDM'nin karakterizasyonu.

EK E: Ticari grafen takviyeli Al-Cu esaslı FDM'nin karakterizasyonu.

EK F: MA süresine bağlı olarak FLG takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimi.



Çizelge A.1 : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Bartolucci ve diğ., 2011)	Atomize edilmiş Al tozu (~22 µm tane boyutu)	Eksfoliye edilen GO	Karıştırma, yüksek enerjili öğütme (Ar, 1 sa), HIP (550°C, 4 sa), ekstrüzyon	Grafen, yapıda Al ₄ C ₃ oluşturma eğiliminde; bu durum alüminyumun sertliğini ve çekme mukavemetini düşürmektedir. Ağ. %0,3 GNS/Al için çekme mukavemetinde saf Al'a göre %62 artış
(Wang ve diğ., 2012)	Al tozu (2 µm tane boyutu)	GNS (Eksfoliye GO)	Sinterleme (Ar), sıcak ekstrüzyon	Ağ. %1 grafen içeren kompozit için 60 dk öğütme ile %47; 90 dk öğütme ile ise %34 kadar mukavemet artışı görülmüştür.
(Bastwros ve diğ., 2014)	Al6061 tozu (13,8 µm ortalama başlangıç boyutu)	FLG (Brodie; 100 µm ortalama başlangıç boyutu)	Bilyalı değirmen (10, 30, 60, 90 dk), iki aşamalı presleme (oda sıcaklığında ön presleme; sıcak presleme yarı katı rejimde)	Kompozitin sertlik değerinde %11,8 ve çekme mukavemetinde %11,1 artış
(Rashad ve diğ., 2014)	Al tozu (%99, 1-3 µm tane boyutu)	GNP (5-15 nm ortalama kalınlık)	Kısmî toz metalurjisi, sinterleme (muffle fırın; 600°C, 6 sa), sıcak ekstrüzyon (470°C)	

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Yan ve diğ., 2014)	Al alaşım tozları (Mg-Cu; ağ. %1,5; %3,9)	GNF (Hummers')	Ultrasonikasyon (1 sa, GNF+etanol), bilyalı öğütme (12 sa, 75 rpm), HIP (480°C, 110 MPa, 2 sa), sıcak ekstrüzyon (450°C, 1 sa)	Ağ. % 0,5 GNF ile akma dayanımı 214'den 319 MPa'ya ulaşmıştır.
(Pérez-Bustamante ve diğ., 2014)	Al tozları (%99,9; 325 mesh)	GNP (grafit eksfoliyasyonu, <10 nm kalınlıkta)	Yüksek enerjili bilyalı öğütme (1,3,5 sa; Ar), soğuk presleme (950 MPa), sinterleme (Ar; 500°C, 0,5; 1, 2, 3, 4, ve 5 sa)	2 sa sinterleme işlemi uygulanan kompozitlerin, öğütme süreleri arttıkça sertlik değerlerinde artış görülmüştür.
(Shin ve Bae, 2015)	Gaz atomize edilmiş Al2024 alaşım tozları (%99,5; <150 µm çap)	FLG (6-8 nm kalınlık)	Gezegen tipli öğütme (100 rpm, 3 sa), yüksek enerjili öğütme (500 rpm, 9 sa, Ar), sıcak haddeleme (450°C)	Ağ. %0,7 FLG'ye sahip kompozit için çekme mukavemeti 700 MPa'a ulaşmıştır.
(Rashad ve diğ., 2015b)	Al (%99,5; tane boyutu 2 µm)	GNP (CVD ile üretim; 5-25 nm kalınlık, ortalama çap 0,5-20 µm)	Mekanik karıştırma (1 sa, 2000 rpm) 7 kurutma (vakum, 80°C, 12 sa), şekillendirme (540 MPa) sinterleme (600°C; 5,5 sa), ekstrüzyon (470°C)	GNP'lerin matristeki oranı arttıkça, kompozitlerin sertlik değerleri de artmaktadır.

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takviyeli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Reddy ve diğ., 2015)	Atomize edilmiş Al tozu (45-75 µm tane boyutu)	rGO (Hummers')	Sonikasyon (30 dk, etanol), gezegen tipli bilyalı öğütme (30 dk, 80 rpm), sinterleme (490°C, 1 sa)	Ağ. %0,5 rGO takviyeli Al kompozitin sertlik ve termal iletkenliğinde gelişme gözlemlenmiştir.
(Shin ve diğ., 2015)	Al tozu (%99,5; < 150 µm)	FLG (grafit eksfoliyasyonu)	Gezegen tipli bilyalı öğütme (200 rpm, 1 sa; 100 rpm 3 sa 'Al+FLG'), atritör (500 rpm, 6 sa, Ar), sıcak haddeleme (500°C)	FLG takviyesinin matriste homojen dağılımı; hacimce %0,7 FLG/Al kompozitte 440 MPa çekme mukavemeti
(Zhang ve diğ., 2016b)	Küresel Al5083 tozu (300 mesh)	GNP (5-20 nm kalınlıkta)	Gezegen tipli bilyalı öğütme (350 rpm, 24 sa, Ar atmosferi), sıcak presleme (773 K, 1 sa, 300 MPa), sıcak ekstrüzyon (773 K)	Takviyesiz Al'a göre; ağ. %1 GNP içeriğine sahip kompozit için; akma dayanımında 219 MPa'dan 322 MPa'a; maksimum çekme mukavemetinde ise 301 MPa'dan 470 MPa'a kadar ulaşılmıştır.

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Kumar ve Xavior, 2016)	Ticari Al6061 tozu	Ticari grafen (10 μ m'den büyük tane boyutu)	Bilyalı öğütme, presleme (450 MPa), sinterleme (500°C)	Grafen ilavesi; sürtünmeyi ve aşınma oranını (kütle kaybı) bastırarak olumlu etki göstermiştir.
(Liu ve diğ., 2016)	Al tozu (250 mesh, %99,5)	rGO; (su bazlı grafen oksit kolloidi)	Mekanik karıştırma (Al tozları + alkol, 15 dk), sonikasyon (GO su koloidi, 1-3 sa), soğuk presleme (30,73,220,260,330,560 MPa)	Sertlik değerlerinde artış; 560 MPa'lık maksimum basınçta %88,5 relatif yoğunluk
(Gao ve diğ., 2016)	Al tozu (CTAB ile işlem)	GO (Hummers')	GO/Al tozları (CTAB işlem), sinterleme (Ar, 600°C, 1 sa, 25 MPa)	Ağ. %0,3 grafen içeriğine sahip kompozitin çekme mukavemeti en iyi değerde; kopma uzaması ise grafen içeriği ile birlikte düşmektedir.
(Akçamlı ve diğ., 2016)	Al tozu (325 mesh, %99 saflık)	Ticari GNPs	Gezegen tipli bilyalı öğütme (1,2,4 sa; Ar, 300 rpm), presleme (625 MPa), sinterleme (630°C, 3 sa, Ar)	Ağ. %2 GNP içeriği ile birlikte topaklanma ve sertlik değerlerinde düşüş görülmüştür.

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Tabandeh-Khorshid ve diğ., 2016)	Al tozu (%99; 75 µm tane boyutu)	GNP (6 nm ortalama kalınlık)	Atritör ile öğütme (6 sa, 500 rpm), soğuk (200 MPa) ve sıcak presleme (525°C, 500 MPa)	Ağ. %1 GNP içerikli kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı takviyesiz Al'a göre iyileşme göstermektedir.
(El-Ghazaly ve diğ., 2017)	AA2124 tozu (ort. 45µm tane boyutu)	MLG (5-10 nm kalınlık)	Karıştırma (1 sa, 96 rpm, Ar), yüksek enerjili bilyalı öğütme (400 rpm, 2 sa), presleme (525 MPa), sinterleme (450°C, 75 dk), sıcak ekstrüzyon	Ağ. %5 grafen içeriğinden sonra grafen kümelerinin toplanması.
(Li ve Xiong, 2017)	Al tozu (%99,5; 40 µm çap)	GNS (< 5 µm, 5-8 nm kalınlık)	Ultrasonikasyon (40 dk), yüksek enerjili öğütme (Ar, 4 sa, 250 rpm), sıcak presleme (vakum, 30 MPa, 610°C, 4 sa)	Ağ. %0,25 GNS eklenen kompozitte; akma ve çekme mukavemetinde sırasıyla Al'a göre %38,27 ve %56,19 artış;
(Kwon ve diğ., 2017)	Gaz-atomize Al-Mg5 (AlMg5) alaşım tozu (%99,5; tane boyutu < 63 µm)	Kendiliğinden hazırlanan GO tozu (5-20 nm kalınlık, 1 µm uzunluk)	Gezegen tipli bilyalı öğütme (Ar, 360 rpm, 20 sa), sıcak presleme (550°C, 570 MPa, 4 sa)	Kompozitin maksimum çekme mukavemeti 560 MPa'a kadar ulaşmıştır, fakat kopma uzaması %40 kadar azalmıştır.

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Niteesh Kumar ve diğ., 2017)	Al tozu (20-45 µm; %98)	Grafen (%99; 0,5-20 µm tane boyutu)	Bilyalı öğütme (300 rpm, 2 sa), soğuk presleme (350 MPa), sinterleme (560°C, 4 sa), sıcak ekstrüzyon (400°C)	Ağ. %1 MLG eklenmesiyle, kompozitin sertlik ve çekme mukavemetinin artış
(Li ve diğ., 2018)	1060 saf Al tozu (%99,96; 3 µm çap)	GNP (5 nm ortalama kalınlık)	Sonikasyon, manyetik karıştırma, gezegen tipli bilyalı öğütme (350 rpm, 150 dk), kriyo tipli öğütme (Ar, -5°C), ekstrüzyon (50 MPa), sıcak pres (580°C, 4sa)	Takviyesiz Al'a göre; basma mukavemeti %330 ve %586 oranında artış görülmüştür.
(Bhadauria ve diğ., 2018)	Al tozu (%99,5; 7-15 µm tane boyutu)	GNP (10-15 nm ortalama kalınlık)	Ultrasonikasyon (4 sa, GNP; GNP+Al), manyetik karıştırma (15 dk, Al+GNP), SPS (550°C, 20 dk, 80 MPa)	Ağ. %0,5 GNP içeriğine sahip kompozitte akma ve maksimum mukavemet için, sırasıyla, %98 ve %63 artış görülmüştür.
(Jiang ve diğ., 2018)	Atomize Al tozu (%99,8)	GNS (3-10 nm kalınlık)	Hız değişkenli gezegen tipli bilyalı değirmen (Ar), presleme (500 MPa), sinterleme (540°C, 2 sa, vakum), sıcak ekstrüzyon (450°C)	295 MPa çekme mukavemeti

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Zhang ve diğ., 2018)	Ticari A335 Al-Si alaşım (Si: ağı. % 4,6; Cu: Ağı. %0,8; Mg: ağı. % 0,51 Fe: ağı. % 0,15; 30 µm tane boyutu)	GNS (1-5 nm kalınlık)	Gezegen tipli bilyalı Öğütme (2,5,10,15,20 sa; 250 rpm), soğuk presleme (350 MPa), sıcak presleme (50 MPa, 1 sa, 500°C)	Al-GNSs kompozitin sertlik değeri, Al alaşımından %115,1 oranında daha yüksektir.
(Bhadauria ve diğ., 2019)	Al tozu (%99,5; 7-15 µm tane boyutu)	GNP (10-15 nm ortalama kalınlık)	Yüksek enerjili öğütme (180 rpm); GNPs (SDS ile işlem), SPS (550°C, 80 MPa, 20 dk)	SPS yardımıyla %99 relatif yoğunluk elde edilmiştir. Ağı. %0,5 GNP eklenmesiyle; akma mukavemetinde %85; çekme mukavemetinde ise %44 artış.
(Akçamlı ve diğ., 2019)	Alümiyum (325 mesh, %99,9)	Ticari GNP	Mekanik alaşımlama (SPEX, 2-8 sa, 1200 rpm), presleme (300 MPa; CIP 200 MPa), sinterleme (650°C, 5 sa, Ar)	Ağı. %2 GNP'ye sahip kompozitte aglomerasyonu; ağı. %0,5 GNP'ye sahip kompozitin sertlik değeri 199,4 HV olarak elde edilmiştir.

Çizelge A.1 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Al esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Xiong ve diğ., 2020)	Al tozu (40 µm ortalama çap; %99,5)	GNP (3-10 nm ortalama kalınlık)	Ultrasonikasyon (GNPs, etil alkol 1 sa), Yüksek enerjili öğütme (300 rpm, 4 sa, Ar), SPS (510°C, 540°C, 570°C, 600°C; 20 dk)	Nano-Al ₄ C ₃ fazı, GNP/Al kompozitlerinin arayüzey bağını ve mekanik özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olmuştur.
(Raj ve diğ., 2021)	Al AA7075 alaşımı	Ticari grafen (ortalama kalınlık 8-15 nm)	Bilyalı öğütme (24 sa, etil alkol, 240 rpm), presleme (555 MPa, 20 dk), sinterleme (Ar, 1 sa, 600°C)	Ağ. %1 grafen içeriği ile en yüksek sertlik değeri (106,4 HV)
(Akçamlı ve diğ., 2022)	Al (325 mesh, %99,5); Si (325 mesh, %99,5)	FLG (EAD üretim)	Yüksek enerjili titreşimli bilyalı değirmen (Ar, 0,2,4,8 sa), soğuk presleme (650 MPa), sinterleme (2 sa, Ar, 565°C)	Ağ. %0,5 FLG ilavesi ile, basma dayanımı %50 iyileşmiştir.
(Kaykılarlı ve diğ., 2022)	Al (%99,5; <74 µm), Cu (%99,5; <63 µm)	FLG (EAD üretim)	Gezegen tipli bilyalı öğütme (500 rpm; 5,7,9 sa); presleme (300 MPa), sinterleme (Ar, 590°C, 3 sa)	En yüksek sertlik değeri, 7 sa öğütme ve ağ. %1 FLG katkılı kompozit ile elde edilmiştir.

Çizelge A.2 : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Hwang ve diğ., 2013)	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	GO(Hummers')	Sonikasyon, SPS (50 MPa, 3dk, 600°C)	Elastik modül ve akma dayanımı sırasıyla 131 GPa (Takviyesiz Cu'ya göre %30 yüksek) ve 284 MPa, (Takviyesiz Cu'ya göre %80 yüksek)
(Cui ve diğ., 2014)	Cu tozu	FLG (Özel üretim)	- Bilyalı öğütme (100,200 ve 300 rpm, 4 ve 8 saat), - SPS (600°C, 40 MPa)	FLG / Cu-100-4 kompozitinin akma dayanımı 378 MPa; FLG / Cu- 100rpm-4saat- kompozitinin iletkenliği, % 70,4 IACS'ye ulaşmıştır.
(Chu ve Jia, 2014)	Cu (%99,9 saflık, 15-20 µm)	GNP (Brodie)	- SPEX (Paslanmaz çelik, 1200 rpm, 3 sa, Ar), - HP (800°C,15 dk,50°C/dk ısıtma, 40 MPa)	Hacimce %8 GNP/Cu'da akma dayanımında %114, elastisite modülünde ise %37'lik bir artış gözlemlenmiştir.
(Li ve diğ., 2015)	Cu tozu (%99,7 saflık, ~5 µm)	GO (Hummers')-(RGO) ve HP ile yüksek kalitede grafen üretiliyor (HQG)	- Bilyalı öğütme (1700 rpm, 4 saat), - SPS (650°C, 60 MPa, 5 dk)	Ağ. %0,5 oranının üstünde HQG eklendiği takdirde, sertlik ve elektriksel iletkenlik düşüyor. Çünkü porosite artışı mevcut.

Çizelge A.2 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Dutkiewicz ve diğ., 2015)	Cu tozu (%99,9 saflık; 40-90 µm)	GNP (N006 tip), FLGRO	5 saat bilyalı öğütme (Pulverisette 5 Fritsch, ZrO₂ kap ve bilya); - HP (550 MPa, 510°C 10-2 bar vakum)	Ağ. %1-2'lik FLGRO içeriği N006 grafen içeriğine göre %50 sertlikte artışa; %30 kadar elektrik direncinde düşüşe neden olmuştur.
(Varol ve Canakci, 2015)	Gaz atomize Cu tozu (%99,9 saflık, 58,5 µm)	MLG (%96-99 saflık, 50-100 nm ortalama kalınlık)	5 saat bilyalı öğütme (125 ml kap, gezegen tipli, 300 rpm, WC bilya ve kap) 200 MPa ön şekillendirme, HP (500 MPa, 1 sa, 500°C) - Sinterleme 950°C, 2 sa Ar	MLG / Bakır nanokompozitlerin sertliği, MLG partikül içeriği arttıkça azalmıştır.
(Li ve diğ., 2015)	Cu tozu (Bakır nitrat, glisin, GO karışımından ısıtıl reaksiyonla)	RGO-(GO; Hummers')	SPS (580°C, 5 dk, 50 MPa)	Akma mukavemetinde (225 MPa) % 75,8 artış; gerilme mukavemetinde (316 MPa) % 47,7 bir artış
(Varol ve Canakci, 2015)	Atomize Cu tozu (58,5 µm)	- Nanografite (100 nm tane boyutu); - GNS (%96-99 ortalama kalınlık 50-100 nm); - KNT (ortalama çap 9,5 nm)	5 saat öğütme (Gezegen tipli; Retsch PM 200; WC kap, bilya, 300 rpm, kuru ortam) 200 MPa ön şekillendirme, HP (500 MPa, 1 sa, 500°C) - Sinterleme (950°C-2 saat, Ar) - SPS (30 MPa, 973K, 5 dk, Ar)	Grafen oranı arttıkça, sertlik düşmektedir. Bu durum, artan takviye içeriği ile gözenek içeriğindeki artışa ve yoğunluğun azalmasına bağlanabilir.

Çizelge A.2 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Jiang ve diğ., 2016)	Cu tozu (dendritik; 3 µm)	- PG (%4 viskoz çamurda bozulmamış saf grafen) - GO (Hummers')	SPS (30 MPa, 973K, 5 dk, Ar)	PG/Cu kompozit malzeme, sırasıyla 172 ve 228 MPa'lık akma dayanımı ve basma dayanımına sahiptir.
(Chen ve diğ., 2016a)	Cu iyonunun alkollü çözeltisi	GNPs (2,4 nm kalınlıkta)	SPS (700°C, 5 dk, vakum altında, 40 MPa)	Elde edilen en yüksek elastisite modülü ve sertlik değeri, sırasıyla; 147 GPa ve 1,75 GPa.
(Gao ve diğ., 2016)	Cu tozu	GO (Hummers')	- CTAB ile işlem; - Sinterleme (900°C, 1 saat Ar, 25 MPa)	En yüksek sertlik değeri (50 HV); ağı. %0,3 grafen içeriği ile elde edilmiştir. Grafen Cu matrisinde homojen bir şekilde dağılmıştır.
(Chmielewski ve diğ., 2016)	Cu (%99,8; dendritik, 3 µm)	Grafen (1-5 nm tane boyutu)	- Öğütme (Gezegensel; 100 rpm, 4 sa); - SPS (Vakum, 950°C, 10 dk, 50 MPa)	En yüksek sertlik değeri (88,5 HV) v/v %3 grafen içeriği ile elde edilmiştir.

Çizelge A.2 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Yue ve diğ., 2017)	Cu tozları	GO nano tabakaları, (PG'den, Hummer's yöntemi; GNSs)	• Ultrasonikasyon (etanol, 1 saat), • Bilyalı öğütme (400 rpm, Ar; 1,3,5,7 saat), • Vakum-HP- sinterleme (25 MPa, 1 saat, 850°C)	En yüksek sertlik değeri (50 HV) ağı. %0,5 GNSs içeriği ile elde edilmiştir. Uzun süre gerçekleştirilen bilyalı öğütmede, GNS'lerde hatalar mevcuttur.
(Saboori ve diğ., 2018b)	Cu tozu (%99,5; 150-240 µm)	GNPs (%99; 10 nm kalınlık; 25 µm genişlik, 700 m ² /g yüzey alanı)	• Cu ve GNP tozları etanolde ultrasonikasyon (45 dk) yardımıyla karıştırıldı.	En yüksek sertlik değeri (48,6 HV) h/h %8 GNP içeriği ile elde edilmiştir. GNP içeriği arttıkça, tane sınırlarında; nanoplakalar kümeler oluşturma eğilimindedir.
(He ve diğ., 2018)	Cu tozu	GNS (EG - Elektrokimyasal eksfoliye)	• Gezegen tipli öğütme (200 r/dk, 1 sa); • 2,5 MPa ve 5 MPa'da şekillendirme, • Vakumlu tüp fırında sinterleme (800°C'de 1 saat)	En yüksek sertlik değeri (70,2 HV); ağı. %0,2 EG içeriği ile elde edilmiştir.
(Gao ve diğ., 2018)	Cu (CTAB ile modifiye)	GO (Hummers')	• Elektrostatik olarak kendi kendine GO'nun CTAB ile modifiye edilmesi • Sinterleme (Ar, 900°C'de 1 saat, 25 MPa altında)	%0,3 GO içeriği ile sertlik değeri 51 HV olarak bulunmuştur. Grafen, Cu taneciklerinin sınırında homojen bir şekilde dağılmıştır.

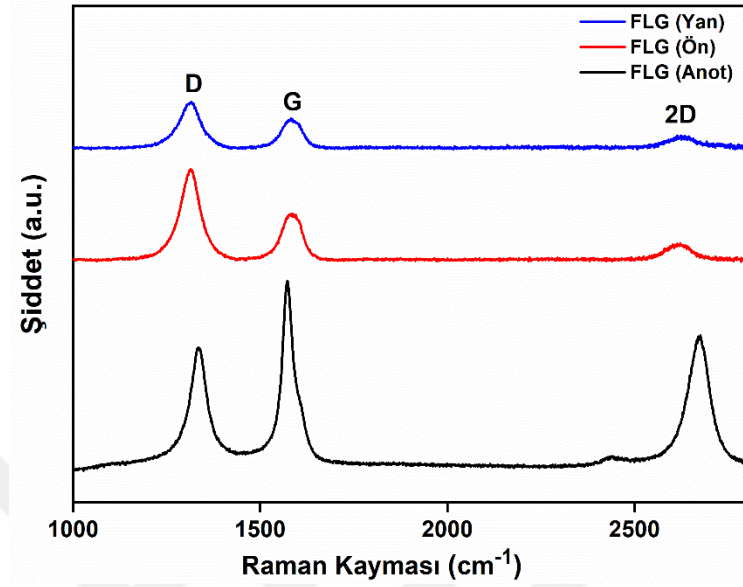
Çizelge A.2 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Asgharzadeh ve Eslami, 2019)	Elektrolitik Cu (%99; <45µm)	GO (Hummers')	- GO süspansiyonu, Cu tozlarıyla 5 dk sonikasyona maruz bırakılıyor. 600 MPa şekillendirme, 850°C, 30 dk ön ısıtma; - Sıcak haddeleme (800°C, 1 sa)	En yüksek sertlik değeri (140 HV) ağırlık %1 RGO içeriği ile elde edilmiştir. Kompozitteki rGO içeriğindeki artış, numunelerin yoğunluğunun azalmasına yol açmaktadır.
(Salvo ve diğ., 2019)	Cu tozu (%99,9 <75µm)	GNS (Grafitten sentez)	- Gezegen tipli öğütücüde öğütme; (0,5-4 sa, 150 rpm; ZrO₂ hazne-bilya) - Vakum-HP (600-700°C, 30 MPa)	700°C de sinterlenen kompozit tane boyutunun artması nedeniyle 600°C de sinterlenen kompozite göre daha düşük sertlik değerleri sergilemiştir.
(Wu ve diğ., 2019)	Cu (%99,5; 500 nm)	GPLs (6 nm kalınlık, 20 µm çap)	- Öğütme (3 sa, 100 rpm) - SPS (600°C, 5 dk, 35 MPa)	En yüksek sertlik değeri (75 HV) hacimce %1 grafen içeriği ile elde edilmiştir.
(Swikker ve diğ., 2020)	Cu tozu (Dendritik, %99,7; <70 µm)	GO (Hummers')-GNS (Grafitin; yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonlarıyla elde edilmiştir.)	- Ultrasonikasyon (Aseton, 4 sa); - PVA ile şiddetli mekanik karıştırma; - Cu/GO karışımı kalsinasyon (550°C, Ar, 2 sa); - Soğuk presleme (1 GPa); - Sinterleme (750;800;850°C, 1 sa,Ar)	En yüksek sertlik değeri (95 HV) ağırlık %1 RGO içeriği ile 800°C sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir.

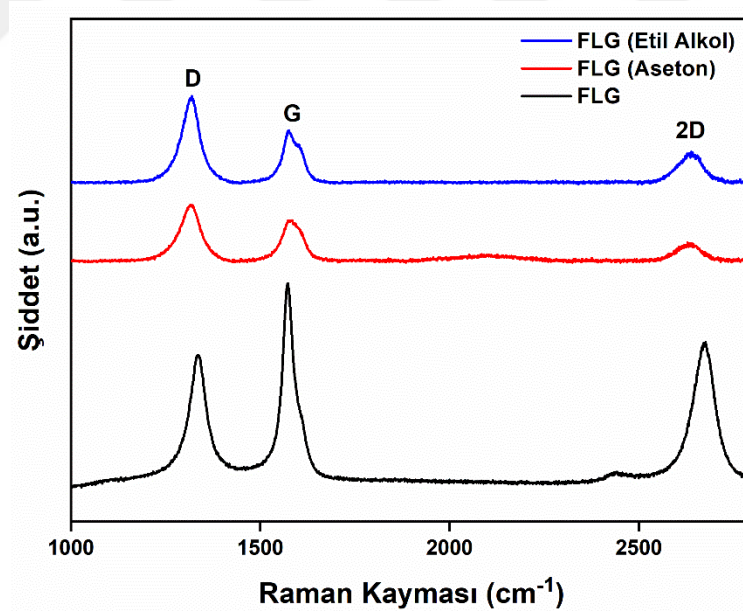
Çizelge A.2 (devam) : Toz metalurjisi ile üretilen grafen takyiveli Cu esaslı kompozitlere yönelik çalışmalar.

Çalışma Grubu	Matris Türü	Takviye İçeriği	Yöntem	Özellik
(Konakov ve diğ., 2020)	Cu tozları (%99,5)	Termal olarak eksfoliye olmuş grafit, (TEFG)	- Gezegen tipli öğütme (150-400 rpm; 5 saat; 5 dk tersinir) 17 ton/cm² soğuk presleme - Isıl işlem (vakum fırını, 1030°C; 1 sa)	En yüksek sertlik değeri (36 HV) ağı. %0,5 TEGF içeriği ile elde edilmiştir. Takviye partikül içeriğinin artmasıyla, partikül sınırındaki takviye partiküllerinin sayısı artar ve dolayısıyla aglomerasyon artmaktadır.
(Chen ve diğ., 2021)	Elektrolitik Cu (50 µm, %99,9; küresel)	GO (> %97; 5-10 µm çap)	- Etanolde karıştırma - Islak ortamda öğütme; (8 sa, 280 r/dk) - Kurutma (80°C, 20 h, vakumda) - Mikrodalga sinterleme (Ar, 900°C, 40 dk.)	Sertlik değerleri 61,8 HV ile 92,8 HV (bölgesel olarak) arasında değişmektedir. Ortalama sertlik 81,1 HV olarak elde edilmiştir.
(Hu ve diğ., 2021)	Cu (%99,5; 30 µm çap)	MLG (5 katmandan az)	- Gezegen tipli öğütme (300 rpm, 2 saat; paslanmaz çelik bilya) - Presleme (500 MPa), - Sinterleme (700-800-850°C, Ar, 1 sa)	En yüksek sertlik değeri (64,4 HV) ağı. %2,5 MLG içeriği ile elde edilmiştir.

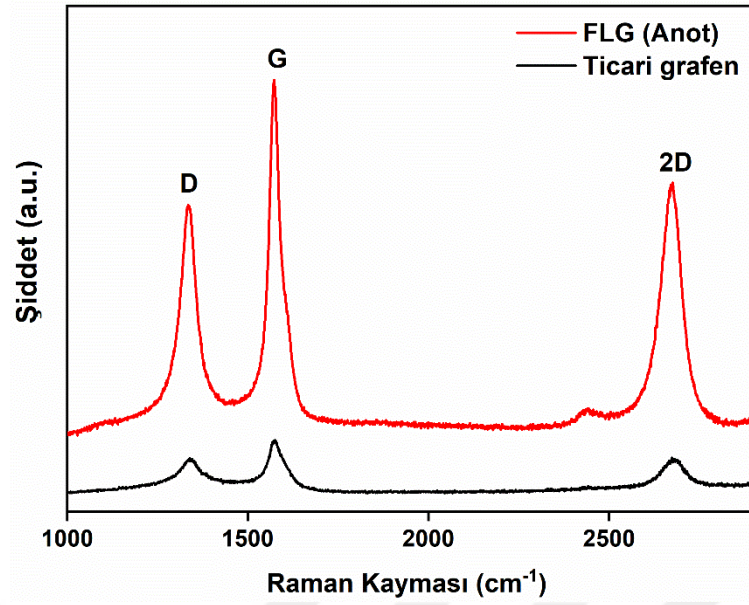
EK B



Şekil B.1 : Reaktörün farklı bölgelerinden toplanan FLG’lerin Raman spektrumları.



Şekil B.2 : Reaktörün anot bölgesinden toplanan FLG, aseton ve etil alkolde sonikasyona maruz kalan FLG’lerin Raman spektrumları.

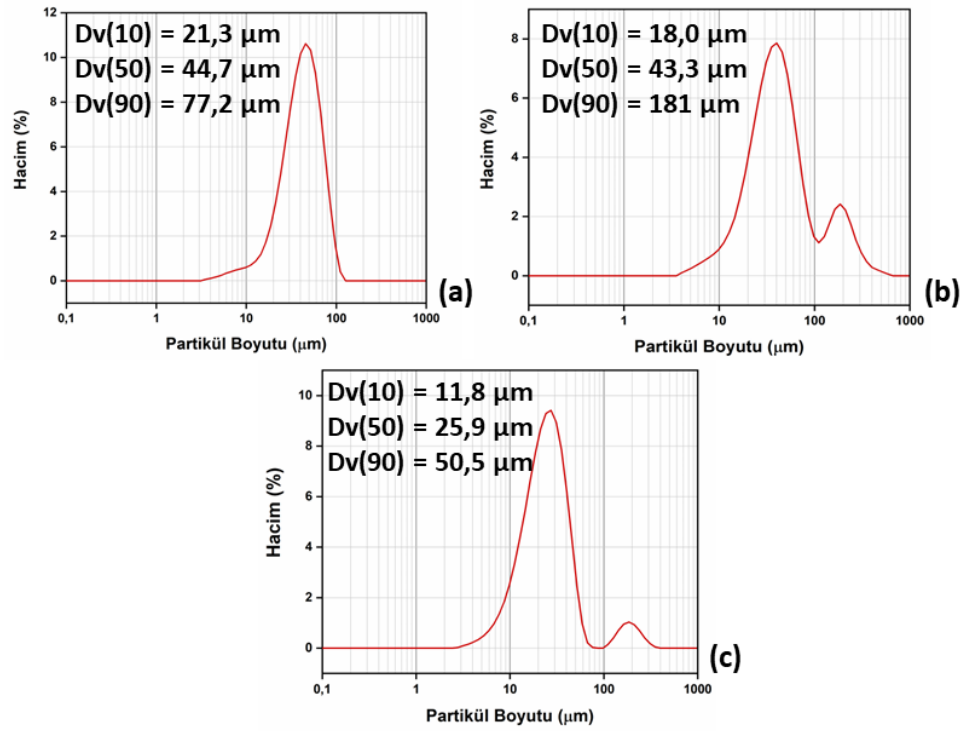


Şekil B.3 : Reaktörden toplanan FLG ve ticari grafenin Raman spektrumları.

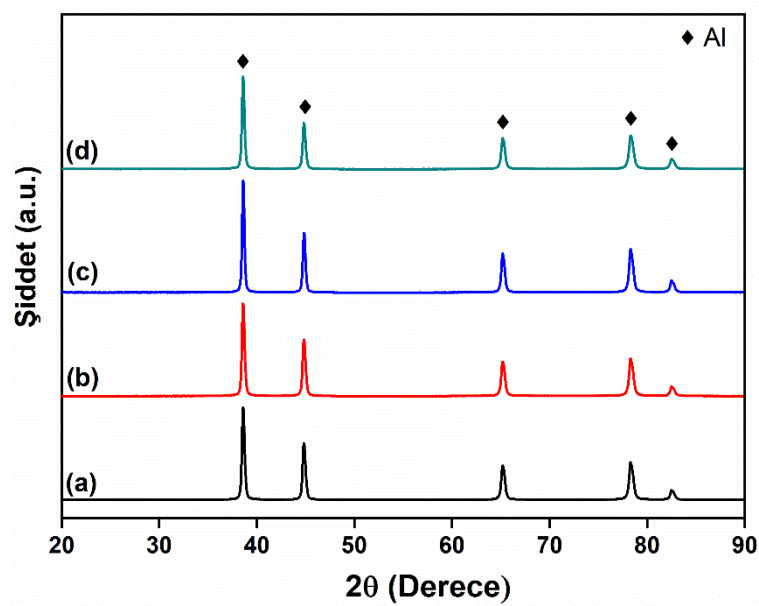
Çizelge B.1 : Raman spektrumlarının hesaplanan sonuçları.

Numune	D bant	G bant	2D bant	I_D/I_G	I_G/I_{2D}
Grafit	1327	1578	2661	0,51	1,35
FLG (Anot)	1336	1575	2673	0,66	1,29
FLG (Yan)	1311	1584	2626	1,50	2,99
FLG (Ön)	1315	1587	2619	1,81	3,23
FLG (Etil Alkol)	1319	1575	2638	1,66	1,72
FLG (Aseton)	1316	1584	2628	1,37	2,28
Ticari grafen (TG)	1339	1575	2674	0,66	1,48

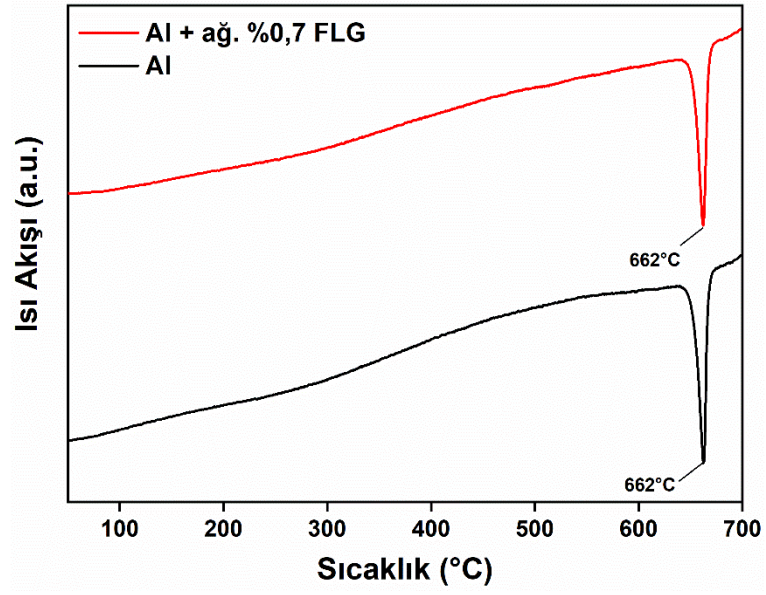
EK C



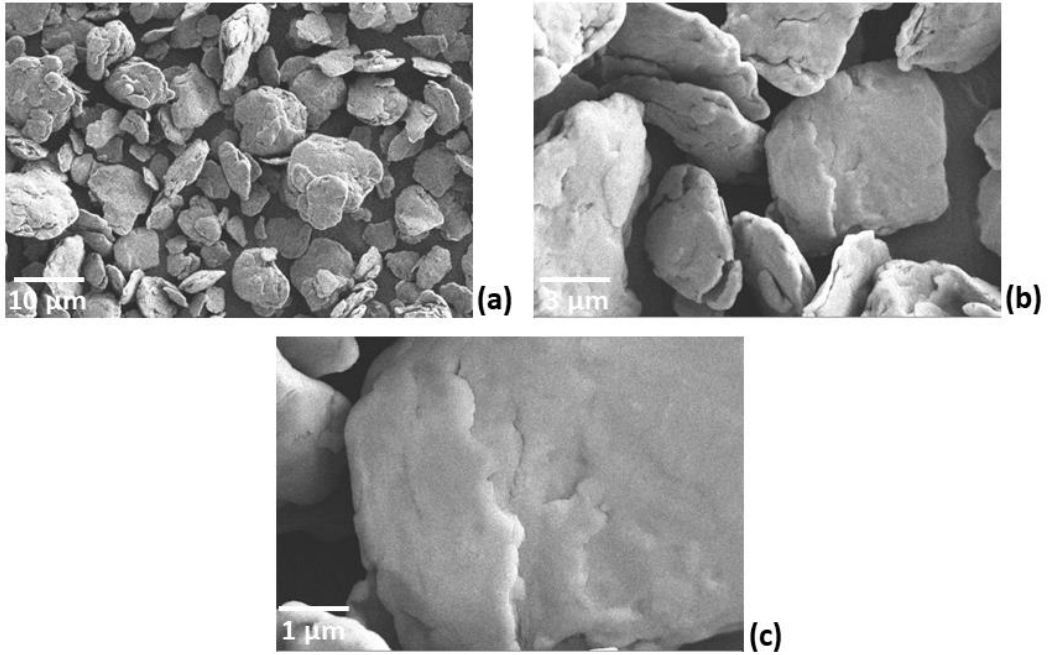
Şekil C.1 : 5 sa MA ile elde edilen (a) Al+ağ. % 0,1 FLG; (b) Al+ ağ. %0,3 FLG ve (c) Al + ağ. %0,7 FLG tozlarının partikül boyut dağılım grafiği.



Şekil C.2 : 5 sa MA ile elde edilen FLG takviyeli Al esaslı tozlarının XRD paternleri: Ağ. (a) %0, (b) %0,1, (c) %0,3 (d) %0,7.

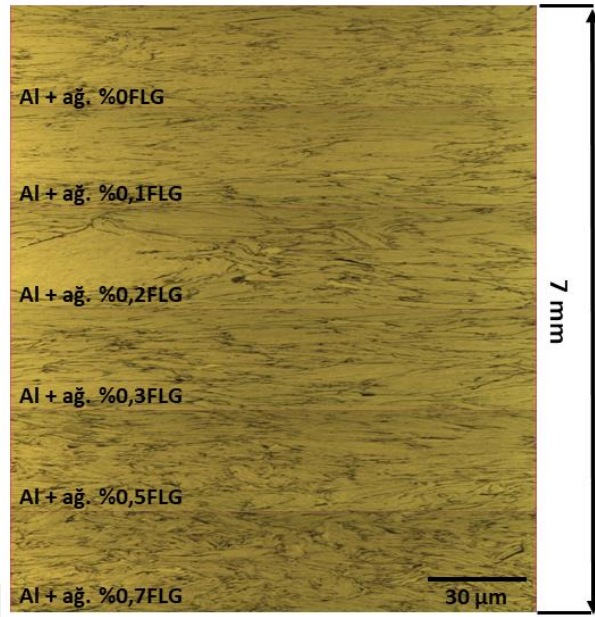


Şekil C.3 : 5 sa MA ile elde edilen takviyesiz ve ağı. %0,7 FLG takviyeli Al esaslı tozların DSC eğrileri.

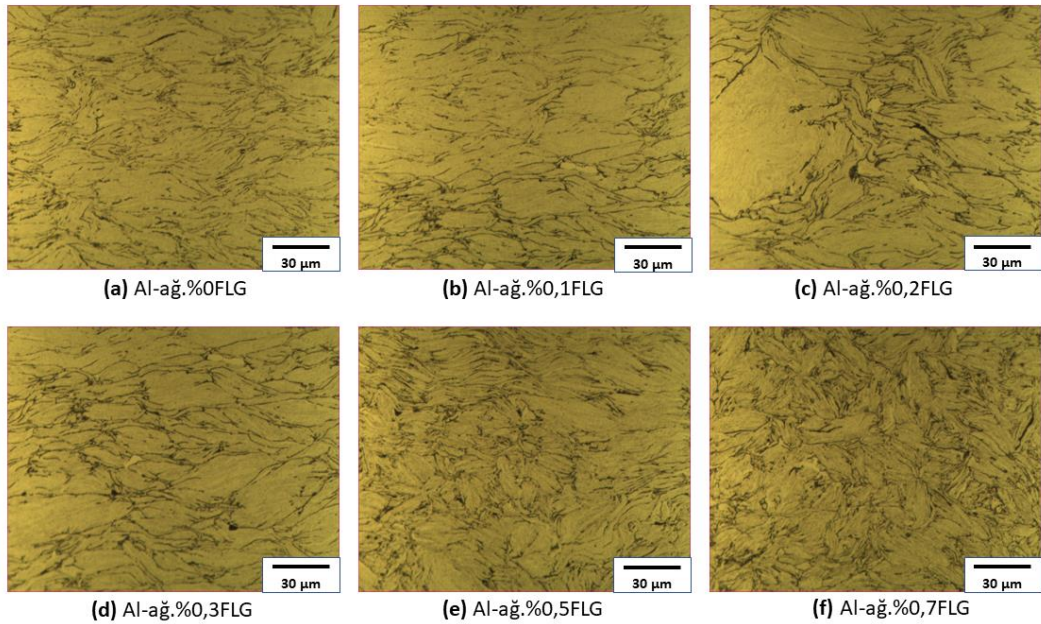


Şekil C.4 : 5 sa MA ile elde edilen ağı. %0,7 FLG takviyeli Al esaslı tozların farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 2000X, (c) 5000X.

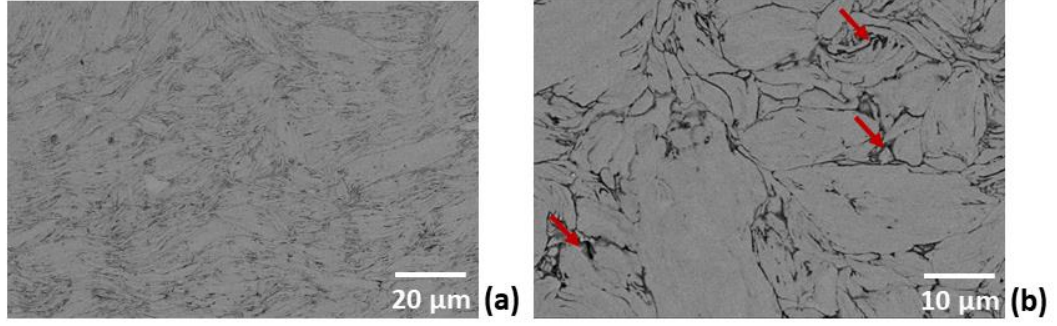
EK D



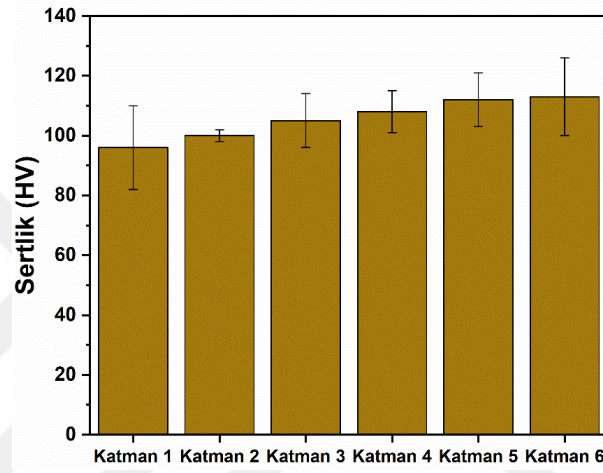
Şekil D.1 : FLG içeriklerinin Al esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.



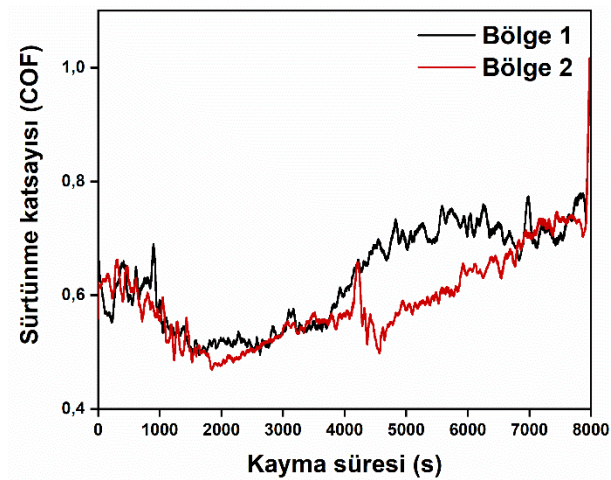
Şekil D.2 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 FLG takviyeli Al esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.



Şekil D.3 : FLG takviyeli Al esaslı FDM'nin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1000X.

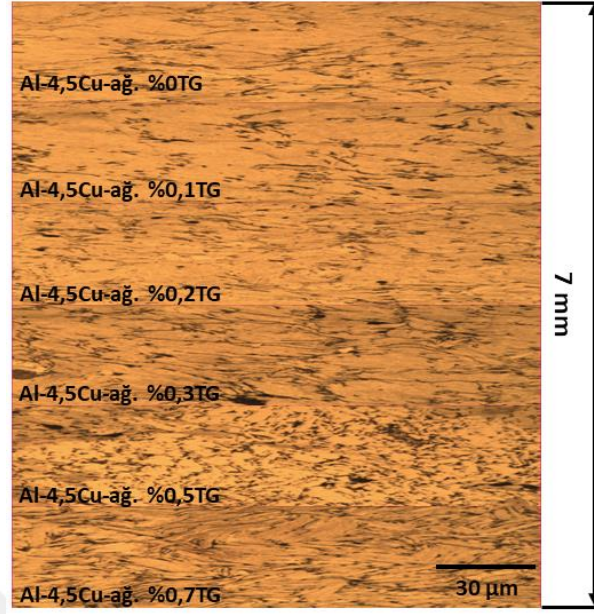


Şekil D.4 : FLG takviyeli Al esaslı FDM'nin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.

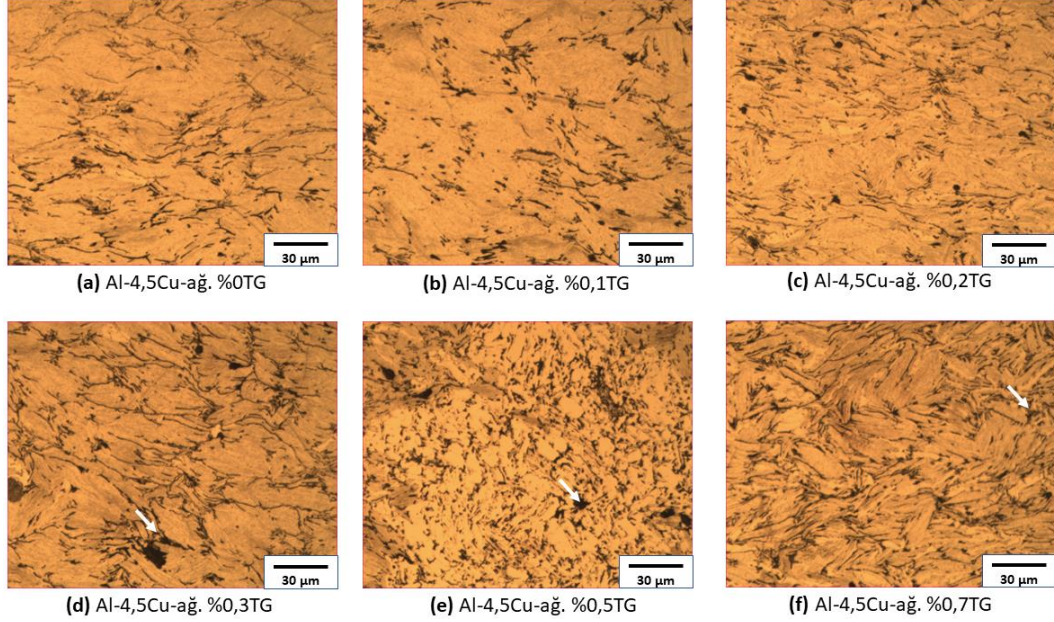


Şekil D.5 : FLG içerik bölgelerinden Al esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

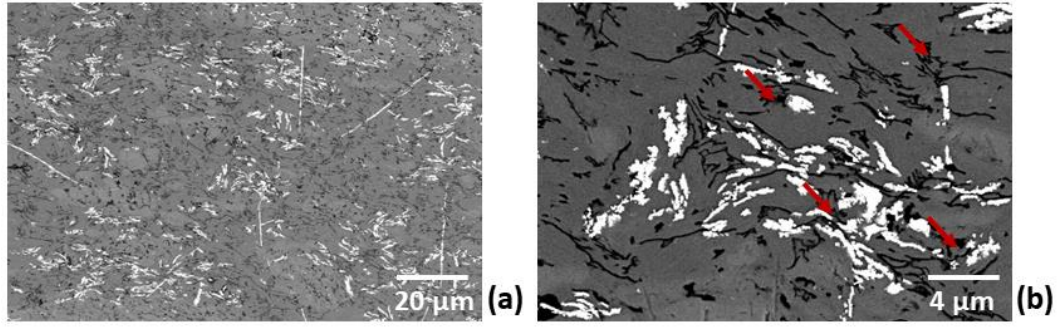
EK E



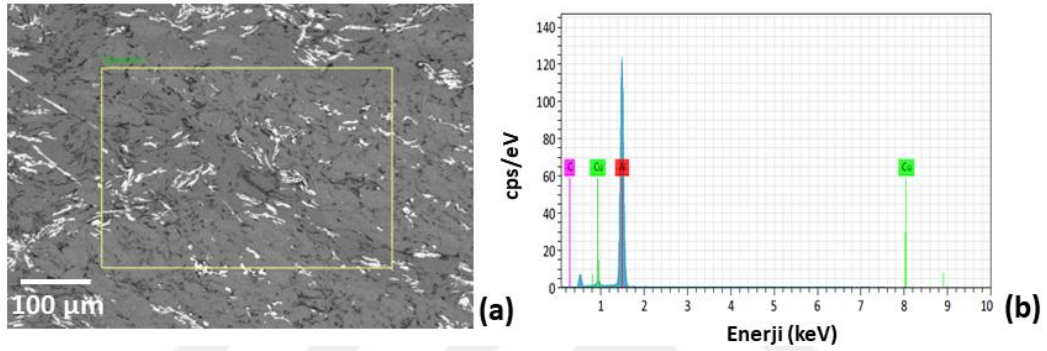
Şekil E.1 : TG içeriklerinin Al-4,5Cu esaslı FDM üzerinde yukarıdan aşağıya doğru derecelendirilmesi.



Şekil E.2 : (a) %0; (b) %0,1; (c) %0,2; (d) %0,3; (e) %0,5 ve (f) %0,7 TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin 50X büyütmede optik görüntüleri.



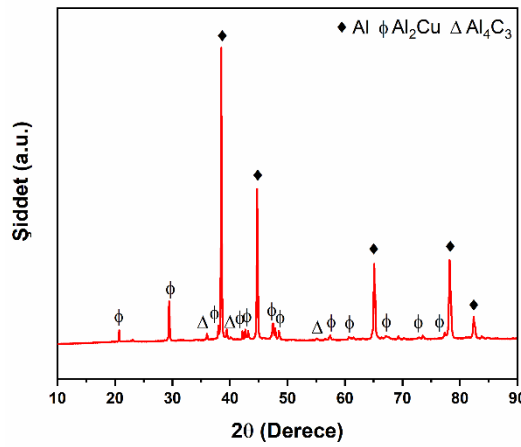
Şekil E.3 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü: (a) 300X ve (b) 1500X.



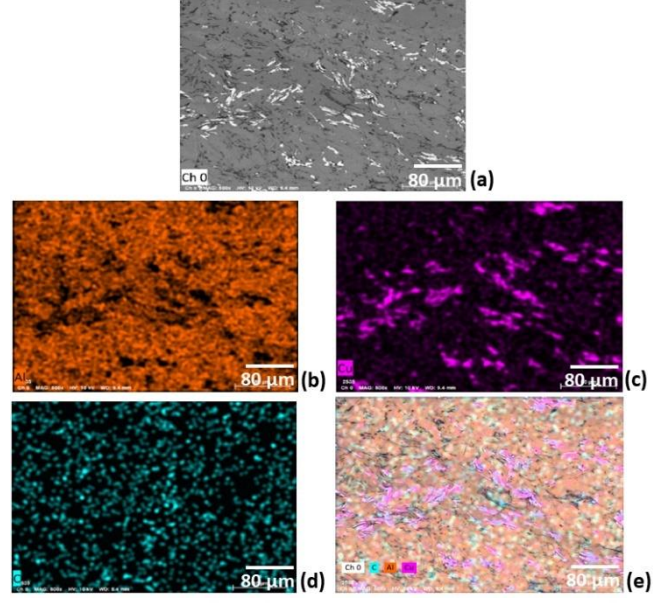
Şekil E.4 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin: (a) SEM görüntüsü ve (b) (a)'da belirtilen alanın EDS analiz spektrumu.

Çizelge E.1 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'e ait Şekil E.4(a)'daki SEM görüntüsünde işaretlenen alanın EDS analiz sonuçları.

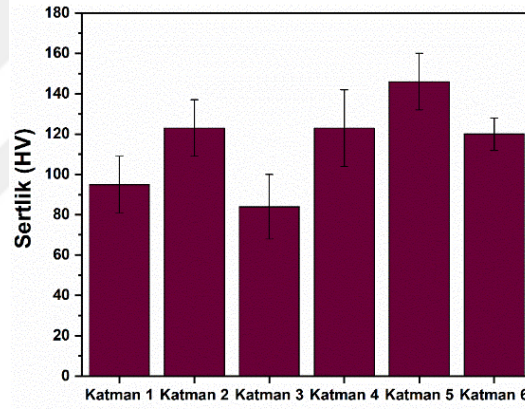
Alan	Al (ağ. %)	Cu (ağ. %)	C (ağ. %)
1	92,21	4,83	2,96



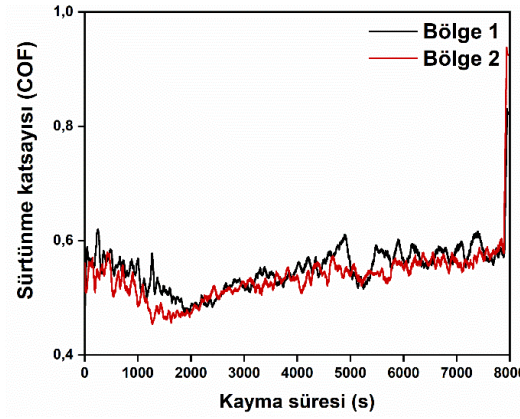
Şekil E.5 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin XRD paterni.



Şekil E.6 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Cu, (d) C elementel haritalama analizleri ve (e) haritalama analizlerinin üst üste görüntüsü.

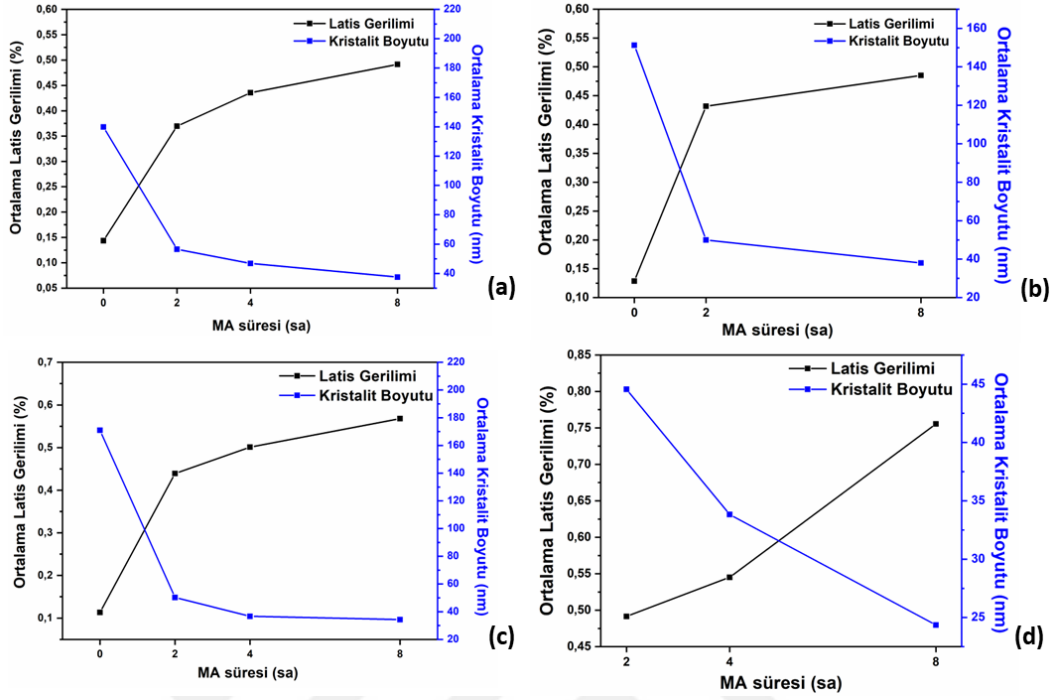


Şekil E.7 : TG takviyeli Al-4,5Cu esaslı FDM'nin her katmanı için sertlik değerlerinin (HV) grafiği.

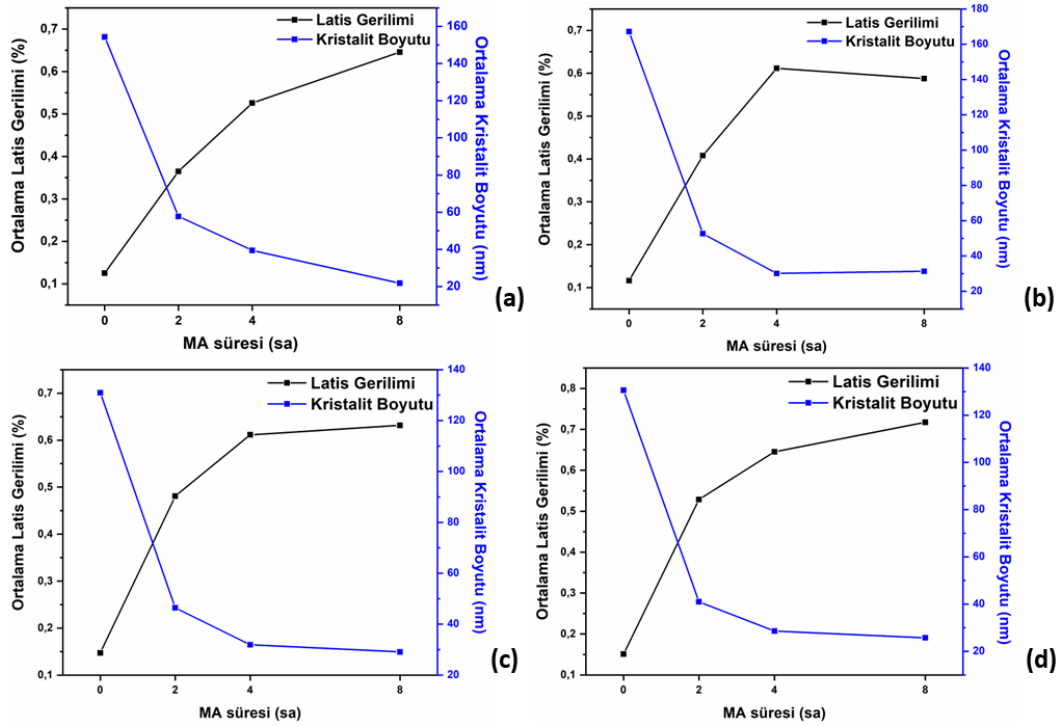


Şekil E.8 : TG içerik bölgelerinden Al-4,5Cu esaslı FDM'nin COF değerlerinin kayma süresine göre değişimi.

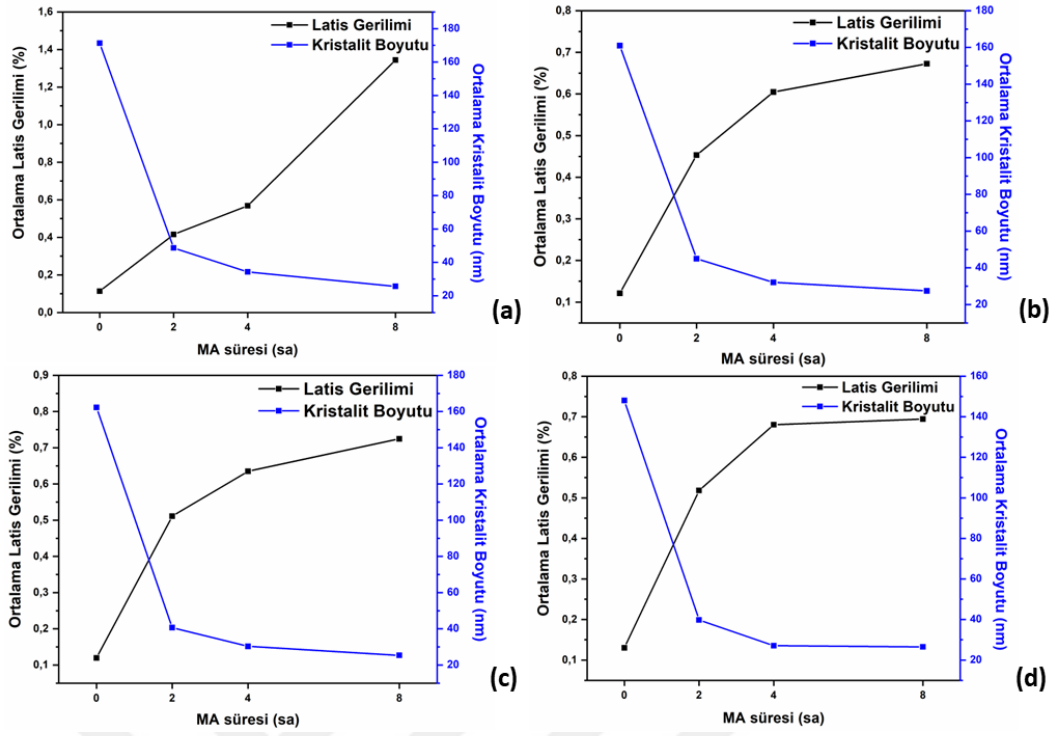
EK F



Şekil F.1 : Al-7,5Zn-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.

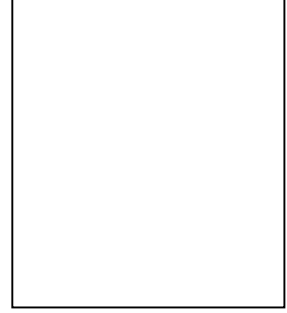


Şekil F.2 : Al-7,5Zn-2,5Mg-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.



Şekil F.3 : Al-7,5Zn-2,5Mg-1,8Cu-xFLG tozlarının MA süresine bağlı olarak ortalama latis gerilimi ve kristalit boyutlarının değişimleri; x (ağ. %) = (a) 0, (b) 0,5, (c) 1 ve (d) 2.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Gökçe BORAND

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 - Araştırma Görevlisi, Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Makaleler:

- **Borand, G., & Uzunsoy, D.** (2022). Fabrication of functionally graded few-layered graphene reinforced Al-4.5 Cu alloy by powder metallurgy. Journal of Alloys and Compounds, 923, 166348.
- **Borand, G., Akçamlı, N., & Uzunsoy, D.** (2021). Structural characterization of graphene nanostructures produced via arc discharge method. Ceramics International, 47(6), 8044-8052.

Bildiriler:

- **Borand, G., & Uzunsoy, D.** (2022). Microstructure and mechanical properties of functionally graded FLG reinforced Al6Zn by powder metallurgy. 6th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE) (Özet bildiri/Sözlü sunum).

- **Borand, G., & Uzunsoy, D. (2022).** Production of functionally graded materials based on FLG reinforced Al-4,5Cu-1,5Mg by powder metallurgy. 21st International Metallurgy and Materials Congress (IMMC) (Özet bildiri/Sözlü sunum).
- Şenyurt, B., **Borand, G.,** Ağaoğulları, D., Akçamlı, N., Uzunsoy, D., (2022). Synthesis and characterization of graphene reinforced Al-7.5 wt.% Zn matrix composites. 21st International Metallurgy and Materials Congress (IMMC) (Özet bildiri/Sözlü sunum).
- Öztürk, Ö., **Borand, G.,** Uzunsoy, D. (2022). Processing and characterisation of functionally graded materials based on few-layered graphene reinforced aluminium. 31st International conference on metallurgy and materials (METAL 2022) (Tam metin bildiri/Sözlü sunum).

Diğer Eserler, Sunumlar ve Patentler:

Makale:

- Şenyurt, B., Küçükelyas, B., Bellek, M., Kavak, S., **Borand, G.,** Uzunsoy, D., Ağaoğlu D. & Akçamlı, N. (2022). Few-layered graphene reinforced Al-10 wt% Si-2 wt% Cu matrix composites. Journal of Materials Research and Technology, 21, 486-501

Bildiriler:

- **Borand, G.,** Öztürk, Ö., Aydın, H. S., Uzunsoy, D. (2022). Production of Al-5Cu alloy composites reinforced with few-layered graphene by powder metallurgy method. 31st International conference on metallurgy and materials (METAL 2022) (Tam metin bildiri/Sözlü sunum).
- **Borand, G.,** Parın, F.N., Duman, Ş., Uzunsoy, D., Yıldırım, K. (2019). Fabrication and Characterization of Cr Doped ZnO Nanofibers. 3rd International Materials Technologies and Metallurgy Conference (MTM) (Tam metin bildiri/Sözlü sunum).
- Parın, F.N., Bulut, B., **Borand, G.,** Duman, Ş., Uzunsoy, D., Yıldırım, K. (2019). Characterization and Production of Mn Doped TiO₂ Nanofibers via Electrospinning Method. 3rd International Materials Technologies And Metallurgy Conference (MTM) (Tam metin bildiri/Sözlü sunum).