

**T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BRONZ MATRİSLİ
SERAMİK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Serkan ISLAK
Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA tarafından hazırlanan "**Fonksiyonel Derecelendirilmiş Bronz Matrisli Seramik Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Serkan ISLAK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ Fırat Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr.Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ Kastamonu Üniversitesi



02/05/2019

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK



TAAHHÜTNAME

Bu belgedeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ve taahhüt ederim.

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BRONZ MATRİSLİ SERAMİK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serkan ISLAK

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) havacılık, denizcilik, otomobil ve elektronik endüstrisi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarındaki kullanımı son yıllarda giderek artış göstermiştir. Bu endüstrilerde kullanılan çoğu geleneksel metal yerini yeni malzemelere bırakmıştır. Bu yeni malzemeler arasında, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin eşsiz özelliklere sahiptir. Üstün özelliklere sahip fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler, farklı parçacıklar bir araya getirilerek üretilir. Bu durumda; parçacıkların miktarı ve dağılımı, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen çok önemli faktörlerdir.

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş bronz matrisli malzemeler, soğuk presleme+sinterleme yöntemi kullanılarak üretilmiş olup, takviye malzemesi olarak bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC) ve molibden karbür (Mo_2C) kullanılmıştır. Bronz+ %10 SiC , Bronz+ %10 B_4C , Bronz + %10 Mo_2C ve Bronz + %10 TiC bileşimine sahip numuneler 500 MPa basınçta $750^\circ C$ sıcaklıkta 90 dakika boyunca sinterlenmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını değerlendirmek için test ve analiz incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla, mikro yapıları izlemek için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve X-ray difraksiyonu (XRD) analizlerinden yararlanılmıştır. Numunelerin sertlik testi, 200 gram yükte Vickers sertlik ölçüm cihazı yardımıyla yapılmıştır. Bronz matrisli seramik takviyeli FDM kompozitleri, toz metalürjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Seramik parçacıkların kompozit tabakaları homojen olarak dağılım göstermiştir. Çok az gözenek oluşumu gözlemlenmiştir. Üretilen FDM'lerin üst ve alt kompozit tabakaları sertken, orta tabakanın sünek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değerine B_4C takviyeli FDM'de ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: FDM, bronz, metal matrisli kompozit, mikroyapı, sertlik

2019, 59 sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc. Thesis

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF FUNCTIONALLY GRADED BRONZE MATRIX CERAMIC REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA
Kastamonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan ISLAK

The use of functional graded materials (FGMs) in various engineering applications, such as aerospace, marine, automobile and electronics industries, has increased in recent years. Most traditional metals used in these industries have been replaced by new materials. Among these new materials, functional graded composites have unique properties. Functionally graded composites with superior properties are produced by combining different particles. In this case; The amount and distribution of particles are very important factors affecting the mechanical properties of functional graded composite materials.

In this thesis, functionally graded bronze matrix material was produced by using cold pressing+sintering method, for which, boron carbide (B_4C), silicon carbide (SiC), titanium carbide (TiC), and molybdenum carbide (Mo_2C) were used as reinforcement materials. The samples with compositions Bronze + 10% SiC, Bronze + 10% B_4C , Bronze + 10% Mo_2C , and Bronze + 10% TiC were sintered at 750 °C for 90 minutes at 500MPa pressure. Investigations were carried out to assess the mechanical properties and microstructures of specimens. For this purpose, optical microscope, scanning electron microscope (SEM-EDS), and X-ray diffraction (XRD) analysis were applied for monitoring microstructures. Sample hardness testing was carried out with the help of Vickers hardness testing device at 200gram load. Powder metallurgy method with bronze matrix ceramic reinforcement FGM composites were successfully produced. Composite layers of ceramic particles are homogeneously distributed. Little pore formation was observed. While the upper and lower composite layers of the FGMs produced were hard, the middle layer was found to be ductile. The highest hardness value was reached in the B_4C reinforced FGM.

Key Words: FGM, bronze, metal matrix composite, microstructure, hardness

2019, 59 pages

Science Code: 91

TEŐEKKÖR

Öncelikle tezim süresince beni yönlendiren, değerli bilgilerini benimle paylaşan ve bana her türlü desteği ve imkanı sağlayan danıőmanım Doç. Dr. Serkan ISLAK'a teőekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca ve bu tezin araştırma ve yazılma süresince bana göstermiő oldukları sonsuz destek ve teşvik için aileme en içten teőekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Bu başarı, ailem olmaksızın mümkün olamazdı. Teşekkür ederim.

Aimen Mohamed ABUSHRAIDA
Kastamonu, Mayıs, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
GRAFİKLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER (FDM)	3
2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özellikleri.....	3
2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin (FDM) Uygulama Alanları	3
2.2.1 Havacılık Endüstrisi.....	4
2.2.2 Otomobil Endüstrisi	4
2.2.3 Biyomedikal Ekipmanlar	4
2.2.4 Savunma Amaçlı Üretim	5
2.2.5 Enerji/Elektrik Üretimi	5
2.2.6 Elektrikli/Elektronik Ekipmanlar.....	5
2.2.7 Denizcilik Endüstrisi.....	6
2.2.8 Opto-elektronik.....	6
2.2.9 Spor Ekipmanları	6
2.2.10 Diğer Uygulama Alanları.....	6
3. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	8
3.1. Filtrasyon/Alçı Kalıba Döküm	8
3.2. Sıvı Metal İnfiltrasyon Yöntemi.....	8
3.3. Santrifüj Döküm Yöntemi	9
3.4. Şerit Döküm Yöntemi	10
3.5. Kaplama Yöntemleri	11

3.6. Toz Metalürjisi Yöntemi	12
3.6.1. Toz Üretimi.....	12
3.6.1.1. <i>Mekanik Yöntemlerle Üretim</i>	13
3.6.1.2. <i>Atomizasyon Teknikleri</i>	13
3.6.2. Toz Karıştırma ve Harmanlama	14
3.6.3. Sıkıştırma.....	15
3.6.4. Sinterleme	16
4. BRONZ ALAŞIMLAR.....	17
5. KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN TAKVİYELER	19
5.1. Silisyum Karbür (SiC).....	19
5.2. Bor Karbür (B ₄ C)	20
5.3. Molibden Karbür (Mo ₂ C).....	21
5.4. Titanyum Karbür (TiC)	22
6. LİTERATÜR TARAMASI.....	23
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
7.1. Kullanılan Malzemeler ve Kompozit Üretimi.....	28
7.2. Uygulanan Testler	32
7.2.1. Sertlik Testi.....	32
7.2.2. Metalografik Çalışmalar	33
7.2.3. Mikroyapı İncelemeleri (Optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD)	34
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
8.1. Mikroyapı Sonuçları.....	36
8.2. XRD Sonuçları	49
8.3. Sertlik Sonuçları	51
9. GENEL SONUÇLAR	53
10. ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	59

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ray Difraksiyonu
EDS	Enerji Dağılımlı Spektrometre
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

	Sayfa
Fotoğraf 7.1. Hassas Terazî.....	29
Fotoğraf 7.2. Turbula	30
Fotoğraf 7.3. Presleme makinesi ve kalıp	30
Fotoğraf 7.4. Tüp fırın.....	31
Fotoğraf 7.5. Vickers sertlik ölçüm cihazı	33
Fotoğraf 7.6. Taşlama ve parlatma makinesi	34
Fotoğraf 7.7. Görüntüleme ve faz analizi tespitinde kullanılan cihazlar: (a) Optik mikroskop, (b) SEM ve (c) XRD.....	35
Fotoğraf 8.1. Tozların SEM görüntüleri:(a) CuSn, (b) B ₄ C, (c) Mo ₂ C, (d) TiC ve (e) SiC	36
Fotoğraf 8.2. B ₄ C takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X, ve (D) 5000X.....	37
Fotoğraf 8.3. Mo ₂ C takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X.....	38
Fotoğraf 8.4. TiC takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X.....	38
Fotoğraf 8.5. SiC takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X.....	39
Fotoğraf 8.6. B ₄ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri	40
Fotoğraf 8.7. Mo ₂ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri	40
Fotoğraf 8.8. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri	41
Fotoğraf 8.9. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri	41
Fotoğraf 8.10. B ₄ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi	42
Fotoğraf 8.11. Mo ₂ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi ..	44
Fotoğraf 8.12. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi	45
Fotoğraf 8.13. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Filtrasyon/Alçı Kalıba Döküm proses.....	8
Şekil 3.2. Sıvı Metal İnfiltrasyon Yöntemi.....	9
Şekil 3.3. Santrifüj Döküm Yöntemi.....	10
Şekil 3.4. Şerit Döküm Yöntemi.....	11
Şekil 3.5. Kaplama Yöntemleri.....	12
Şekil 3.6. Gaz Atomizasyon Teknikleri	14
Şekil 3.7. Toz Karıştırma ve Karıştırma makinesi.....	15
Şekil 3.8. Sıkıştırma proses.....	16
Şekil 3.9. Sinterleme proses	16
Şekil 7.1. Numunelerin şekli ve boyutları.....	31

GRAFİKLER DİZİNİ

	Sayfa
Grafik 7.1. Sinterleme grafiđi	32
Grafik 8.1. B ₄ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi.....	43
Grafik 8.2. B ₄ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS analizi.....	43
Grafik 8.3. Mo ₂ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi.....	44
Grafik 8.4. Mo ₂ C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS analizi	45
Grafik 8.5. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi.....	46
Grafik 8.6. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS analizi.....	47
Grafik 8.7. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi.....	48
Grafik 8.8. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS analizi.....	49
Grafik 8.9. FDM kompozitin XRD analizi	50
Grafik 8.10. Cu-Sn ikili faz diyagramı.....	50
Grafik 8.11. Sertlik Testi Sonuđları	52

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Silisyum Karbürün (SiC) Genel Özellikleri.....	20
Tablo 5.2. Bor Karbürün (B ₄ C) Genel Özellikleri	21
Tablo 5.3. Molibden Karbürün (Mo ₂ C) Genel Özellikleri.....	21
Tablo 5.4. Titanyum Karbürün (TiC) Genel Özellikleri.....	22
Tablo 7.1. Numunelerin toz ağırlıkları.....	29
Tablo 8.1. FDM'nin Sertlik Değerleri.....	51

1. GİRİŞ

Saf metaller, rekabetçi özelliklere sahip olmamaları nedeniyle mühendislik uygulamalarında çok az kullanım alanına sahiptir. Örneğin yüksek sertliğin arzulandığı bir uygulama için, doğal yolla oluşmuş bir madde bu gereksinimi karşılayamaz. Bu sorunu çözmek için metal ile metal veya metal olmayan malzemelerin ergiyik fazda bileşimi kullanılabilir. Bu yeni oluşan malzemeye malzeme biliminde alaşım adı verilmektedir. Bu alaşım, ana metaller/maddeler ile kıyaslandığında özelliklerinin farklı olması sebebiyle hazırlanır. İnsanlık tarihinde kalay ve bakırın birleştirilmesi yoluyla hazırlanan ilk alaşım bronzdur.

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle üretilen gelişmiş yeni nesil malzemelerdir. Bu malzemeler, katı halde belirli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Kompozit malzeme özelliklerinin eşsiz karışımı sebebiyle kompozit malzemeler üretim süreçleri açısından kritiktir ve birçok kompozit malzeme ana malzemeleriyle kıyaslandığında farklı davranış sergilemektedir ve şaşırtıcı şekilde çoğu kompozit malzeme hafiftir (Hon ve Shiraishi, 2001).

Günümüzdeki gelişmiş mühendislik uygulamaları için daha mukavemetli, daha hafif ve daha ucuz malzemeler gerekmektedir (Tjong, 2014). Geleneksel malzemelerin yüksek performans talebini karşılayamaması sebebiyle yeni nesil malzemelerin üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), çeşitli mühendislik uygulamaları için gerekli uyarlanabilir özellik kombinasyonları sayesinde üreticilerin dikkatini çekmiştir. Bu özellikler arasında yeterli korozyon direnci, yüksek ısı direnci, yüksek özgül rijitlik, düşük ısı genleşme katsayısı, üstün aşınma direnci, yüksek özgül mukavemet ve iyi sönümleme kapasitesi yer almaktadır (Alaneme ve Bodunrin, 2011; Kok, 2005).

Çoğu endüstri, bakır ve bakır alaşımlarını büyük ölçekli üretimde kullanmaktadır. Bu endüstriler arasında makine, otomobil ve denizcilik ekipmanları üretim endüstrileri yer almaktadır. Bu kullanımın sebebi, bakır ve alaşımlarının eşsiz ısı iletkenliği, sünekliği, korozyon direnci ve elektrik iletkenliğidir (Cui vd., 2013).

Son yıllarda, bronz matrisli kompozitler çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanılabilir olmaları sebebiyle büyük önem kazanmıştır. Bu kompozitlerin geliştirilmesi ile yüksek iletkenliğe ancak düşük mekanik mukavemete sahip olan bronz alaşımının yerine hem elektriksel iletkenlik hem de mekanik olarak çok daha iyi özelliklere sahip yeni kompozitler elde edilmiştir. Karbür, oksit ve borür içeren parçacıklar, bronz matris içinde çözünmez. Dahası bu parçacıklar, yüksek sıcaklıklara dayanan yüksek ısı kararlılığına sahiptir ve bu özellik, onları takviye işlemi için iyi bir seçenek haline getirmektedir. Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler yüksek sıcaklık toleransı, gelişmiş çekme özellikleri, yüksek rijitlik (stiffness) ve daha iyi aşınma direnci gibi mekanik özelliklerde istenen iyileştirmeleri mümkün kılmaktadır (Uysal, Karslioglu, Akbulut ve Alp, 2012).

Bu tez çalışmasında kısmen bakırın özelliklerine sahip bronz alaşımı matris olarak kullanılmış olup, takviye olarak ise bor karbür, silisyum karbür, titanyum karbür ve molibden karbür seramik partikülleri tercih edilmiştir. Bu ham maddeler kullanılarak toz metalurjisi yöntemi ile bronz matrisli seramik takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Literatür incelendiğinde bronz matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER (FDM)

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), boyutlarındaki varyasyonlarla farklılık gösteren çeşitli özelliklere sahip yeni ve gelişmiş malzemeler kategorisidir. FDM'ler farklı malzemeler olup, bazıları ana malzemeleriyle kıyaslandığında oldukça farklı olmaları sebebiyle benzersizdir. FDM'ler çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır; dolayısıyla, ana malzeme maliyeti, malzeme üretiminde kullanılacak işlem türleri ve onların üretimi sebebiyle bu malzemelerden bazılarının imalatı maliyetlidir (Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012).

2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özellikleri

FDM'lerin bileşenleri, bazı endüstriyel proseslerin özel ihtiyaçlarını karşılayan belirli faydalı karakteristik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, geleneksel kompozit malzemelerin eksikliklerini etkili bir şekilde ortadan kaldırmaktadır. FDM'ler geleneksel ve kompozit malzemelere kıyasla pek çok avantaja sahip olup, bu avantajlar aşağıda belirtilmiştir (Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014):

- FDM'ler uyumsuz malzemelerden üretilmiş iki bileşeni tamamen birleştirme kapasitesine sahip bir ara yüzey tabakasına sahiptir; böylece, bağ dayanımını önemli ölçüde artırır.
- FDM kaplaması ve ara yüzey, artık ve termal gerilimi azaltmada kullanılabilir.
- FDM kaplaması, malzemeleri birleştirmede ve bitiş noktası ile ara yüzey gerilimini ortadan kaldırmada kullanılabilir.
- FDM kaplaması, bağlantı mukavemetini artırmanın yanı sıra çatlak yayılma kuvvetini azaltır.

2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin (FDM) Uygulama Alanları

FDM'ler çoğu girişimde büyük önem kazanmıştır. FDM'ler gelişmiş post modern endüstrilerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. FDM'ler diğer bir takım endüstrilerde ve gelecekteki uygulamalarda yüksek potansiyele sahiptir. Çoğu önemli mevcut ve gelecekteki FDM uygulamalarından mevcut bölümde bahsedilmiştir. Günümüzde, bu malzemeler otomobil, havacılık, biyomedikal, savunma, enerji üretimi,

elektrik/elektronik alet üretimi, denizcilik, termoelektronik ve optoelektronik endüstriler gibi gelişmiş endüstrilerde kullanılmaktadır.

2.2.1 Havacılık Endüstrisi

FDM'ler başlangıçta bazı uzay aracı gövdelerinin yapımında kullanılmaktaydı. Havacılık endüstrisinde başarılı bir şekilde denenmeleri, test edilmeleri ve kullanılmaları sebebiyle FDM'lerin kullanımı son dönemlerde artış gösterdi. Havacılık yapıları ve ekipmanlarının çoğunluğu, günümüzde FDM'ler kullanılarak üretilmektedir. FDM'ler roket motoru, ısı değişim paneli, uzay aracı makas yapılarının bileşenleri ile kamera, reflektör, güneş paneli, türbin kanadı kaplamaları, türbin çarkları, mekiklerin misil uçları ve füzeler gibi ekipmanların üretimi için iyi bir seçenektir. FDM'ler eşsiz ses ve ısı yalıtımı özelliği sunmaktadır; bu nedenle, yapı duvarlarında kullanılmaktadır. Yüksek verimli otomobillerin birçok önemli parçası, aşağıdaki alt bölümde açıklanan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler yardımıyla yapılmaktadır.

2.2.2 Otomobil Endüstrisi

Otomobil endüstrisi, değişik özelliklere sahip çeşitli malzeme gerektiren endüstrilerden biridir; yüksek maliyet FDM'lerin kullanımını sınırlayan tek engel olduğundan FDM'lerin kullanımı hala sınırlıdır; ancak bazı öncü araba üreticileri, FDM'leri yüksek değerli otomobillerin fonksiyonel açısından önemli bileşenlerini üretmede kullanmaktadır. FDM'ler günümüzde buji, dizel motor pistonlarının motor silindir gömlekleri, yaprak yay, tahrik mili, yanma odası, volan, amortisör, araç gövdesi bileşenleri, yarış arabası frenleri ve cam panellerin üretiminde kullanılmaktadır. FDM'ler, mika ya da dioksit gibi FDM parçacık kaplamalarının yardımıyla otomobil gövdesi tabakalarını iyileştirmede de kullanılmaktadır.

2.2.3 Biyomedikal Ekipmanlar

Doğa, insan vücudunda kendi FDM'lerini kullanmıştır. Aslına bakıldığında; dişler ve kemikler günümüzde zarar görmesi ya da yaşlanması halinde değiştirilebilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerdir. Biyoyumlu mühendislik malzemeleri, doğal fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler yardımıyla doğal vücut parçalarını değiştirmede kullanılabilir. Şimdiye kadar, çoğu fonksiyonel derecelendirilmiş

malzeme başarılı bir şekilde denenip, implantlar şeklinde insan vücuduna yerleştirilmiştir. Porozite gradyanlı FDM'lerin özellikleri doğal kemik özellikleriyle eşleştiğinden kemik ve diş protezlerinde genellikle porozite gradyanlı FDM'ler kullanılmaktadır. Porozite gradyanlı FDM'ler, uygun olarak derecelendirilmiş porozitenin gerilim korumasını en aza azaltmaya yardımcı olması sebebiyle iskelet protez implantlarının üretiminde kullanılmaktadır (Thieme vd., 2001). Titanyum kullanılarak üretilen bazı gradyanlı gözenekli diş implantları, osseointegrasyon implant özelliklerini geliştirmektedir (Suk, Choi, Kim, Do Kim ve Kwon, 2003). Ayrıca hidroksiapatit (HA), yeni dokuların büyümesini sağlayan çift modlu insan kemik yapısına çok benzer olup, aynı zamanda hastalara hareket için değerli mekanik özellikler sağlamaktadır (Tampieri, Celotti, Sprio, Delcogliano ve Franzese, 2001; Rodriguez-Lorenzo ve Ferreira, 2004).

2.2.4 Savunma Amaçlı Üretim

FDM'ler, savunma ekipmanlarında kullanımı için çok faydalı olan ve bir yüzeyde çatlağın yayılmasını sınırlayan dikkate değer bir penetrasyon direncine sahiptir. Bazı FDM'ler zırh levhası, kesme plakası ve kurşun geçirmez yelek/kalkan gibi savunma ekipmanlarının üretiminde kullanılmaktadır. FDM'ler ayrıca araç gövdelerini kurşun geçirmez yapmak için araç gövdelerine yerleştirilmektedir.

2.2.5 Enerji/Elektrik Üretimi

Elektrik üretimi ve enerji koruma endüstrileri, daima yararlı yeni malzeme arayışında olan sürekli değişen endüstrilerdir. Bu endüstriler, ekipmanlarının verimini arttırmada FDM'lerden faydalanmaktadır. FDM'ler dahili nükleer reaktör duvarları, güneş panelleri, enerji korumalı termoelektrik dönüştürücüler, güneş hücreleri, basınçlı kaplar/borular ve katı oksit yakıt üreten derecelendirilmiş elektrotlar gibi hassas ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca bazı piezoelektrik FDM'ler ultrasonik güç çeviriciler, yakıt hücreleri, ısı engeli kaplamaları ve türbin kanadı kaplamalarının yapımında kullanılmaktadır.

2.2.6 Elektrikli/Elektronik Ekipmanlar

FDM'ler elektronik ve elektrikli cihazların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. FDM'ler esas olarak alan ve elektrot alan gerilmelerini azaltmak (Shumiya, Kato ve

Okubo, 2004) ve diyot, sensör ve yalıtkanlar gibi yarı iletkenleri üretmek için uygulanmaktadır. Bu ısı kalkanı elemanları mikro-elektronik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olup, genellikle karbon nanotüp FDM'ler ile birlikte üretilmektedir (Kato vd., 2006).

2.2.7 Denizcilik Endüstrisi

FDM'ler denizcilik ekipmanlarında kapsamlı biçimde kullanılmaktadır. FDM'ler gemilerin ve denizaltıların farklı bileşenleri ile gövdelerinin imalatında kullanılmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılarak üretilen bileşenler arasında dalış tankları, pervane milleri, boru sistemleri, sonar kubbeleri ve silindirik mukavim tekneler yer almaktadır.

2.2.8 Opto-elektronik

Bu malzemeler ayrıca farklı optoelektronik bileşenler ile cihazların imalatında kullanılmaktadır. Bu endüstride temel olarak optik fiberler, lazerler, lensler, güneş pilleri, yüksek verimli foto dedektörler, ayarlanabilir fotodedektörler, manyetik depolama cihazları ve farklı kırılma endekslerine sahip yarı iletkenler kullanılmaktadır.

2.2.9 Spor Ekipmanları

Bazı FDM'ler dayanıklı kayaklar, golf sopaları ve tenis raketleri başta olmak üzere spor aletlerinin imalatında kullanılmaktadır. Spor aletleri, seçili FDM'ler kullanılarak üretilmektedir.

2.2.10 Diğer Uygulama Alanları

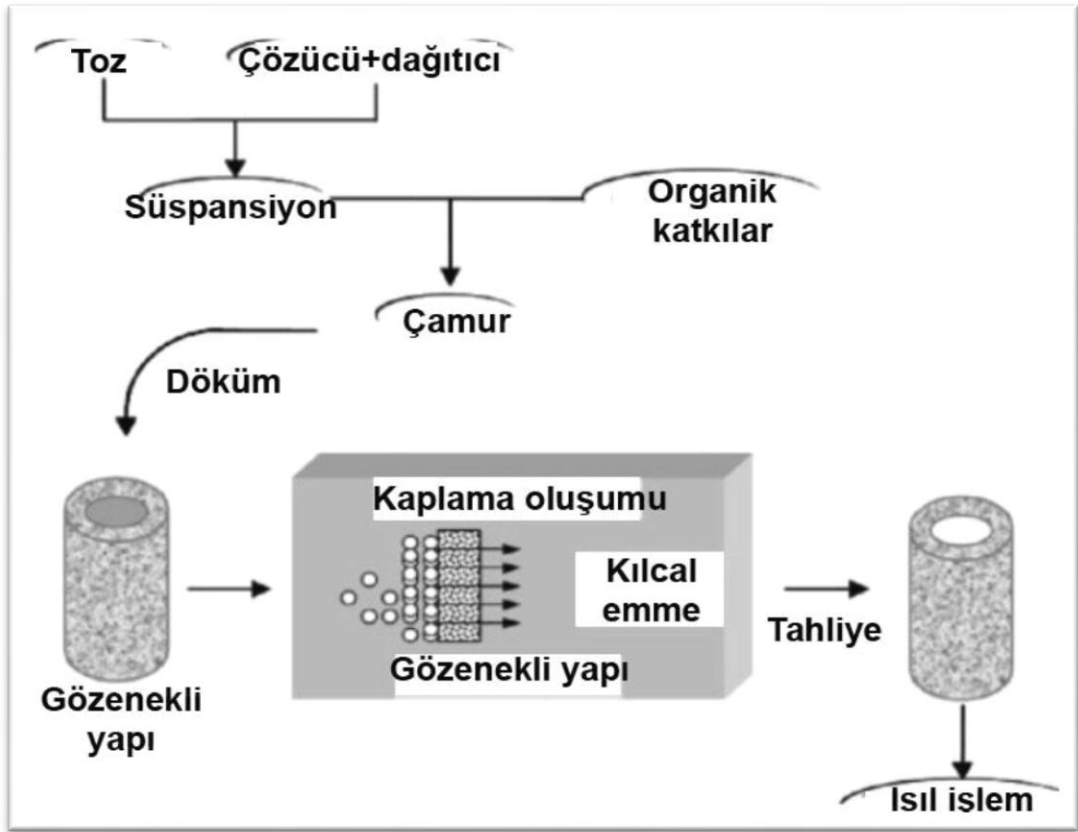
FDM kullanımı yaygındır. FDM'ler kesme aletlerinin, yüksek ısı dayanım gerektiren aletlerin, boyaların, yangın söndürme ekipmanlarının, yangına dayanıklı kapıların, paslanmaz çelik tıraş bıçaklarının, koruyucu başlıkların ve gözlük çerçevelerinin imalatında kullanılmaktadır (Miyamoto, Kaysser, Rabin, Kawasaki ve Ford, 2013). Ayrıca basınçlı kapların, MR tarayıcı kriyojenik tüplerin, laptop gövdelerinin, yakıt tanklarının, X-ray masalarının ve müzik enstrümanlarının imalatında da kullanılmaktadır. FDM'ler Miyamoto'nun kapsamlı olarak belirttiği Japon ürünlerinde büyük oranda kullanılmaktadır (Miyamoto, 1996). FDM uygulamasının gelecekte

artması muhtemel olup, üretim maliyetlerinin azalması halinde FDM uygulaması büyük oranda artacaktır.

3. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Filtrasyon/Alçı Kalıba Döküm

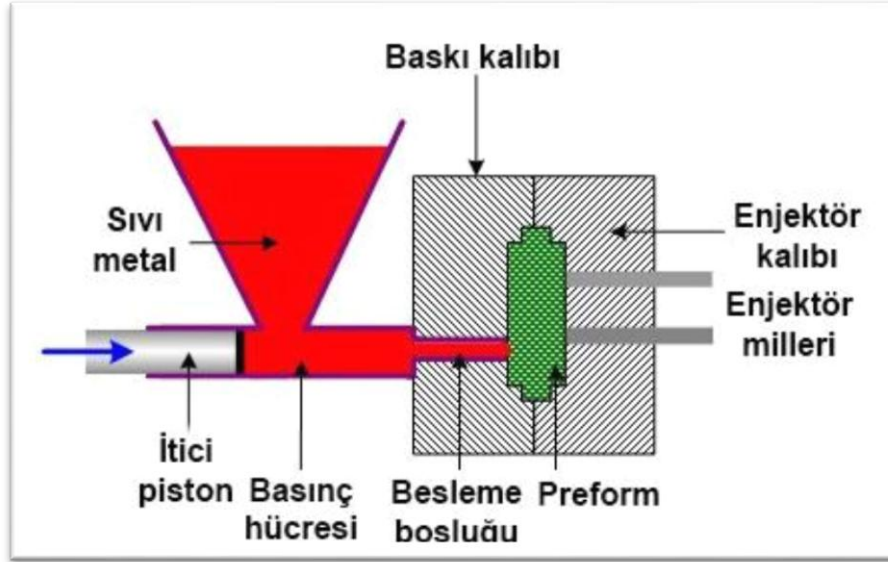
Gözenekli bir yapı farklı özelliklere sahip bir dizi çamura batırıldığında, sıvı kılcal kuvvetler yardımıyla gözeneklere girer. Bu kuvvetler, katmanları kademeli eğimle yüzeyde bırakır (Moore, 1993). Bu ilkeler, sıralı alçı kalıba döküm için de uygulanır. Birkaç katmanın uygulama ihtiyaçlarını karşılaması halinde, filtrasyon ve alçı kalıba döküm yöntemleri büyük ölçekli üretim potansiyeline sahiptir (Kieback, Neubrand ve Riedel, 2003).



Şekil 3.1. Filtrasyon/Alçı Kalıba Döküm proses

3.2. Sıvı Metal İnfiltasyon Yöntemi

İnfiltasyon yöntemi, çeşitli erime noktalarına sahip bu FDM'ler için uygundur. Bu proses için ilk olarak uygun porozite gradyanına sahip yarı işlenmiş bir kalıp geliştirilir. Daha sonra daha düşük erime noktasına sahip erimiş malzemeyle süzülür. Yarı geliştirilmiş kalıp yalnızca açık gözeneklere sahiptir ve ergiyik içinde çözünmez. Belirtilen infiltasyon işlemi seramik, metal ve cam FDM'lere uygundur ancak genellikle metaller ve seramikler ($\theta > 90^\circ$ ıslatma açısında) ıslak değildir ve önceden geliştirilmiş kalıplar/ön kalıplar eş zamanlı olarak süzülmez. Daha büyük gözeneklerin süzülmesi için infiltasyon prosesi boyunca basınç uygulanır (Kieback, Neubrand ve Riedel, 2003).

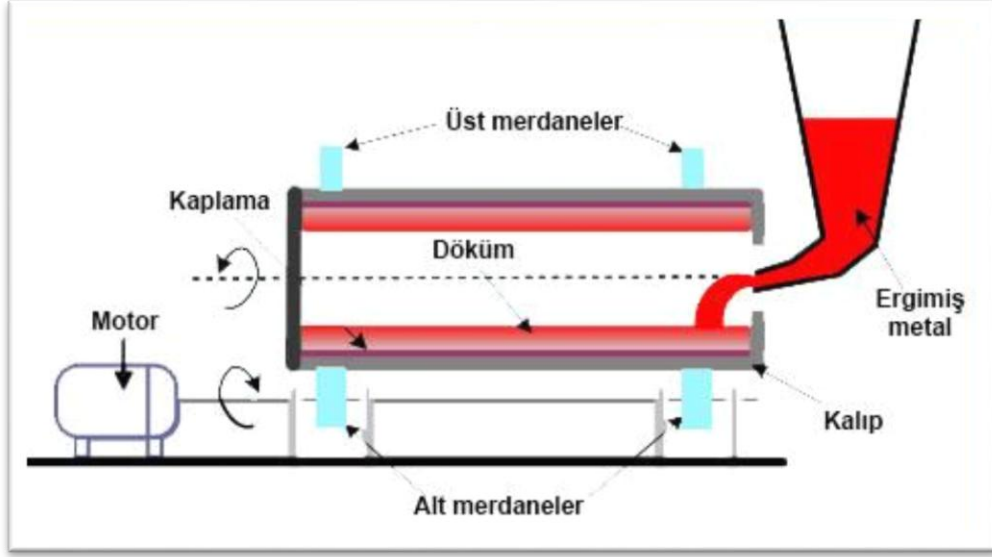


Şekil 3.2. Sıvı Metal İnfiltasyon Yöntemi

3.3. Santrifüj Döküm Yöntemi

Bu proseste kalıbı döndürerek FDM üretmek için yerçekimi kuvveti ve etkilerinden yararlanılmaktadır. Bu proses, silindirik bileşenlerin imalatı için uygulanır. Bu proseste erimiş metal dönen kalıba bırakılır. Erimiş metal, kalıbın dönüşü sırasında katılaşır. Santrifüj dökümün düşük porozite, yüksek mekanik özellikler ve tek biçimli mikro yapı gibi birtakım avantajları mevcuttur. Kompozisyonel gradyan, esas olarak katı parçacıklar ve erimiş metal arasındaki yoğunluk farkının oluşturduğu merkezkaç

kuvveti farkı vasıtasıyla elde edilir (Gupta ve Talha, 2015; Watanabe, Yamanaka ve Fukui, 1998; Watanabe, 2000).

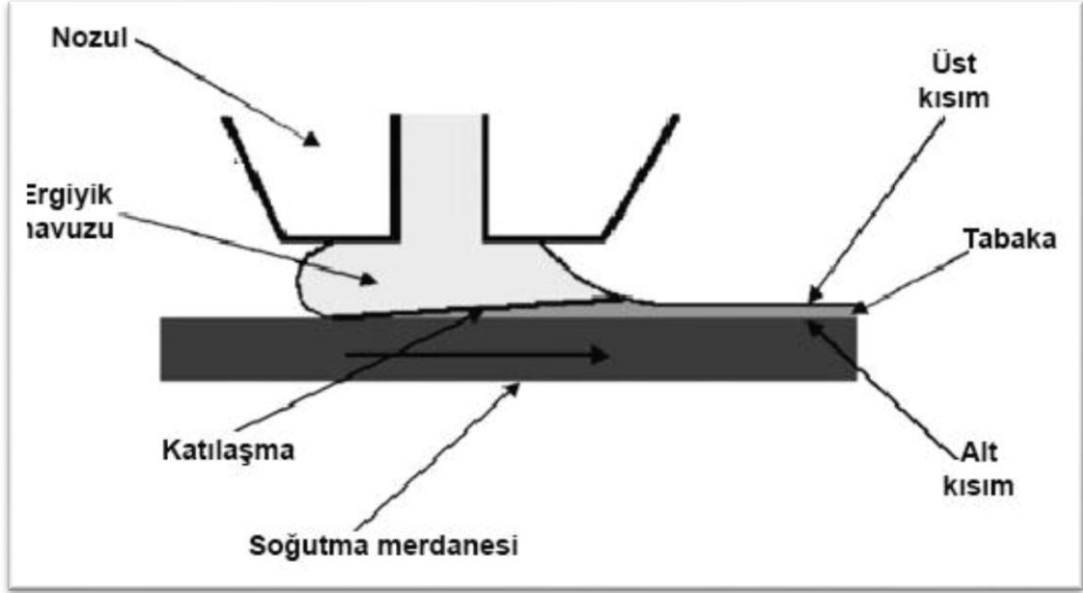


Şekil 3.3. Santrifüj Döküm Yöntemi

3.4. Şerit Döküm Yöntemi

Şerit döküm yöntemi, hareketli kayış üzerinde bulunan kanat kenarının altından geçen çamur karışımı hareketli kayışa döküldüğü zaman uygulanır. Bu, tek tip kalınlık kazanması için çamuru şekillendirir. Çamur karışımı hazırlamak için toz karışım organik çözücüyle karıştırılır. Uygun bağlayıcı ve akışkanlaştırıcı uygulanır. Daha sonra, çamur film kalınlığı kazanacak biçimde şekillendirilir ve son olarak şerit şekli alır. Bu durumda, ebat değişken olabilir; maksimum birkaç metre ya da minimum birkaç milimetre kalınlıkta olabilir. Kalınlık, döküm bıçağı yardımıyla ayarlanır (Gasik, 1998). Ardından, çözücü kurutulur ve yeşil artık bırakır. Kademeli FDM gradyanları, farklı bileşimlere sahip şeritler yığılarak üretilir. Şerit yığını üretildiğinde, bu yığın yüksek sıcaklıkta (50°- 200°C) ve 3-30 MPa basınçta sinterlenir. Yığılan derecelendirilmiş parça, yüksek sıcaklıkta ve basınçta sinterlenir ve bu işlem organik bağlayıcının giderilmesine yardımcı olur. Bu, bileşenlerin yoğunluğunu arttırmak açısından yararlıdır. Bu prosesin en büyük yararı, yüksek çözünürlüklü FDM'ler üretmesidir; ancak bu proses, bileşen dayanımının sınırlı olmasına neden olur ancak

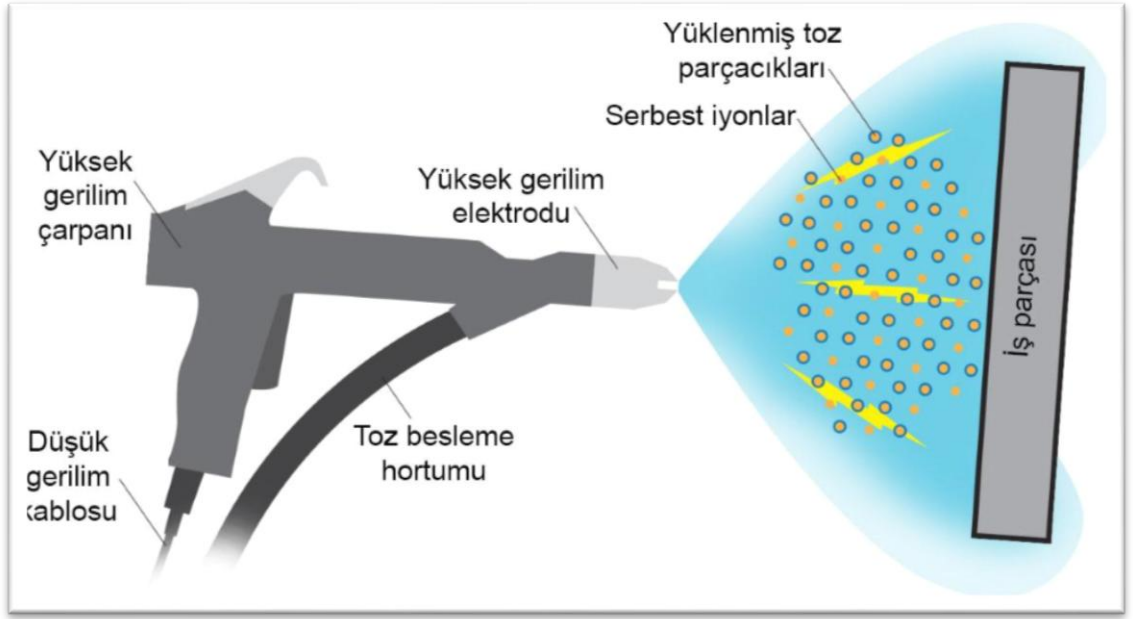
bu, sinterleme basıncına ve sıcaklığına bağlıdır (Rhee, 2007; Chumanov, Anikeev ve Chumanov, 2015).



Şekil 3.4. Şerit Döküm Yöntemi

3.5. Kaplama Yöntemleri

Sulzer-Metco, kısa bir süre önce aslında karma bir biriktirme prosesi olan PS-PVD (plazma püskürtme-fiziksel buhar biriktirme) yöntemini geliştirdi. Bu proses, PVD prosesi ile kaplamaları buharlaştıran ekonomik ve geleneksel düşük basınçlı plazma püskürtme (LLPS) yöntemlerinin bir birleşimidir. Çok kalın ve çok ince kaplamaların (en az 1 mm kalınlık) biriktirilmesini sağlayan LPPS yöntemi, 50-20 mbar basınç aralığında kullanılmaktadır (Udupa vd., 2014). Çalışma basıncı düştüğünde, plazma alevi 50 ila 500 mm aralığında değişerek homojen ve tek biçimli bir kaplama sağlar. Kararlı bir PS-PVD prosedürü için çalışma basıncı 0.5 ile 2 mbar aralığında ve plazma alevi uzunluğu 2 m'den fazla olmalıdır. Bu durumda, alev çapı 200 ila 400 mm aralığında olur. PS-PVD prosedürünün basınç gereksiniminin PVD prosesinden fazla olduğu aşikardır. Yüksek plazma akım hızı (2000 m/s'den fazla), yüksek plazma akım sıcaklığıyla birlikte ham maddeyi kolayca buharlaştırır ve dolayısıyla iç noktaların yanı sıra diğer yerlerde kaplama birikimini mümkün kılar (Udupa vd., 2014).



Şekil 3.5. Kaplama Yöntemleri

3.6. Toz Metalürjisi Yöntemi

Toz metalürjisi, karıştırma ya da kalıplama ihtiyacı olduğunda uygulanır. Bu yöntemde, ilk olarak ince tozlu malzemeler karıştırılır ve ardından bu tozlar gerekli şekli alana kadar preslenir. Daha sonra, yüzeyleri birleştirmek için karışım ısıtılır. Bu yöntem, ufak bileşenleri içeren ve yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulan yerlerde de kullanılır. Az miktarda malzeme atığı ve olağan dışı karışımlar (birkaçından bahsetmek gerekirse) otomotiv endüstrisi, ev aletleri ve rekreasyon ekipmanları için parça üretiminde kullanılabilir. Metalik tozlar üretilip sınıflandırıldığında, klasik TM proses sırası üç ana aşamada takip edilir: (1) tozları karıştırma, (2) sıkıştırma ve (3) sinterleme. Bazı optik ve nihai ikincil işlemler de gerçekleştirilir.

3.6.1. Toz Üretimi

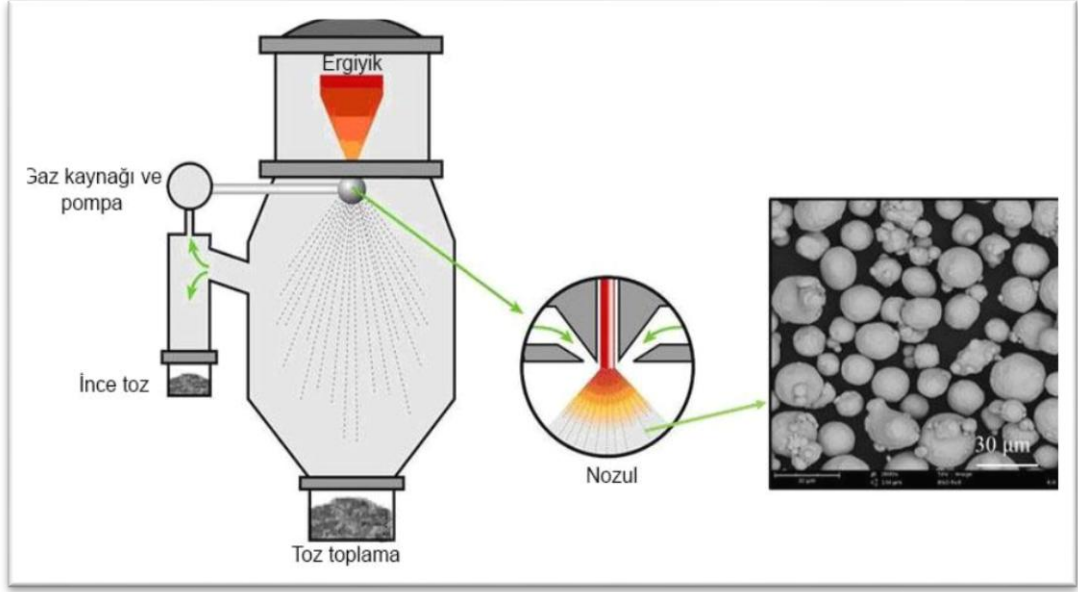
Toz üretimi yöntemi miktar, boyut, saflık, şekil ve tozun üretim maliyeti gibi diğer özellikleri belirler. Toz üretiminin avantajı, toz tanelerinin şeklini ve boyutunu tahmin etmesidir. Neredeyse tüm malzemeler, toz şekline dönüştürülebilir ancak toz yapımı için seçilen üretim yöntemi maliyete, reaksiyonlara ve özelliklere bağlıdır. Mekanik yöntemler, elektrolitik üretim, kimyasal üretim, atomizasyon teknikleri ve buharlaştırma yöntemleri toz üretiminde kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.

3.6.1.1. Mekanik Yöntemlerle Üretim

Hem mekanik yöntemler hem de diğer üretim yöntemleri, esas olarak enerji uygulandığında yeni yüzeyler oluşturulmasına dayalıdır. Mekanik üretim yöntemlerinin dört temel şekli mevcuttur. Darbe, istenen malzemelerin bir çekiç ya da başka bir ağır alet yardımıyla yüksek hızda küçük parçalara ayrılmasıdır. Aşındırıcı frezeleme, aşındırıcı bilyelerin (bu bilyeler malzeme özelliklerine göre farklılık göstermektedir) bir tambura yerleştirildiği ve ham malzemenin bilyelerin sürtünme kuvvetiyle küçük parçalara ayrıldığı bir prosesdir. Bu proses, genellikle kırılma malzemelerden toz üretiminde kullanılır. Ancak toza dönüşmekten ziyade deforme olmaları sebebiyle sünek malzemeler için uygun değildir. Bu kesme (işleme), tornalama ve taşlama gibi temel talaşlı imalat prosesleriyle gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Bu prosesler uygulanarak düzensiz şekilli büyük parçalar üretilmektedir. Küçük ölçekli toz üretimi için uygun olmasına rağmen, etkisiz ve yavaş olması sebebiyle toz üretiminde ilk tercih değildir. Diş dolgusunda amalgam dolgusu olarak kullanılan gümüş gibi tozlar, bu yöntemle üretilmektedir. Basınç kuvvetine maruz kalan tüm malzemeler kırılma noktasına ulaştığında toza dönüşme eğilimi göstermektedir. Bu özelliğe dayalı olarak istenen malzemeler basınç kuvvetiyle toza dönüştürülür. Mekanik alaşımlama prosesi, en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Daha ince ve daha homojen bir mikro yapı elde etmek için katı tozların periyodik olarak kaynaklanması ve ardından toz üretmek için topraklanması sağlanır.

3.6.1.2. Atomizasyon Teknikleri

Bu teknikte, istenen malzeme sıvı hale dönüştürülür. Bu proses, erimiş sıvıyı damlacıklara dönüştürerek gerçekleştirilir. Dondurulan damlacıklar, parçacıkların elde edilmesine yardımcı olur. Gaz atomizasyonu ve sıvı atomizasyonu en yaygın kullanılan tekniklerdir. Gaz atomizasyonu hava, azot, argon ya da helyum yardımıyla sıvı metal damlacıkları parçalayarak gerçekleştirilir. Tamamen soy gaz ortamında gerçekleşen gaz atomizasyonu tekniğiyle saf tozlar elde edilebilir. Elde edilen parçacık, genellikle küre şeklindedir. Sıvı ve su atomizasyonu, erimiş sıvı damlacıkların yağ ve su kullanılarak parçalandığı bir yöntemdir. Elde edilen malzemelerin suyla tepkimeye girme ihtimali sebebiyle işlem bittiğinde temizlik yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.6. Gaz Atomizasyon Teknikleri

3.6.2. Toz Karıştırma ve Harmanlama

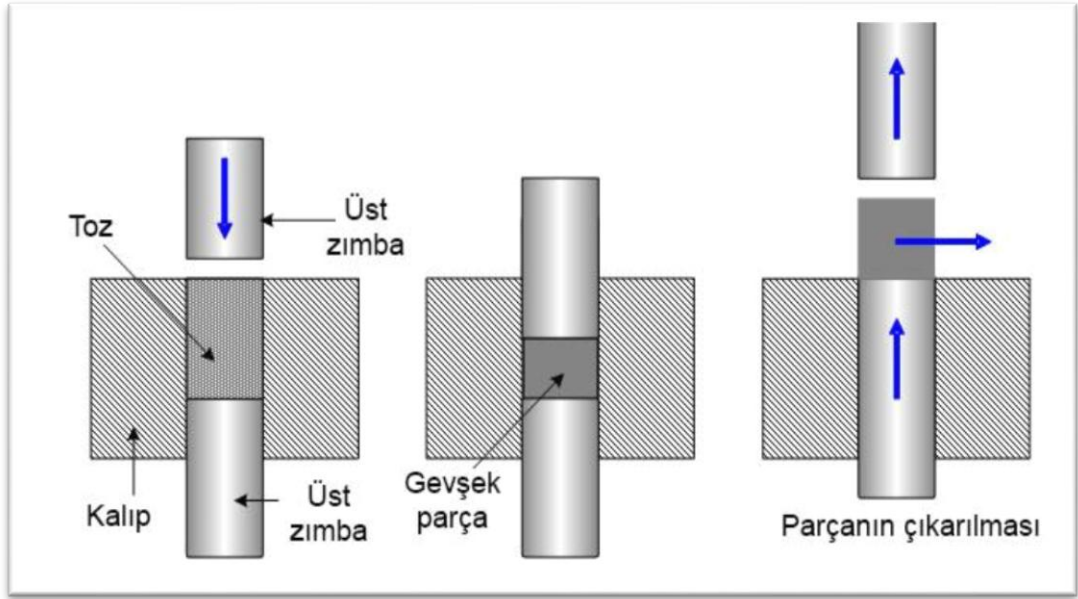
Sıkıştırma öncesi uygulanan işlemlerdir. Her ikisi ile tozlar homojen hale getirir. Harmanlama, farklı boyutlardaki aynı bileşime sahip tozların karıştırılma işlemi, karıştırma ise farklı bileşime sahip tozlara uygulanan işlemdir. Son üründe istenen özellikleri elde etmek için tozların büyük bir çoğunluğu diğer tozlar, bağlayıcılar ve yağlayıcılar ile karıştırılır. Sinterleme işlemi esnasında üniform kimya ve yapı oluşturmak için yeterli düzeyde difüzyon sağlanmalıdır.



Şekil 3.7. Toz Karıştırma ve Karıştırma makinesi

3.6.3. Sıkıştırma

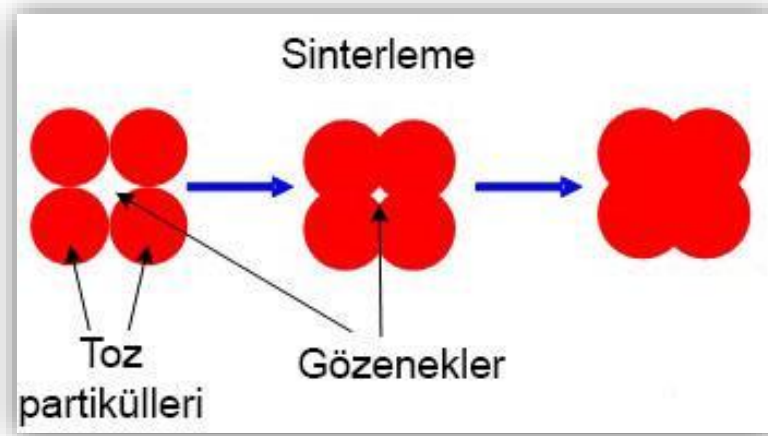
Karıştırılan tozlar, istenen şekli alması için yüksek basınç altında kalıplara basılır. İş parçası, sıkıştırma işlemine tabi tutulduğunda "ham parça" ya da sadece "ham" olarak adlandırılır. Bu, iş parçasının "henüz tam anlamıyla işlenmediğini" ifade etmektedir. Çoğu sıkıştırma işlemi mekanik, hidrolik ve pnömatik presleme ekipmanları ve rijit aletler ile yapılmaktadır. Tozlar, sıvı gibi akmazlar; parçacıkları homojen olana ve karşı kuvvet oluşturulana kadar preslenirler; bu karşı kuvvet parçacıklar ve kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme ile alt zımba direncinin birleşimiyle oluşur.



Şekil 3.8. Sıkıştırma proses

3.6.4. Sinterleme

Sinterleme, toz metalürjisindeki en önemli proseslerden biridir. Sinterleme işlemi sırasındaki bağlanma polimer yanması, boyut değişikliği ve mikro yapının irileşmesi gibi önemli olayları içermektedir. Katı hal difüzyonu ve bağlanma yüksek sıcaklıkta meydana gelir. Soğutma prosesi, sıcaklık kontrollü atmosferde ürünlerin sıcaklığını düşürür. Bu işlem, oksijensiz koşullarda gerçekleştirilir.



Şekil 3.9. Sinterleme proses

4. BRONZ ALAŞIMLAR

Bronz, en yararlı alaşımlardan biri olup; bakır, %12 kalay ve çinko, nikel, manganez veya alüminyum içeren diğer bazı metallerin birleşimidir. Bazı durumlarda alaşımın sertliğini arttırmaya yardımcı olması ve saf bakırdan daha sert olması sebebiyle silisyum, fosfor ya da arsenik içeren ametal ya da metaloitler de eklenir. Ayrıca süneklik, rijitlik ve işlenebilirlik gibi faydalı özellikleri mevcuttur.

Arkeolojik araştırmalar, bronzun "Bronz Çağı" isimli tarihi dönemde yaygın olarak kullanılan en sert alaşım olduğunu göstermektedir. Bronz Çağı, M.Ö. 3000'lerde Batı Avrasya ve Hindistan'da yaşanmıştır. M.Ö. 2000'de ise Çin'de popülerdi (Thorp, 2006). M.Ö. 1300'de başlayan Demir Çağı, Bronz Çağı'nın yerine geçmiştir ve bronz Demir Çağı boyunca popülerliğini korumasına rağmen M.Ö. 500'de Avrasya'da demir yaygın olarak kullanılmıştır.

Çoğu tarihi parça, farklı bronz ve pirinç (bakır ve çinko birleşimi) yardımıyla yapıldığından eski kalıntılar ve modern müzelerde bu parçalar "bakır alaşımlar" olarak adlandırılmaktadır.

Bronzun fiziki özellikleri şunlardır:

- Bronz, bakır rengindedir.
- Bronz, oda sıcaklığında katı haldedir.
- Bronz, kokusuzdur.
- Bronzun bağıl yoğunluğu 8,8 g/cc'dir.
- Bronz elektriği ve ısıyı çok iyi iletir.
- Bronz, demirden/bakırdan daha serttir.
- Suda çözünmez.
- Düşük sürtünmeye sahiptir.
- Sünektir.
- Bronzun erime noktası 950 °C ile 1050 °C arasında değişir.

Bronzun kimyasal özellikleri şunlardır:

- Bronz, havada oksitlenir ve yüzeyde ince bir bakır oksit tabakası olarak birikir.
- Birkaç kirlenici madde ve bunların kükürt bileşenleri ile tepkimeye girer.

- Hidrojen üretmek için güçlü asitlerle tepkimeye girer.
- Oda sıcaklığında kararlıdır.
- Bronz, deniz suyu korozyonuna dirençlidir.

Bronz alaşımların uygulanması

Bronz alaşımlar madalya, müzik enstrümanları ve heykel yapımı için gereklidir. Ayrıca düşük metal sürtünmesi sebebiyle çoğu makine yataklarının ve burçlarının yapımında faydalıdır. Bronz, deniz suyuna karşı eşsiz korozyon direnci göstermesi sebebiyle çoğu deniz araçlarının ve gövdelerinin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bronz, zil/çan yapımında kullanılmaktadır; ancak zil/çan yaparken alaşım oluşturmak için %23 kalay eklenir.

Neredeyse tüm profesyonel ziller (davulcular için pirinç plakalar), hem uygun ses hem de dayanıklılık sağlayan bronz kullanılarak üretilmektedir.

Demir para yapım endüstrisi, bronz kullanmaktadır çünkü neredeyse tüm "bakır" paralar aslında bronzdan yapılmaktadır. Para yapımı için %1 çinko ve %4 kalay eklenmektedir.

Bronz, demir paraların yanı sıra, yüzyıllardır madalya ve ödül yapımında kullanılmaktadır. Günümüzde, bronz madalyalar farklı yarışmalarda üçüncüleri onurlandırmak için verilmektedir.

5. KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN TAKVİYELER

Kompozit malzemeler, matris formunda olduklarından daha fazla mukavemet kazanmak için takviye aşamasından geçer. Bu aşama, aşağıdaki özellikleri sağlar:

- Düşük yoğunluk
- İyi kimyasal ve mekanik uyumluluk
- İyi termal kararlılık
- Yüksek young modülü
- Yüksek çekme dayanımı ve sıkıştırma
- İyi işlenebilirlik
- Maliyet etkinliği

Normalde, inorganik ametaller (seramik ve karbon elyafı) belirtilen özelliklerin kabul edilebilir bir birleşimine sahiptir, ancak hizalı elyaflar en etkili takviyeyi sağlar; dolayısıyla, yüksek performanslı ekipmanların imalatı için gerekli olduklarından çok popülerdir. Ayrıca tekstil teknolojisinin gelişimi, istenen özellikler ile üretimin kolaylıkla sağlanmasına yol açabilir. Elyaf takviyelerinin büyük bir çoğunluğu grafit, cam elyaf, silisyum karbür elyaf, bor elyafı, aramid elyafı, alümina elyafı ve yüksek yoğunluklu polietilen lif dahil olmak üzere sert/ gevrek karbon ya da seramiklerden oluşur (Chawla, 2012). Bu projede aşağıdaki takviyeler kullanılacaktır:

5.1. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür; elmas, bor karbür ve kübik bor nitrürden sonra en sert seramiktir. Kimyasal olarak etkisiz ve aşınmaya dirençli olduğu barizdir; ki bu, silisyum karbürü zorlu işletme durumlarında güvenilir bir seramik ve aşındırıcı yapmaktadır.

SiC, genellikle petrol, kok kömürü, kuvars ya da silika elektrik dirençli fırında birleştirildiğinde üretilir. Karışım, 1700-2500 °C sıcaklık aralığında kimyasal tepkimeye girer ve α -SiC'i oluşturur. Tepkime aşağıda verilmiştir:



Tablo 5.1. Silisyum Karbürün (SiC) Genel Özellikleri (Pierson, 1996)

Özellikler			
Kimyasal formül	SiC	Basınç dayanımı (MPa)	3900
Molekül ağırlığı	40.11	Kristal yapı	FCC
Rengi	Siyah, yeşil	Erime noktası (°C)	2730
Yoğunluk (g/cm ³)	3,21	Isı iletkenliği (W/m K)	120
Sertlik (GPa)	29	Özgül ısı (J/kg K)	750
Young modülü (GPa)	410	Kafes değişmezleri (nm)	a ⁰ =0.189, c ⁰ =0.308
Poisson oranı	0.14	Birim göze oylumu (10 ⁻²² cm ³)	1.259

Silisyum karbür, uzun bir süredir çok yüksek sıcaklık ve voltaja dayanmasını sağlayan etkileyici elektrik özellikleri ve fiziki özellikleri sebebiyle güç elektroniğinde popüler bir malzeme olmuştur. Bilyeli vana bileşenleri, türbin parçaları, contalar, kanatlar, yataklar, fırınları, aşınma plakaları, ısı eşanjörleri ve yarı iletken ince işleme ekipmanları SiC'in kullanıldığı aletler arasında yer almaktadır.

5.2. Bor Karbür (B₄C)

B₄C, daha önce de belirtildiği üzere, elmas ve bor nitrürden sonra üçüncü en sert maddedir. Metalotermik prosedür yardımıyla doğrudan karbon ve bor elementlerinden doğrudan sentez yapabilmesi bir diğer faydalı özelliğidir. Ayrıca karbotermik redüksiyon olarak adlandırılan diğer bir popüler prosedürde bor anhidrit (B₂O₃) ya da borik asit (H₃BO₃) gibi ucuz kimyasallar kullanılmaktadır. Bu prosedür yardımıyla karbon redüksiyon yöntemi kullanılarak bor karbür üretilmektedir.



Bor karbür, yapımında kullanılan unsurlarda mükemmel sertlik (2900-3100 kg/mm²) sağlar. Bunların yanı sıra, eşsiz elektrik, termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca düşük maliyetlidir, düşük yoğunluğa (2,51 g/cm³) ve kendisini mikroelektronikler, uzay araçları, askeri ekipmanlar, tıbbi ekipmanlar ve nükleer cihazlar için uygun hale

getiren ciddi eylemsizliğe sahiptir (Ryan et al., 2002). B₄C'nin genel özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Bor Karbürün (B₄C) Genel Özellikleri (Pierson, 1996)

Özellikler			
Bileşim	(B ₁₁ C)CBN	Basınç dayanımı (MPa)	2750
Molekül ağırlığı	55.26	Kristal yapı	Rombohedral
Renk	Siyah	Erime noktası(°C)	2450
Yoğunluk (g/cm ³)	2.52	Isıl genleşme (1/°C)	5x10 ⁻⁶
Sertlik(GPa)	27.4-34.3	Elektrik iletkenliği (Ω ⁻¹ m ⁻¹)	140
Young modülü (GPa)	290-450	Kafes değişmezleri(nm)	a ⁰ =0.55991, c ⁰ =1.20740
Kayma modülü(GPa)	165-200	Birim göze oylumu(nm ³)	3.27809
Esneklik modülü (GPa)	190-250	Uzay grubu	R3m
Poisson oranı	0.18		

5.3. Molibden Karbür (Mo₂C)

Molibden karbür sertlik, yüksek erime noktası, oksidasyon, korozyon direnci, elektrik iletkenliği ve yüksek aşınma direnci dahil olmak üzere yararlı kimyasal ve fiziki özelliklere sahip mükemmel bir geçiş metali karbürüdür (Chen vd., 2011); bu nedenle, heterojen kataliz için önemli kabul edilir. Molibden karbürün genel özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Molibden Karbürün (Mo₂C) Genel Özellikleri (Pierson, 1996)

Özellikler			
Bileşik Formülü	Mo ₂ C	Basınç dayanımı (MPa)	901
Molekül Ağırlığı	203.91	Kristal yapı	BCC
Renk	Gri	Erime noktası (°C)	2690
Yoğunluk(g/cm ³)	9.18	Young modülü (GPa)	227-553
Vickers Mikrosertlik	1950		

Molibden karbür (Mo₂C), elektronik yapısının asal metallere benzemesi sebebiyle temel olarak hidrokarbon reformasyonunda kullanılan uygun maliyetli ve ucuz bir malzemedir (Dantas, Lopes-Moriyama ve Souza, 2018). Mo₂C, geçtiğimiz yıllarda, aktif faz sırasında hem çeşitli malzemeleri tespit etmeye yönelik elektrotların hem de

yüksek performanslı güç depolama cihazlarının üretiminde toz olarak denendi ve kullanıldı.

5.4. Titanyum Karbür (TiC)

Makul kimyasal inertliğe, yüksek erime noktasına, sertliğe ve uygun elektrik iletkenliğine sahip olan TiC farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yoğunlukla kesme aletlerinde ve aşınmaya dirençli malzemelerde ve anotlarda (lityum iyon piller) kullanılmaktadır (Gou, Zhang ve Chou, 2017). TiC'nin genel özellikleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4: *Titanyum Karbürün (TiC) Genel Özellikleri (Pierson, 1996)*

Özellikler			
Yoğunluk (g/cm ³)	4.93	Entalpi (kJ/g)	2.8
Molekül Ağırlığı	59.89	Poisson oranı	0.19
Renk	Siyah	Erime noktası (°C)	3065
Kristal yapı	FCC	Isıl genleşme (ppm/°C)	7.9
Sertlik (GPa)	30	Elektriksel direnç (μΩ.cm)	105
Young modülü (GPa)	460	Kafes parametreleri (nm)	a ⁰ =0.430-0.433
Uzay grubu	Fm3m	Özgül ısı (J/g .K)	0.56

6. LİTERATÜR TARAMASI

Mahamood vd. (2012) yaptıkları çalışmada, FDM'ler, bileşimlerine dayalı olarak farklı özelliklere sahip gelişmiş malzemelerdir. FDM özellikleri, kendisini oluşturan malzemelere göre farklılık göstermektedir; bu nedenle, imalat ve malzeme işleme masraflarının arttığı çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu işlemlerin iyileştirilmesi halinde, maliyet azalarak genel kullanım teşvik edilmiş olacaktır. İmalat proseslerini, uygulama alanları ve yakın zamanda yapılan bazı araştırmaların alıntılarını tartışılmıştır. Daha uygun, makul, ekonomik açıdan uygun FDM üretim yöntemleri (SFF yöntemi olarak da adlandırılmaktadır) geliştirmeye yönelik araştırma çalışmalarının artırılmasına ihtiyaç vardır. SFF prosedürünün geliştirilmesi gerekmektedir ve bu alandaki gelecek araştırmalar FDM imalat maliyetini düşürerek verimi arttıracaktır (Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012).

Toudehdehghan vd. (2017) yaptıkları sürekli ve kararlı çalışmalarla malzeme mühendisliğinde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) önemini vurgulamışlardır. FDM'ler özel malzeme özellikleri sunan gelişmiş maddelerdir. FDM uygulamalarını incelemenin yanı sıra, FDM'lerin matematiksel idealleştirilmesi de tartışılmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi, FDM'ler heterojendir ve mekanik özellikleri uzamsal koordinatlarına göre pürüzsüz bir şekilde değişmektedir. FDM'lerin doğru bir şekilde analiz edilmesi için karmaşık heterojen mikro yapıları ve homojenleştirme şemaları basitleştirilmelidir. Bu prosesle bazı temel katı mekanik sorunlara kapalı formlu çözümler bulunabilir. Sonuç olarak, FDM'ler bireysel malzeme yapıları sebebiyle benzersizdir ve dolayısıyla, bunların gelecekteki mühendislik uygulamalarında sınırsız bir şekilde kullanılma ihtimalinin olduğu vurgulanmıştır (Toudehdehghan, Lim, Foo, Ma'arof ve Mathews, 2017).

Sharma vd. (2001) yaptıkları çalışmada, metal matrisli kompozitlerin (MMK) silindirik gömleği, yatak manşonu, uçak frenleri ve pistonlar dahil olmak üzere birçok uygulama için gerekli olması sebebiyle ilginç tribolojik özellikleri mevcut olduğu vurgulanmıştır. SiC parçacıkları ve takviyesiz parçalar (takviyeli fosfor-bronz alaşımı), yağlamanın olmadığı bir ortamda uygulanan yükler ve kayma hızı yönünden incelenmiştir. Kompozitler içindeki SiC içeriği, (ağırlığına göre %2 adımda) %1-5 aralığında farklılık göstermiştir. Bunların aşınma oranını analiz etmek için pin-on-disk

aşınma test cihazı kullanılmış olup, bunun için de EN24 çelik diski şeklinde karşı yüz kullanılmıştır. 1,25, 1,56 ve 1,87 m/s hızda 20 N adımda 20-160N yük uygulanmıştır. Deneysel sonuçları, matrisli alaşım ve kompozit durumunda yük ve kayma hızı arttığında aşınma hızının arttığını ancak kompozitlerin alaşımlardan daha hızlı aşındığını göstermiştir. Kritik yük uygulandığında; kompozit ve takviyesiz alaşım durumunda hafif aşınma ciddi aşınmaya dönüşmüştür. Takviyesiz alaşımların geçiş yüklerinin kompozitlerin geçiş yüklerinden önemli ölçüde düşük olduğunu vurgulamak önem arz etmektedir; bu nedenle, SiC parçacıklarının ağırlık yüzdesi arttığında, geçiş yükleri artmaktadır ancak sürtünme hızı arttığında geçiş yükü azalmaktadır (Sharma, Satish, Girish ve Somashekar, 2001).

Ali vd. (2016), toz metalurjisi yöntemi ile bronz -%40W kompozitleri üretmişlerdir. Farklı presleme basınçlarında üretilen kompozitler farklı sinterleme sıcaklıklarında (750 °C, 850 °C ve 950 °C) ve farklı sürelerde (60-120 dakika) sinterlenmiştir. Ham tozların ve kompozitlerin mikro yapılarını test etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniği kullanıldı. Sonuçlar, sıkıştırma yükü, sinterleme süresi ve sıcaklık arttığında yoğunluğun da arttığını ortaya koymuştur. Ağırlıkça %60 bronz (ağırlıkça %40) kompozitlerin ortalama vickers sertliği 91,5'tir. Kompozitin korozyon direncini arttırmak için, kompozitlerin yüzeyine elektrokaplama yöntemi ile kalay kaplanmıştır. Bu şekilde, 45-60 µm'lik kaplama tabakaları elde edilmiştir. Farklı numunelere farklı koşullar altında (kaplamasız, kaplamalı, çizikli kaplama) korozyon hızı ölçümleri yapıldı. Kompozit alt katmanın maruz kalan alanındaki katodik koruma sebebiyle çizikli kaplama numunesinin korozyon akımının çiziksiz numunelerden daha fazla olduğu tespit edildi. Sonuç olarak, çizikli kaplama örneğinin korozyon hızı çiziksiz örneğin korozyon hızından yüksektir (Ali, Suppiah ve Muayaduldeen, 2016).

Bannan vd. (2003), karbotermik redüksiyon tekniği ile bakır ve alüminyum bronzu (AB2) matrisli titanyum karbür takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. 1-3 µm tane boyutuna sahip titanyum karbür tanecikleri alüminyum bronzu içinde 1250 °C'de elde edilirken, bakır matris içinde 1330 °C sıcaklıkta ve 1-6 µm olarak elde edilmiştir. Bakır ve alüminyum bronz için titanyum karbürün dağılım konsantrasyonları %20 ve %6,5 olarak bulundu. Ayrıca alüminyum bronz alaşım içinde titanyum karbür parçalarının olması durumunda demirin dağıtım ortamı olarak kullanılabileceğini destekler kanıtlar bulunmuştur (Bannan, Temple ve Jones, 2003).

İpek vd. (2017) yaptığı çalışmada, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak bor karbür (B_4C) takviyeli bakır metal matrisli kompozitler (MMC'ler) üretildi ve sıkıştırılmış kompozitlerin tribolojik davranışı incelendi. B_4C takviyesi, ağırlıkça %2 ve %10 aralığında farklı oranlarda seçildi. Tozlar, soğuk presleme yöntemi kullanılarak 735 ± 1 MPa basınçta bir kalıpta sıkıştırıldı. Numunelerin sinterleme işlemi, $900^\circ C$ sıcaklıkta Ar gaz atmosferinde iki farklı sinterleme süresi (1 saat ve 3 saat) içinde gerçekleştirildi. Kuru sürtünme koşulları altında triboloji testlerini yapmak için bilgisayarlı pin-on-disk düzeneği kullanıldı. Triboloji test süresi 1 ila 5 saat idi. Aşınan yüzeyler, aşınma mekanizmasının anlaşılmasına yardımcı olan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi. Bunların yanı sıra, üretilen numunelerin porozite durumu ve triboloji davranışı araştırıldı. B_4C içeriği arttığında, numunelerin porozite durumunun arttığı tespit edildi. Ayrıca aşınma dayanımı, artan takviye içeriğiyle birlikte artış gösterdi (İpek, Cuvalci ve Celebi, 2017).

Xie vd. (2017), yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi kullanılarak, bronz/seramik kompozitler üretmişlerdir. Sinterleme sıcaklığı, seramik/bronz kompozit bağının yapısını etkilemektedir. Bu nedenle mekanik özellikler elektromekanik üniversal test cihazı yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM), Rockwell sertlik cihazı ve X-Ray difraksiyonu kullanıldı ve bulgular, sinterleme sıcaklığındaki artışın hem seramik hem de bronz kompozit bağlar için yoğunluğu ve darbe dayanımını arttırdığını göstermiştir. Yoğunluk ve darbe dayanımı öncelikle artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır ancak daha sonra sıcaklık daha fazla arttığında azalmaktadır. Seramik/bronz kompozitlerin mekanik özellikleri, $620^\circ C$ sinterleme sıcaklığında 170 MPa eğme dayanımı, 5.43 g/cm^3 yoğunluk, $9,76\text{ kJ/m}^2$ darbe dayanımı ve 126 HRB sertlik ile tepe noktasına ulaşmıştır. Cu ve Sn alaşım sıcaklığındaki artış, bronz ve seramiğin etkileşime geçmesine neden olmuştur. $620^\circ C$ sinterleme sıcaklığında bakır ve kalay $\alpha+\delta$ ötektoiddir; seramik ve metal iyice bağlanarak seramik/bronz kompozit bağ özelliklerini iyileştirmiştir (Xie, Hou, Li, Huang ve Ding, 2017).

Naebe ve Shirvanimoghaddam (2016), yaptıkları çalışmada, FDM'ler, bazı kritik endüstrilerdeki geniş kapsamlı uygulamaları sebebiyle daha fazla ihtiyaç duyulan modern malzemelerden olmuştur. FDM'ler ile ilgili çoğu araştırma, seramik ya da metal bazlı malzemeler üzerine yapılmıştır; bu nedenle, polimer FDM uygulamaları

ve özellikleri ile ilgili mevcut bilgiler sınırlıdır. Bu durumun sebebi, işleme yöntemlerinin fazla oluşu ve uygulama alanının geniş olmasıdır; dolayısıyla çok az araştırmada polimer FDM'lere odaklanılmıştır. Nano takviyeli polimer kompozitlerde bulunan gradyan mikroyapılar, gelecekteki mühendislik uygulamaları açısından çok büyük potansiyele sahiptir. Biyopolimer FDM üretiminde nano malzeme (ör. grafen, karbon nanotüp (CNT) ve bor nitrür (BN)) kullanımı ve yakın alan elektro lif çekim olmak üzere gelişmiş tekniklerden faydalanılmaktadır ve bu durum, çok işlevli malzemelerin geliştirilmesine yol açabilir. Bu malzemeler gelişmiş fiziki, mekanik ve kimyasal performansa ihtiyaç duymaktadır ve ancak bu performanstan sonra biyoyapımlarda kullanılabilirler. FDM üretim yöntemlerinin yanı sıra gelecekte sonraki nesil eğimli yapıların geliştirilmesinde kullanılacak daha az kullanılan yöntemler de mevcuttur. Yüksek sıcaklık mikro dalga sinterleme işlemi önemli miktarda enerji ve zamandan tasarruf sağlamakta olup, bu işlem gelecekte daha fazla yoğunluğa ve daha iyi ısıl gerilim dağıtımına sahip yeni FDM'lerin üretiminde faydalı olacaktır. Mikrodalga sinterleme metaller, seramikler ve polimerler için etkili ve verimli bir yöntemdir. Eklemeli üretim proseslerindeki gelişmelerin yanı sıra FDM uygulamalarına yönelik yeni ve çok fonksiyonlu derecelendirilmiş bileşimlerin geliştirilmesi için çeşitli önemli fırsatlar da mevcuttur. Bu yöntemin doğruluğu ve yüksek kontrollü oluşu, karmaşık geometrilere sahip bileşimlerin derecelendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bileşimler biouyumlu protez uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

Sobczak ve Drenchev (2013) yaptıkları çalışma ile, kompozitlerin özellikleri ve derecelendirilmiş yapıları, uzmanların dikkatini malzeme bilimine ve teknolojilerine kaydırmıştır. Çünkü bu kompozitler ilginç ve faydalı özelliklere sahiptir. Şimdiye kadar derecelendirilmiş metal matrisli kompozitlerin sentezlenmesi için birçok üretim yöntemi uygulanmıştır. Bu üretim yöntemleri iki kategoriye ayrılır. Birinci kategoride, nihai ürünün birkaç parçası derecelendirilmiş bir yapıda düzenlenir ve ardından gerekli özellik ve derecelendirilmiş yapıya sahip kompozit elde etmek için eritme ya da sinterleme yöntemi vasıtasıyla süzülür; ancak derecelendirilmiş yapı, ikinci kategori yöntemlerinde gerçekleşen kompozit eritmeli katılaşmayla da elde edilebilir. Bu kategoride, müteakip kuvvetlerden herhangi biri olabilecek dış kuvvet uygulanması gerekmektedir: merkezkaç kuvveti, yerçekimi kuvveti, elektromanyetik dalgalar,

manyetik kuvvet ya da kuvvetlerin birleşimi. Isıl işlemlerle derecelendirilmiş yapı elde edilmesine yardımcı olan plazma püskürtme, diğer bir uyumlu ve çok amaçlı işlemdir; bu proses, mekanik ve kimyasal olarak yüzeydeki derecelendirilmiş kaplamalara dayanır. FDM uygulamasının bazen postmodern endüstrilerin gerekliliklerini karşılayan tek seçenek olması sebebiyle FDM gelişimi özel beceriler ve fizik, kimya ve birçok mühendislik bilimi bilgisi gerektirir (Sobczak ve Drenchev, 2013).

Radhika vd. (2018)'nin yaptıkları çalışmanın önemli amaçlarından biri, yatay santrifüj döküm prosesi uygulayarak Cu-10 Sn/SiC kompozit (dış çapı 100 x iç çapı 70 x 100 mm) ve fonksiyonel derecelendirilmiş takviyesiz bakır alaşımı (Cu-10Sn) üretmektir. Ayrıca elde edilen yapının tribolojik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Dökümlerin radyal yönleri ile birlikte elde edilen yapının sertliği ve mikroyapısı analiz edildi; hem iç hem de dış bölgelerde çekme testleri yapıldı. Değerlendirilen kompozit mikro yapı, takviye parçacıklarının radyal yön boyunca gradyan yapı oluşturduğunu ancak iç çevrede en yüksek takviye konsantrasyonunun tespit edildiğini gösterdi. Bu durumda, en yüksek sertlik 205 HV ile yüzeyde tespit edildi. Çekme testi sonuçları, kompozitin iç bölgesinin yüksek çekme dayanımına (248 MPa) sahip olduğunu gösterdi. Bu değer, takviyesiz alaşımdan ve dış bölgeden daha yüksektir. İç çevrenin mekanik özellikleri daha iyi olduğundan, kompozitin iç bölgesini pin-on-disc (disk üzeri) tribometre yardımıyla analiz etmek için kuru sürtünmeli aşınma deneyi yapıldı. Bu durumdaki bazı parametreler şunlardır: sürtünme mesafesi 500-1500 m, yük 10-30N ve sürtünme hızı 1-3 m/s. Bu değerler, Taguchi L27 dikey dizilim yardımıyla analiz edildi. Ayrıca bu parametrelerin aşınma miktarı üzerindeki etkileri varyans analizi ve sinyal- gürültü oranı vasıtasıyla analiz edildi. Analizler, yükün aşınma miktarı üzerinde en yüksek etkiyi (%54) yarattığını, kayma mesafesinin %18.2 etki ile bu değere yakın olduğunu ve kayma hızının %3.7 etkiye sahip olduğunu gösterdi. Kompozitin aşınma miktarı, yük ve kayma mesafesi arttıkça önemli oranda artmıştır, ancak kayma hızındaki artışla da azalmıştır (Radhika, Thirumalini ve Shivashankar, 2018).

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Kullanılan Malzemeler ve Kompozit Üretimi

Bu tez çalışmasında matris tozu olarak bronz tozu (% 85 Cu ve % 15 Sn, -325 mesh parçacık büyüklüğü, %99,9 saflık), takviye olarak ise SiC (400 mesh parçacık büyüklüğü, \geq %97,5 saflık), TiC (-325 mesh parçacık büyüklüğü, %98 saflık), Mo₂C (-325 mesh parçacık büyüklüğü, %99,5 saflık) ve B₄C (-325 mesh parçacık büyüklüğü, %98 saflık) tozları kullanılmıştır.

Numuneler, çeşitli aşamalarla hazırlandı. Bu hazırlık süreci aşağıdaki adımlarla özetlenebilir:

İlk olarak, numunenin her bir tabakasının hacmi (V) hesaplandı:

$$V = \pi r^2 h$$

Burada:

r: numunenin yarıçapı

h: tabaka kalınlığı

$$V = 3.14 \times (0.65)^2 \times 0.2$$

$$V = 0.265 \text{ cm}^3$$

Daha sonra, yoğunluk kullanılarak her bir tabaka için gerekli kütle hesaplandı:

$$\text{Kütle (m)} = \text{Hacim (v)} \times \text{Yoğunluk}(\rho)$$

$$m_{(100\% \text{ CuSn})} = V \times \rho_{(\text{CuSn})}$$

$$m_{(100\% \text{ CuSn})} = 0,265 \times 8,69$$

$m_{(100\% \text{ CuSn})} = 2.30 \text{ gr}$ Bu, tüm numuneler ve tüm katmanlar için orta tabakanın net kütlesidir. Hesaplama sonrasında, tozlar hassas terazi kullanılarak doğru bir şekilde tartıldı (Fotoğraf 7.1.)

Tablo 7.1: Numunelerin toz ağırlıkları

Tabakalar	Numune 1 (B ₄ C içerikli) ağırlığı (gr)	Numune 2 (Mo ₂ C içerikli) ağırlığı (gr)	Numune 3 (TiC içerikli) ağırlığı (gr)	Numune 4 (SiC içerikli) ağırlığı (gr)
1. tabaka	2,2035	2,1575	2,3125	2,1395
2. tabaka	2,3000	2,3000	2,3000	2,3000
3. tabaka	2,2035	2,1575	2,3125	2,1395



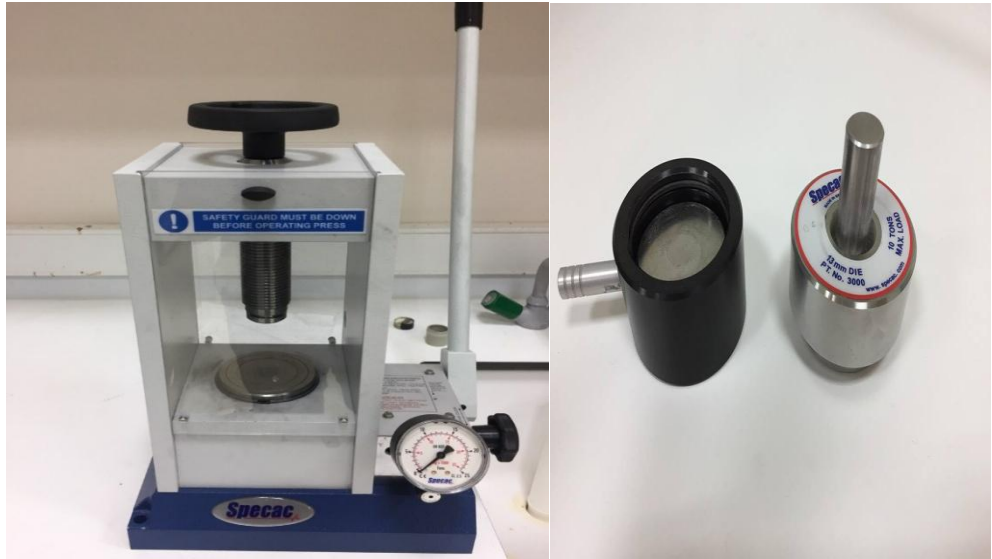
Fotoğraf 7.1. Hassas terazi

- 1- Karıştırma: Karıştırma işlemi için tozlar 20 devir/dakika hızında 45 dakika boyunca karıştırma işlemine tabi tutuldu. Bu işlem için 10 adet 100Cr6 çelik bilye kullanıldı ve her bir bilye 10 mm çapa sahipti. Kullanılan toz karıştırma mikseri (turbula) Fotoğraf 7.2'de gösterilmiştir.

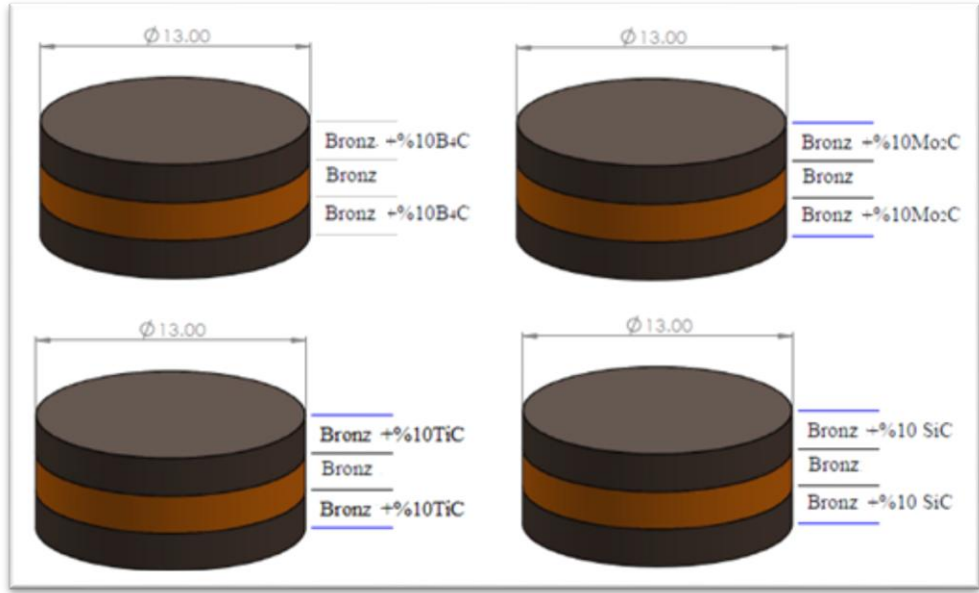


Fotoğraf 7.2. Turbula

2- Presleme: Presleme işleminde toz, 13 mm çapa sahip silindirik bir kalıba yerleştirildi (Fotoğraf 7.3). Toz matrise takviye tozu eklendi ve daha sonra Fotoğraf 7.3'te gösterildiği üzere 6 mm kalınlığa ve 13 mm çapa sahip (üç adet 2 mm'lik tabaka) silindirik numune üretmek için kompozit 500 MPa'da preslendi.



Fotoğraf 7.3. Presleme makinesi ve kalıp

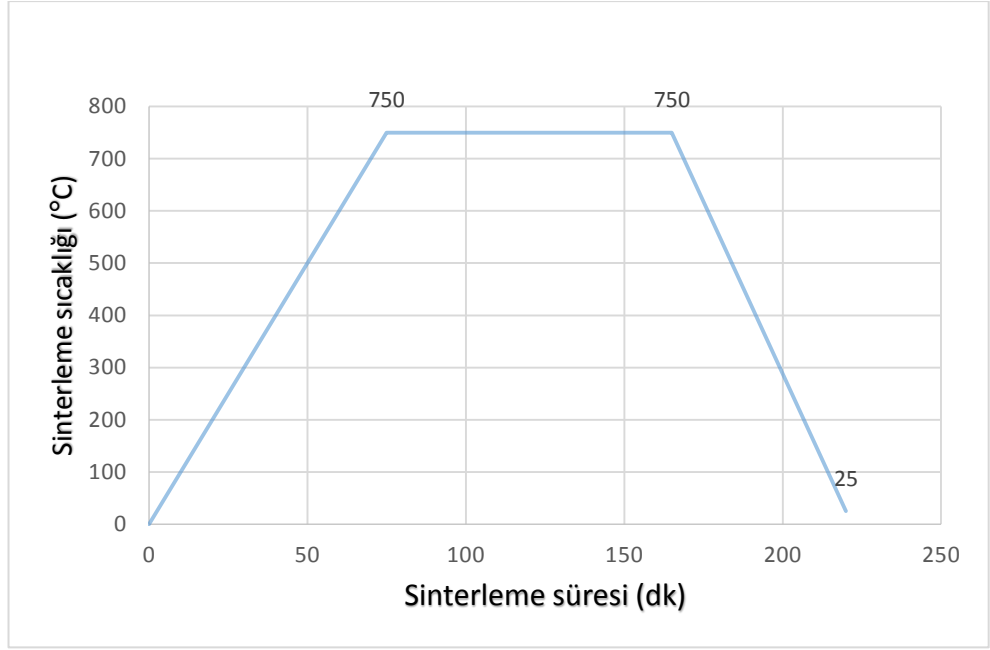


Şekil 7.1. Numunelerin şekli ve boyutları

- 3- Sinterleme: Numuneler koruyucu argon gazı atmosferinde tüp fırında sinterlendi (Fotoğraf 7.4). Grafik 7.1'de gösterildiği üzere, sinterleme sıcaklığı 750°C, sinterleme süresi 90 dakika, ısıtma ve soğutma hızı 10°C/ dk idi. Aşağıda verilen fotoğraf, sinterleme işlemi esnasında kullanılan fırını göstermektedir.



Fotoğraf 7.4. Tüp fırın



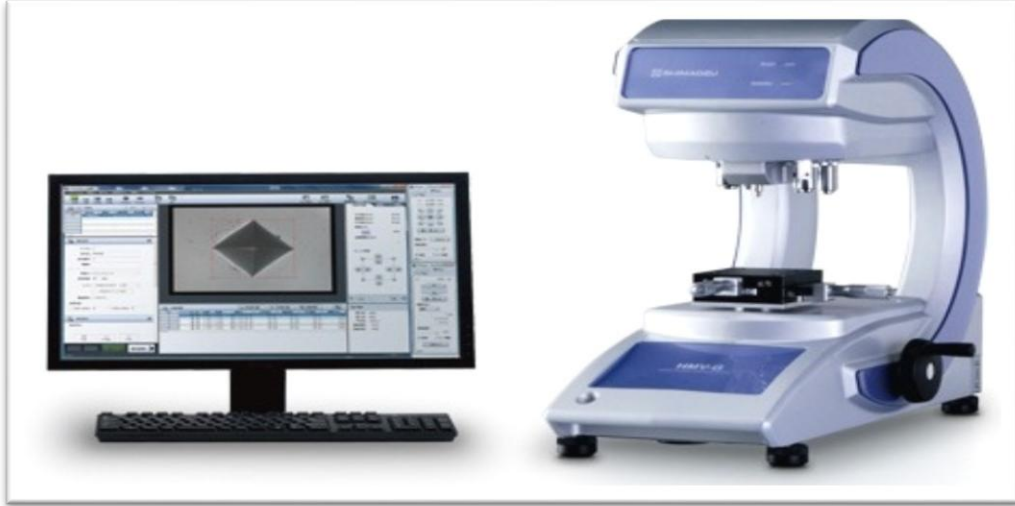
Grafik 7.1. Sinterleme grafiđi

7.2. Uygulanan Testler

- Sertlik Testi
- Metalografik Çalışmalar
- Mikroyapı incelemeleri (optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD)

7.2.1. Sertlik Testi

Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak 200 gr yükte üretilen numunelerin sertlik seviyesi belirlendi (Fotoğraf 7.6). Sertliğin doğru belirlenmesi amacıyla sertlik değerleri numunelerin üst, orta ve alt tabakalarından alındı; dolayısıyla her bir örnekten üç sertlik değerleri alındı.



Fotoğraf 7.5.Vickers sertlik ölçüm cihazı

7.2.2. Metalografik Çalışmalar

Metalografik incelemeler için elde edilen metalografi numuneleri 60-1200 gözenekli kağıtlarla temizlendi. Ardından, soket yüzeyleri elmas sprej yardımıyla parlatıldı. Mikroyapı incelemeleri için numuneler 5 gramlık $FeCl_3$ + 50ml HCl + 100 ml H_2O çözelti içinde 20 saniye dağlanmalıdır. Faz yapılarının incelenmesi ve anlaşılması için enerji dağılımlı spektroskopi (EDS), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ray difraksiyonu (XRD) kullanıldı. Fotoğraf 7.6'da Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında kullanılan taşlama ve parlatma makinesi gösterilmektedir.



Fotoğraf 7.6. Taşlama ve parlatma makinesi

7.2.3. Mikroyapı İncelemeleri (Optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD)

Optik incelemeler için Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuvarında bulunan Olympus GX41 ters metal mikroskobu ve Stream görüntü analiz sistemi kullanıldı. Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki FEI QUANTA 250 FEG taramalı elektron mikroskobu kullanılarak numunelerin mikroyapıları analiz edildi. SEM'in yanı sıra, numune mikroyapısını kimyasal bileşimini analiz etmek için EDS analizi yapıldı. Ayrıca mikroyapıdaki faz oluşumunu incelemek için X-ray prosedürü gerçekleştirildi. Bu amaçla, yine aynı laboratuvarda bulunan Bruker D8 Advance model XRD cihazı kullanıldı. Mikroyapının görüntülenmesi ve faz analizi için kullanılan cihazlar Fotoğraf 7.7'de gösterilmiştir.

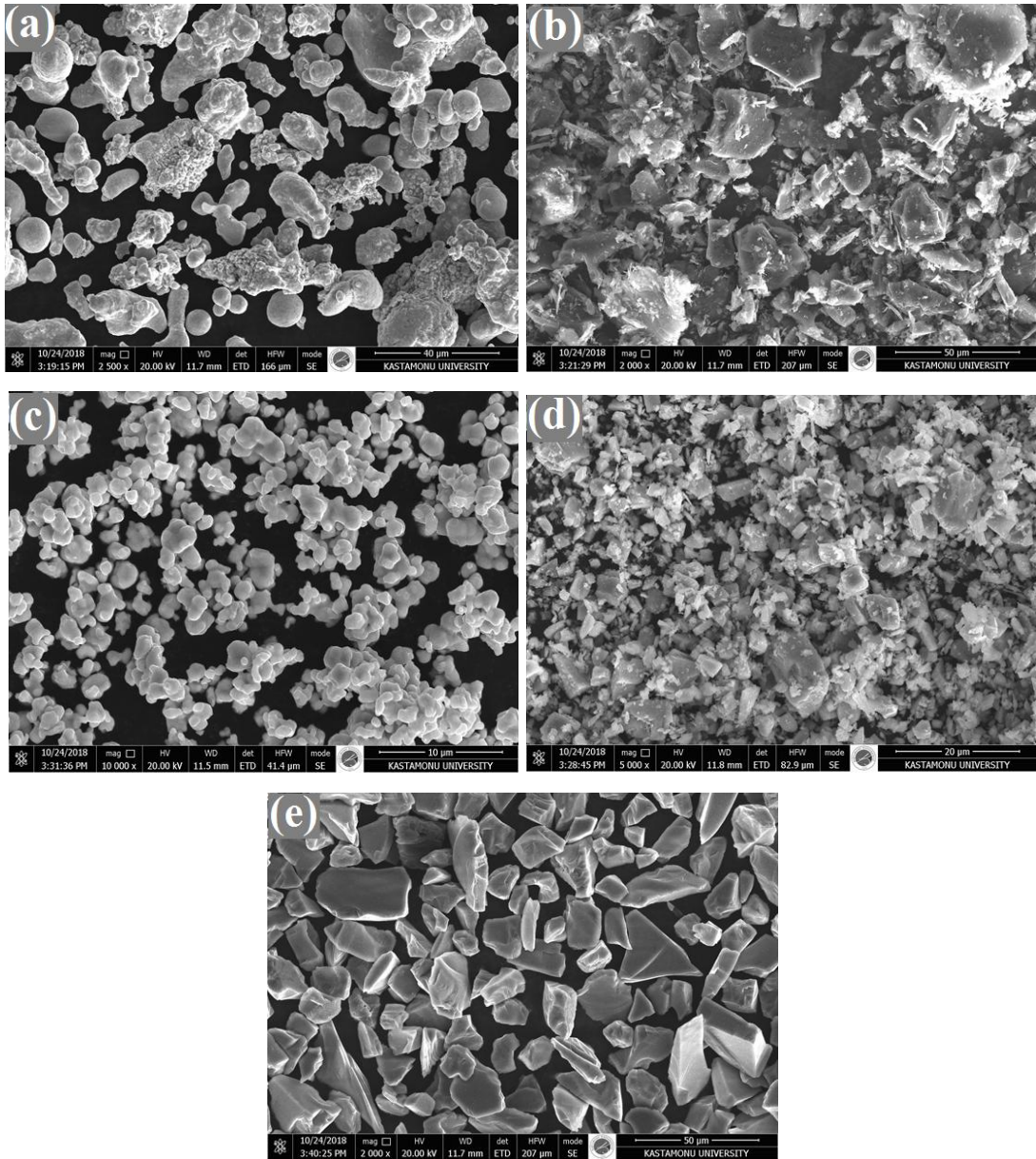


Fotoğraf 7.7. Görüntüleme ve faz analizi tespitinde kullanılan cihazlar: (a) Optik mikroskop, (b) SEM ve (c) XRD

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

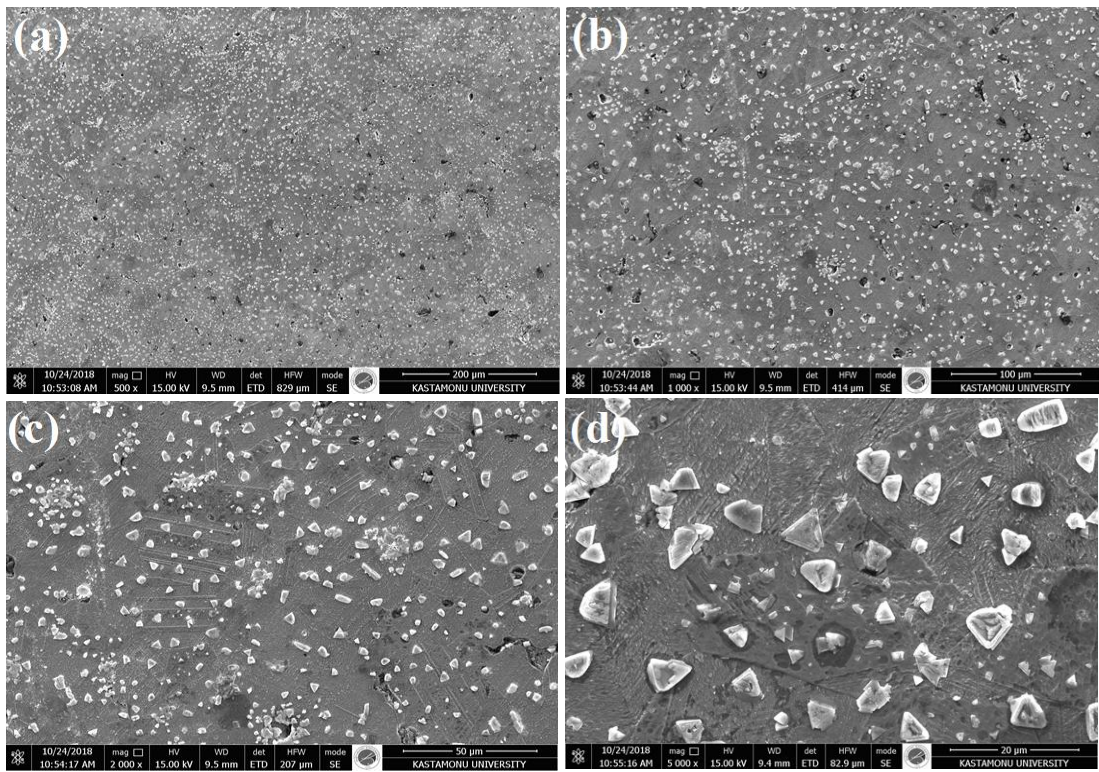
8.1. Mikroyapı Sonuçları

Fotoğraf 8.1'de fonksiyonel derecelendirilmiş bronz matrisli seramik katkılı kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri verilmiştir. Bronz tozlar, farklı boyutlarda küresel ve yuvarlak morfolojiye sahiptir. Bor karbür ve silisyum karbür tozları, keskin açısallık morfolojiye sahiptir; molibden karbür ve titanyum karbür tozları ise kümelenmiş morfolojiye sahiptir

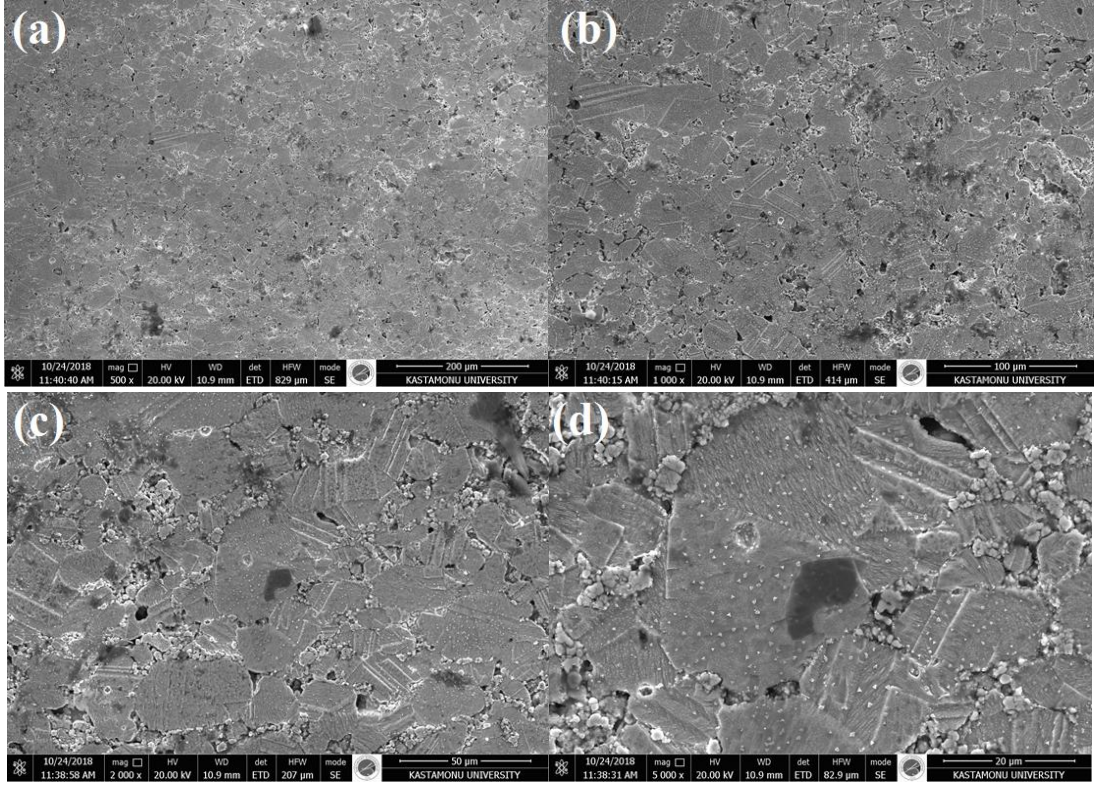


Fotoğraf 8.1. Tozların SEM görüntüleri:(a) CuSn, (b) B₄C, (c) Mo₂C, (d) TiC ve (e) SiC

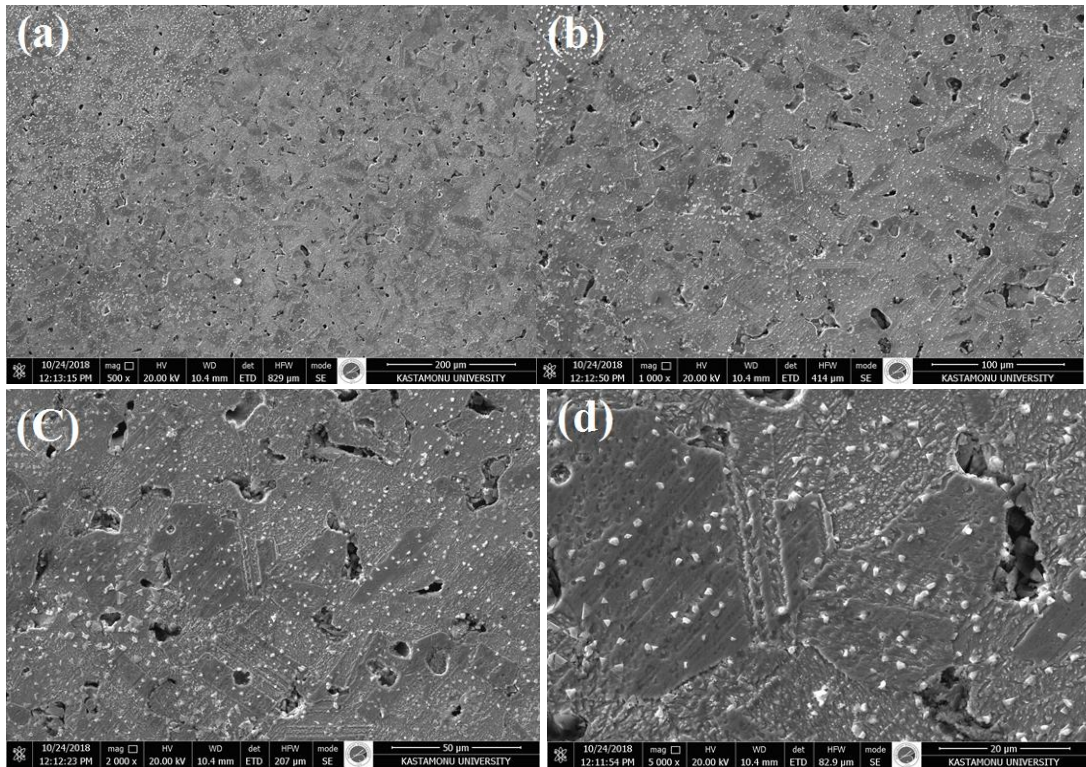
Fotoğraf 8.2, Fotoğraf 8.3, Fotoğraf 8.4 ve Fotoğraf 8.5'te bor karbür, molibden karbür, titanyum karbür ve silisyum karbür takviyeli bronz matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinde, takviye seramik parçacıkların homojen bir şekilde dağıldığı ve tüm kompozitlerdeki mikroyapıların genellikle benzer olduğu açıkça görülmektedir. Seramik takviye tozlarının bronz matris içindeki tekdüzen dağılımı, ortaya çıkan kompozitlerin mekanik özellikleri ile yoğunluklarının iyileştirilmesini sağlamaktadır.



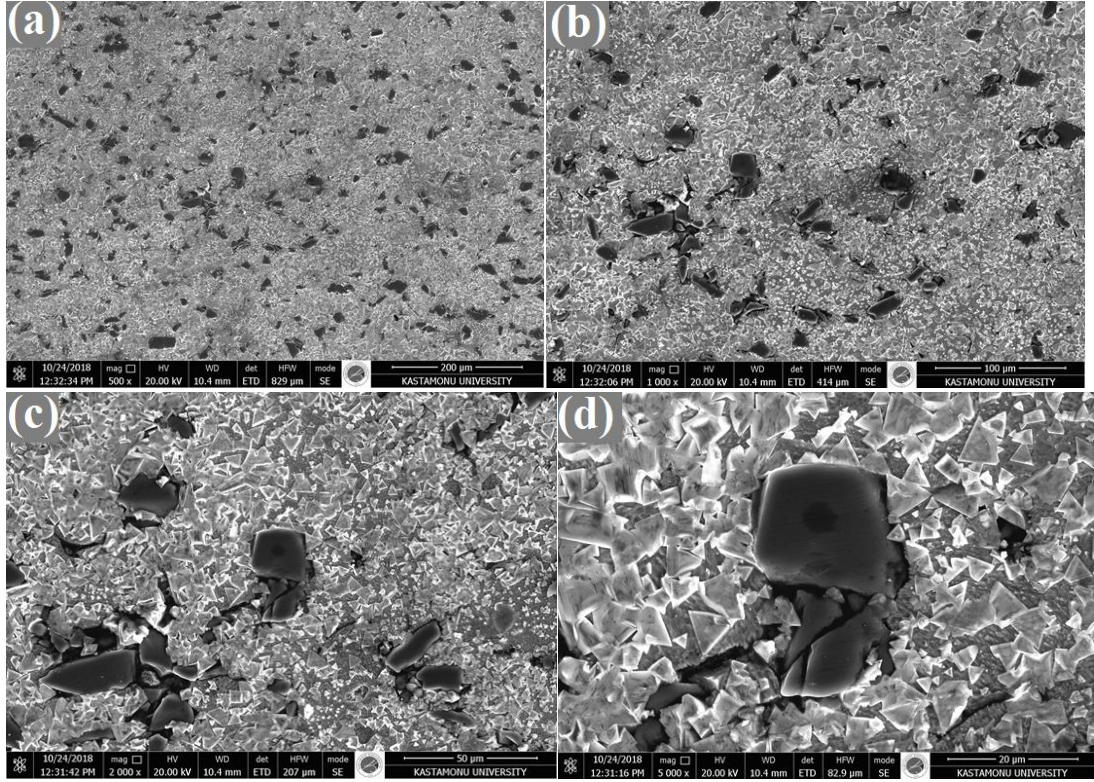
Fotoğraf 8.2. B₄C takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X, ve (D) 5000X



Fotoğraf 8.3. Mo₂C takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X



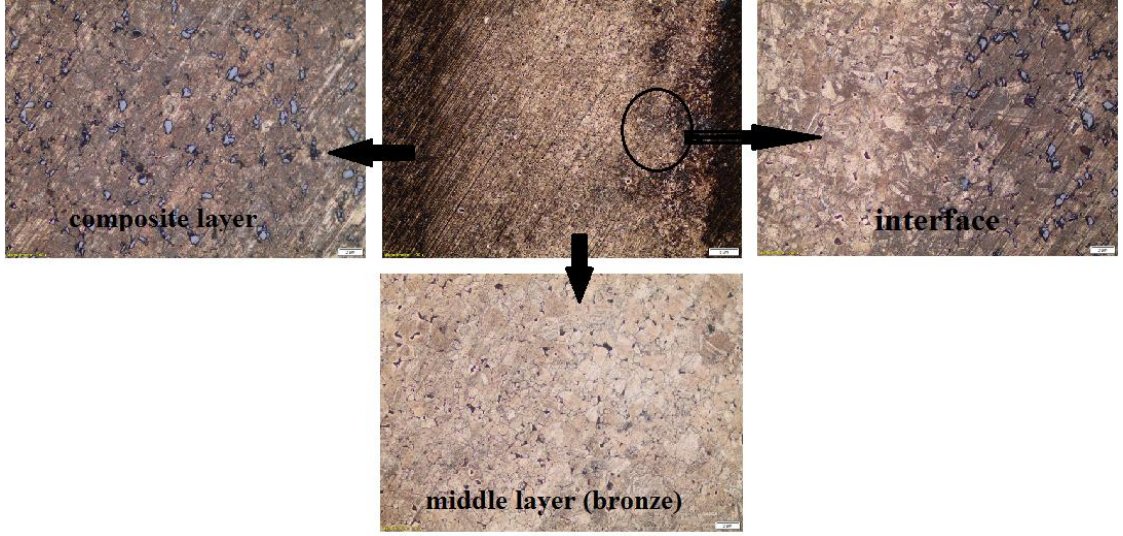
Fotoğraf 8.4. TiC takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X



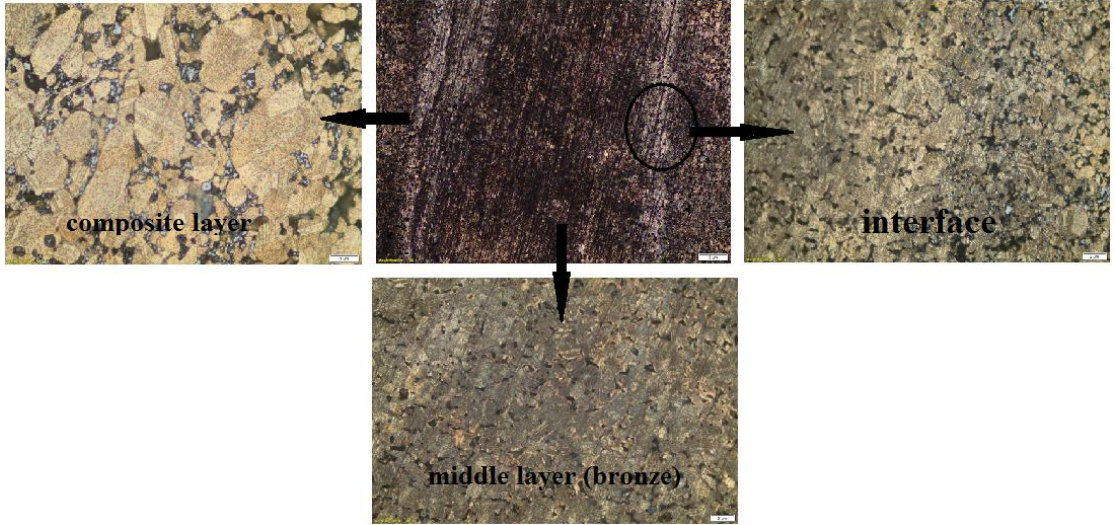
Fotoğraf 8.5. SiC takviyeli bronz matrisli FDM'nin SEM görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X, (c) 2000X ve (D) 5000X

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen FDM malzemelerinin optik mikroskop görüntüleri Fotoğraf 8.6, Fotoğraf 8.7, Fotoğraf 8.8 ve Fotoğraf 8.9'da verilmiştir. Fotoğraf 8.6, bor karbür takviyeli FDM'leri; Fotoğraf 8.7 molibden karbür takviyeli FDM'leri; Fotoğraf 8.8 titanyum karbür takviyeli FDM'leri ve Fotoğraf 8.9 silisyum karbür takviyeli FDM'leri göstermektedir. Bu fotoğraflarda üç (kompozit-ara bölge-kompozit) tabaka ve bu bölgelerin büyütülmüş fotoğrafları ve arayüzey parçaları ayrıntılı olarak görülmektedir. Kompozit tabakalar ve orta bölümler açık bir şekilde ayırt edilmektedir.

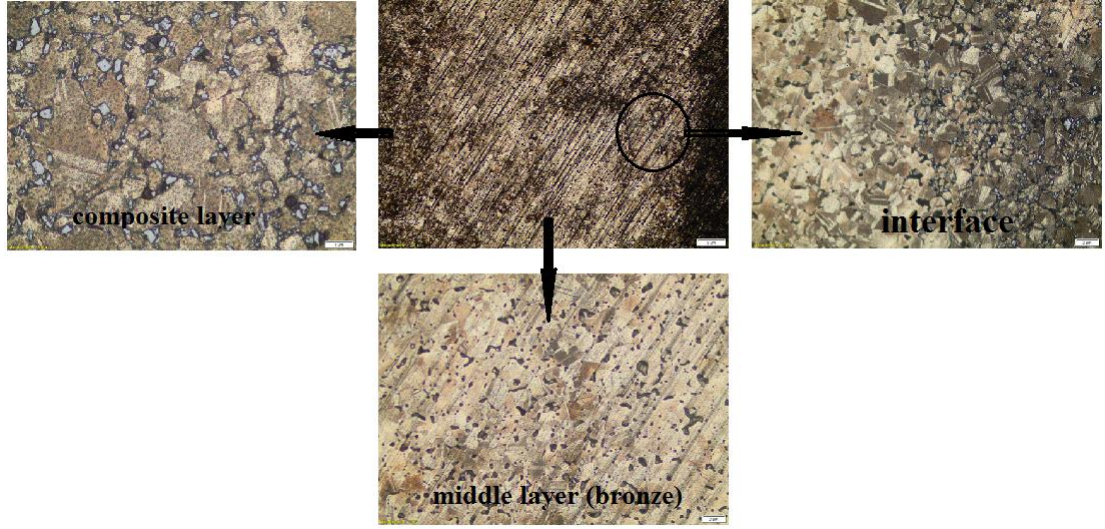
B_4C , Mo_2C , TiC ve SiC taneleri bronz matris içinde benzer şekilde ve oldukça homojen olarak dağılmıştır. Bu seramik parçacıkları, bronz tanelerin bulunduğu bölgelerde bulunmaktadır. Ara yüzeylerde kırılma ve çatlak oluşumu söz konusu değildir. FDM'lerde gözenek oluşumu gözlenmiştir.



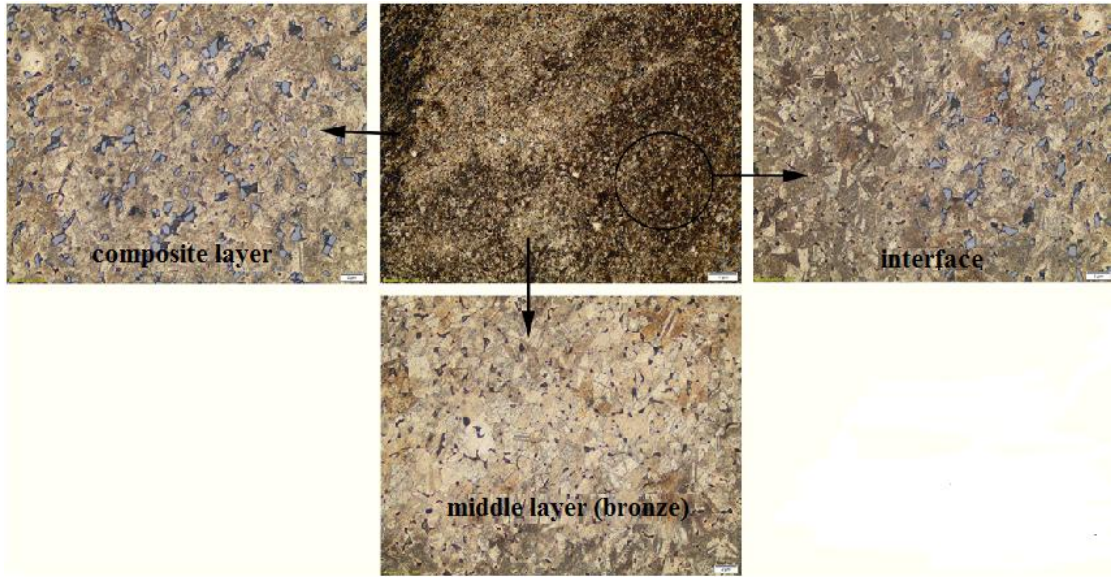
Fotoğraf 8.6. B₄C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri



Fotoğraf 8.7. Mo₂C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri

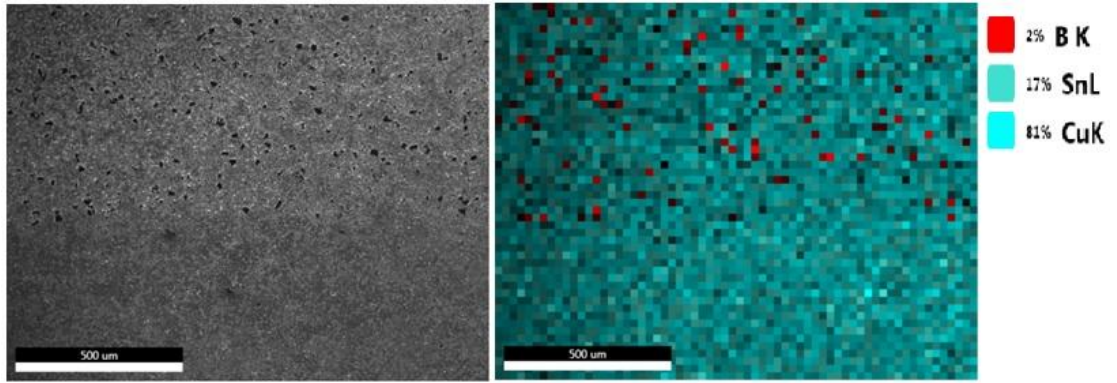


Fotoğraf 8.8. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri

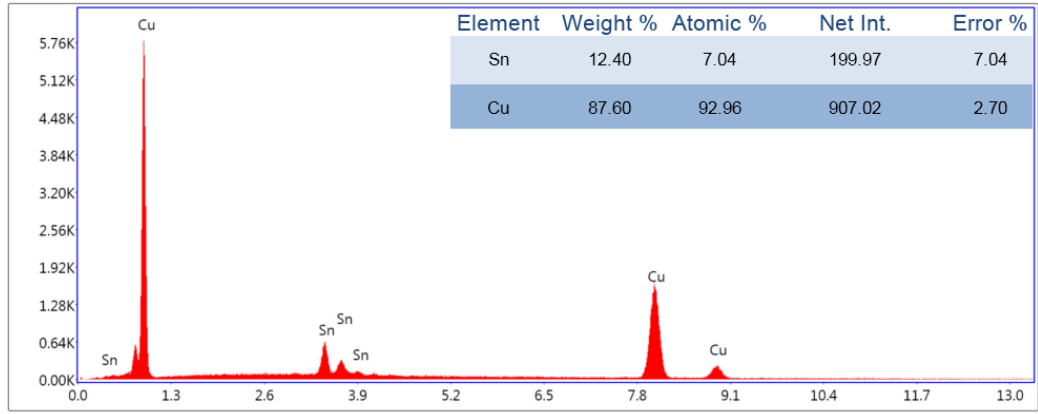
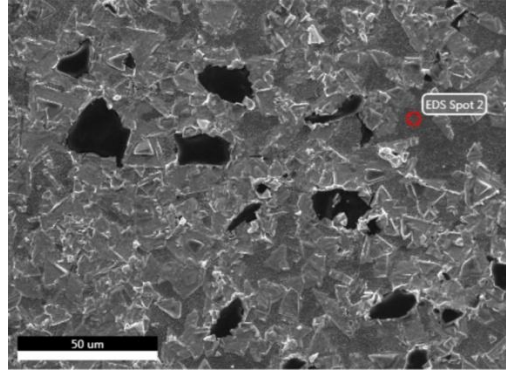


Fotoğraf 8.9. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin optik mikroskop görüntüleri

Fotoğraf 8.10 ila Fotoğraf 8.13 aralığındaki fotoğraflar ve Grafik 8.1 ila Grafik 8.8 aralığındaki grafiklerde gösterildiği üzere matrisler ve takviyelerde farklı noktalar seçildikten sonra fonksiyonel derecelendirilmiş bronz matrisli seramik takviyeli kompozit malzeme numunelerin matris ve takviyeleri, EDS (Enerji Dağılımlı Spektrometre) yöntemi kullanılarak analiz edilmiş olup kimyasal bileşimleri belirlenerek teyit edilmiştir. FDM malzemelerinin temel elementi Cu ve Sn'dir. Diğer elementler ise B, Mo, Ti, Si ve C'dir. Bu analizden bor karbür, molibden karbür, titanyum karbür ve silisyum karbür tanelerinin homojen dağılım gösterdikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca EDS analizi, kompozit tabakalarda bulunan seramik mikroparçacıklarda aglomerasyon olmadığını göstermiştir. Malzemelerdeki elementlerin homojen dağılımı, malzemenin fiziki, kimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

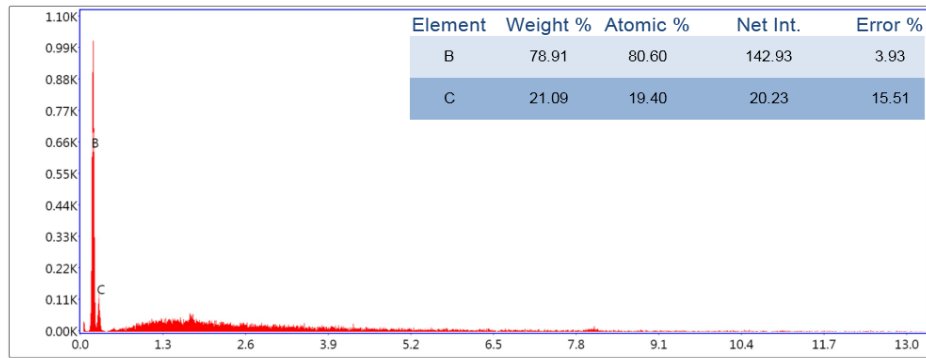
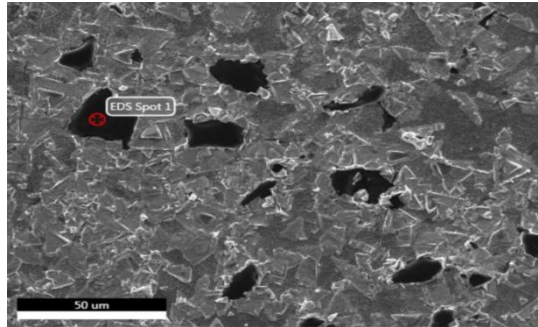


Fotoğraf 8.10. B₄C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi



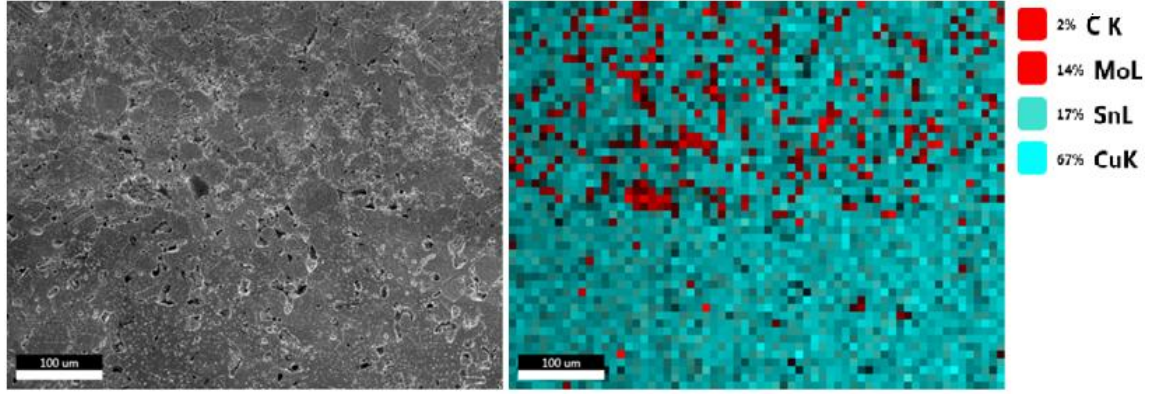
Lsec: 26.9 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

Grafik 8.1. B₄C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi

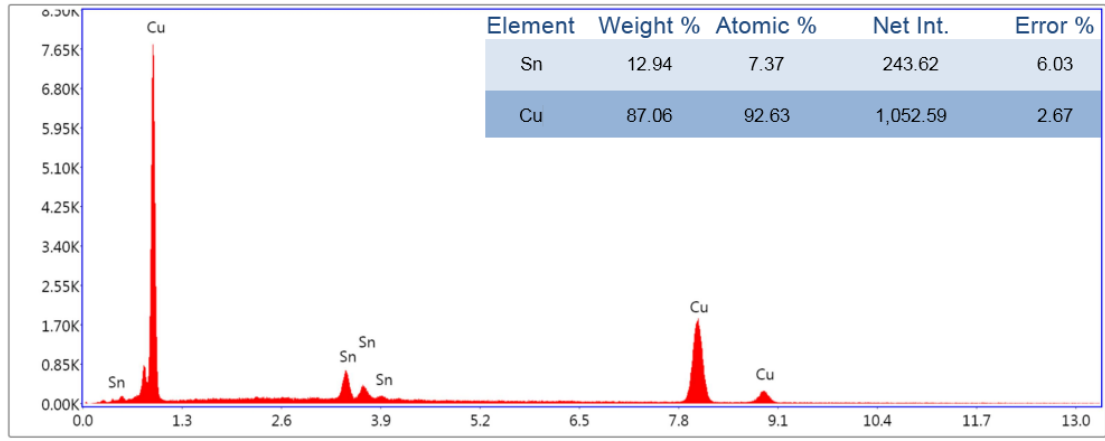
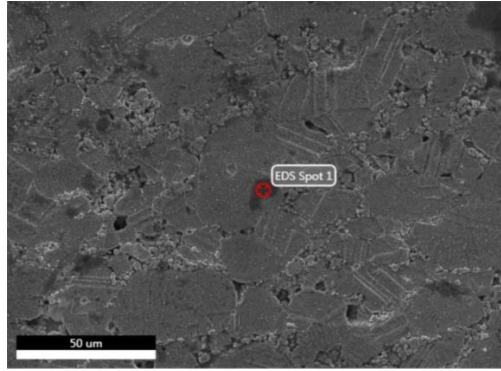


Lsec: 27.4 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

Grafik 8.2. B₄C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS analizi

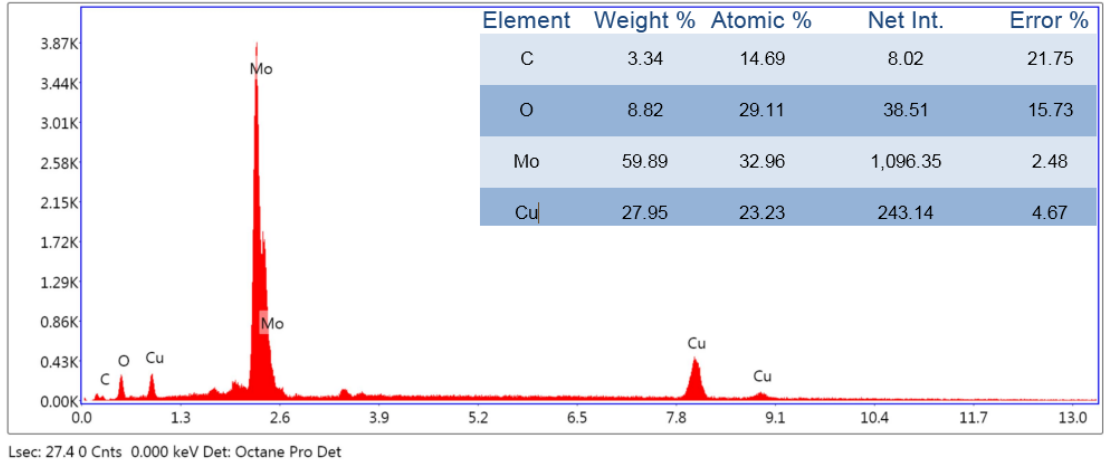
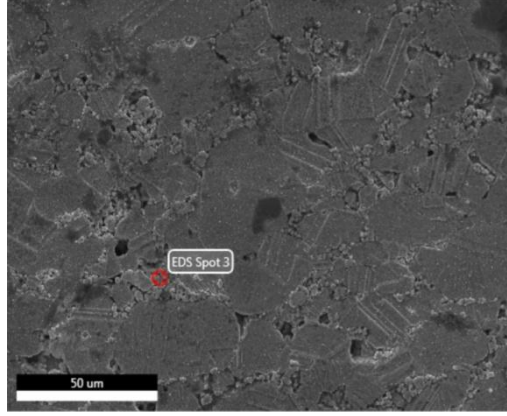


Fotoğraf 8.11. Mo₂C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi

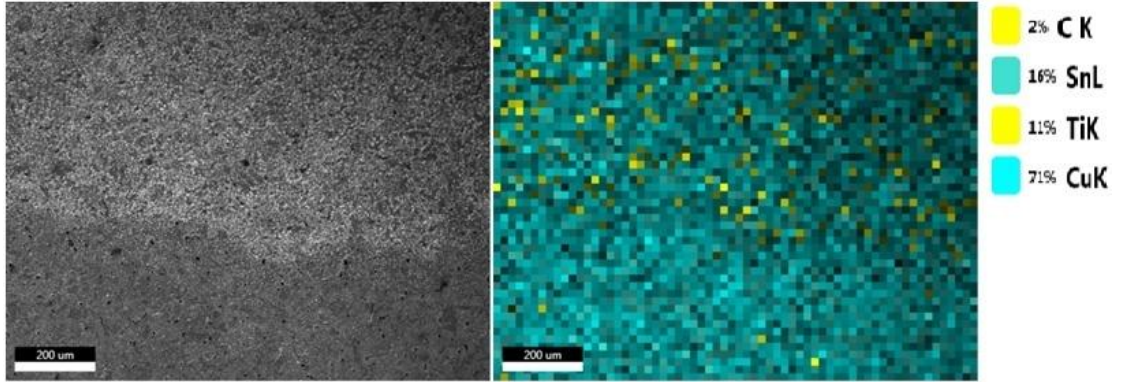


Lsec: 26.3 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

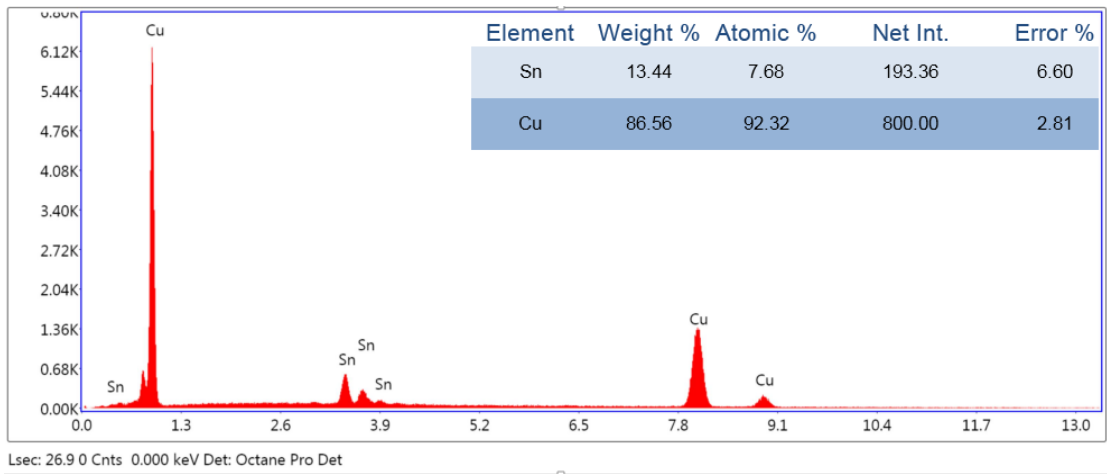
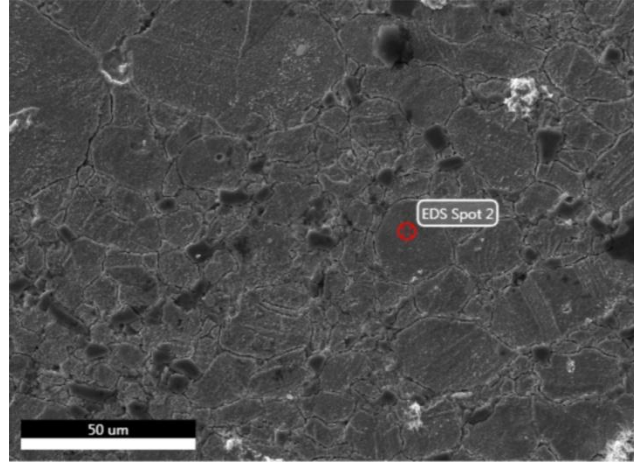
Grafik 8.3. Mo₂C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS analizi



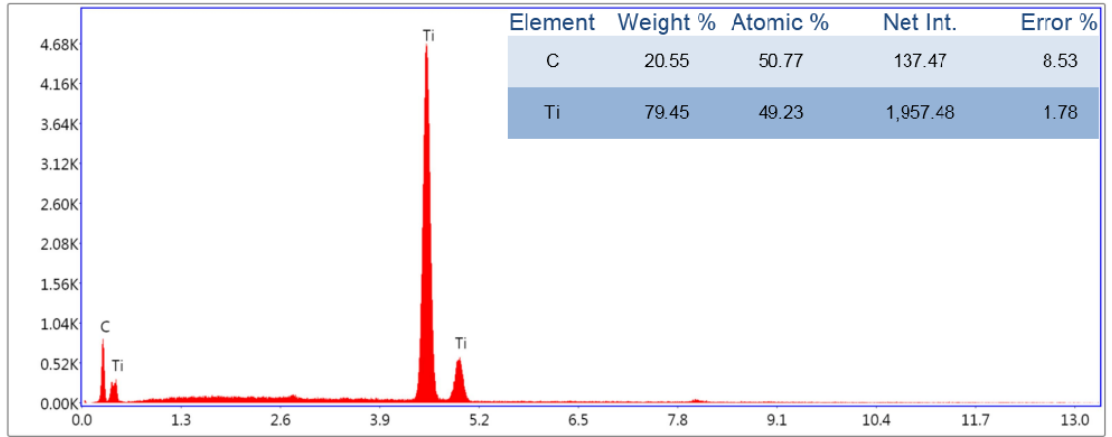
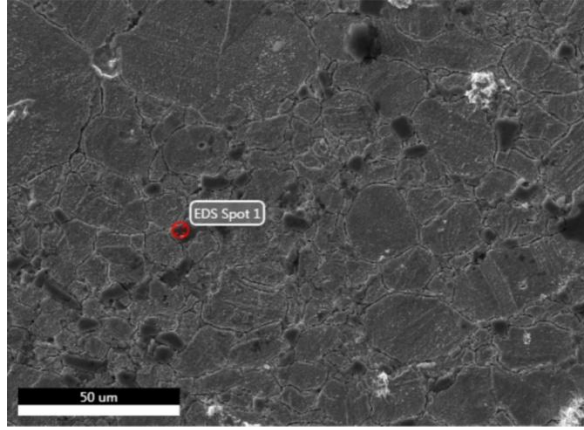
Grafik 8.4. Mo₂C takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS Analizi



Fotoğraf 8.12. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi

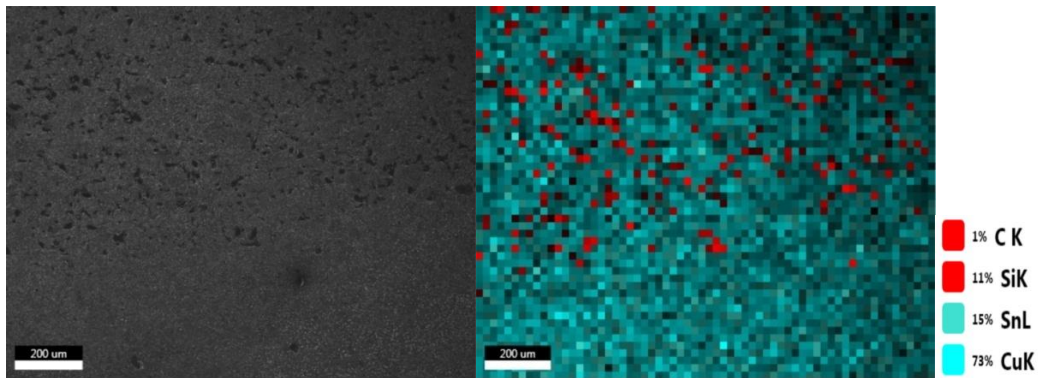


Grafik 8.5. TiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS Analizi

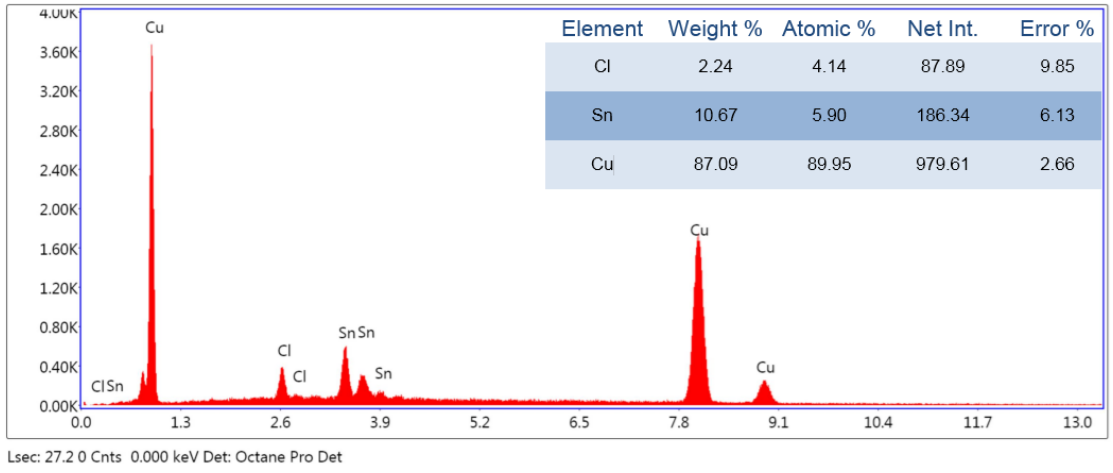
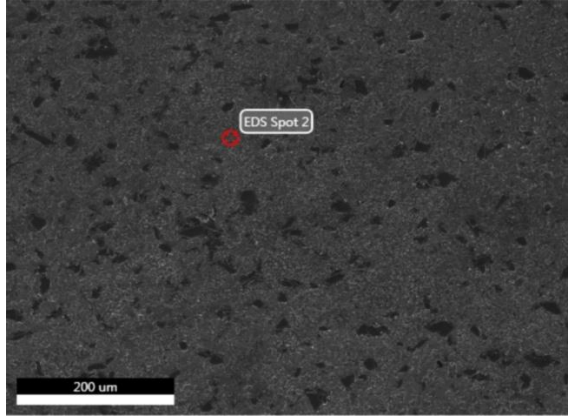


Lsec: 27.7 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

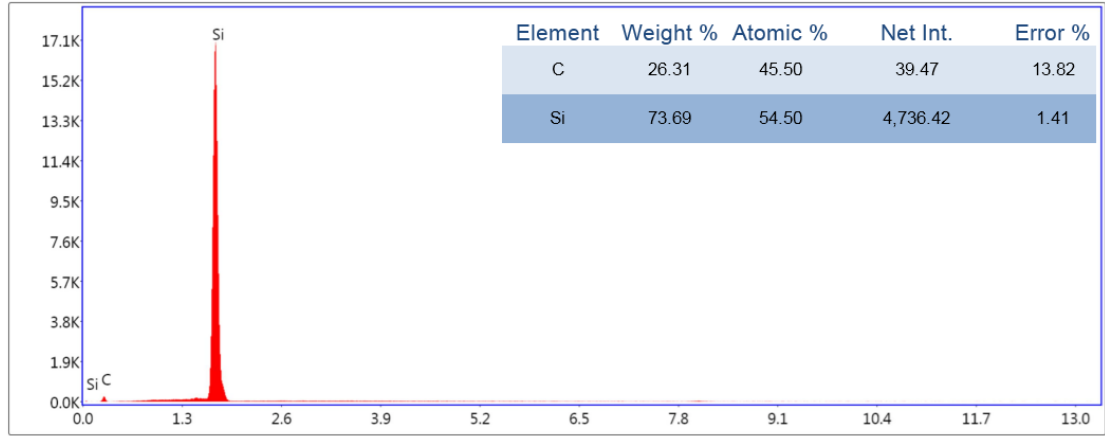
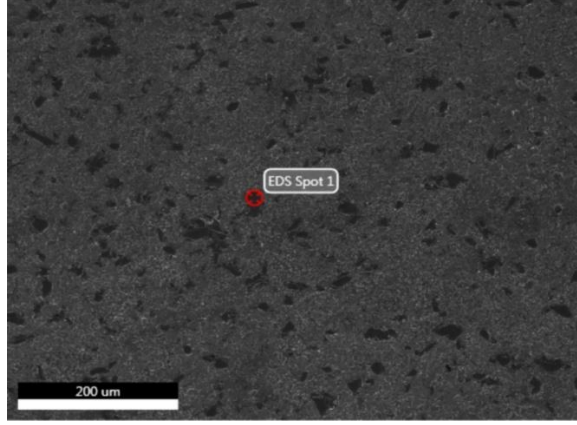
Grafik 8.6. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS Analizi



Fotoğraf 8.13. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitin EDS analizi



Grafik 8.7. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki matrisin EDS Analizi



Grafik 8.8. SiC takviyeli bronz matrisli FDM kompozitteki takviyenin EDS Analizi

8.2. XRD Sonuçları

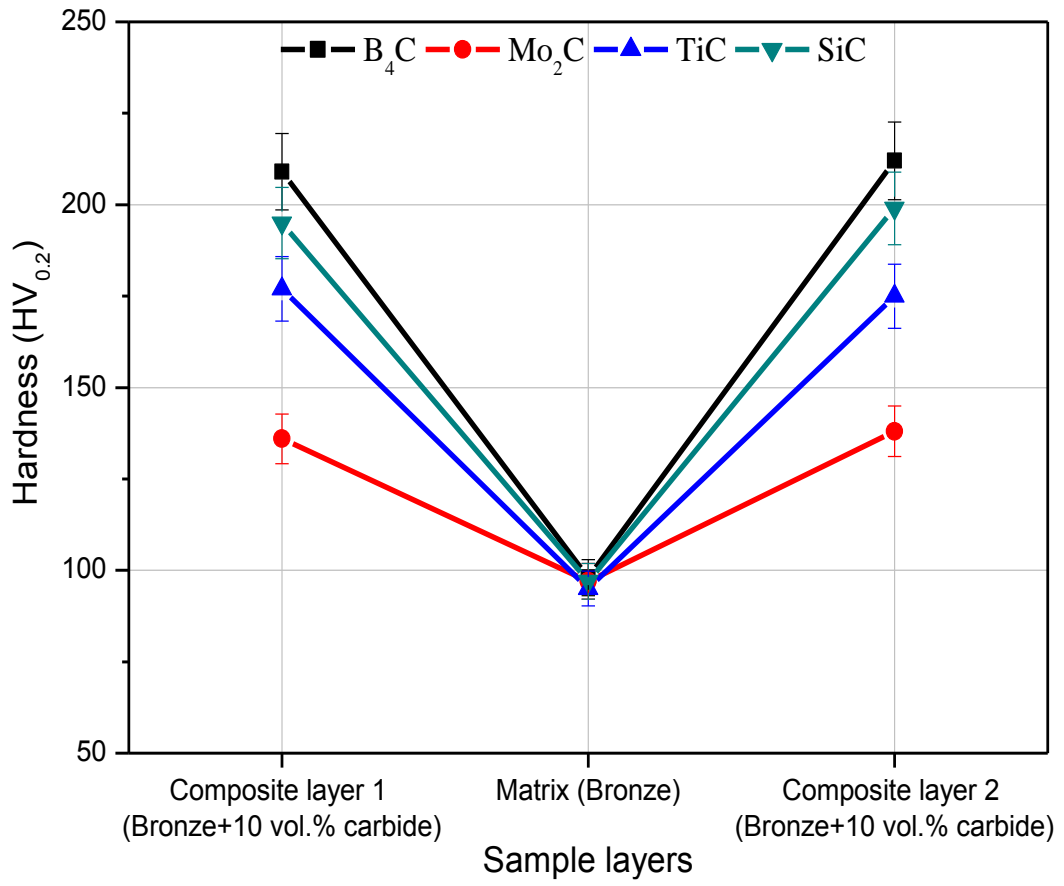
Bir fazın arayüzeyde matris ve karbür parçacıklarını bağlayıp bağlamayacağını belirlemek için her bir FDM kompozit XRD analizi yapıldı. Bronz matrisli karbür takviyeli FDM kompozitlerin XRD grafikleri, Şekil 8.9'da gösterilmiştir. XRD ölçümleri, üç tabakayı (kompozit tabaka- matrisli tabaka- kompozit tabaka) kapsayan bölümden alınmıştır. Karbür parçacıkları ve matris arasında metallerarası bileşik oluşmamıştır. Bu durum, matris ve karbür arasındaki kimyasal tepkimeden kaynaklanmaktadır. Bronz matriste, XRD grafiklerinden de görüleceği üzere α -Cu ve Cu_3Sn fazları oluşmuştur. Bu durum Grafik 8.10'da verilen Cu-Sn faz diyagramı ile desteklenmektedir. Ayrıca karbür fazlar XRD grafiklerinde açıkça görülmektedir.

8.3. Sertlik Sonuçları

Bor karbür, molibden karbür, titanyum karbür ve silisyum karbür takviyeli bronz matrisli FDM kompozitlerin sertlik grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Orta tabakanın sertliği 95 HV_{0.2} civarındayken, kompozit tabakaların sertliği Mo₂C için 130 HV_{0.2} ve B₄C için 210 HV_{0.2} aralığındadır. Kompozit tabakalar, orta tabakayla kıyaslandığında en yüksek sertliğe sahiptir. Bu artış oranı, Mo₂C takviyesinde %35; SiC takviyesinde %100; TiC takviyesinde %75 ve B₄C takviyesinde yaklaşık %121 civarındadır. Sertlik artışına neden olan çeşitli faktörler mevcuttur. Bu faktörler kompozit elemanların sertliği, ayrık sertleştirme etkisi ve karışım kuralına bağlı olarak sert parçacıkların yer değiştirme hareketi üzerindeki etkisi olarak sıralanabilir.

Tablo 8.1: FDM'nin Sertlik Değerleri

Numuneler	Sertlik (HV _{0.2})		
	Kompozit tabaka 1	Takviyesiz tabaka	Kompozit tabaka2
Bronz + %10 B ₄ C (hcm)	209	98	212
Bronz + %10 Mo ₂ C (hcm)	136	97	138
Bronz + %10 TiC (hcm)	177	95	175
Bronz + %10 SiC (hm)	195	97	199



Grafik 8.11. Sertlik Testi Sonuçları

9. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen bronz matrisli B₄C, Mo₂C, TiC ve SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin mikroyapısı ve sertlik özellikleri ayrıntılı ve deneysel olarak incelenmiştir.

- Bronz matrisli B₄C, Mo₂C, TiC ve SiC takviyeli FDM kompozitler, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretildi.
- Hem optik fotoğraflara hem de SEM-MAP analizlerine göre seramik parçacıkların kompozit tabakaları homojen dağılım göstermiştir. Mikroyapılar, genel olarak tüm kompozitlerde benzerdir. Takviye parçacıkları, matrisin temas noktalarında yer almakta ve kısmen matrise gömülü haldedir.
- Uygun tozun 20 rpm hızda 45 dakika karıştırılması sayesinde seramik takviye tozları bronz matris içinde homojen olarak dağılmıştır. Bu durum da, elde edilen kompozitlerin mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir.
- Fonksiyonel derecelendirilmiş bronz matrisli seramik takviyeli kompozit malzemelerin sertliği, takviyelerle birlikte artış göstermiştir. Matrisin sertliği 95 HV_{0,2} civarındayken, en yüksek sertlik 212 HV_{0,2} değeriyle CuSn-%10B₄C kompozitinde ölçülmüştür. Diğer seramik kompozitlerin sertliği 136 ila 199 HV_{0,2} aralığında değişmektedir. Sertlik, matristeki takviye parçacıklarının oluşturduğu dağılım direnci etkisiyle ve/veya ayrık sertleşmenin engellenmesiyle artmıştır.
- Sinterleme sıcaklığı (750°C) ve sinterleme süresi (90 dakika), fonksiyonel derecelendirilmiş bronz matrisli seramik takviyeli kompozit malzemelerin mikro yapıları ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından uygundu.
- Mikroyapıda çok az gözenek oluşumu gözlemlendi.

10. ÖNERİLER

Bu çalışmanın neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Aşınma ve korozyon dayanımı, numuneler üzerinde aşınma ve korozyon testi yapılarak incelenebilir.
- Sinterleme sıcaklığının bazı özellikler üzerindeki etkisini belirlemek için numunelere farklı sinterleme sıcaklıkları uygulanabilir.
- Yeni FDM kompozitler üretmek için hibrit kompozit tabakalar tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

- Alaneme, K. K., & Bodunrin, M. O. (2011). Corrosion behavior of alumina reinforced aluminium (6063) metal matrix composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(12), 1153.
- Ali, M., Suppiah, B., & Muayaduldeen, Z. (2016). Preparation and Corrosion Behavior of Bronze-40% w Composite. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 10(2), 141-147.
- Bannan, J., Temple, R. I., & Jones, R. (2003). In situ fabrication of titanium carbide reinforced copper MMC. *Materials science and technology*, 19(8), 1148-1150.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- Chen, Y., Zhang, H., Zhang, J., Ma, J., Ye, H., Qian, G., & Zhong, S. (2011). Facile synthesis and thermal stability of nanocrystalline molybdenum carbide. *Materials Sciences and Applications*, 2(09), 1313.
- Chumanov, I. V., Anikeev, A. N., & Chumanov, V. I. (2015). Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure. *Procedia engineering*, 129, 816-820.
- Cui, G., Bi, Q., Zhu, S., Fu, L., Yang, J., Qiao, Z., & Liu, W. (2013). Synergistic effect of alumina and graphite on bronze matrix composites: tribological behaviors in sea water. *Wear*, 303(1-2), 216-224.
- Dantas, S. L., Lopes-Moriyama, A. L., & Souza, C. P. (2018). Synthesis and characterization of molybdenum carbide doped with nickel. *Materials Chemistry and Physics*, 216, 243-249.
- Gasik, M. M. (1998). Micromechanical modelling of functionally graded materials. *Computational Materials Science*, 13(1-3), 42-55.
- Gou, H. P., Zhang, G. H., & Chou, K. C. (2017). Preparation of Titanium Carbide Powder from Ilmenite Concentrate. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 23(1).
- Gupta, A., & Talha, M. (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 1-14.
- Hon, D., & Shiraishi (2001). *Wood and cellulose chemistry*, 2nd ed. (New York: Marcel Dekker).

- İpek, H., Cuvalci, H., & Celebi, C. (2017). Tribological properties of boron carbide reinforced copper based composites. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(1), 102-107.
- Kato, K., Kurimoto, M., Shumiya, H., Adachi, H., Sakuma, S., & Okubo, H. (2006). Application of functionally graded material for solid insulator in gaseous insulation system. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13(2), 362-372.
- Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1-2), 146-156.
- Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1-2), 203-210.
- Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1-2), 81-106.
- Kok, M. (2005). Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3), 381-387.
- Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. (2012). Functionally graded material: an overview.
- Miyamoto, Y. (1996). The applications of functionally graded materials in Japan. *Materials Technology*, 11(6), 230-236.
- Miyamoto, Y., Kaysser, W. A., Rabin, B. H., Kawasaki, A., & Ford, R. G. (Eds.). (2013). *Functionally graded materials: design, processing and applications* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Moore, S. (1993). New materials set endurance records. *Chemical Engineering*, 100(5), 39.
- Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*, 5, 223-245.
- Pierson, H. O. (1996). *Handbook of Refractory Carbides & Nitrides: Properties, Characteristics, Processing and Apps*. William Andrew.
- Radhika, N., Thirumalini, S., & Shivashankar, A. (2018). Investigation on mechanical and adhesive wear behavior of centrifugally cast functionally graded copper/SiC metal matrix composite. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(6), 1311-1322.
- Rhee, R. S. (2007). *Multi-scale modeling of functionally graded materials (FGMs) using finite element methods*. University of Southern California.

- Rodríguez-Lorenzo, L. M., & Ferreira, J. M. F. (2004). Development of porous ceramic bodies for applications in tissue engineering and drug delivery systems. *Materials research bulletin*, 39(1), 83-91.
- Ryan K.R., et al., (2002). Tool Material Manufacturing. *Engineering Materials Production Reviews*, 2, 58-60.
- Saunders, N., Miodownik, A. P., 1990, Bull. Alloy Phase Diagrams, vol.11, pp. 278-87.
- Sharma, S. C., Satish, B. M., Girish, B. M., & Somashekar, D. R. (2001). Wear characteristics of phosphor-bronze/silicon carbide particulate composites. *Journal of materials processing technology*, 118(1-3), 65-68.
- Shumiya, H., Kato, K., & Okubo, H. (2004, October). Feasibility study on FGM (functionally graded materials) application for gas insulated equipment [solid insulators]. In *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*. (pp. 360-363). IEEE.
- Sobczak, J. J., & Drenchev, L. (2013). Metallic functionally graded materials: a specific class of advanced composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(4), 297-316.
- Suk, M. J., Choi, S. I., Kim, J. S., Do Kim, Y., & Kwon, Y. S. (2003). Fabrication of a porous material with a porosity gradient by a pulsed electric current sintering process. *Metals and Materials International*, 9(6), 599-603.
- Tampieri, A., Celotti, G., Sprio, S., Delcogliano, A., & Franzese, S. (2001). Porosity-graded hydroxyapatite ceramics to replace natural bone. *Biomaterials*, 22(11), 1365-1370.
- Thieme, M., Wieters, K. P., Bergner, F., Scharnweber, D., Worch, H., Ndop, J., & Grill, W. (2001). Titanium powder sintering for preparation of a porous functionally graded material destined for orthopaedic implants. *Journal of materials science: materials in medicine*, 12(3), 225-231.
- Thorp, R. L. (2006). *China in the early Bronze Age: Shang civilization*. University of Pennsylvania Press.
- Tjong, S. C. (2014). Processing and deformation characteristics of metals reinforced with ceramic nanoparticles. In *Nanocrystalline Materials* (pp. 269-304). Elsevier.
- Toudehdeghan, A., Lim, J. W., Foo, K. E., Ma'arof, M. I. N., & Mathews, J. (2017). A brief review of functionally graded materials. In *MATEC Web Conferences* (Vol. 131). EDP Sciences.
- Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). Functionally graded composite materials: an overview. *Procedia Materials Science*, 5, 1291-1299.

- Uysal, M., Karslıoğlu, R., Akbulut, H., & Alp, A. (2013). Characteristics Bronze/Al₂O₃ (Ni) Reinforcement Metal Matrix Composite Produced by Current Activated Sintering. *Acta Physica Polonica, A.*, 123(2).
- Watanabe, Y. (2000). Microstructures and mechanical properties of functionally graded materials fabricated by a centrifugal method. *Rec. Res. Devel. Metal. Mater. Sci.*, 4, 51-93.
- Watanabe, Y., Yamanaka, N., & Fukui, Y. (1998). Control of composition gradient in a metal-ceramic functionally graded material manufactured by the centrifugal method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5-6), 595-601.
- Xie, Y.-B., Hou, Y.-G., Li, W.-F., Huang, Q.-F., & Ding, Z.-J. (2017). Effect of Sintering Temperature on Properties and Microstructure of Ceramic/Bronze Composite Bond. *Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals*, 46(8), 1511–1516.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aimen. M. ABUSHRAIDA
Doğum Yeri ve Yılı : Libya 1985
Medeni Hali : Bekar
Cinsiyet : Erkek
Yabancı Dili : İngilizce
E-mail : aimen2040@yahoo.com



Eğitim Durumu

Lisans : Bachelor degree of Engineering Sciences, Department of Materials & Metal Engineering, Faculty of Engineering, Tripoli University.
Lise : Damascus District High School