



**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ Al_2O_3 MATRİSLİ ZrO_2 TAKVİYELİ
MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Ali Erman MUT

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali Erman MUT

22/04/2025

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ Al_2O_3 MATRİSLİ ZrO_2 TAKVİYELİ MALZEMELERİN
ÜRETİMİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Ali Erman MUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)'ler sınırsız sayıda varyasyon ile üretilebilen, seramiklerin, metallerin ya da seramik-metal malzemelerin karışımından elde edilmiş kompozit malzemeler olup malzeme yapısındaki çeşitliğin yanında yaygın kullanım alanlarına da sahiptir. FDM'nin birçok üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi (TM), metal veya seramik tozların mekanik ve ısı etkileriyle birleştirilerek tek parça haline getirilmesi işlemidir. Bu çalışmada iki seramik malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin sağladığı avantajların bir araya getirilerek FDM ile üretilebilirliği ve mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede Zirkonya (ZrO_2) ve Alümina (Al_2O_3) seramik malzemeler kullanılarak TM yöntemi ile FDM malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça farklı oranlarda bulunan seramik tozları belirlenen oranlarda her katman için birer saat mekanik karıştırıcı cihazında karıştırılmış daha sonra soğuk presleme ile numune haline getirilmiştir. Numunedeki çatlakların en aza indirildiği basınç değeri belirlendikten sonra numunedeki çatlakların tamamen giderilebilmesi için farklı oranlarda bağlayıcı kullanılmasına karar verilmiştir. Karışım halindeki seramik tozları eritilen bağlayıcı ile karıştırılarak ayrı ayrı katmanlar oluşturulmuştur. Bağlayıcı miktarı hem malzeme yapısını bozmayacak hem de çatlakları giderecek oranda belirlenmiştir. Belirlenen bağlayıcı oranında herhangi bir değişiklik yapılmadan, malzeme ZrO_2 ağırlık oranı azaltılarak Al_2O_3 matrisli FDM elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen numune ön sinterleme ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda ZrO_2 ve Al_2O_3 seramik tozlarının 500MPa basınçta soğuk preslenmesine karar verilmiştir. Bağlayıcı oranı %9 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcının uzaklaştırılması için ön sinterleme yapılmıştır. Ön sinterleme sıcaklığı 500°C'de, bekleme süresi ise yarım saat olarak belirlenmiştir. Daha sonra sıcaklık 1300°C'ye kadar artırılarak en optimal sinterleme süresini belirlemek için numune 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerince sinterlenmiştir. Bu çalışmada, Al_2O_3 ve ZrO_2 malzemeler FDM yöntemiyle bir araya getirilerek çeşitli özellikleri ve etkileri incelenmiştir. Elde edilen numunelere makroyapı analizi, XRD analizi, SEM ve EDS analizleri, sertlik analizi ve üç nokta eğme analizleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda optimal sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması alümina ve zirkonya arasındaki etkileşime odaklanarak, FDM'nin kapsamlı bir araştırmasını ortaya koymuştur.

Bilim Kodu : 91528
Anahtar Kelimeler : Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), toz metalurjisi, seramik malzemeler, zirkonya (ZrO_2), alümina (Al_2O_3)
Sayfa Adedi : 91
Danışman : Prof. Dr. Hakan ATEŞ

FABRICATION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR
FUNCTIONALLY GRADED Al_2O_3 MATRIX ZrO_2 REINFORCED MATERIALS
PRODUCED BY POWDER METALLURGY

(M. Sc. Thesis)

Ali Erman MUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Functional Graded Materials (FGMs) are composite materials made of ceramics, metals or ceramic-metal materials that can be produced with an unlimited number of variations and have a wide range of applications as well as diversity in material structure. Powder metallurgy (PM), one of the many production methods of FDM, is the process of combining metal or ceramic powders into a single piece by mechanical and thermal effects. In this study, it is aimed to combine the advantages of the physical and chemical properties of two ceramic materials and to investigate their mechanical behavior and manufacturability with FDM. In this framework, FDM material production was realized by TM method using Zirconia (ZrO_2) and Alumina (Al_2O_3) ceramic materials. Ceramic powders in different ratios by weight were mixed in a mechanical mixer device for one hour for each layer at the determined ratios and then turned into samples by cold pressing. After determining the pressure value at which the cracks in the sample were minimized, it was decided to use binder (paraffin wax) in arched proportions to completely eliminate the cracks in the sample. The mixed ceramic powders were mixed with the melted binder to form separate layers. The amount of binder was determined at a rate that would not disrupt the material structure and eliminate cracks. FDM with Al_2O_3 matrix was obtained by reducing the ZrO_2 weight ratio of the material without any change in the determined binder ratio. Then, the sample obtained was subjected to pre-sintering and sintering process. As a result of the experiments and examinations, it was decided to cold press ZrO_2 and Al_2O_3 ceramic powders at 500MPa pressure. The binder ratio was determined as 9%. Pre-sintering was performed to remove the binder. The pre-sintering temperature was set at 500°C and the waiting time was set as half an hour. The temperature was then increased up to 1300°C and the sample was sintered for 1, 2, 3 and 4 hours to determine the optimal sintering time. In this study, Al_2O_3 and ZrO_2 materials were combined by FDM method and their various properties and effects were investigated. Macrostructure analysis, XRD analysis, SEM and EDS analysis, hardness analysis and three-point bending analysis were performed on the obtained samples. Optimal results were obtained as a result of these tests. In conclusion, this thesis work has presented a comprehensive investigation of FDM, focusing on the interaction between alumina and zirconia.

Science Code : 91528

Key Words : Functionally graded materials (FGM), powder metallurgy, ceramic materials, zirconia (ZrO_2), alumina (Al_2O_3)

Page Number : 91

Supervisor : Prof. Dr. Hakan ATEŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve görüşleriyle beni yönlendiren ve desteğini esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Hakan ATEŞ'e, teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda desteklerinden ve değerli fikirlerinden dolayı sayın Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, Doç. Dr. Melika ÖZER'e, Prof. Dr. Halil ARIK'a ve Arş. Gör. Tolga YILMAZ'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, beni bugünlere getiren ve bugüne kadar desteklerini esirgemeyen babam Mehmet MUT'a, annem Miyase MUT'a ve özellikle fikir ve görüşleriyle her daim yanımda olan abim İbrahim İlkay MUT'a, teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince üstün özverisi ile daima yanımda olan, motivasyonunu, yardımlarını ve deneyimini esirgemeyen kıymetli dostum Ertuğrul Furkan SAVAŞTAER'e yanımda olduğu için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	5
2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Nedir?	5
2.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çıkış Nedenleri	6
2.3. FDM’lerin Sınıflandırılması.....	8
2.4. Üretim Yöntemleri	9
2.4.1. Toz metalurjisi yöntemi	10
2.4.2. Plazma spreyi ile kaplama yöntemi	10
2.4.3. Kendinden yayılmalı yüksek sıcaklık sentezi (SHS) yöntemi	10
2.4.4. CVD fırını ile kaplama yöntemi.....	11
2.4.5. Pervane kuru karıştırma (IDB) yöntemi.....	11
2.4.6. Endüksiyonla yığma (EPD) yöntemi	12
2.4.7. Slip döküm yöntemi	12
2.4.8. Santrifüj döküm yöntemi	12
2.4.9. Seçici Lazer ergitme yöntemi (SLM).....	13
2.4.10. Doğrudan enerji biriktirme yöntemi (DED).....	13

	Sayfa
3. TOZ METALURJİSİ	15
3.1. Toz Metalurjisi Yöntemi ile FDM Üretimi	16
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	19
5. MALZEME VE METOT	43
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar	43
5.2. Deneysel Yöntemler ve Prosedürler.....	50
5.3. Numune Hazırlama	51
5.4. Deney Koşulları ve Parametreleri	55
5.4.1. Metalografik numune hazırlanması.....	56
5.4.2. Morfoloji	56
5.4.3. Kimyasal kompozisyon analizi	57
5.4.4. Malzeme yüzey analizi.....	58
5.4.5. X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi	58
5.4.6. Sertlik analizi	59
5.4.7. Üç nokta eğme testi.....	60
6. BULGULAR	63
6.1. Malzeme Yüzey Analizi.....	64
6.2. X Işınları Difraksiyonları (XRD) Analizi	66
6.3. SEM Analizi.....	69
6.3.1. EDS analizi.....	73
6.4. Sertlik Analizi	77
6.5. Üç Nokta Eğme Testi	78
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Al_2O_3 ve ZrO_2 Özellikleri	43
Çizelge 5.2. FDM katmanları için toz kütlesi hesabı.....	54
Çizelge 5.3. Sinterleme süreleri ve sıcaklık değerleri.....	56
Çizelge 6.1. 4 farklı sürede sinterlenmiş olan numunelerin makroyapı görüntüleri.....	65
Çizelge 6.2. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü	70
Çizelge 6.3. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü	71
Çizelge 6.4. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü	72
Çizelge 6.5. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü	73
Çizelge 6.6. Numunelerin her bir katmanından alınan sertlik değerlerinin çizelgesi.....	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Malzeme tetrahedronu çerçevesinde işleme-yapı-özellik-performans ilişkisi.....	3
Şekil 2.1. FDM malzemenin yapısı.....	6
Şekil 2.2. Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi ve kaplamada kırılmaların oluşumu.....	7
Şekil 2.3. (a) Kaplamanın üst yüzeyindeki yatay gerilimler (b) Yatay gerilmelerden kaynaklanan ve kaplamanın üst yüzeyine dik olarak oluşan yüzey çatlakları.....	8
Şekil 2.4. SHS yöntemi ile FDM üretimi.....	11
Şekil 2.5. (a) Toz beslemeli eklemeli imalat (b) Tel beslemeli eklemeli imalat	14
Şekil 3.1. Toz metalurjisinde taneciklerin geometrik şekilleri	15
Şekil 3.2. FDM malzemenin üretim süreci	17
Şekil 5.1. 1000 gr ZrO ₂ toz boyutu için yüzdece toz dağılım grafiği	45
Şekil 5.2. Tek yönlü ve çift yönlü zımba metotları.....	47
Şekil 5.3. İstiflenmiş Al ₂ O ₃ ve ZrO ₂ katmanları	52
Şekil 5.4. 5 katmanlı Al ₂ O ₃ matrisi.....	54
Şekil 5.5. Üç nokta eğme testine göre bükülme mukavemetinin şematik gösterimi	61
Şekil 6.1. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği.....	67
Şekil 6.2. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği.....	67
Şekil 6.3. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği.....	68
Şekil 6.4. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği.....	68
Şekil 6.5. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 1. ve 2. katman geçişlerinin EDS analizi.....	74
Şekil 6.6. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 2. ve 3. katman geçişlerinin EDS analizi.....	75

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 3. ve 4. katman geçişlerinin EDS analizi	75
Şekil 6.8. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 4. ve 5. katman geçişlerinin EDS analizi	76
Şekil 6.9. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 1. ve 2. katman geçişlerine ait çizgisel EDS analizi	76
Şekil 6.10. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin altın paladyum kaplamanın EDS analizindeki görüntüsü	77
Şekil 6.11. FDM numunelerinin her bir katman için sertlik değeri grafiği	78
Şekil 6.12. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği	79
Şekil 6.13. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği	79
Şekil 6.14. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği	79
Şekil 6.15. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Al_2O_3 ve ZrO_2	44
Resim 5.2. Elek makinesi.....	45
Resim 5.3. Hassas tartı.....	46
Resim 5.4. Mekanik karıştırıcı (Turbula cihazı)	46
Resim 5.5. 280 ton kapasiteli hidrolik pres makinesi ve pres kalıbı.....	48
Resim 5.6. Parafin wax bağlayıcı	48
Resim 5.7. Mekanik karıştırıcılı ısıtıcı.....	49
Resim 5.8. Protherm PLF160/15 sinterleme fırını.....	50
Resim 5.9. Farklı basınçlarda preslenmiş numuneler	52
Resim 5.10. 500MPa da preslenmiş numune.....	53
Resim 5.11. Farklı bağlayıcı oranı kullanılarak elde edilen numuneler	53
Resim 5.12. 1550 °C’ de 3 saat sinterlenmiş numune	55
Resim 5.13. Numune hazırlığında kullanılan ekipmanlar	56
Resim 5.14. JEOL JSM-6060 LV model taramalı elektron mikroskopi.....	57
Resim 5.15. Leica marka DMC 2900 model mikroskop	58
Resim 5.16. Bruker D8 Advance Marka XRD Cihazı.....	59
Resim 5.17. Qness marka Q30M model sertlik test cihazı	60
Resim 5.18. INSTRON marka 3369 model üç nokta eğme test cihazı.....	60
Resim 6.1. 1300°C’ de sinterlenmiş numuneler; a) 1 saat sinterlenmiş numune b) 2 saat sinterlenmiş numune c) 3 saat sinterlenmiş numune d) 4 saat sinterlenmiş numune e) 1 saat sinterlenmiş numunenin yandan görünüşü	63
Resim 6.2. Üretilen FDM numunesine ait katman geçişleri ve yüzde oranları	64
Resim 6.3. 2°C/dk sıcaklık artış hızı ile 1 saat sinterlenmiş numune	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde Oran
°	Derece
°C	Santigrat Derece
µm	mikrometre
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alümina
Al ₄ C ₃	Alüminyum Karbür
AlN	Alüminyum Nitrür
B ₄ C	Bor Karbür
Cu	Bakır
Cu	Bakır
CuAl ₂	Alüminit
Fe	Demir
Fe ₂ B	Demir Borür
HA	Hidroksiapatit
HB	Brinell Sertlik (Hardness Brinell)
HV	Vickers Sertlik
IDB	Pervane Kuru Karıştırma
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
Mo	Molibden
Mo ₂ C	Molibden Karbür
MPa	Megapascal
Ni	Nikel
SHS	Kendinden Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi
SiC	Silisyum Karbür
SiO ₂	Silisyum Dioksit

Simgeler**Açıklamalar****Sn**

Kalay

SPS

Kıvılcım Plazma Sinterleme

Ti

Titanyum

Ti₃AlC₂

Titan Alüminyum Karbür

TiC

Titanyum Karbür

TiSiO₂

Titanyum Silisyum dioksit

y

Yıl

ZrB₂

Zirkonyum Diborür

ZrO₂

Zirkonya

Kısaltmalar**Açıklamalar****AKG**

Az Katmanlı Grafen

AMMNK

Alüminyum Metal Matris Nano Kompozitleri

EDS

Enerji Dağılım Spektroskopisi

FD

Fonksiyonel Derecelendirilmiş

FDDKM

Fonksiyonel Dereceli Kompozit Köpük Malzemeler

FDK

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit

FDKM

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük Malzeme

FDM

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

HRTEM

Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskopi

IPM

Yerinde Toz Metalurjisi (In-situ Powder Metalurgy)

LPBF

Lazerle Tozla Birleştirme

Peg(400)

Polietilen Glikol 400

SEM

Taramalı Elektron Mikroskopi

T/M

Toz Metalurjisi

TM

Toz Metalurjisi

XRD

X-Işını Kırılımı

1. GİRİŞ

FDM, malzeme özelliklerinin belirli bir yönde kademeli olarak değiştiği yenilikçi malzemelerdir. Bu malzemeler, farklı işlevsel gereksinimleri karşılamak amacıyla tasarlanmış olup, genellikle iki veya daha fazla malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. FDM'ler, özellikle yüksek sıcaklık, aşınma direnci ve mekanik dayanım gibi özelliklerin optimize edilmesi gereken uygulamalarda büyük avantajlar sunmaktadır (Kieback ve diğerleri, 2003).

Toz metalurjisi yöntemi, FDM'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, metal tozlarının belirli bir kalıp içinde sıkıştırılması ve ardından sinterleme işlemi ile katı bir malzeme haline getirilmesi esasına dayanmaktadır. Toz metalurjisi, malzeme bileşiminin ve mikroyapısının hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımakta, bu da FDM'lerin istenen özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır (Upadhyaya, 1997).

Al_2O_3 ve ZrO_2 gibi seramik malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler, bu malzemeleri özellikle aşındırıcı ortamlarda ve yüksek sıcaklık uygulamalarında ideal kılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin kırılganlığı ve düşük toklukları, mekanik performanslarını sınırlayan önemli faktörlerdir. Bu nedenle, Al_2O_3 ve ZrO_2 'nin FDM olarak kullanılması, bu malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır (Çalışkan ve diğerleri, 2017; Oksuz ve diğerleri, 2017).

Bu çalışmanın motivasyonu, Al_2O_3 ve ZrO_2 'nin FDM olarak kullanılmasıyla, bu malzemelerin mekanik performanslarının nasıl iyileştirilebileceğini araştırmaktır. Literatürde, bu malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretilen FDM'ler olarak kullanımı üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan literatür çalışması sonucu Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik tozlarıyla FDM üretimi ile ilgili yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışması, Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik malzemelerden toz metalurjisi yöntemiyle FDM üretilirliği ve bu alanda yayın eksikliği noktasında bilimsel boşluğu doldurmayı aynı zamanda Al_2O_3 ve ZrO_2 'nin FDM'ler olarak kullanımının mekanik davranışları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

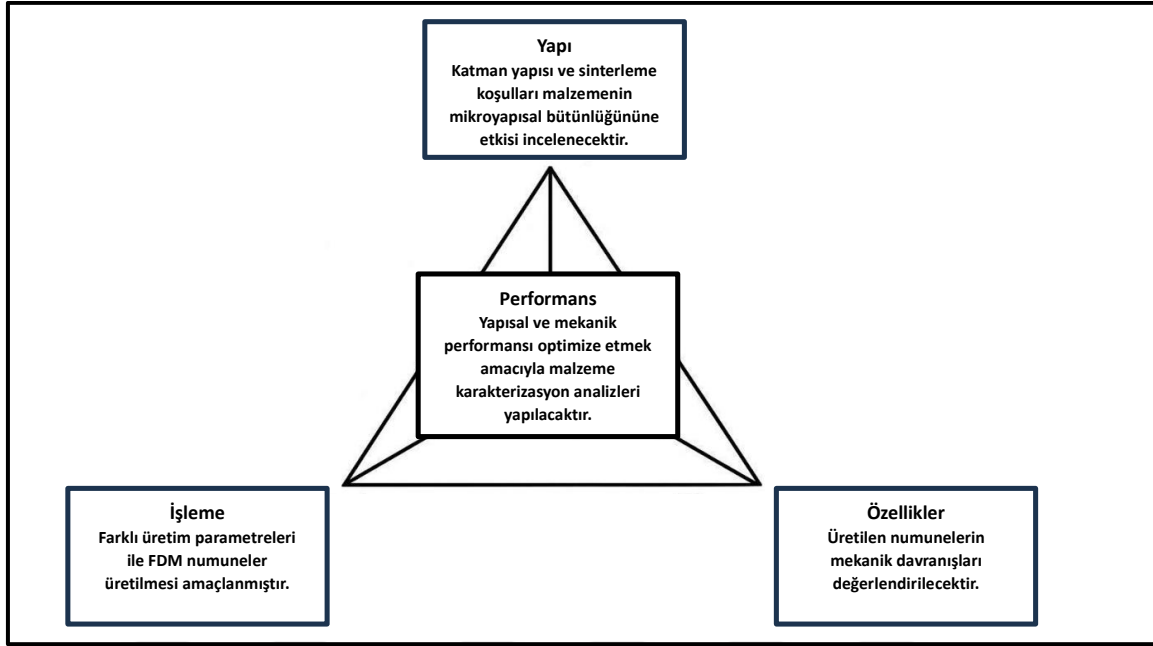
Sunulan çalışmada iki seramik malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin sağladığı avantajların bir araya getirilerek FDM eldesi ile üretilirliği ve mekanik davranışlarının

incelenmesi ana çerçevesinde ilerlenmiştir. Böylece Zirkonya (ZrO_2) ve Alümina (Al_2O_3) seramik malzemeler kullanılarak toz metalurjisi yöntemi ile FDM malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın motivasyonu, farklı koşullarda farklı fiziksel ve mekaniksel özellikler sergileyen malzemelerin bir araya getirilerek FDM yöntemiyle üretilmesidir. Bu doğrultuda, zirkonya ve alümina tozları kullanılarak FDM üretimi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu FDM 5 katmandan oluşmaktadır. Her katman ağırlıkça yüzde 20'lik oranlarda değişen tozların karışımından elde edilmiştir. Preslenme ve sinterlenme aşamasında çatlak oluşumunun önlenmesi amacıyla ağırlıkça belirlenen oranlarda bağlayıcı kullanılmıştır. Bu katmanlı yapı kalıba laminar olarak yerleştirilmiş ve soğuk pres yöntemi kullanılarak preslenmiştir. Sonrasında elde edilen preslenmiş numune ön sinterleme ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı sinterleme sürelerinde numuneler elde edilmiştir.

FDM, gelecekte enerji verimliliği, dayanıklılık ve yüksek performans gibi önemli özelliklerle endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynayacaktır. Bu nedenle özellikle toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi, mühendislik uygulamalarında daha sürdürülebilir ve verimli çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen FDM'lerin mekanik davranışları incelenecektir. Çalışmanın amacı, farklı üretim parametrelerinin ve malzeme bileşimlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu malzemelerin performansını optimize etmektir. Bu bağlamda, literatürdeki mevcut çalışmalar gözden geçirilmiş, deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanarak sunulmuştur. Bu tez çalışması malzeme tetrehedronu çerçevesinde Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



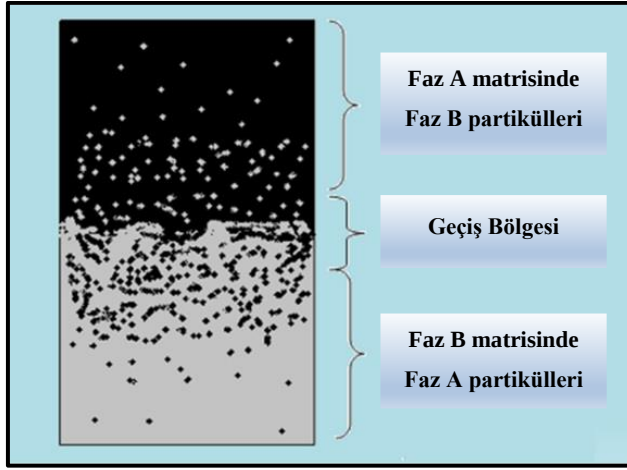
Şekil 1.1. Malzeme tetrahedronu çerçevesinde işleme-yapı-özellik-performans ilişkisi

2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Doğada bir durumdan başka bir duruma ani ve direkt geçişler, çeşitli problemlere neden olabilmektedir. Olası problemlerin ve olumsuz durumların önüne geçebilmek için ani ve direkt geçişler yerine kademeli geçişlerin kullanılması tercih edilmelidir. Sel öncesi yağmur çiselemesi ya da fırtına öncesi rüzgâr esmesi doğada yaşanan ve olumlu kazanımları olan kademeli geçişlere örnek olarak verilebilecek olaylardır. Benzer şekilde, özellikle günümüzde teknolojinin gelişmesi gibi faktörler nedeniyle bazı ihtiyaçların karşılanabilmesi için çeşitli malzemelerde homojen yapıda olmayan kademeli ve sürekli değişen bir yapıya ihtiyaç duyulmuştur. FDM'ler, kimyasal ve fiziksel olarak birbirinden farklı özellikler taşıyan iki maddenin birleştirilmesi sırasında, söz konusu maddeler arasındaki farklı ısı genleşme katsayıları nedeniyle oluşan ısı gerilmeleri, derecelendirilmiş yapılarıyla azaltılmaktadır. Bu durum, iki madde arasındaki kimyasal ve fiziksel özelliklerdeki ani değişimler nedeniyle oluşabilecek problemlerin minimum düzeye indirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık altında yapılan uygulamalar, uzay araçları, mikroelektrik ve endüstriyel uygulamalar FDM kullanımının yaygınlaştığı alanlardan bazılarıdır (Alagöz ve diğerleri, 2004).

2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Nedir?

FDM, seramik ve metal gibi farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, sertlik, elastik modül, termal iletkenlik, yoğunluk gibi bir ya da birden fazla mekanik ve fiziksel özelliği belirli bir yönde sürekli olarak değişen gelişmiş bir malzeme türüdür. Şekil 2.1'de görüleceği üzere bu malzemelerin karışımından elde edilmiş kompozit malzemelerdir (Miyamoto ve diğerleri, 2013).



Şekil 2.1. FDM malzemenin yapısı (Yin ve diğerleri, 2004).

FDM'ler sınırsız sayıda varyasyon ile üretilebilirler. Malzeme yapısındaki çeşitliğin yanında yaygın kullanım alanlarının bulunması, FDM'lerin üretiminde farklı üretim yöntemlerinin de gelişmesine neden olmuştur (Saleh ve diğerleri, 2020).

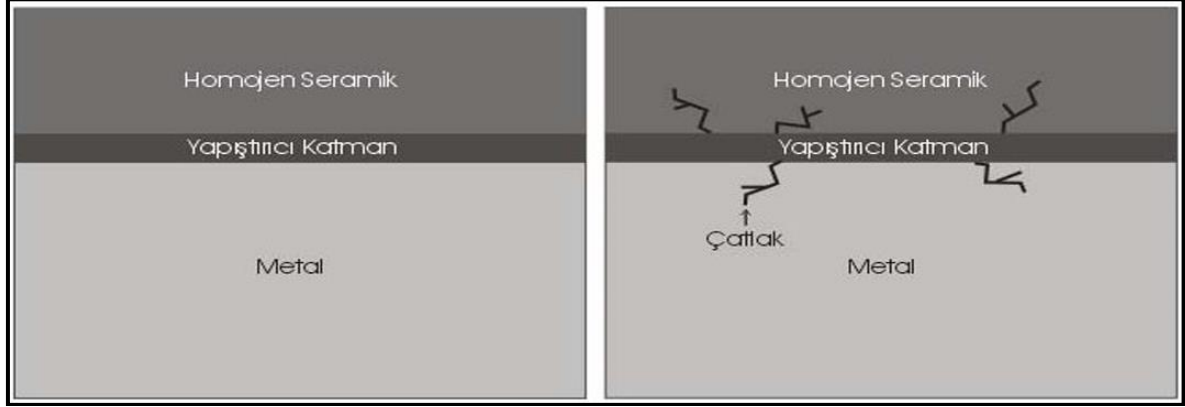
FDM malzemelerin sağlamış olduğu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Alümina aşınmaya ve çizilmeye karşı mükemmel direnç gösterir ancak kırılma tokluğu oranı oldukça yüksektir. Zirkonya ise seramikler arasında kırılma tokluğu açısından en iyi performansı sergiler.
- Alümina yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve iyi bir ısı iletkenidir, ancak zirkonya termal şoklara karşı daha dayanıklıdır ve daha iyi bir ısı yalıtkanıdır.
- Kimyasal direnç açısından benzer olsalar da zirkonya daha yüksek oksidasyon dayanımı sunar.
- Alümina tamamen yalıtkan bir malzeme iken, zirkonya iyon iletkenliği özellikleriyle farklı enerji uygulamalarında kullanılabilir.

2.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çıkış Nedenleri

Isıl işlemler gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, işlemin gerçekleştirildiği ortamı çevreleyen maddenin, yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilenmesini önlemektir. Bu amaçla, yüksek sıcaklığa maruz kalan malzeme, sıcaklığa karşı direnç gösterebilen bir malzeme olarak bilinen seramik ile kaplanmaktadır. Bu sistem termal bariyer olarak bilinmektedir. Termal bariyer uygulaması her ne kadar yüksek sıcaklığın

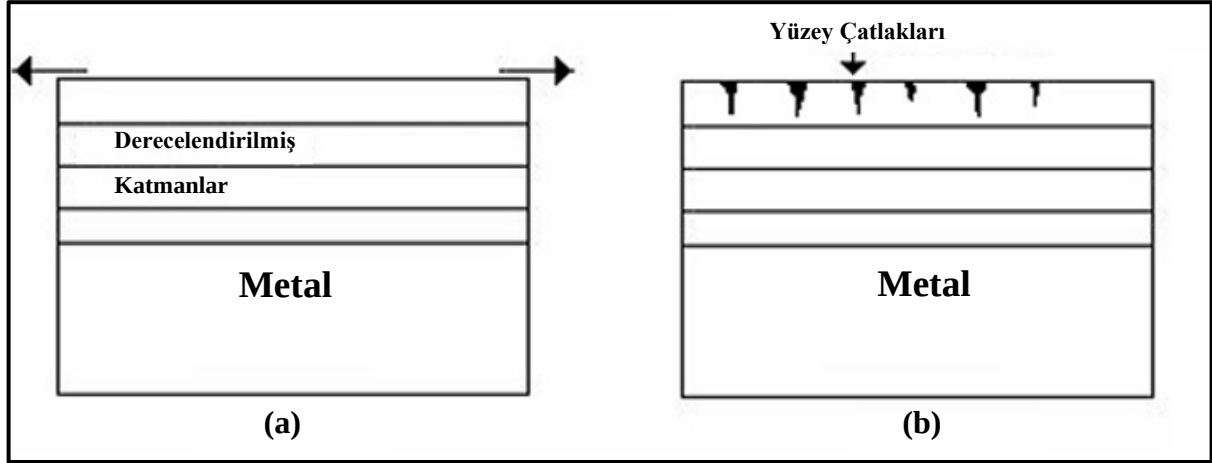
malzeme üzerinde oluşturacağı olumsuz etkileri önlemek için kullanılsa da Şekil 2.2’deki gibi bazı sorunlara yol açabilmektedir (Alagöz ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.2. Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi ve kaplamada kırılmaların oluşumu (Alagöz ve diğerleri, 2004).

Termal bariyer uygulamalarında yüksek sıcaklığa maruz kalan homojen seramik ile metalin ısı genleşme katsayıları arasındaki yüksek uyumsuzluk, bağlanma bölgesinde ısı gerilmelere neden olmaktadır. Bu durum ara yüz çatlakları ve kırılmaların oluşmasına ortam hazırlamaktadır. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklığa ilk maruz kalan kaplamanın en dış yüzeyinde de yüzeye dik kenar çatlakları olduğu görülmektedir. Bu çatlakların meydana gelmesindeki ana faktör ise kaplamanın en üst yüzeyindeki yarıçap yönündeki yatay gerilimdir (Dimitoka ve Yıldırım, 2003).

Fiber matris kompozitler, iki farklı malzemenin bir araya gelmesi ve bir araya gelen bu iki malzeme arasındaki geçişin ani olması nedeniyle yüksek sıcaklıkta kırılmaya ve ayrılmaya eğilimli malzemelerdir. Kaplamanın en üst yüzeydeki yarıçap yönündeki yatay gerilimler ve bu yatay gerilimlerin neden olduğu kenar çatlakları Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Bu çatlaklar, ara yüzeyden zayıf bileşen yönüne doğru artmaktadır. Bunun yanı sıra kompozit malzemelerdeki fiber ve matrisin ısı genleşme katsayılarının farklı olması, gerilmelerde ek bir problem olarak kabul edilmektedir. Söz konusu problemler bileşenlerin derecelendirilmiş şekilde bir araya gelmesi nedeniyle FDM’lerde görülmemektedir (Özarslan, 2007).



Şekil 2.3. (a) Kaplamananın üst yüzeyindeki yatay gerilmeler (b) Yatay gerilmelerden kaynaklanan ve kaplamananın üst yüzeyine dik olarak oluşan yüzey çatlakları (Alagöz ve diğerleri, 2004).

Isıl gerilmelerin azaltılması ve tüm bu uyumsuzlukların minimum seviyeye düşürülmesi amacıyla FDM kullanılmaktadır. FDM'deki derecelendirilmiş yapı metali, aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı korumaktadır. Bunun yanı sıra seramik kaplamada oluşan kırılmaları, yüzey ve ara yüz çatlaklarını ise minimum seviyeye indirmektedir (Alagöz ve diğerleri, 2004).

2.3. FDM'lerin Sınıflandırılması

FDM'ler, mikroyapısı, gözenekliliği ve kimyasal bileşimi, hacmi boyunca değişen malzemelerdir. Keskin bir arayüz yerine kademeli olarak değişen bir arayüz kullanılması, söz konusu malzemenin kullanım alanının daha geniş olmasına olanak sağlamakta ve farklı tür malzemelerin geliştirilmesini daha kolay hale getirmektedir. FDM'ler aşağıdaki gibi üç ayrı grupta sınıflandırılmaktadır (Yıldız, 2021):

- Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM,
- Gözeneklilik ve gözenek boyutu derecelendirilmiş FDM,
- Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM

Malzemenin kimyasal bileşiminin kademeli olarak değiştiği malzeme grubu kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM olarak bilinmektedir. Kimyasal yapısı farklı iki malzemenin yapı içerisindeki oranlarının kalınlık boyunca değişmesi, tokluk, korozyon direnci, sertlik, aşınma direnci, ısıl direnç ve ısıl iletkenlik gibi özelliklerin de kademeli olarak değişmesine

neden olmaktadır. Isıl işlemler sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalan malzemelerin, ısının neden olabileceği olumsuz etkilerden korunabilmesi amacıyla seramik malzemeler ile kaplanmaları bu duruma verilebilecek örneklerden biridir (Yıldız, 2021).

Gözenekliliğin ve gözenek boyutunun malzeme kalınlığı boyunca değiştiği malzeme grubu gözeneklilik ve gözenek boyutu derecelendirilmiş FDM olarak bilinmektedir. Bu malzeme grubu bilhassa biyomedikal uygulamaları için yüksek önem arz etmektedir. Gözenekli yapıya sahip olması ve gözenek boyutunun değişkenlik göstermesi nedeniyle kemik, doğal FDM 'ye verilebilecek örneklerden biridir (Yıldız, 2021).

Mikroyapının istenilen özellikleri karşılayacak şekilde, malzeme içerisinde genişlik ya da kalınlık boyunca değiştiği malzemeler ise mikroyapısı derecelendirilmiş FDM olarak bilinmektedir. Dişliler, yüzeyde martenzitik, iç kısımlarda ise beynitik ve ferritik mikroyapı göstermeleri nedeniyle bu malzeme grubuna verilebilecek en iyi örneklerden biridir (Yıldız, 2021).

FDM'ler sınırsız sayıda varyasyon ile üretilebilirler. Malzeme yapısındaki çeşitliğin yanında yaygın kullanım alanlarının bulunması, FDM'lerin üretiminde farklı üretim yöntemlerinin de gelişmesine neden olmuştur (Kumar ve diğerleri, 2012).

2.4. Üretim Yöntemleri

FDM'nin birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Malzeme yapısındaki çeşitliğin yanında yaygın kullanım alanlarının bulunması, FDM'lerin üretiminde farklı üretim yöntemlerinin de gelişmesine neden olmuştur (Konez ve diğerleri, 2005; Uluköy, 2011; Mahamood ve diğerleri, 2012; Çallı, 2022; Güler ve diğerleri, 2022).

FDM'in üretim yöntemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Toz Metalürjisi
- Plazma Spreyiyle Kaplama
- SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis)
- CVD Fırını ile Kaplama
- Pervane Kuru Karıştırma (IDB)

- Endüksiyonla Yığıma (EPD)
- Slip Döküm
- Santrifüj Döküm
- SLM
- DED

2.4.1. Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurjisiyle FDM üretimi, düşük maliyet, daha fazla ham madde bulunabilirliği, basit işlem teçhizatları, düşük enerji tüketimi ve kısa işlem süreleri gibi avantajlar sunar. Bu yöntem, malzeme üretiminde daha düzenli bileşimler ve ikincil fazlarda daha iyi dağılım sağlar. Toz metalurjisi, geleneksel malzemelere göre daha farklı alaşım ve kompozit malzemelerin üretilmesine olanak tanır. Ayrıca, bu yöntemle doğrudan kullanılabilir parçalar üretilir, bu da daha kısa imalat çevrim süreleri sağlar (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.2. Plazma spreyi ile kaplama yöntemi

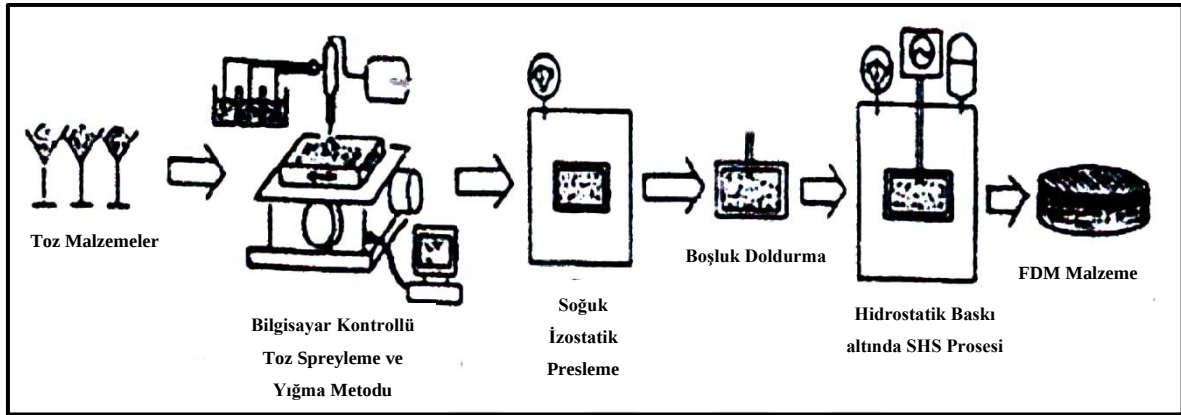
Isıl bariyer kaplamalar, sistemin ısı verimliliğini artırmak ve korozyon, oksidasyon veya aşınmayı önlemek amacıyla kullanılır. Isıl gerilmeleri önlemek için FDM ile dereceli değişen kaplamalar tercih edilir. Plazma spreyinde, ardışık damlaların birikimiyle yüzey kaplaması yapılır, ancak bu yöntemde kaplamanın homojen olmaması, oksitlenme ve gözenek oluşumu gibi dezavantajlar görülebilir. Yine de FDM ile ısı bariyer kaplamalar, türbin ve dizel motorları gibi alanlarda, artan kullanım ömrü ve malzeme güvenliği sağladığı için yaygın olarak kullanılır. Bu kaplamalar, bağ mukavemeti, ısı dayanım ve oksidasyon direnci gibi özellikleriyle de endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.3. Kendinden yayılmalı yüksek sıcaklık sentezi (SHS) yöntemi

Kendinden Yayılmalı Yüksek Sıcaklık Sentezi (SHS) diğer adı ile yanma sentezi, yüksek saflıkta ürünler, düşük enerji gereksinimi ve basit işlem avantajları sunan bir üretim yöntemidir (Şekil 2.4). Bu yöntem, FDM üretimi için uygundur çünkü yanma işlemi hızlıdır ve kalın, net ya da yarı-belirgin geometrilerde üretim sağlar. SHS, metal tozlarının üzerine malzeme tozlarının spreylenip yığılmasıyla başlar, ardından soğuk izostatik presleme işlemi

ve vakumla boşluklar doldurulur. Sonrasında hidrostatik baskı ile malzeme sentezlenir. SHS ile Ti-B-Cu, Ti-C-Ni, Ti-C-Cu sistemlerini içeren FDM'ler üretilebilir. SHS sürecinde iki önemli yöntem vardır:

1. Toz yığma metodu: Kompozisyonun bilgisayar kontrollü şekilde derecelendirilmesi.
2. Hidrostatik baskı metodu: Sentez ve şekillendirme işlemi (Konez ve diğerleri, 2005).



Şekil 2.4. SHS yöntemi ile FDM üretimi (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.4. CVD fırını ile kaplama yöntemi

CVD fırını ile kaplama yöntemi, karbon/karbon (K/K) kompozitlerinin yüksek sıcaklık uygulamalarında oksidasyona karşı korunmasını sağlamak için kullanılır. K/K kompozitler, hafif olmalarına rağmen oksidasyona karşı dayanıksızdır. Bu nedenle, geleneksel seramik kaplamalar yerine kimyasal buhar yığma (CVD) yöntemi ile kaplanmaları gerekmektedir. CVD fırını kullanılarak K/K kompozitler, SiC/C FDM malzemesiyle besleme gaz oranları kontrol edilerek kaplanabilir ve bu kaplamalar yüksek sıcaklık süpersonik gaz akış testlerinde iyi performans sergiler (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.5. Pervane kuru karıştırma (IDB) yöntemi

Pervane kuru karıştırma (Impeller Dry Blending) Yöntemi (IDB) FDM üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Sydney Üniversitesi tarafından geliştirilen bu yöntem, düşük maliyet, yüksek işlem hızı ve farklı derecelenmiş FDM'lerin üretimini sağlar. IDB ile düzenli ve tabakalanmamış dereceler elde edilebilir. Ayrıca, bulk FDM'lerin üretimi üzerine yapılan laboratuvar çalışmaları çoğunlukla kontrollü ayırım içerir. Kontrollü ayırım, metal ve seramik tanelerini yoğunluk esasına göre derecelendirir, ancak bu süreç zayıf ve yavaş olabilir. Diğer

bir yöntem ise kontrollü karıştırmadır; burada iki FDM bileşeni oranlı olarak karıştırılır, bu da yüksek işlem hızları ve düzgün fonksiyonel dereceler sağlar. Kontrollü karıştırma özellikle ince FDM ince film üretiminde yaygın olarak kullanılır (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.6. Endüksiyonla yığma (EPD) yöntemi

FDM'ler, elektroforez biriktirme (EPD) ve basınçsız sinterleme yöntemleriyle üretilir. 1970'lerde, EPD yöntemi sodyum-sülfür hücrelerinde elektrolit olarak kullanılan beta-alumina seramiklerine şekil vermek için yaygın olarak kullanılmıştır. EPD, geleneksel seramik işleme yöntemlerinin zorlandığı seramiklerin üretiminde basit, hızlı ve güvenilir bir teknik olarak öne çıkmıştır. Bu yöntemde, süspansiyon bileşimi dinamik olarak değiştirildiği için malzemenin derecelendirilmesi sağlanabilir. EPD, diğer üretim tekniklerine göre daha düşük maliyetli olup, karmaşık geometrilere sahip sürekli malzeme üretimi yapabilen bir FDM üretim yöntemidir (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.7. Slip döküm yöntemi

Slip döküm yöntemi, FDM'lerde kullanılan döküm tekniği etkili olsa da alçı taşı kalıp kullanımını bazı dezavantajlar taşır. Bu dezavantajlar şunlardır:

- CaSO_4 , FDM malzemesine karışır.
- Sürekli üretimde döküm oranı azalır ve kalınlık kontrolü zorlaşır.
- Dökümdeki kurutma süresi verimsizliğe yol açar.

Son dönemde gözenekli reçine kalıplar kullanılarak bu dezavantajlar ortadan kaldırılmıştır (Konez ve diğerleri, 2005).

2.4.8. Santrifüj döküm yöntemi

Santrifüj döküm yöntemi, FDM üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, ergiyik malzeme belirli bir hızda dönen silindirik kalıba dökülür. Katılaşma tamamlandığında kalıp durdurulur ve döküm parça çıkarılır. Metal matrisli ve seramik parçacıklı kompozitlerde, partikül yoğunluğu ergiyik yoğunluğundan fazla ise partiküller dış tarafta yoğunlaşır, aksi takdirde iç tarafta yoğunlaşır.

Bu yöntemin avantajları arasında:

- FDM malzemelerinin ısı verimliliği artırarak, termal ve mekanik uyumsuzlukları ortadan kaldırmak,
- Korozyon, oksitlenme ve aşınmayı önlemek yer alır.

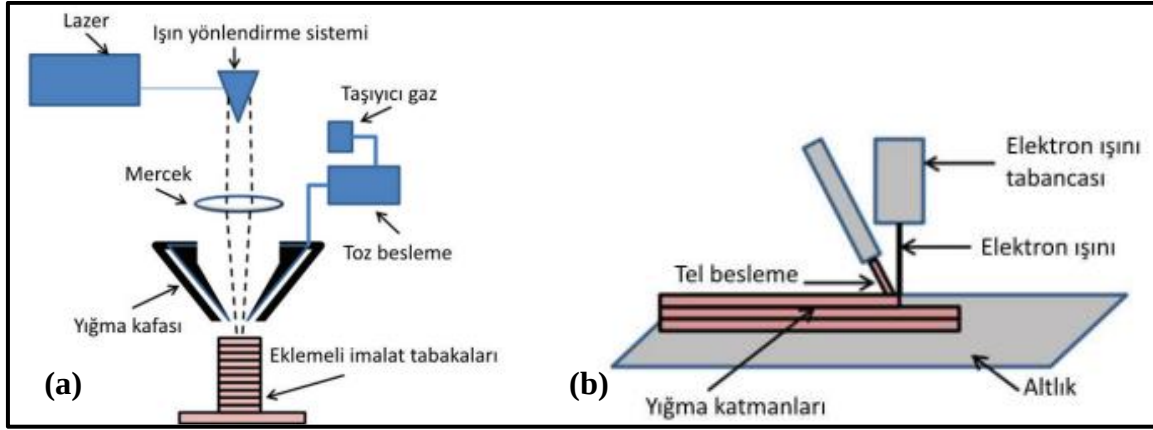
Ancak, üretimden kaynaklanan ısı ve gerilme problemleri ve katmanlar arasındaki düzgün yüzey oluşmaması gibi dezavantajlar da bulunmaktadır (Uluköy, 2011).

2.4.9. Seçici Lazer ergitme yöntemi (SLM)

Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting) yöntemi (SLM) ile FDM üretimi, lazerle metal tozlarını eritip birleştirerek katman katman yapı oluşturulmasına dayanır. Her katmanda farklı metal alaşımları veya katkı malzemeleri kullanılarak malzeme özellikleri (sertlik, iletkenlik vb.) derecelendirilebilir. Süreç, metal tozlarının yerleştirilmesi, lazerle eritilmesi ve yeni katmanların eklenmesi adımlarından oluşur. Bu yöntem, özellikle yüksek performans gereksinimleri olan uçak ve otomotiv sektörlerinde kullanılır (Güler ve diğerleri, 2022).

2.4.10. Doğrudan enerji biriktirme yöntemi (DED)

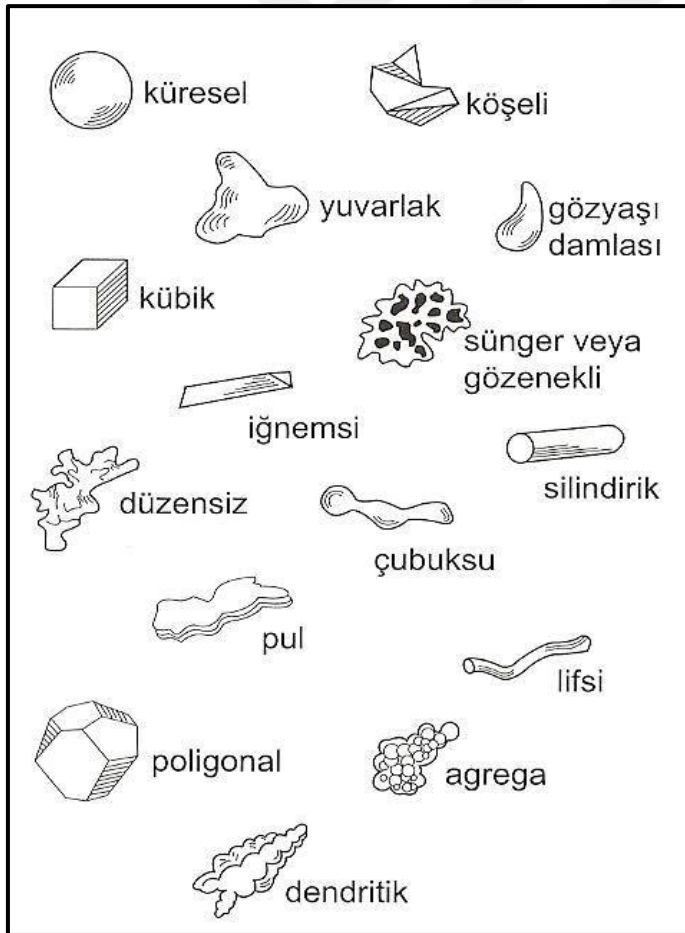
Doğrudan enerji biriktirme (Direct Energy Deposition) yöntemi (DED), FDM üretiminde, metal tozları veya tel formundaki malzemenin bir lazer, elektron ışını veya ark kaynağı ile eritilip hedef yüzeye doğrudan eklenmesi prensibine dayanır (Şekil 2.5). Bu süreçte, farklı malzeme bileşenleri katmanlar halinde birleştirilerek, her katmanda malzemenin özellikleri (sertlik, dayanıklılık vb.) optimize edilir. DED yöntemi, özellikle onarım, üretim ve karmaşık parça üretimi için uygundur (Güler ve diğerleri, 2022).



Şekil 2.5. (a) Toz beslemeli eklemeli imalat (b) Tel beslemeli eklemeli imalat (Güler ve diğerleri, 2022).

3. TOZ METALURJİSİ

Bu tezde toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretimi gerçekleştirilmiştir. Toz metalurjisi, metal veya seramik tozların üretimi ile bu tozların mekanik ve termik etkilerle birleştirilerek tek parça haline getirilmesi işlemidir. Toz metalurjisi sıvı fazda hiç çözünmeyen elementlerden mekanik alaşımlama ile yüksek dayanımlı parça üretimine imkân vermektedir. Toz olarak üretilen hemen hemen her çeşit metal ve alaşımları, toz metalurjisi yöntemi ile şekillendirmek mümkündür. Metal tozlarının imalinde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Şekil3.1’de görüldüğü gibi tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, karmaşık şekle kadar çok farklı olabilmektedir. Tozun yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir (Thümmeler ve Oberacker, 1993).



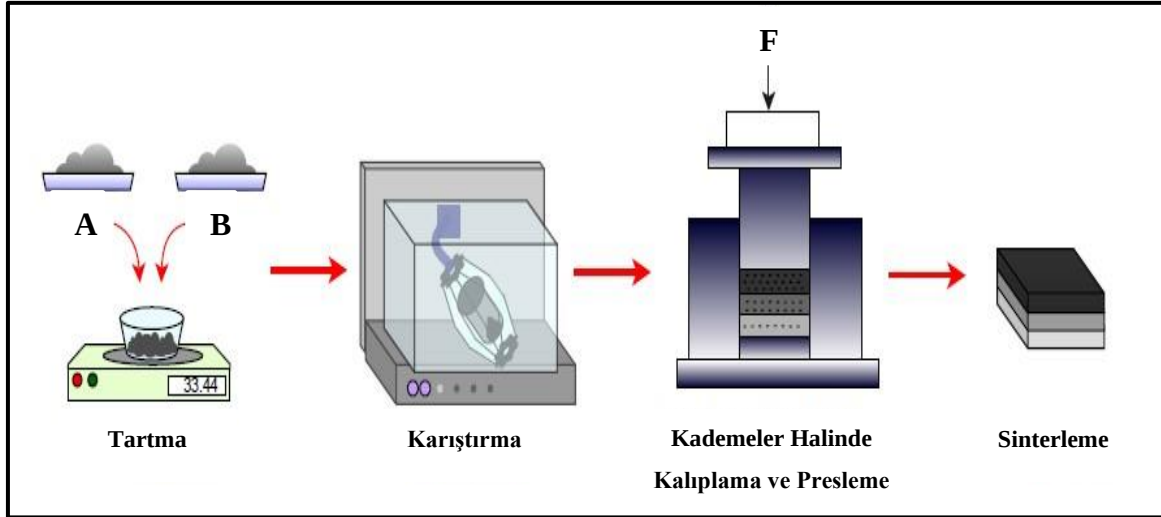
Şekil 3.1. Toz metalurjisinde taneciklerin geometrik şekilleri (Türker, 2007).

3.1. Toz Metalurjisi Yöntemi ile FDM Üretimi

Toz metalurjisi (TM) ve seramik teknolojisi, mühendislik malzemelerinin ve parçalarının işlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu süreçler, toz üretimi, toz işleme, şekillendirme ve sinterleme ya da basınç destekli sıcak konsolidasyon gibi aşamaları içerir. Metal, alaşım, seramik ve bileşik malzemelerin tozları, genellikle endüstriyel kaynaklardan temin edilebilir veya toz metalurjisi ve seramik üretiminde onlarca yıl boyunca geliştirilen çeşitli tekniklerle elde edilebilir. Bu tozlar, genellikle nanometre ölçeğinden birkaç yüz mikrometreye kadar değişen boyutlarda olabilir (Yıldız, 2021).

Toz metalurjisi, metal ve metal dışı toz malzemelerin üretimi ve şekillendirilmesi sürecini kapsayan bir yöntemdir. Daha geniş bir tanımla toz metalurjisi; metal veya seramik tozların üretimi ile bu tozların mekanik ve termik etkilerle birleştirilerek tek parça haline getirilmesi işlemidir (Thümmel ve Oberacker, 1993). Bu süreç genellikle toz malzemelerin bir araya getirilmesiyle başlamakta, ardından karışımın, pres kalıpları kullanılarak istenilen şekle sokulmasıyla devam etmektedir (Akkaş ve diğerleri, 2021).

Toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretimi, tozların kademe içerisindeki yüzde oranlarına göre tartılması ile başlamaktadır. Tartma işleminin ardından her kademeye ait karışım ayrı kaplara alınmakta ve karıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Toz karışımın kademe içerisinde homojen bir şekilde dağılması için karıştırma parametrelerinin doğru seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Kieback ve diğerleri, 2003). Homojen olarak karıştırılan toz karışımların önceden hazırlanan kalıplara doldurulması ve sıkıştırılması ile malzeme şekillendirilmektedir. Son olarak malzemenin tasarım yoğunluğuna ve mukavemetine ulaşması için sinterleme işlemi gerçekleştirilmektedir (Yıldız, 2021). Toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretiminin şematik gösterimi Şekil 3.2'de yer almaktadır.



Şekil 3.2. FDM malzemenin üretim süreci (Yıldız, 2021).

Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen malzemelerin özellikleri, kullanılan tozların boyutuna, türüne, karıştırma işleminin etkinliğine, presleme işleminde kullanılan basınca ve sinterleme sıcaklığı gibi pek çok etkene bağlı olarak değişmektedir. Örnek vermek gerekirse, daha ince ve homojen bir toz karışım kullanılması, nihai ürünün daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasına katkıda bulunur. Ayrıca sinterleme işleminin uygun sıcaklık ve ortam koşullarında gerçekleştirilmesi de malzeme mukavemeti ve yoğunluğuna olumlu yönde etki eden parametreler arasında yer almaktadır. Bu yöntemin sunduğu avantajlar, pek çok endüstriyel alanda kullanılmasını sağlamaktadır (Akkaş ve diğerleri, 2021).

Toz metalurjisi sıvı fazda hiç çözünmeyen elementlerden mekanik alaşımlama ile yüksek dayanımlı parça üretimine imkân vermektedir. Toz olarak üretilebilen hemen hemen her çeşit metal ve alaşımları, toz metalurjisi yöntemi ile şekillendirmek mümkündür. Metal tozlarının imalinde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, karmaşık şekle kadar çok farklı olabilmektedir. Tozun yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir (Thümmeler ve Oberacker, 1993).

Toz metalurjisi yöntemi, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyetle daha kaliteli ve üretimi zor ürünlerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Özetle, toz metalurjisi, günümüz imalat tekniklerinde kilit bir rol oynayan; gelecekteki mühendislik uygulamaları içinse büyük potansiyel taşıyan bir yöntemdir (Akkaş ve diğerleri, 2021).



4. LİTERATÜR TARAMASI

Ardıçoğlu, Çinici ve Karakoç tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada, AA5083 matrisi ve Al_2O_3 içeriği değişen yeni nesil fonksiyonel dereceli kompozit köpük malzemeleri (FDKKM'ler) üretmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. AA5083, Al_2O_3 ve TiH_2 tozları karıştırılmış ve ardından $500^\circ C$ 'de 300 MPa basınç altında sıkıştırılarak blok numuneler elde edilmiştir. Köpürebilir formdaki malzemeler $750^\circ C$ 'de köpürtülmüştür. Elde edilen FDKKM'lerin mikroyapısında gözeneklilik gözlemlenmiş ve tabaka kalınlıkları ile tozların sıkıştırılabilirliği arasında bir ilişki belirlenmiştir. Gözeneklilik artmasıyla alüminyum köpük kısmının köpürebilirliği azalmış ve gözenekler küreselden halden daha düz hale geçtiği gözlemlenmiştir. Boşluk oluşumu ve gaz çıkışı incelenerek en aza indirgenmiştir. Makro inceleme testleri sonucunda, en yüksek verim değeri 167 HB olarak elde edilmiştir. Ayrıca, darbe enerjisi etkileri değerlendirilmiş ve delinme durumları incelenmiştir. FDKKM'lerin yapısal özellikleri ve darbe sönümleme kapasiteleri üzerine testler yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, alüminyum köpük kaplı AA5083/ Al_2O_3 FDKKM'lerin üretimi ve karakterizasyonu konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Yeni nesil fonksiyonel dereceli kompozit malzemelerin (FDKM) potansiyeli ve mukavemet özelliklerinin geliştirilmesine yönelik bu çalışma, ileri uygulamalarda kullanılabilecek yeni malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Ardıçoğlu ve diğerleri, 2023).

Borand ve Uzunsoy tarafından 2022 yılında yapılan çalışma, FDM'lerinin önemi ve kullanım alanlarına odaklanmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek özgül dayanım, yüksek özgül modül ve düşük ısı genleşme katsayısı gibi özellikleri nedeniyle tercih edilen malzemeler arasındadır. Grafen ise üstün mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahip olmasıyla dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, Al 4.5Cu alaşımı temelinde fonksiyonel derecelendirilmiş grafen takviyeli malzemeler üretilmiştir. Al-4.5Cu alaşım tozlarına farklı az katmanlı grafen (AKG) içerikleri mekanik alaşımlama yöntemiyle katılmıştır. Ardından preslenerek blok numuneler elde edilmiş ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, AKG'nin Al-4.5Cu alaşım matrisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve tane boyutunu küçülttüğü gözlemlenmiştir. Sinterleme sonucunda sertlik değerlerinde artış, mikrosertlik değerlerinde ise %37,11'e kadar artış tespit edilmiştir. Ayrıca, AKG'nin matris ile iyi bir bağlanma sağlayarak tribolojik özellikleri iyileştirdiği ve sürtünme katsayısının düşmesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, grafen takviyeli Al-4.5Cu alaşımı FDM'lerin üretimi ve karakterizasyonu konusunda önemli

bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, grafen takviyeli farklı alaşımların tasarımı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için FDM'lere dayalı toz metalurjisi yönteminin potansiyelini vurgulamaktadır (Borand ve Uzunsoy, 2022).

Chauhan ve Khan tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, toz metalürjisi ve sinterleme yöntemleri kullanılarak Al-Cu metal-metal fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin hazırlanması ele alınmıştır. FDM'ler, saf metaller veya alaşımların tek başına mühendislik yapılarının gereksinimlerini karşılayamaması nedeniyle geliştirilen yeni malzeme kombinasyonlarıdır. Bu çalışmada, yüksek saflıkta ince Al ve Cu tozları kullanılarak Al-Cu FDM'leri üretilmiştir. Optik mikroskopi ve SEM görüntüleme yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Al-Cu FDM'lerde, numunenin yüzeyinde herhangi bir çatlak, delik veya ezik gibi kusurlar tespit edilmemiştir. Bu durum, numunenin fiziksel bütünlüğünün sağlam olduğunu göstermektedir.
- Optik mikroskopi ve SEM görüntüleri, FDM'nin bireysel katmanlarının homojen olduğunu ve her katman arasındaki bağın sağlam olduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgu, Al-Cu FDM'lerde başarılı bir katman bazında derecelendirme yapıldığını göstermektedir.
- SEM görüntüleri, FDM'nin farklı katmanlarındaki malzemeler arasında güçlü bir bağ olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, iç yüzeylerde kümelenme parçacıkları, mikro gözenekler ve mikro çatlaklar gibi bazı kusurlar da gözlenmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, Al-Cu FDM'lerin yapısal bütünlüğünü ve katmanlar arası bağlantılarının gücünü doğrulamaktadır. FDM'ler, mühendislik yapılarında istenen özellikleri elde etmek için potansiyel bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Gelecekteki çalışmalar, FDM'lerin üretiminde süreç parametrelerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenerek optimize edilmesini hedefleyebilir (Chauhan ve Khan, 2020).

Confalonieri, Perrin ve Gariboldi tarafından 2020 yılında, Al-Sn alaışımının aktif faz izolasyonunu ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için geleneksel toz metalürjisi proseslerini kullanmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Sn tozu bilyeli öğütme yöntemiyle işlenerek Al tozu ile homojen bir karışım elde edilmiştir. Bu yöntem, Sn parçacıklarının daha yuvarlak hale gelmesini sağlamak ve sızıntıyı azaltarak termal

kararlılığı artırmaktadır. Al ve Sn tozları bilyeli öğütme yöntemiyle karıştırılarak ince bir mikroyapı elde edilmiştir. Bu yöntem, alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirerek daha iyi bir mukavemet sağlamıştır. Ayrıca, aktif faz parçacıklarının pasif matris içinde daha homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Termal tepki üzerinde yapılan çalışmalar, mikroyapının ve aktif fazın parçacık boyutunun önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İri aktif faz parçacıkları, hızlı bir ısı salınımı sağlayarak hızlı bir faz değişimi gerçekleştirirken, küçük parçacıklar daha yavaş bir şekilde katılaşmakta ve daha geniş bir sıcaklık aralığında termal tepkiye izin vermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, Al-Sn alaşımının özelliklerini iyileştirmek için toz metalürjisi proseslerini kullanan bir yaklaşım sunmaktadır. Bilyeli öğütme yöntemi, Al ve Sn tozlarının homojen bir karışımını sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Mikroyapı ve aktif fazın parçacık boyutu, termal tepki üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmanın bulguları, termal tepkiyi uyarlamak için uygun mikroyapıya sahip alaşımların tasarlanabileceğini göstermektedir (Confalonieri ve diğerleri, 2020).

Çinici ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, AA 7075 Al alaşımı tozları ve B₄C parçacıkları kullanılarak sıcak presleme yöntemiyle FDM üretilmiştir. AA 7075 matris malzemesine farklı oranlarda (%10 - %60) B₄C ilave edilerek çeşitli kompozit karışımları elde edilmiştir. Karışım tozları, 3 boyutlu karıştırıcıda homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Üretim sürecinde, karışım tozları belirli sıcaklık ve basınç değerlerinde preslenmiştir. Presleme işlemi için farklı sıcaklık seviyeleri (250, 350 ve 450°C) ve basınç değerleri (200, 300 ve 400 MPa) kullanılmıştır. Bu şekillendirme işlemi sonucunda, farklı geçiş bölgelerine sahip olan FDM elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin sertlik değişimini belirlemek için makro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, numuneler tel erozyon yöntemiyle kesilerek standart boyutlarda çapraz kırılma test numuneleri elde edilmiştir. Malzemenin çapraz kırılma dayanımını belirlemek için çapraz kırılma testleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, presleme sıcaklığı ve basıncının artmasıyla birlikte, partikül-matris ara yüzey boşluklarının azaldığı ve partikül-matris uyumunun arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sabit sıcaklıklarda presleme basıncının artmasıyla kademelerdeki sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek çapraz kırılma dayanımı, 450°C sıcaklıkta preslenen numunelerde elde edilmiş, bu da presleme sıcaklığı ve basıncının çapraz kırılma dayanımını artırdığını göstermektedir. Bu çalışma, presleme sıcaklığı, basınç ve malzeme kompozisyonu gibi parametrelerin optimize edilmesiyle daha yüksek performanslı FDM'lerin elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca AA 7075 alaşımı ve B₄C

parçacıklarının sıcak presleme yöntemiyle işlenerek FDM'lerin üretimindeki parametrelerin ve bu parametrelerin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler, benzer malzemelerin gelecekteki üretim ve uygulamaları için önemli bir yol gösterici olabilir (Çinici ve diğerleri, 2017).

Islak ve Abushraida, 2019 yılında yaptıkları çalışma ile toz metalürjisi yöntemini kullanarak seramik takviyeli bronz matris FDM'lerin üretimini amaçlamışlardır. Seramik takviye malzemeleri olarak B_4C , TiC , Mo_2C ve SiC seçilmiştir. Bronz matrisine %10 oranında SiC , B_4C , Mo_2C ve TiC katkıları eklenerek, numuneler $750^{\circ}C$ 'de 90 dakika süreyle sinterlenmiştir. Bu çalışmada, FDM'lerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları deneysel olarak değerlendirilmiştir. Mikroyapı analizi için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve X-ışınları kırınım (XRD) analizi kullanılmıştır. Numunelerin sertlikleri Vickers sertlik testi cihazıyla ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, seramik takviyeli kompozit tabakaların homojen bir şekilde dağıldığını ve gözenek oluşumunun minimum düzeyde olduğunu göstermiştir. FDM'lerin üst ve alt kompozit katmanlarının yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu, orta katmanın ise daha sünek özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle B_4C takviyesiyle elde edilen FDM, en yüksek sertlik değerine ulaşmıştır. Bu çalışma, seramik takviyeli bronz matris FDM'lerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin deneysel olarak ayrıntılı bir şekilde incelendiğini göstermektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle başarıyla üretilen bu malzemelerin, potansiyel olarak geniş bir uygulama alanına sahip olabileceği üzerinde durulmaktadır. Ayrıca çalışmada gelecekte, FDM'lerin daha ileri özellik optimizasyonu ve karakterizasyonu için daha kapsamlı araştırmaların yapılması önerilmektedir (Islak ve Abushraida, 2019).

Konez ve diğerleri (2005), yaptıkları çalışma ile FDM'nin uzay araçları ve gelecek nesil fizyon reaktörleri gibi uygulamalarda sıcak gerilmeleri azaltma potansiyelini araştırmayı amaçlamışlardır. FDM, metal/seramik kompozisyonlu yeni bir malzeme olup, dereceli yapısında tokluk ve diğer malzeme özelliklerine ait fonksiyonlara sahiptir. Üretim teknikleri arasındaki farklılıklar incelenerek, Toz Metalürjisi, T/M Prosesi, Endüksiyonla Yığıma ve Pervane Kuru Karıştırma gibi yöntemlerin kullanıldığı belirtilmektedir. Ayrıca, Milimetrik Dalga Huzmesi ile Üretim Tekniği de açıklanmıştır. FDM'in kullanım alanları ve gelecekteki potansiyeli vurgulanmaktadır. Toz Metalürjisi yöntemi, esnek, etkili, düşük maliyetli ve çevre dostu bir yöntemdir. Bu yöntem, istenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin üretimine imkân tanımaktadır. T/M Prosesi ise FDM için uygun ve

sürekli uygulanabilir bir yöntemdir. Bu yöntemde, sıcak bariyer kaplama yöntemi kullanılarak çalışma sıcaklığını artırarak verimliliği artırmakta ve korozyon, oksitlenme veya aşınmayı önlemeye yardımcı olmaktadır. Endüksiyonla Yığıma Yöntemi, düşük maliyetli ve kompleks geometriye sahip malzemelerin sürekli üretimini sağlamaktadır. Bu yöntemde, malzemelerin yüzeyine elektromanyetik alan uygulanarak malzemelerin çekilmesi ve biriktirilmesi sağlanmaktadır. Pervane Kuru Karıştırma yöntemi ise yüksek hızlarda işlem hacmi sağlayarak malzeme üretimini hızlandırmaktadır. Milimetrik Dalga Huzmesi ile Üretim Tekniği ise elektromanyetik dalga enerjisinin seçilebilir ve kontrollü bir şekilde kullanılarak düşük gerilimli ve artık gerilimli fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların üretimini sağlamaktadır. Bu yöntem, diğer üretim metotlarında karşılaşılan sıcak yayılma düzensizliği sorununu çözmekte ve gelişmiş enerji dağılımı özelliği sunmaktadır. Bu yöntemlerle üretilen FDM, sıcak gerilmelerin azaltılması ve özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmaların sonucunda, daha mükemmel kompozisyona sahip FDM'lerin üretimi için etkili üretim teknikleri ve yöntemler geliştirilmektedir (Konez ve diğerleri, 2005).

Oleiwi tarafından 2023 yılında yapılan çalışma ile farklı krom ilaveleri ile 316L paslanmaz çelik bileşiklerinin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda toz metalürjisi tekniği kullanılarak çelik numuneler üretilmiştir. Krom katkısının çeliğin oksidasyona karşı direncini artırdığı ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Çalışmada çekme testi, sertlik testi, optik mikroskop, SEM mikroyapı, SEM kırık yüzey ve SEM, EDS analizleri gibi karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, ağırlıkça 17,34 krom ile karıştırılan çelik bileşiğinin diğer oranlara kıyasla daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, krom ilavesi ve toz metalürjisi teknolojisinin 316L paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve maliyetini düşürmek için etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır (Oleiwi ve diğerleri, 2023).

Canpolat, Çanakçı ve Erdemir, 2023 yılında yaptıkları çalışmada, biyomedikal uygulamalar için SS316L/ Al_2O_3 fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin mikroyapısı, korozyon direnci, mekanik özellikler ve laboratuvar ortamında biyoaktivite özelliklerini incelemeyi amaçlamaktadır. FDM, toz metalürjisi tekniği kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Dört katmandan oluşan FDM, çatlaksızdır ve Al_2O_3 takviyesi her katmana homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Mikroyapı analizleri, FDM katmanlarının Al_2O_3 içeriği arttıkça

mikrosertliklerinin istikrarlı bir şekilde arttığını göstermiştir. Dördüncü katman, maksimum 367 HV sertlik değerine ulaşacak şekilde yüksek sertlik sergilemektedir. Eğilme mukavemeti, 776 MPa olarak ölçülmüş ve bu değer eklem protezleri için yeterli bir dayanıklılık sağladığını göstermektedir. Korozyon direnci testleri, FDM'nin Ringer solüsyonunda ve Hank solüsyonunda sırasıyla 0,187 mm/y ve 0,201 mm/y korozyon hızına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Döngüsel potansiyodinamik polarizasyon testi sonuçları, FDM'nin Hank solüsyonunda oyuklaşma korozyonuna daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Laboratuvar ortamında biyoaktivite testleri, FDM ve SS316L'nin 7, 14 ve 21 gün boyunca SBF solüsyonunda daldırılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm daldırma sürelerinin sonunda FDM yüzeyinde küresel kristallerden oluşan bir apatit tabakası gözlenmiştir. 316L numunelerinde ise 21 gün sonunda küresel apatit oluşumu gözlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma SS316L/ Al_2O_3 FDM'nin başarılı bir şekilde üretildiğini ve biyomateryal uygulamaları için umut verici bir malzeme olduğunu göstermektedir. FDM'nin mikroyapısı, korozyon direnci, mekanik özellikler ve biyoaktivite özellikleri, implant performansını iyileştirmede önemli potansiyel sunmaktadır (Canpolat ve diğerleri, 2023).

Erdemir, Canakci ve Varol (2015) tarafından yapılan çalışma, Al_2O_3/SiC fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimi ve karakterizasyonunu ele almaktadır. Farklı sayıda derecelendirilmiş katmanlar ve farklı miktarda SiC içeriği içeren Al_2O_3/SiC FDM'ler, toz metalurjisi yöntemi ve sıcak presleme işlemiyle başarıyla üretilmiştir. Çalışmanın amacı, artan SiC içeriği ve katman sayısının kompozitin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Al_4C_3 , $CuAl_2$ ve $CuMgAl_2$ gibi intermetalik bileşiklerin yanı sıra Al ve SiC'nin de baskın bileşenler olduğunu göstermektedir. %40 SiC içeriğine sahip üst katmanda iki katmanlı FDM'ler için maksimum eğilme mukavemeti 1400 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, porozite içeriğinin SiC içeriğiyle arttığı ve farklı katman sayılarının gözeneklilik üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Mikrosertlik değerlerindeki artışın ve intermetalik oluşumun, kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma Al_2O_3/SiC FDM'lerin üretimi ve karakterizasyonu konusunda önemli bir ilerleme sunmaktadır. Artan SiC içeriği ve katman sayısı, kompozitin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Bu bulgular, Al_2O_3/SiC FDM'lerin daha iyi mekanik özelliklere

sahip kompozitler olarak kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır (Erdemir ve diğerleri, 2015).

Gökmen ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, Al 7075 matrisli B₄C seramik parçacık takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler (FDKM) üretilmiştir. FDKM'ler, sıcak presleme yöntemiyle oluşturulmuş ve düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Ağırlıkça %10 ila %60 arasında değişen oranlarda B₄C parçacıkları matris malzeme içine homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Al 7075 matrisli FDKM numuneleri, farklı hızlarda darbe testine tabi tutulmuş ve delinme davranışları incelenmiştir. Düşük hızlı darbe testleri, kompozit malzemenin elastik deformasyonunda enerji sönümlemenin önemli olduğunu göstermiştir (Gökmen ve diğerleri, 2018).

Essam ve diğerleri tarafından 2022 yılında gerçekleştirilen çalışma, bir bakır alaşımı olan 88Cu–8Ni–4Sn'nin (% ağırlık) mekanik özelliklerini, elektriksel ve termal iletkenlikte önemli bir azalma olmadan iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, toz metalürjisi tekniği kullanılarak Ti₃AlC₂ MAX fazı Cu alaşımına eklenerek beş katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler (FDK'ler) hazırlanmıştır. FDK'lerin alt tabakası Cu alaşımından oluşurken, diğer tabakalar farklı oranlarda MAX fazı eklenerek oluşturulmuştur. Bu çalışmada, öğütülmüş tozlar X-ışını kırınımı (XRD) ve yüksek çözünürlüklü geçirgen elektron mikroskobu (HRTEM) ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, FDK katmanlarının mekanik, termal ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, öğütme işleminin metaller arası fazlar oluşturduğunu ve bunun Ti₃AlC₂ fazına katkıda bulunarak partikül boyutunu azalttığını göstermektedir. FDK'nin üst tabakası, nihai güç ve mikrosertlikte belirgin bir iyileşme göstermiştir. Ayrıca, FDK'lerin üst katmanındaki termal ve elektriksel özelliklerde azalma çok azdır. Bu çalışmanın sonuçları, FDK'lerin Cu alaşımının çeşitli özelliklerini iyileştirmek için uygun bir çözüm olduğunu ve punta kaynak elektrotları, yüksek performanslı elektrik anahtarları, antikorozyon kaplamalar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir (Moustafa ve diğerleri, 2022).

Gu ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışma, çok malzemeli lazerle tozla birleştirme (LPBF) sürecinde kusur oluşum mekanizmalarını araştırmayı amaçlamaktadır. DEM-CFD (Discrete Element Method-Computational Fluid Dynamics) modellemesi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma, Invar36 ve Cu10Sn tozlarının kullanıldığı bir malzeme karışımını incelemektedir. Yöntem olarak, toz karışımının içeriği ve işlem

parametrelerinin iz morfolojisi, erimiş Invar36 tozunun gelişimi ve katmanlar arası kusur oluşumu üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla DEM-CFD modellemesi kullanılmıştır. Yatay ve dikey yönleri boyunca farklı özelliklere sahip çoklu malzeme yapıları üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, Cu10Sn içeriğinin artmasıyla Invar36 tozu için daha az bir erimiş yüzey derinliği ve kusurların oluştuğunu göstermektedir. Katmanlar arası kusurların kalınlıkla ilişkili olduğu belirlenmiştir. İz genişliği ise Invar36 içeriğinin azaltılmasıyla önce artmakta, sonra azalmaktadır. Yatay ve dikey yönlere göre farklı işlem parametrelerinin optimize edilmesi önerilmiştir. Bu çalışma, çok malzemeli LPBF sürecinde kusurların mekanizmalarını anlamak için önemli bir adımdır. Gelecekteki çalışmalar daha fazla analiz yaparak mikroyapı gelişimi ve mekanik davranışı araştırabilir (Gu ve diğerleri, 2021).

Hamamcı, Nair ve Cerit tarafından 2023 yılında yapılan çalışma, demir (Fe) ve bor karbür (B_4C) parçacıklarının kullanılarak yerinde toz metalürjisi (IPM) ile üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş Fe/Fe₂B kompozitlerinin üretilebilirliğini, metalografik ve mekanik karakterizasyonunu araştırmaktadır. Çalışmada FDM'lerin farklı bileşim dereceleri kullanılarak oluşturulmuş olup, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı karakterizasyonu yapılmış, FDM'lerin sertlikleri belirlenmiştir. FDM'lerin yükleme davranışı eğilme ve darbe testleriyle analiz edilmiştir. Mikroyapısal analizler, B_4C 'nin demir ile reaksiyona girerek Fe₂B fazlarının sentezlendiğini göstermiştir. Sertlik ve kırılma özellikleri, takviye oranına ve yükleme yüzeyine bağlı olarak değişmiştir. Sonuçlar şunları göstermektedir:

- %20 B_4C takviye oranı maksimum takviye oranıdır. Bu sınırın aşılması çatlamalara neden olabilir.
- FDM'deki sert katmanlar derecelendirme ile birlikte yüzeyler arası geçişlerde değişmektedir.
- Katmanlandırma tekniği, mekanik özellikleri iyileştirmiştir.
- Yükleme yönü, sertlik ve kırılma özellikleri üzerinde etkilidir.
- Sert yüzeyden yüklenenler kırılmalı, %20 B_4C yüzeyinden yüklenenler ise sünek davranış göstermiştir.

Bu çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş Fe/Fe₂B kompozitlerinin üretimine ve mekanik davranışına ilişkin önemli bulgular sağlamaktadır (Hamamcı ve diğerleri, 2023).

Kumar ve diğerkleri (2023) tarafından yapılan çalışmanın amacı, alüminyum bazlı malzemelerin geri dönüşümü ve köpürtülmesi için toz metalurjisi yöntemlerinin kullanımını araştırmaktır. Yöntem olarak, farklı köpürtme ve toz metalurjisi teknikleri kullanılmış ve bu tekniklerin alüminyumun yeniden işlenmesi ve köpürtülmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada alüminyum alaşımından yapılmış köpüklerin oluşturulması için sıkıştırma basıncı, takviye ağırlığı veya yoğunluğu ve takviye tipi gibi faktörlerin önemi vurgulanmıştır. Kullanılan malzeme alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Bu malzemeler, toz metalurjisi yöntemiyle geri dönüştürülerek alüminyum bazlı mühendislik malzemeleri elde edilmiştir. Ayrıca, toz metalurjisi ve köpürtme maddesi kullanılarak alüminyum köpükler de üretilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, toz metalurjisi yöntemiyle geri dönüştürülen alüminyum bazlı malzemeler, birincil kompozite göre üstün mekanik özelliklere sahip olmuştur. Alüminyum hurdasının birincil alüminyumla birlikte geri dönüştürülmesi, daha az gözeneklilik içeren iki fazlı bir malzeme elde edilmesini sağlamıştır. Sıkıştırma basıncı, ağırlık oranı ve talaş boyutu gibi toz metalurjisi işlem parametrelerinin optimizasyonu, alüminyumun yeniden işlenmesi ve köpürtülmesi için önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, alüminyum köpüklerin oluşturulması için yüksek basınçlı sıkıştırma gereklidir (Kumar ve diğerkleri, 2023).

Rodriguez-Albelo ve diğerkleri tarafından (2023), kemik dokularını taklit eden metal implantların üretimi için β -Titanyum alaşımlarının potansiyelini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, Ti35Nb7Zr5Ta β -Titanyum alaşımından gevşek sinterleme yöntemi kullanılarak gözenekli numuneler üretilmiştir. Ham tozlar ve sinterlenmiş numuneler, fizikokimyasal ve mikroyapısal analizlerle ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir. Tribo-mekanik davranışı, ultrason tekniği, aletli mikro girinti (P-h eğrileri) ve çizik testleriyle değerlendirilmiştir. Biyo-işlevsel davranış ise empedans spektroskopisi ve temas açısı ölçümleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, β -Titanyum alaşımının daha iyi biyomekanik dengeye sahip olduğunu göstermiştir. Ti35Nb7Zr5Ta alaşımı, ticari olarak saf titanyuma göre daha yüksek elektriksel empedans değerleri sergilemiş ve biyo-korozyon davranışında azalma gözlenmiştir. Bu çalışma, gevşek sinterleme yönteminin endüstriyel imalat için uygun, ekonomik ve ölçeklenebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmanın bulguları, β -Titanyum alaşımlarının kemik dokularını taklit eden implantlar için potansiyel bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Gözeneklilik düzeyi, kimyasal bileşim ve mikroyapının implantların performansını

etkilediği belirlenmiştir. Bu çalışma, ileride daha gelişmiş implant malzemelerinin ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Rodriguez-Albelo ve diğerleri, 2023).

Madan ve Bhowmick tarafından, 2022 yılında, toz metalürjisi tekniği kullanılarak üç katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) bir disk imal etmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Diskin her bir katmanında metal-seramik bileşimi radyal olarak değişmektedir. Mikroyapısal inceleme, optik mikroskop ve SEM ile yapılmış ve alümina parçacıklarının matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Arayüzlerde çatlak veya boşluk olmadığı ve katmanlar arasındaki geçişin düzgün olduğu tespit edilmiştir. Katman-2 ve katman-3, içerdikleri daha yüksek alümina bileşimi nedeniyle katman-1'e göre daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Arşimet prensibi kullanılarak numunenin yoğunluğu hesaplanmış ve teorik modeller kullanılarak gözenekli FD malzemelerinin yoğunluğu tahmin edilmiştir. Ayrıca, malzeme bazında teorik modeller kullanılarak Young modülü ve akma dayanımı gibi malzeme özellikleri tahmin edilmiştir. Bu malzeme özellikleri sonlu eleman analiziyle birleştirilerek, dönen disk uygulaması için geçerlilikleri de dikkate alınarak stres analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, toz metalürjisi tekniğinin ekonomik ve işlevsel derecelendirilmiş disklerin üretimi için uygun olduğunu göstermektedir (Madan ve Bhowmick, 2022).

Majzoobi, Mohammadi ve Rahmani tarafından 2022 yılında yapılan çalışma ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Ti/HA ve Ti/SiO₂ FDM örneklerinin üretilmesi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının gerinim hızıyla nasıl değiştiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yeni tasarlanmış bir karıştırıcı kullanılarak parçacıkların homojen bir şekilde karıştırılması sağlanmıştır. Farklı gerinim hızlarında çeşitli testler ve mikroyapı incelemeleri yapılarak gerinim hızının numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sonuçlar, karıştırıcı yöntemiyle elde edilen FDM'lerin parçacıkları başarılı bir şekilde karıştırdığını ve doğrusal bir sınıflandırma sergilediğini göstermiştir. Ti/HA ve Ti/SiO₂ için en yüksek bağıl yoğunluk değerleri, bölünmüş Hopkinson çubuğu ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Dinamik sıkıştırma yöntemiyle üretilen Ti/HA ve Ti/SiO₂ FDM'lerin nihai basınç dayanımı, statik sıkıştırma yöntemiyle üretilen numunelere göre önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, yükleme hızının artmasıyla maksimum girinti kuvveti ve enerjisi de artmıştır. Bununla birlikte, seramik takviye içeriğinin artması (HA veya SiO₂) maksimum kuvvet ve girinti enerjisini azaltmıştır. Örneğin, Ti/SiO₂ FDM'lerde, seramik içeriği %0'dan %100'e

değiştirildiğinde maksimum girinti kuvveti %79 azalmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, FDM'lerin tasarımında ve üretiminde önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu malzemelerin tıbbi implantlar gibi uygulamalarda kullanılması potansiyeline sahip oldukları düşünülmektedir (Majzoobi ve diğerleri, 2022).

Chen ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan çalışmanın amacı, kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle AlN/Mo FDM'lerin üretimi için alüminyum nitrür (AlN) ve molibden (Mo) kullanarak, mikroyapıların mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmektir. AlN/Mo FDM'lerin bileşim üssü p değerine göre farklı örnekler hazırlanmış, girinti ve eğme testleriyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, $p < 1$ değerine sahip örneklerin, $p \geq 1$ değerine sahip örneklerden metal açısından daha zengin bir yapı sergilediğini göstermektedir. AlN/Mo FDM'lerin radyal eğilme ve kesme dayanımı, $p < 1$ değerine sahip örneklerde sırasıyla 369,78 MPa ve 48,01 MPa olarak maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ayrıca, gözeneklilik ve seramik/metal arayüzü ile karşılaştırıldığında, bileşenlerin dağılımının eğilme ve kayma direncinin iyileştirilmesinde en önemli faktör olduğu gözlemlenmiştir. Kademeli katmandaki sert metal ağ içeriği arttıkça, AlN/Mo FDM'lerin eğilme ve kesme mukavemeti de artmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, AlN/Mo FDM'lerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için bileşim üssü ve dağılımının önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, ileri malzeme mühendisliği alanında FDM'lerin tasarımı ve üretimi için önemli bir katkı sağlamaktadır (Chen ve diğerleri, 2020).

Morampudi ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan çalışma, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak nano boyutlu ZrB_2 partikülleri ile takviye edilmiş Al6061 alaşım matrisinden Alüminyum Metal Matris Nano Kompozitleri (AMMNK) üretimini incelemektedir. Mikroyapı analizleri, ZrB_2 parçacıklarının homojen olarak dağıldığını ve daha az gözenekli bir yapı oluşturduğunu göstermiştir. Yoğunluk, seramik takviye yüzdesine bağlı olarak artış göstermiştir. Korozyon testleri, Al6061/ ZrB_2 kompozitlerinin daha iyi korozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, nano takviyeli Al6061/ ZrB_2 AMMNK'nin çeşitli endüstrilerde potansiyel uygulamalara sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Morampudi ve diğerleri, 2022).

Özusta ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışma ile toz metalürjisi yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik matrisli bor karbür takviyeli FDM'nin üretimi amaçlanmaktadır. Paslanmaz çelik ve bor karbür tozları karıştırılarak sıcak pres cihazında numuneler üretilmiştir.

Mikroyapı analizi ve sertlik ölçümleri yapılarak mekanik özellikler incelenmiştir. Mikroyapı analizlerinde takviye oranıyla birlikte bor karbür miktarının arttığı görülmüştür. Sertlik testleri sonuçlarına göre, takviye oranı arttıkça sertlik değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Çalışma, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik matrisli bor karbür takviyeli malzemenin gözenek miktarının minimum düzeyde tutulduğunu ve bor karbür takviyesinin homojen bir şekilde yapı içerisine dağıldığını göstermektedir. Bu malzemenin yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip olduğu düşünülmektedir, bu da makine elemanlarının üretiminde kullanılabilirliğini ve özelliklerinin geliştirilmesi potansiyelini göstermektedir (Özusta ve diğerleri, 2019).

Rajasekhar, Babu ve Davidson tarafından 2021 yılında yapılan çalışmanın amacı, toz metalurjisi kullanarak Al-Cu malzemelerin farklı hacim fraksiyonlarına sahip FDM'lerin üretimi ve karakterizasyonunu araştırmaktır. Çalışmada, Cu içeriği (ağırlıkça % 0, 5, 10 ve 15) değiştirilen toz karışımları kullanılmıştır. Bu karışımlar 400 MPa basınçta sıcak preslenmiş ve 550 °C'de 3 saat boyunca sinterlenmiştir. Malzemelerin karakterizasyonu için Optik Mikroskop, Geri saçılmış elektron Modu, taramalı elektron mikroskobu ve XRD analizi gibi teknikler kullanılmıştır. Mikroyapısal analizler, Al matrisinde dağılan Al₂Cu fazının Cu içeriği arttıkça kademeli olarak değiştiğini göstermiştir. Mekanik özellikler ise sertlik ve yoğunluk gibi parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Al-Cu FDM'lerin mikro-mekanik özelliklerinde malzeme bileşimi, sinterleme sıcaklığı ve kalma süresine bağlı olarak bir gelişme olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, FDM numunelerinde çatlak tespit edilmemiş ve iyi bir arayüz bağı sağlanmıştır. FDM'lerin sertlik ve yoğunluk özellikleri, FDM olmayan numunelerin homojen karışımıyla karşılaştırıldığında artmıştır. Bu çalışma, Al-Cu FDM'lerin üretimi ve karakterizasyonu konusunda önemli bulgular sunmakta ve malzeme mühendisliği alanında ileriye yönelik uygulamalara yönelik temel bir araştırma olarak değerlendirilmektedir (Rajasekhar ve diğerleri, 2021).

Shamami, Rabiee ve Shakeri (2022) tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga sinterleme tekniği kullanılarak Mg/HA fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin başarılı üretimini incelemiştir. Farklı HA içeriklerine sahip 2, 3 ve 4 katmanlı numuneler ile tek katmanlı saf Mg numuneleri kullanılmıştır. Toz metalurjisi ve hızlı mikrodalga sinterleme tekniği kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler, çeşitli analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Sonuçlar, mikrodalga sinterlemenin Mg/HA FDM'lerinin

üretiminde etkili olduğunu ve kısa sürede homojen mikroyapının elde edilebileceğini göstermiştir. Katmanlı numunelerin saf Mg'ye göre daha yüksek mikrosertlik ve basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, çok katmanlı numunelerin saf Mg'ye göre üstün korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, Mg/HA FDM'lerinin üretiminde mikrodalga sinterleme tekniğinin potansiyelini vurgulamaktadır. Bu teknik, kısa işlem süresi ve homojen mikroyapının elde edilebilmesi gibi avantajlarıyla bu malzemelerin üretiminde tercih edilebilir bir yöntem olarak önerilmektedir. Sonuçlar, Mg/HA FDM'lerinin mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerinde HA katılımının ve tabaka sayısının önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir (Shamami ve diğerleri, 2022).

Sing ve diğerleri tarafından, 2022 yılında yapılan çalışmanın amacı, Al bazlı FDM'lerin mekanik ve tribolojik davranışı üzerinde takviyelerin etkisini araştırmaktır. Çalışmada alüminyum, farklı takviyelerin kullanımıyla Al FDM'ler üretmek için tercih edilen malzeme olarak kullanılmıştır. Santrifüj döküm yöntemi ve SiC takviyesi gibi üretim teknikleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, Al FDM'lerin geleneksel kompozitlere kıyasla üstün mekanik ve tribolojik özellikler sunduğunu göstermektedir. Ayrıca takviyelerin kullanımıyla Al FDM'lerin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilebileceği belirlenmiştir. Hibrit takviyelerin etkisi henüz yeterince araştırılmamış olsa da bu çalışma, takviyelerin Al FDM'lerin performansını anlamak ve gelişmiş mekanik ve tribolojik özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla önemli bir adımdır (Singh ve diğerleri, 2022).

Srinivas ve diğerleri (2022) tarafından, otomobil ve havacılık uygulamalarında kullanılan bileşenlerin performansını artırmak için gelişmiş akıllı malzemelerin kullanımını araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışma, katmanlı bir bileşik malzeme geliştirme üzerine odaklanmaktadır. Yöntem olarak, toz metalürjisi tekniği kullanılarak Al 356 matris metaline SiC ve Ni toz takviyeleri eklenerek çok katmanlı kompozit numuneler sentezlenmiştir. Sentezleme işlemi, sıkıştırma basıncı ve sıcaklık kontrollü bir makine yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, karakterizasyon çalışmaları için mekanik, mikroyapısal ve tribolojik özellikler açısından numuneler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Kullanılan malzemeler arasında Al 356 matris metalinin yanı sıra SiC ve Ni toz takviyeleri yer almaktadır. Bu malzemelerin belirli oranlarda karıştırılması ve sıkıştırma işlemiyle kompozit numuneler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen malzemenin saf

alüminyum ana metale göre daha yüksek bir sertliğe sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, SEM analizleri bileşenlerin güçlü bağlanmasını ve yüzey kusurlarının oluşmadığını göstermektedir. EDAX analizleri, beklenmeyen malzemeler veya karbürlerin bulunmadığını doğrulamaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, otomobil ve havacılık sektöründe kullanılan bileşenlerin performansını artırmak amacıyla geliştirilen akıllı malzemelerin potansiyelini göstermektedir (Srinivas ve diğerleri, 2022).

Surya ve Nilesh tarafından, 2019 yılında yapılan çalışmada, toz metalürjisi tekniği kullanılarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir malzemenin sentezi ve mekanik davranışı incelenmektedir. Araştırma, düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olan saf alüminyumun matris olarak seçilmesiyle başlamıştır. Alüminyum matrisine takviye olarak silisyum karbür seçilmiştir çünkü silisyum karbürün yüksek sertlik özelliği vardır. Çalışma, farklı hacim fraksiyonlarında (%0, %3, %7, %10) silisyum karbür içeren dört tabakalı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimine odaklanmıştır. Bu FDM'ler, inert bir atmosferde 580°C'de sinterlenmiştir. Yapılan mikroyapı analizi sonucunda, homojen karışımlar ve çatlaksız tabakalar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, FDM'nin mekanik özellikleri (sertlik ve tokluk), saf alüminyumdan daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, FDM'lerin homojen karışımlar elde ettiği ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, FDM'lerin potansiyel olarak daha iyi darbe dayanımı ve deformasyon direnci sağladığını göstermektedir (Surya ve Nilesh, 2019).

Übeyli ve diğerleri (2019), silisyum karbürle güçlendirilmiş FDM'nin zırh malzemesi olarak kullanılma potansiyelini araştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada metalik ve seramik tozlardan farklı kalınlıklarda fonksiyonel derecelendirilmiş SiC Alüminyum Alaşım (AA) 7075 kompozitler, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Numunelerin çökeltme sertleşme davranışı belirlenmiş ve mikroskopi teknikleri kullanılarak mikroyapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ardından, FDM numuneleri zırh delici mermilerle test edilerek çarpma davranışları analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, araştırılan FDM'ler balistik koruma sağlamada başarılı olmamıştır, özellikle 25 mm kalınlığa kadar olan numuneler mermi etkisine dayanamamıştır. Numunelerde gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Makro düzeyde test edilen numunelerde büyük çatlaklar ve tıkaç oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca, deformasyon bölgesine yakın bölgelerde mikro çatlaklar, deforme olmuş ve uzamış taneler belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, incelenen tüm kalınlık ve

bileşimlerde FDM'lerin tam bir balistik koruma sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Tam bir balistik koruma tasarımı için daha kalın FDM'lerin kullanılması gerekmektedir, ancak bu durumda bile FDM'ler hafif zırh üretimi için uygun bir çözüm olmayabilir. FDM'lerin deformasyon tipi genel olarak kırılğan olarak değerlendirilmiştir. Büyük çatlaklar ve tıkaç oluşumu makro düzeyde gözlemlenmiştir. Ayrıca, özellikle deformasyon bölgesine yakın bölgelerde mikro çatlaklar ve deforme olmuş, uzamış taneler tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, FDM'lerin tam bir balistik koruma sağlamadığını ve kırılğan bir deformasyon tipine sahip olduğunu göstermektedir (Übeyli ve diğerleri, 2014).

Van Do ve Lee tarafından 2018 yılında, mekanik kenar sıkıştırması altındaki FDM sandviç plakalarının burkulma sonrası davranışını sayısal olarak analiz etmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, radyal nokta interpolasyon yöntemi (RPIM) ve yüksek dereceli kayma deformasyon teorisi (HSDT) temel alınarak basit ancak doğru bir ağsız yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşım, burkulma sonrası tepkilerin tahmin edilmesi için kullanılmıştır. HSDT, kusurlu FDM sandviç plakası için büyük deformasyonu ve ilk geometrik kusuru açıklayan von Kármán tipi doğrusal olmayan bir denklem oluşturur. Alan değişkenleri, radyal temel fonksiyonun, şekil fonksiyonlarının parametresi olmadan yapılandırıldığı kompakt bir şekilde desteklenen bir biçimde tahmin edilir. Burkulma sonrası tepkileri elde etmek için, değiştirilmiş Newton-Raphson yinelemeli şemasını kullanan bir çözüm prosedürü tasarlanmıştır. Ağsız yaklaşımın performans doğruluğu, karşılaştırmalı çalışmalar ve düzlem içi mekanik sıkıştırmaya tabi tutulan FDM sandviç plakalarının burkulma sonrası özelliklerini aydınlatmak için yapılan ayrıntılı parametrik incelemelerle doğrulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, önerilen ağsız yöntemin FDM sandviç plakalarının burkulma sonrası tepkilerini tahmin etmek için basit ve doğru bir sayısal araç olarak kullanılabileceğini ve ilk geometrik kusur ve yükleme tipinin burkulma sonrası davranış üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir (Van Do ve Lee, 2018).

Wang ve Wei tarafından 2012 yılında yapılan çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) ara tabakaya sahip kalın cidarlı sandviç silindirik yapının mekanik davranışları üzerinde malzeme homojensizliğinin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, üç parametrelili bir model ve laminat yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Malzemenin homojen olmamasının sandviç silindirik yapının mekanik davranışları üzerinde önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, malzemenin homojen olmamasının çember gerilimi üzerinde radyal gerilimden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca,

yüksek dereceli modların rezonans frekansları, malzeme homojensizliğine karşı daha duyarlıdır. Bu çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik yapıların tasarımında kullanılabilecek parametre analizi ve özel mühendislik gereksinimlerine yönelik uygulamalarıyla önemli bir katkı sağlamaktadır (Wang ve Wei, 2012).

Wang ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışma, saf titanyumdan başlayarak %Al %50 Ti-50'ye kadar tasarlanmış bir bileşim aralığına sahip titanyum-alüminid (TiAl) fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzemenin başarılı bir şekilde üretildiği çift telli ark eklemeli imalat yöntemini (WAAM) ele almaktadır. Araştırmanın amacı, çift telli ark katkılı imalat yöntemiyle dikkatlice tasarlanmış TiAl alaşımının üretilmesidir. İmalat işlemi, iki ayrı tellerin tel besleme hızlarının ayarlanmasıyla istenen kimyasal bileşimdeki değişiklikleri elde etmektedir. Elde edilen sonuçlar, malzemenin gradyan yönünde farklı morfoloji, mikroyapı, mekanik özellikler ve oksidasyon davranışı sergilediğini göstermektedir. Al konsantrasyonu arttıkça, üretilen malzemenin yapısal evrimi şu sıralama ile karakterize edilebilir: α - β dubleks yapı, α - α_2 katmanlı yapı, büyük α_2 taneleri, α_2 - γ dubleks katmanlı yapı ve γ interdendrite yapısı. Mikrosertlik ve gerilme mukavemeti, Al içeriği arttıkça benzer bir eğilim sergilemektedir ve tek bileşenli bileşenlerle karşılaştırılabilir seviyelere ulaşmaktadır. Oksidasyon direnci ise Al içeriğinin azalmasıyla birlikte artan bir oranda düşmektedir çünkü TiAl alaşım matrisindeki oksit kırılma etkisi göstermektedir. Bu deneysel çalışma, WAAM yönteminin istenen bileşim gradyanına, uygun mekanik özelliklere ve kabul edilebilir oksidasyon davranışına sahip, hatasız TiAl FDM üretebilme yeteneğini göstermektedir (Wang ve diğerleri, 2018).

Zhu ve diğerleri (2001) tarafından yapılan çalışma, ZrO_2 -NiCr bileşimi üzerinde yapısal varyasyonlara dayalı olarak derecelendirilmiş malzeme geliştirmeyi amaçlamaktadır. Farklı bileşimlere sahip karışık tozların ön biçimlendirme ve sinterleme işlemleri incelenerek uygun üretim prosedürü belirlenmiştir. Mikroskobik gözlemler, ZrO_2 -NiCr FDM'nin makroskopik seramik/metal arayüzünü ortadan kaldırarak kademeli olarak dağıldığını göstermektedir. Yöntem olarak, farklı karışım oranlarına sahip karışık tozlar kullanılarak ön biçimlendirme ve sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. FDM, uygun üretim prosedürü olarak seçilmiştir. Kullanılan malzeme, ZrO_2 ve NiCr'den oluşan karışık tozlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, ZrO_2 -NiCr sisteminin şekillendirme ve sinterleme davranışı bileşimsel varyasyona bağlıdır. Saf bileşen malzemesi neredeyse tam yoğunlaştırma elde edebilirken, karışık bileşenlere sahip kompozitler için bu daha zor olmaktadır. FDM'lerde,

makroskopik seramik/metal arayüzü ortadan kalkmıştır. Bileşenler arasında reaksiyon belirlenmemiştir ve mekanik özellikler yapısal değişikliklere bağlı olarak çeşitli gradyan dağılımları göstermektedir (Zhu ve diğerleri, 2001).

Yıldız ve Sur tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, farklı yapı ve bileşime sahip tabakalardan oluşan Al7075 alaşımlı FDM'lerin (FDM'lerin) mikroyapı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Al7075/Al₂O₃ FDM'ler, toz metalurji yöntemi ve sıcak presleme işlemiyle üretilmiştir. Üç, dört ve altı tabakalı Al7075/Al₂O₃ FDM'ler üretilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın kullanılan malzemesi Al7075 alaşımı ve Al₂O₃ takviye partikülleridir. Al₂O₃ takviye partikülleri, yapı içinde homojen olarak dağılım göstermektedir. Ancak, artan Al₂O₃ miktarının gözenek miktarını ve topaklanmayı artırdığı tespit edilmiştir. Delaminasyon belirtileri tabakalar arasında gözlenmemiştir. Sonuçlar, düşük oranlı tabakalarda (%10, %20 ve %30) Al₂O₃ takviyesinin homojen bir dağılım sergilediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, takviye oranının artması gözenekliliği artırmıştır ve en yüksek gözeneklilik %60 Al₂O₃ takviye oranına sahip tabakada gözlenmiştir. Tabakalar arasında delaminasyon belirtileri gözlenmemiştir (Yıldız ve Sur, 2019).

Jin ve diğerleri tarafından 2005 yılında yapılan çalışma ile Mullit/Mo FDM'lerin termomekanik özellikleri araştırmıştır. FDM'ler, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş ve mikroskobik gözlemler, bu malzemenin mikroyapısının kademeli bir varyasyona sahip olduğunu ortaya koymuştur. Mullit/Mo sistemi, bileşim değişikliklerine bağlı olarak kademeli dağılımlara sahip termomekanik özelliklere sahiptir. Bu çalışma, FDM'lerin yekpare mullit malzemeden daha iyi termal şok direncine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, FDM'lerin termal şok direnci, sinterleme kaynaklı artık termal streten etkilenmektedir. Ayrıca çatlak oluşumu ve mekanizması da incelenmiştir. Mullit/Mo sistemlerinin termomekanik özelliklerinde, mekanik özellikler Voigt modelini takip ederken, termal özellikler Reuss modelini izleme eğilimindedir. Çalışma, FDM'lerin termomekanik özelliklerini incelemekte ve FDM'lerin daha iyi termal şok direncine sahip olduğunu göstermektedir. FDM'lerin termal şok direnci, sinterleme kaynaklı artık termal streten etkilenmektedir. Termal şok direncini artırmak için, artık çekme gerilimini azaltma veya seramik yüzeyinde sıkıştırıcı termal gerilim oluşturma gibi yöntemler önerilebilir. Ayrıca, çatlak oluşumu ve ilerlemesi, FDM'lerdeki termal stres dağılımıyla yakından

ilişkilidir ve çatlakların mullit tabakasına yayılmasını engellemek için çekme gerilimi dağılımı ve R-eğrisi davranışı önem taşımaktadır (Jin ve diğerleri, 2005).

Kırmızı, Arık ve Çinici (2018) tarafından yapılan çalışmada, alüminyum 7075 esaslı silisyum karbür (SiC) takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin mekanik ve balistik özellikleri incelenmiştir. Al7075 ve SiC tozları, farklı sıcaklık ve basınç parametreleri kullanılarak farklı oranlarda SiC içeren dört tabaka FDM üretmek için toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. FDM'lerin mekanik özellikleri, sertlik ve enine kopma mukavemeti (TRS) testleriyle belirlenmiştir. Balistik performanslarını değerlendirmek için ise balistik testler yapılmıştır. Ayrıca, Al7075/SiC FDM'ler ve Al köpüğünden oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler (FDKM) üretilmiştir. Bu malzemelerin yoğunluk, mikroyapı, sertlik, TRS ve çekme dayanımı gibi özellikleri incelenmiştir. FDM'lerin ve FDKM'lerin üretim süreci ve SiC takviyesinin matris üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, SiC takviyesinin matris içinde homojen dağıldığını ve takviye oranının artmasıyla birlikte sertlik ve TRS değerlerinin arttığını göstermiştir. En iyi mekanik özelliklerin 500°C ve 400 MPa üretim parametreleri kullanılarak elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, FDKM'lerin düşük penetrasyon derinliğiyle mermi kinetik enerjisini emdiği gözlenmiştir (Kırmızı ve diğerleri, 2019).

Özmen ve Özhan (2021) tarafından, fonksiyonel derecelendirme yöntemiyle üretilen tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada eklemeli imalat yöntemi kullanılarak dört farklı polimer malzeme kullanılmıştır. PLA, ABS, PETG ve PA malzemeleri ve bu malzemelerin PLA-PA, ABS-PA ve PETG-PA fonksiyonel derecelendirilmiş versiyonları çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonuçlarına göre, FDM'lerin maksimum çekme dayanımlarının tekil malzemelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Malzeme uyumsuzluğu ve yapışma sorunları nedeniyle FDM daha az şekil değiştirebilme özelliğine sahiptir. Elastisite modülü değerleri, FDM'lerin özelliklerini tekil malzemelerin ortasında veya PA malzemesinin üzerinde göstermektedir. Kopma uzaması değerleri de FDM'lerin kopma uzamasının tekil malzemelere kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, fonksiyonel derecelendirme yöntemiyle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu ancak bazı dezavantajları bulunduğu görülmektedir (Özmen ve Özhan, 2021).

Ansari, Jabari ve Toyserkani tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, LDED (lazer destekli enerji biriktirme) süreci aracılığıyla üretilen EM-FDM (eklemeli imalat-fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler) sistemlerinin güncel durumu ve teknolojiadaki son gelişmeler incelenmektedir. Farklı metalik sistemlerin kullanımıyla ilgili fırsatlar ve zorluklar vurgulanmıştır. Malzeme seçimi, faz oluşumu ve özellikler gibi konular özetlenmiş ve tartışılmıştır. EM-FDM, geleneksel üretim yöntemleriyle gerçekleştirilmesi zor olan metalik yapıların üretiminde bir paradigma değişikliği sunmaktadır. LDED süreci, toz besleme yoluyla metalik FDM'lerin üretimini sağlamaktadır. Bu sürecin başarıyla uygulanabilmesi için hassas toz ölçümü ve dağıtımını sağlayan gelişmiş besleme sistemlerine ihtiyaç vardır. EM-FDM'nin başarılı uygulanması birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Özellikle, termal özelliklerin yerleştirilmesi, mikroyapısal evrimin izlenmesi ve gerçek zamanlı kontrol gibi konular önemlidir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için yeni sensörler, kontrol sistemleri ve simülasyon modelleri geliştirilmelidir. EM-FDM'nin endüstri çapında uygulanabilmesi için teknik standartların oluşturulması da önemlidir. Şu anda, EM-FDM için özel standartlar bulunmamaktadır ve bu da endüstriyel uygulamaların benimsenmesini engelleyebilir. ASTM Komitesi F42 gibi kuruluşlar, bu alanda standart geliştirme çalışmalarına öncülük etmelidir. Sonuç olarak, EM-FDM'nin potansiyelini tam olarak ortaya çıkarabilmek için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bu çalışmalar, süreç kontrolü, karakterizasyon teknikleri ve endüstriyel uygulamaları kapsamalıdır (Ansari ve diğerleri, 2021).

Ghanavati ve Naffakh-Moosavy tarafından 2021 yılında yapılan çalışmanın temel hedefi, gradyan metalik malzemelerin eklemeli imalat süreçleri içerisindeki davranışlarını ve özelliklerini analiz etmektir. Bu amaç doğrultusunda, deneysel ve sayısal yöntemlerin birleşimini kullanarak malzemelerin performansını değerlendirmişlerdir. Çalışma, ilk olarak gradyan metalik malzemelerin genel bir tanıtımıyla başlamaktadır. Ardından, özellikle eklemeli imalat süreçlerine odaklanarak, bu malzemelerin üretim yöntemlerinin genel bir değerlendirmesini sunmaktadır. Malzeme analizine ilişkin bölüm, metal-metal, metal-seramik ve metal-intermetalik gradyan malzemeler olmak üzere üç ayrı bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmaları içermektedir. Bu çalışmalar, gradyan yapıdaki katmanların bileşimi ve süreç parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu optimizasyon, erimemiş parçacıklar, gözenekler, bozulmalar, artık gerilimler, istenmeyen fazlar, ayrışma ve çatlama gibi kusurların en aza indirilmesini hedeflemektedir. Ayrıca, sayısal çalışmalar da malzeme bilimi ve mühendisliği açısından

incelenmektedir. Bu çalışmalar, gradyan malzemelerin davranışını ve performansını tahmin etmek amacıyla simülasyon ve modelleme yöntemlerini kullanmaktadır. Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, gradyan metalik malzemelerin eklemeli imalat süreçlerindeki performanslarının katman bileşimi ve süreç parametrelerinin optimize edilmesiyle iyileştirilebileceğidir. Özellikle, metal-metal gradyan malzemelerin çekme özelliklerine odaklanarak, malzeme arayüz bağlantılarının gücünün artırılması ve homojen bir gradyan yapı elde edilmesinin önemli olduğu görülmüştür. Çalışmanın önerileri arasında ise gradyan metalik malzemelerin üretiminde kullanılan süreç parametrelerinin daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi yer almaktadır. Ayrıca, malzeme bileşiminin optimize edilmesi için deneysel çalışmaların yanı sıra simülasyon ve modelleme yöntemlerinin daha fazla kullanılması önerilmektedir. Bu çalışma, gradyan metalik malzemelerin eklemeli imalat süreçlerindeki davranışlarını anlamamıza ve gelecekteki araştırmalara yönelik yönlendirmeler sunmamıza yardımcı olmuştur. Önerilen çalışmalarla, gradyan metalik malzemelerin performansı ve özellikleri daha da iyileştirilebilir ve bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılması mümkün olabilir (Ghanavati ve Naffakh-Moosavy, 2021).

Saleh ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan çalışma, şu anda malzeme bilimi ve mühendislik camiasında büyük ilgi gören ve FDM'lerin üretim yöntemlerine genel bir bakış sağlayan bir araştırmanın sonuçlarını sunmaktadır. FDM'lerin avantajları, üretim yöntemlerinin zorlukları ve gelecekteki araştırma eğilimleri gibi konular ele alınmaktadır. Ayrıca, FDM'lerin mekanik özelliklerinin tahmin edilmesi ve karakterize edilmesi gibi konular da vurgulanmaktadır. FDM'lerin üretimi için kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi, malzeme bilimindeki ilerlemelerle birlikte önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bu çalışma, FDM'lerin üretiminde kullanılan yöntemlerin avantajlarını ve sınırlamalarını özetlemekte ve gelecekteki araştırma eğilimlerini tartışmaktadır. Ayrıca çalışmada, matematiksel modelleme, simülasyon çalışmaları ve eklemeli imalat gibi ileri tekniklerin FDM'lerin tasarımı ve üretimi için büyük potansiyele sahip olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada FDM'lerin gelecekteki gelişimi için bazı zorluklar da belirtilmektedir. Bu zorluklar arasında, üretim yöntemlerinin doğruluğunun artırılması, mekanik özelliklerin tahmin edilmesi ve karakterize edilmesi, çift gradyanlı FDM'lerin ve hibrit FDM'lerin güvenilirliğinin artırılması gibi konular yer almaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, FDM'lerin üretim yöntemlerine genel bir bakış sunmakta ve gelecekteki araştırma eğilimlerini tartışmaktadır. Araştırmacılar ve akademisyenler için değerli bir kaynak olup FDM'lerin tasarımı, üretimi ve uygulamaları konusunda rehberlik sağlamaktadır (Saleh ve diğerleri, 2020).

Sola, Belluci ve Cannillo tarafından 2016 yılında yapılan çalışmanın amacı, işlevsel olarak sınıflandırılmış malzemelerin ortopedik protezlerde kullanımının avantajlarını incelemek ve FDM'lerin tasarımı ve üretimiyle ilgili konuları ele alarak bilgi sağlamaktır. Yöntem olarak, literatür araştırması yapılmış ve mevcut çalışmalar incelenerek elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan malzeme, işlevsel olarak sınıflandırılmış malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeler, belirli bir yasa göre uzayda kademeli olarak değişen bileşime veya mikroyapıya sahiptir. FDM'ler, homojen olmayan özellikleri sayesinde belirli hizmet gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmış yenilikçi malzemelerdir. Elde edilen sonuçlar, FDM'lerin ortopedik protezler için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu malzemeler, orijinal kemiğin özelliklerini taklit ederek stres koruma etkisini en aza indirebilir ve implantın uzun ömürlülüğünü artırabilir. Ayrıca, implant ve çevreleyen kemik dokusu arasındaki kayma gerilimini azaltmaya yardımcı olurlar. Çalışmanın önerileri arasında, malzeme tasarımı ve geometri optimizasyonu için daha fazla hesaplama aracının geliştirilmesi ve FDM tabanlı greftlerin üretimi için mevcut tekniklerin iyileştirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, FDM'lerin etkin bir şekilde entegre edilmesi ve üretim süreçlerinde simülasyonların daha fazla kullanılması önerilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, işlevsel olarak sınıflandırılmış malzemelerin ortopedik protezler için potansiyel kullanımını araştırarak, FDM'lerin tasarımı ve üretimiyle ilgili önemli bilgiler sunmaktadır. FDM'ler, implantların performansını artırmak ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için dikkate alınması gereken yenilikçi malzemelerdir (Sola ve diğerleri, 2016).

Yan, Chen ve Liou tarafından 2020 yılında yapılan çalışmanın amacı, lazer metal biriktirme (LMD) yöntemi kullanarak metalik bileşimsel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimine genel bir bakış sunmaktır. Araştırma, metalik FDM'lerin bölgesel özelliklerini kontrol etme yeteneği ve avantajlarını değerlendirmeyi hedeflemektedir. LMD yöntemi, metalik FDM'lerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir eklemeli imalat (AM) işlemidir. Çalışma, farklı metalik FDM türlerinin LMD kullanılarak üretimi ve karakterizasyonu üzerine odaklanmaktadır. Bu amaçla, çeşitli metal alaşımları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Sonuçlar, LMD ile metalik FDM'lerin başarıyla üretilebildiğini ve istenen bölgesel özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Metalik FDM'ler, bileşimlerinin kademeli olarak değiştirilmesiyle farklı mukavemet seviyeleri, termal iletkenlik özellikleri veya diğer istenen özelliklere sahip olabilirler. Bu özellikler, belirli uygulamalarda daha iyi performans ve işlevsellik sağlamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, çalışma aynı

zamanda LMD ile metalik FDM'lerin üretiminde karşılaşılan zorlukları da ele almaktadır. Örneğin, çatlak oluşumu, intermetalik fazların kontrolü ve erimiş parçacıkların dağılımı gibi üretim sorunları dikkate alınmalıdır. Çalışma, bu sorunlara yönelik çözümler ve öneriler sunmaktadır. Sonuç olarak, LMD yöntemi kullanılarak metalik FDM'lerin üretimi üzerine yapılan çalışmalar, bölgesel özelliklerin kontrol edilebileceğini ve istenen performansı elde etmek için potansiyel sağladığını göstermektedir (Yan ve diğerleri, 2020).

Boggarapu ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, fonksiyonel olarak sınıflandırılmış malzemelerin ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmektedir. FDM'ler, yeni üretim teknikleri ve malzeme bilimi ilerlemeleriyle ortaya çıkan bir kompozit malzeme sınıfıdır. FDM'ler, kompozisyonel gradyanlar sergileyen ve malzeme özelliklerinin kademeli olarak değişmesini sağlayan özelliklere sahiptir. FDM'ler, havacılık, otomotiv, biyomedikal, madencilik, yangın geciktirme, uzay ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde kullanılabilir. Bu malzemeler, mükemmel mekanik performansları ve dayanıklılıkları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Ancak, FDM'lerin bazı dezavantajları vardır. Örneğin, yüksek sıcaklık uygulamalarında liflerin matris malzemeden ayrılması sonucu delaminasyon başarısızlığı meydana gelebilir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için araştırmacılar, Japonya'da FDM'ler olarak adlandırılan yeni bir kompozit malzeme sınıfını geliştirmişlerdir. FDM'lerin üretimi, derecelendirme ve konsolidasyon adı verilen iki aşamalı bir süreci içerir. Derecelendirme aşamasında, yapının temel malzemelerden veya tozlardan oluşturulması ve homojenleştirme işlemi yer alır. Ardından, kademeli yapı dökme malzeme olarak konsolide edilir. Bu işlem, malzeme gradyanlarının ve mikroyapısal gradyanların oluşumunu sağlar. FDM'lerin üretimi için çeşitli işleme yöntemleri kullanılır. İnce FDM'ler, fiziksel veya kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle üretilebilir. Toplu FDM'ler ise toz metalürjisi, santrifüj döküm ve katı serbest biçimli imalat gibi yöntemlerle üretilebilir. FDM'lerin özellikleri, kullanım alanlarına bağlı olarak ayarlanabilir. Örneğin, biyomedikal uygulamalar için FDM'ler, implantlarda kullanılabilir. Gözeneklilik derecesi ayarlanarak implantın ağırlığı ve yoğunluğu azaltılabilir ve insan dokusuyla uyumlu bir malzeme elde edilebilir. FDM'lerin özellikleri ve kullanım alanları, çeşitli endüstrilerde farklı avantajlar sağlar. Havacılık sektöründe, FDM'ler hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle uçak parçaları ve motor bileşenleri için tercih edilir. Ayrıca, FDM'lerin termal iletkenlikleri ayarlanabilir, bu da motorlarda daha iyi ısı transferi sağlar. Otomotiv endüstrisinde, FDM'lerin kullanımı araç ağırlığını azaltır ve yakıt verimliliğini artırır. FDM'ler ayrıca çarpışma enerjisini emme yetenekleri sayesinde araç güvenliğini artırmak için de

kullanılabilir. Biyomedikal alanında, FDM'lerin kullanımı protezler, implantlar ve diğer tıbbi cihazlar için çeşitli avantajlar sunar. FDM'lerin biyouyumluluğu optimize edilebilir ve dokularla daha iyi uyum sağlayan malzemeler üretilir. Ayrıca, FDM'lerin yüzey özellikleri ve dağılımı, hücre büyümesini ve doku rejenerasyonunu teşvik etmek için tasarlanabilir. Madencilik endüstrisinde, FDM'ler aşınma direnci ve dayanıklılık açısından önemli bir rol oynar. Özellikle, delici ve kesici araçlar gibi ağır iş makineleri parçaları için kullanılan FDM'ler, uzun ömür ve daha iyi performans sağlar. Yangın geciktirme uygulamalarında, FDM'lerin termal dirençleri ve yanmazlık özellikleri kullanılır. Farklı malzeme gradyanları, yangının yayılmasını yavaşlatır ve yapısal bütünlüğü korur. Uzay ve savunma sektöründe, FDM'lerin hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri, uzay araçları ve füzelerde kullanılan yapısal bileşenler için önemlidir. Ayrıca, FDM'lerin termal şok dayanıklılığı ve yüksek sıcaklık performansı, uzay atmosferindeki ekstrem koşullara karşı dayanıklılığı artırır. Sonuç olarak, FDM'lerin kullanımı, malzeme özelliklerinin kademeli olarak değiştirilmesine olanak tanıyarak, çeşitli endüstrilerde çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu malzemeler, dayanıklılık, hafiflik, termal özellikler, yanmazlık ve biyouyumluluk gibi özellikleri optimize edilebilen çok yönlü ve yenilikçi bir malzeme sınıfını temsil etmektedir (Boggarapu ve diğerleri, 2021).

Bu literatür taramasından çıkarım olarak; toz metalurjisi yöntemi ile üretilen FDM'lerin, endüstriyel uygulamalarda yüksek dayanıklılık ve performans sağlama potansiyeline sahip olduğu söylenebilmektedir. Bu kapsamda hazırlanan tez çalışmasında, Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik malzemeleri kullanılarak toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretimi alanındaki boşluğun doldurulması amacıyla, malzeme bileşimlerinin ve mikroyapıların mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi motivasyonu ile kapsamlı deneysel çalışmalar ve analizler planlanmıştır. Bu doğrultuda, farklı işleme parametrelerinin malzeme performansına etkisi değerlendirilerek, optimum üretim koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir.



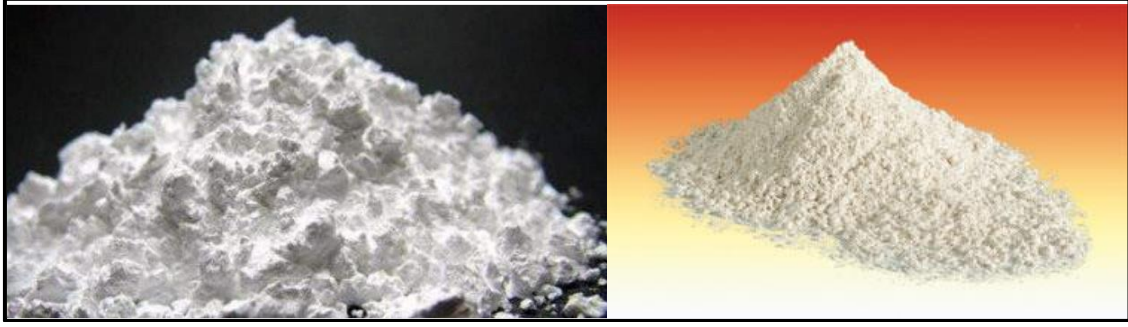
5. MALZEME VE METOT

5.1. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

Resim 5.1’de görülen Al_2O_3 ve ZrO_2 , yüksek erime noktası ve dayanıklılığı nedeniyle birçok endüstriyel ve teknolojik uygulamada tercih edilen seramik malzemelerdir. Al_2O_3 , aşındırıcı malzemeler ve yüksek sıcaklık yalıtkanları için, ZrO_2 ise termal şok dayanımı gerektiren uygulamalar ve biyomedikal implantlar gibi daha esnek ve dayanıklı uygulamalarda tercih edilmektedir (Paladino ve Kingery, 1962; Subbarao 1981). Bu iki malzemenin karışımı olan Al_2O_3 - ZrO_2 kompozitleri ise, her iki malzemenin avantajlarını bir araya getirerek, özellikle yüksek aşınma direnci ve sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Görselleri Resim 5.1’de verilen bu malzemelerin, çalışmada farklı özellikleri bir araya getirilerek numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1’de ise bu malzemelerin tipik özellikleri verilmiş olup, sinterlenebilirlik, sertlik, vb. gibi parametrelerdeki farklılıklar, üretim sırasında yapılan optimizasyonlara ve kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir.

Çizelge 5.1. Al_2O_3 ve ZrO_2 özellikleri (Turon-Vinas ve Anglada 2018, Ören 2023, Yurdakul, 2023; Çavdar ve Efe, 2024)

Özellik	Alümina (Al_2O_3)	Zirkonya (ZrO_2)
Erime Sıcaklığı	2050°C	2700°C
Sertlik	1750 HV	1200 HV
Termal Genleşme Katsayısı	$8,4 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$10,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$
Kimyasal Stabilite	Yüksek kimyasal stabilite, asidik ve bazik ortamlara karşı dirençli	Yüksek kimyasal stabilite, oksidasyon direnci
Sinterlenebilirlik	Düşük sinterleme sıcaklıklarında iyi sinterlenebilir	Daha yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesi gerekebilir
Kırılma Tokluğu	2-4 MPa.m ^{0.5}	4-8 MPa.m ^{0.5}
Termal İletkenlik	30-35 W/m·K	2-3 W/m·K
Aşınma Direnci	Yüksek	Orta



Resim 5.1. Al_2O_3 ve ZrO_2

Toz metalürjisiyle üretilen parçaların özellikleri, büyük ölçüde kullanılan tozların özelliklerine bağlıdır, bunlardan birisi de toz boyutudur. Toz boyutunu ölçmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Her bir yöntemin özelliği farklı olduğundan dolayı ölçüm sonuçları arasında farklılıklar bulunabilir. Parçacık boyutunu ölçen cihazlar genellikle tek bir geometrik parametreyi ölçer ve parçacık şeklinin küresel olduğunu kabul eder. Küresel bir parçacıkta boyut, genellikle yalnızca çap ile tanımlanabilir. Ancak parçacık şekli karmaşıktıkça, boyutu tek bir parametreyle ifade etmek güçleşir. Örneğin, pul veya yassı biçimli parçacıklar için çapın yanı sıra kalınlık gibi ek boyutlara da ihtiyaç duyulur. Parçacık şekli daha da düzensiz hale geldikçe, tanımlanması gereken boyut parametrelerinin sayısı artar (Türker, 2007).

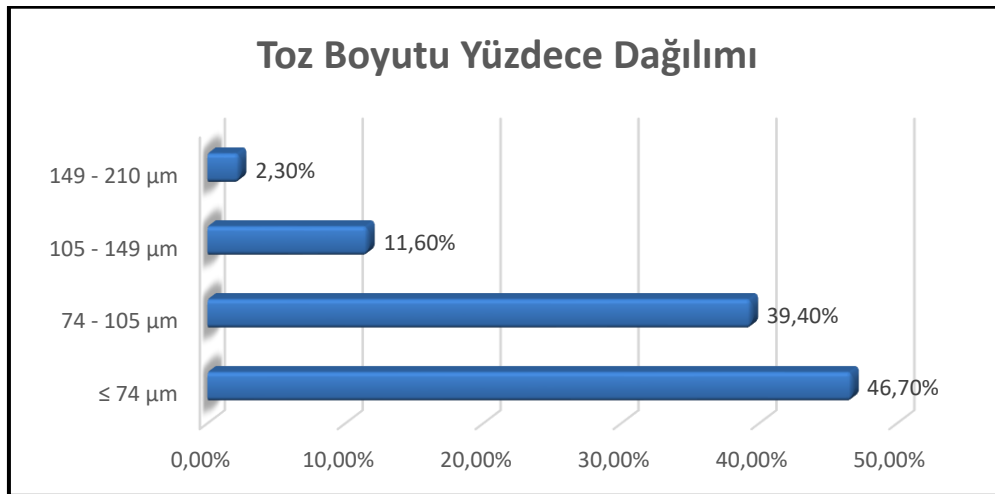
Parçacık boyut ölçüm yöntemleri şunlardır; 1. Elek analizi 2. Mikroskop ile inceleme 3. Sedimentasyon 4. Işık saçılımı ve kırınımı 5. Elektriksel alan algılaması 6. Işık engelleme 7. X-ışını teknikleri. Deneylerde kullanılan Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik tozlarının boyutları elek analiz ile yapılmıştır. Al_2O_3 32 μm altı, ZrO_2 74 μm altı (Tava) olacak şekilde belirlenmiştir (Resim 5.2).

Elek analizi yöntemi, büyük parçacıkların boyut dağılımı ölçümünde kullanılan bir tekniktir. Eşit aralıklı tellerden oluşan kare ızgara, eleği oluşturur. Elek boyutu birim uzunluktaki tel sayısından belirlenir, mesh olarak adlandırılır. Elek analizinde çok küçük açıklık boyutlarına gidilemez. Parçacık topaklanması aynı zamanda parçacıkların eleğe adhezyonu sebebiyle çok küçük açıklık boyutuna sahip elekler kullanılmaz. Elek analizi, parçaların azalan elek açıklıklarında istiflenmesi ile başlar. En küçük açıklık boyutu en alttadır. Toz yığını, en üstteki eleğe konulur ve elek takımı 15 dakika süreyle sarsılır. Titreşimden sonra, her boyut aralığında toz miktarı tartılır ve aralıktaki yüzde, her bir açıklık için hesaplanır (Türker, 2007).



Resim 5.2. Elek makinesi

1000 gr ZrO_2 tozu için yapılan elek analizine ait toz boyutu yüzde dağılımı Şekil 5.1’de verilmiştir. 74 μm altı tozların %46,7 oranında olduğu, 74-105 μm arası tozların %39,40 oranında olduğu, 105-149 μm arası tozların %11,6 oranında olduğu ve 149-210 μm aralığına sahip tozların ise %2,3 oranında bulunduğu görülmüştür.



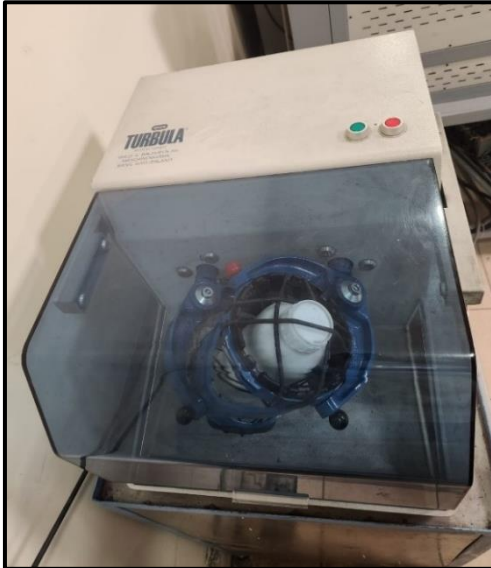
Şekil 5.1. 1000 gr ZrO_2 toz boyutu için yüzde toz dağılım grafiği

Ağırlıkça farklı oranlarda bulunan seramik tozları, önceden belirlenen oranlarda, Resim 5.3’te görülen hassas tartı ile tartılmıştır.



Resim 5.3. Hassas tartı

Resim 5.4'te gösterilen mekanik karıştırıcı (Turbula) cihazında homojen bir karışım elde etmek amacıyla karıştırılmıştır. Bu işlem her katman için birer saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, ZrO_2 ve Al_2O_3 seramik tozlarının iyice karışarak istenilen bileşime ulaşmasını sağlamak için kullanılmıştır. Mekanik karıştırıcı (Turbula) cihazı, tozların düzgün bir şekilde karışmasını ve homojen bir malzeme yapısının oluşmasını sağlayarak sonraki üretim aşamaları için uygun özelliklerin elde edilmesine olanak tanımıştır.

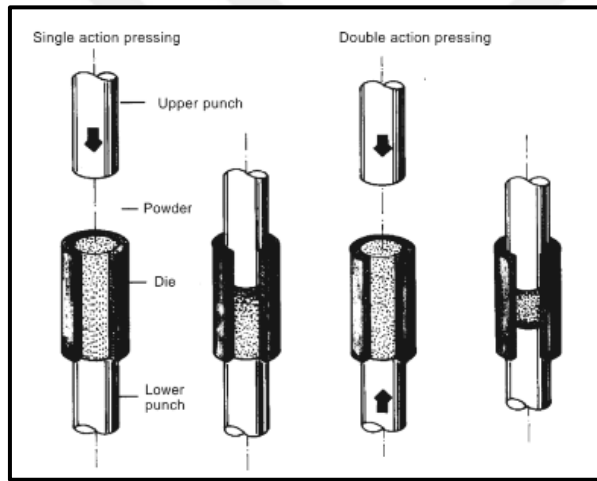


Resim 5.4. Mekanik karıştırıcı (Turbula cihazı)

Literatürde farklı presleme yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda verilen iki ana başlık altında toplanmaktadır:

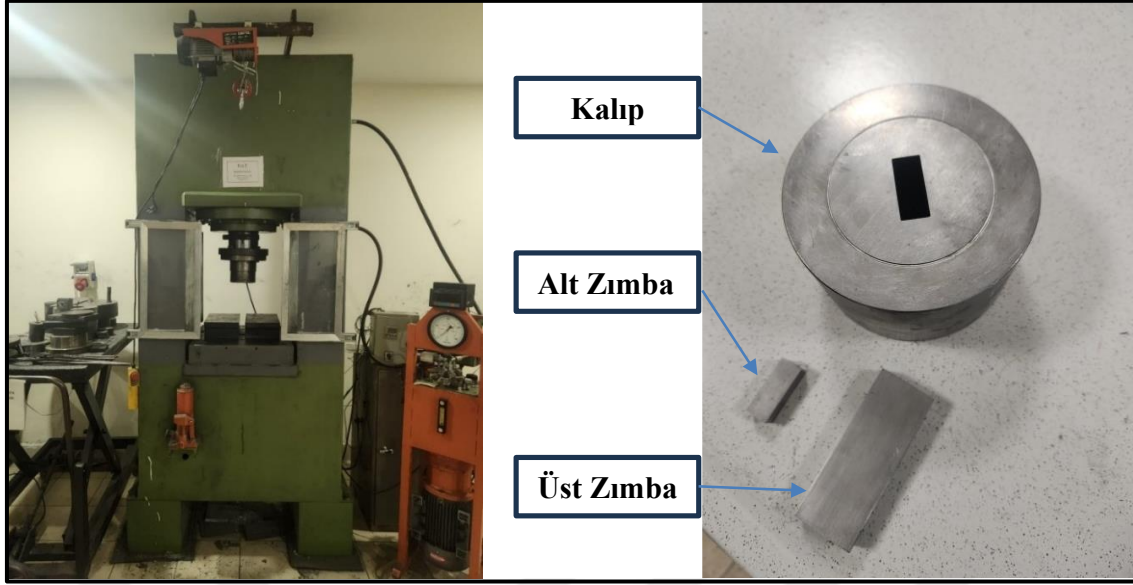
- *Sıcak Presleme:* Sıcak presleme, toz metalürjisinde şekil verme işlemi sırasında tozların yüksek sıcaklık altında preslendiği bir yöntemdir. Bu işlemde, preslenecek olan tozlar belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve ardından yüksek basınç uygulanır.
- *Soğuk Presleme:* Soğuk presleme, toz metalürjisinde en yaygın kullanılan şekil verme yöntemlerinden biridir. Oda sıcaklığında yapılan bir işlemdir. Bu süreçte, istiflenmiş toz katmanları metal bir kalıp içinde yüksek basınç altında sıkıştırılır.

Her iki presleme yöntemi de tek, çift ve çok yönlü zımba metodu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.2’de tek yönlü ve çift yönlü zımba metotları görülmektedir. Bu çalışmada tek yönlü zımba ile presleme yapan hidrolik pres makinesi kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Tek yönlü ve çift yönlü zımba metotları (Upadhyaya, 1997)

Resim 5.5.’te kullanılan 280 ton kapasiteli hidrolik pres makinesi ve 31,7 mm uzunluğa ve 12,7 mm’lik genişliğe sahip tek yönlü pres kalıbı verilmiştir.



Resim 5.5. 280 ton kapasiteli hidrolik pres makinesi ve pres kalıbı

Numunedeki çatlakların en aza indirildiği basınç değeri belirlendikten sonra numunedeki çatlakların tamamen giderilebilmesi amacıyla üretim sırasında bağlayıcı kullanılması karar verilmiştir (Kousksou ve diğerleri, 2010). Düşük erime noktasına ve yüksek akışkanlığa sahip olması, seramik tozların homojen bir şekilde karışmasını sağlaması, şekil verme sürecini kolaylaştırması ve ısıtılma sırasında malzemeden buharlaşarak ayrılması gibi avantajlı özellikleri nedeniyle bağlayıcı olarak parafin wax kullanılması karar verilmiştir. Çatlakların giderilebilmesi amacıyla farklı oranlarda kullanılan bağlayıcı (parafin wax) Resim 5.6’da gösterilmektedir.



Resim 5.6. Parafin wax bağlayıcı

Parafin wax ve karışım oranları belirlenen tozlar Resim 5.7’de görülen ekipman ile ısıtılıp karıştırılmıştır. Bu cihaz sayesinde parafin wax eritilerek tozlarla homojen karışımı sağlanmıştır.



Resim 5.7. Mekanik karıştırıcılı ısıtıcı

Numuneler bağlayıcı eklenerek preslendikten sonra sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Sinterleme işlemi, preslenmiş tozların ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta ısıtılarak birleştirilmesi sürecidir. Bu işlem sırasında, tozlar arasındaki yüzey enerjisinin artmasıyla atomlar arasında bağ oluşur ve metalurjik birleşme sağlanır. Özellikle küçük boyutlu tozlar, daha yüksek yüzey enerjisine sahip olduklarından sinterlemeye daha yatkındır. Sinterleme, hedeflenen malzeme özelliklerine göre belirlenen sıcaklıklarda gerçekleştirilir. İşlem, preslenen parçanın sinter fırınına dikkatlice yerleştirilmesiyle başlar; sıcaklık yavaşça artırıldıkça önce bağlayıcı maddeler buharlaşarak uzaklaşır. Ardından, toz parçacıkları arasında atomik difüzyon yoluyla metalurjik bağlar oluşur. Temas bölgelerinde tane sınırları büyürken, arayüz alanı ve enerjisi azalır. Bu da parçacıkların kaynaşmasını ve tek bir bütün hâline gelmesini sağlar (Büyükdoğan, 2024).

Karışım halindeki seramik tozları eritilen bağlayıcı ile karıştırılarak ayrı ayrı katmanlar oluşturulmuştur. Belirlenen bağlayıcı oranında herhangi bir değişiklik yapılmadan, malzeme ZrO_2 ağırlık oranı azaltılarak Al_2O_3 matrisli FDM elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen 31,7 x 12,7 x 6,35 mm boyutundaki numuneler Resim 5.8’deki Protherm PLF160/15 fırını ile ön sinterleme ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi hava atmosferinde yapılmıştır.



Resim 5.8. Protherm PLF160/15 sinterleme fırını

5.2. Deneysel Yöntemler ve Prosedürler

Bu çalışmada Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik tozları ile FDM numune üretimi ve mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Toz boyutları $32\mu m$ altı Al_2O_3 ve farklı boyutlarda bulunan ZrO_2 elek analizi yöntemi ile farklı boyutlarda eldesi sağlanan tozlardan $74\mu m$ altı (Tava) zirkonya ile çalışılmasına karar verilmiştir.

Üretilen FDM, her katmanı %20'lik oranlarda değişen toz karışımlarından oluşan toplam 6 katman olarak tasarlanmış ve denenmiştir. Detayları tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında belirtileceği üzere nihai üretimde katman sayısı 5'e düşürülmüş ve Al_2O_3 matrisli ile ZrO_2 katkılı FDM üretimi gerçekleştirilmiştir.

Resim 5.5'deki soğuk presleme cihazı ve pres kalıbı ile Al_2O_3 ve ZrO_2 tozlar sıkıştırılarak numune haline getirilmiştir. Bu işlemin sonucunda elde edilen numunelerde çatlaklar gözlemlenmiştir. Numunede oluşan çatlakları gidermek için farklı basınç oranlarında presleme denenmiştir. Denenen presleme basınçları 300, 400, 500, 600, 750 ve 1000 MPa olmuştur. Detayları tezin ilerleyen aşamalarında verileceği üzere nihai üretimde 500 MPa pres basıncı uygulanmıştır.

Presleme işlemi sonucunda elde edilen numuneler detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda numunelerin bütünselliğini korumadığı ve üzerlerinde çok sayıda çatlak olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu problemlerin giderilebilmesi için bağlayıcı ve

dağıtıcı kullanılmasına karar verilmiştir. Bağlayıcı olarak parafin wax, dağıtıcı olarak ise Peg(400) kullanılmıştır.

Ağırlıkça %2 ve %5 oranlarında parafin wax kullanımının oranları yükseltilmeden iyi bir sonuç alınması amacı ile öncelikle literatür araştırmaları yapılmıştır. Literatürde yer alan bilgiler ışığında çalışmanın, dağıtıcı ve bağlayıcı özellikleri bulunan Peg(400) ile denenmesine karar verilmiştir. Ağırlıkça aynı oranda parafin waxın yerine Peg(400) kullanılması ve %2 Peg(400), %3 parafin wax olmak üzere bağlayıcı ve dağıtıcının birlikte kullanılması şeklinde iki çeşit deneme yapılmıştır. Denemeler sonucunda Peg(400) ile üretilen numunelerde çatlak iyileşmeleri benzer oranlarda olması ve parafin wax kullanımının kalıntı bırakmadan uzaklaştırılabilirliği ve kalıntı bırakma riskinin daha düşük olması sebebi ile parafin wax kullanılarak numunenin üretilebilirliği denenmiştir. Ayrıca Peg(400) dağıtıcısının tozlara karışımının zor olması, presleme esnasında yapıdaki homejenliğin sağlanamaması ve ön sinterleme sonucu numunelerde boşluk oluşturması gibi sebepler nedeniyle dağıtıcı kullanımından vazgeçilmiş ve sadece parafin wax bağlayıcısının kullanılmasına karar verilmiştir. En az oranda bağlayıcı kullanılması hedeflenerek %9 oranında bağlayıcı kullanılmış ve çatlaksız en iyi numune elde edilmesi amaçlanmıştır.

Literatürde yapılan araştırmalar, bağlayıcı kullanılarak elde edilen numunelerin ön sinterleme işlemine tabii tutulduklarını göstermektedir. Bu işlem numunelerde bulunan bağlayıcının buharlaşarak malzemeden ayrılmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bağlayıcı madde numunelerden ayrıldıktan sonra asıl sinterleme işlemine geçilmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süresi, kullanılan tozların mekanik özellikleri dikkate alınarak tespit edilmiştir.

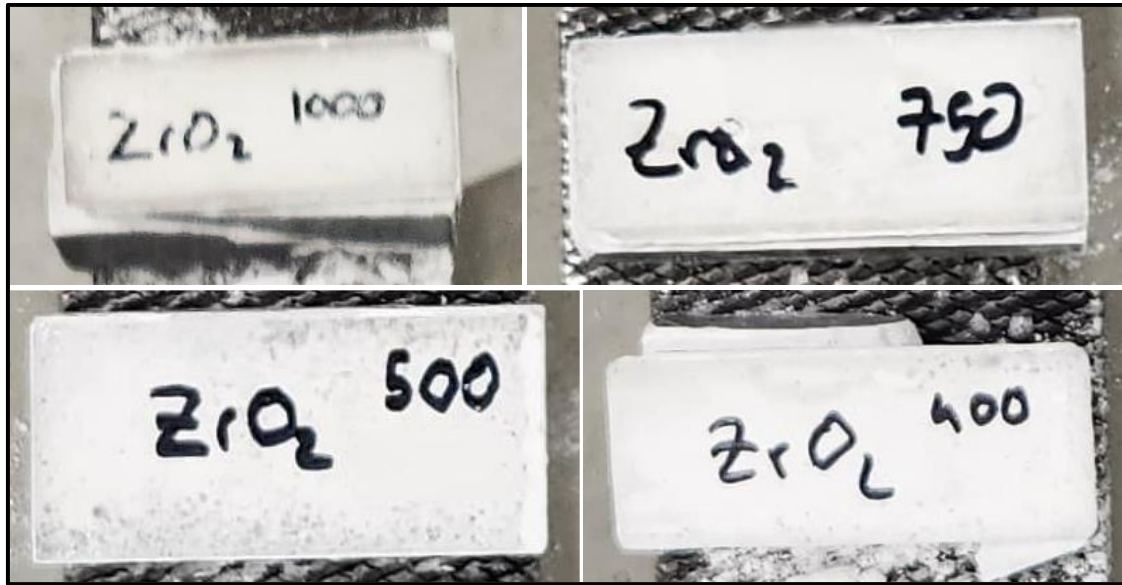
5.3. Numune Hazırlama

Soğuk presleme yöntemi ve sinterleme sırasında çatlak oluşumunun önlenmesi için farklı basınçlarda presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 6 katmandan oluşan numune üretilmiştir. Katman yüzdeleri ve katman görüntüsü ise Şekil 5.3'te verilmiştir.

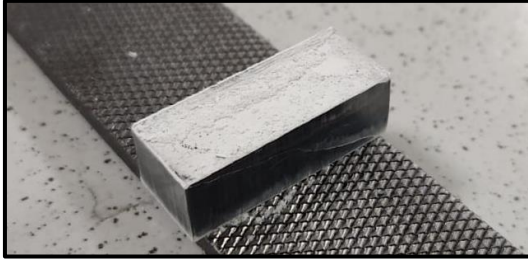
1. Katman	%100 Al_2O_3	%0 ZrO_2
2. Katman	%80 Al_2O_3	%20 ZrO_2
3. Katman	%60 Al_2O_3	%40 ZrO_2
4. Katman	%40 Al_2O_3	%60 ZrO_2
5. Katman	%20 Al_2O_3	%80 ZrO_2
6. Katman	%0 Al_2O_3	%100 ZrO_2

Şekil 5.3. İstiflenmiş Al_2O_3 ve ZrO_2 katmanları (Jung ve diğerleri, 2002).

Numuneler, 300MPa, 400MPa, 500MPa, 600MPa, 750MPa ve 1000MPa basınçlarda soğuk pres yöntemi ile preslenmiştir. Üretilen numunelerin bir kısmı Resim 5.9 ve Resim 5.10’da görülmektedir. Elde edilen tüm numunelerde çatlaklar oluşmuştur ancak en az çatlağın 500MPa basınçta elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle ZrO_2 ve Al_2O_3 seramik tozlarının Resim 5.10’daki gibi 500MPa basınçta soğuk preslenmesine karar verilmiştir.



Resim 5.9. Farklı basınçlarda preslenmiş numuneler



Resim 5.10. 500MPa da preslenmiş numune

Çatlakların iyileştirilebilmesi için bağlayıcı (parafin wax) farklı oranlarda kullanılmıştır. Bağlayıcı oranının en aza indirilerek çatlakların giderilmesi amacı ile dağıtıcı (Peg(400)) kullanılmıştır. Denemeler sonucunda, dağıtıcı ile üretilen numunelerde çatlak iyileşmelerinin benzer oranlarda olması ve Peg400 bağlayıcısının sinterleme sürecinde parafin wax ile karşılaştırıldığında kalıntı bırakma eğiliminin daha fazla olması, presleme aşamasında homojen olmayan yapıların oluşması nedeniyle Peg400 kullanımından vazgeçilmiş ve yalnızca parafin wax kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

Parafin wax katı haldeyken tozlar karıştırılmış daha sonra 60°C'de indüksiyonlu ısıtıcı ile eritilerek karıştırılmıştır. İlk oluşturulan numunelerde farklı oranlarda (%1, %5, %7, %9) bağlayıcı kullanılmıştır. Bu numunelerin bir kısmı Resim 5.11'de görülmektedir. Numuneler incelendiğinde, malzeme bütünlüğünü sağlamak ve çatlak oluşumunu minimize etmek açısından en etkili sonuçların %9 oranında bağlayıcı kullanımı ile elde edildiği tespit edilmiştir.



Resim 5.11. Farklı bağlayıcı oranı kullanılarak elde edilen numuneler

İlk oluşturulan FDM numunelerinin %100 Al₂O₃'den başlayarak %20'lik azalmalarla %100 ZrO₂' ya kadar 6 katmanlı bir yapısı vardır. Ancak numune üretim aşamasında çatlakların en fazla %100 ZrO₂ katmanında olması nedeniyle bu katmanın çıkarılmasına ve Şekil 5.4'te görüldüğü gibi malzemenin 5 katmanlı Al₂O₃ matrisli FDM olarak üretilmesine karar verilmiştir.

1. Katman	%100 Al ₂ O ₃	%0 ZrO ₂
2. Katman	%80 Al ₂ O ₃	%20 ZrO ₂
3. Katman	%60 Al ₂ O ₃	%40 ZrO ₂
4. Katman	%40 Al ₂ O ₃	%60 ZrO ₂
5. Katman	%20 Al ₂ O ₃	%80 ZrO ₂

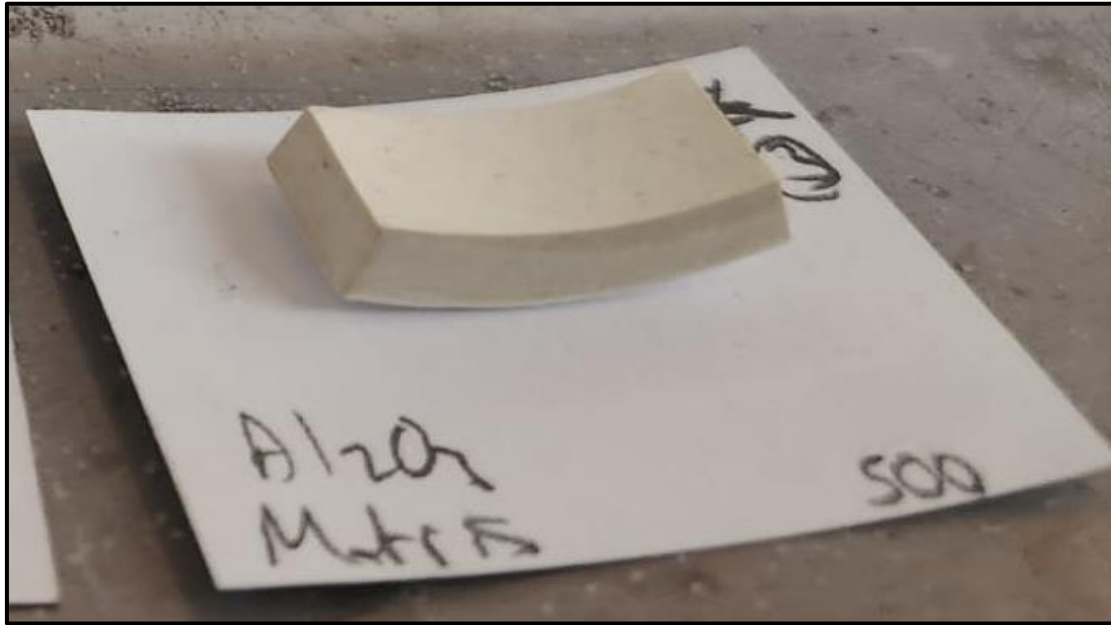
Şekil 5.4. 5 katmanlı Al₂O₃ matrisi

FDM'yi oluşturmak için Şekil 5.4'te verilen ağırlık yüzdeleri baz alınarak her katman için gereken Al₂O₃ ve ZrO₂ toz kütleleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken özkütle formülü ($d=m/V$) kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan özkütle değerleri Al₂O₃ için 4,05 g/cm³ ve ZrO₂ için 5,7 g/cm³'tür. 5 katmanlı üretilecek olan numunede her bir katmanın kalınlığı 1,27 mm, kullanılan kalıbın ölçüleri 31,7 mm x 12,7 mm olduğundan her katmanın hacmi 0,5113 cm³ olarak hesaplanmıştır. Katmanlar için toz kütlesi hesaplarının sonuçları Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. FDM katmanları için toz kütlesi hesabı

Katman	Katman Hacmi (cm ³)	Al ₂ O ₃ Miktarı (g)	ZrO ₂ Miktarı (g)	Parafin Wax Miktarı (g)
1	0,5113	1,4330	0	0,1417
2	0,5113	1,1942	0,2985	0,1476
3	0,5113	0,9346	0,6231	0,1540
4	0,5113	0,6515	0,9773	0,1610
5	0,5113	0,3417	1,3668	0,1689

Bağlayıcının uzaklaştırılması için ön sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığı $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olarak belirlenmiştir. Ön sinterleme sıcaklığı 500°C 'de, bekleme süresi ise yarım saat olarak belirlenmiştir. Daha sonra sıcaklık 1300°C 'ye kadar arttırılarak en optimal sinterleme süresini belirlemek için numune 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerince sinterlenmesi planlanmıştır (Yurdakul ve diğerleri, 2021). Ancak Resim 5.12'de görüldüğü üzere 1550°C sinterlenen numunede eğilme söz konusudur. Bundan dolayı sinterleme sıcaklığı $1300\text{-}1400^{\circ}\text{C}$ 'de sıcaklık artış hızı önce $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ile daha sonra $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olarak sinterlenmiş eğilmenin azalmış olduğu gözlemlenmiştir ve son olarak 1300°C 'de $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sıcaklık artış hızı ile farklı sürelerde sinterlenerek optimal sıcaklık tespit edilmiştir.



Resim 5.12. 1550°C 'de 3 saat sinterlenmiş numune

5.4. Deney Koşulları ve Parametreleri

Numenin boyutu ($31,7 \times 12,7 \times 6,35$ mm) üç nokta eğme test numunesine göre belirlenmiştir. FDM 5 katmandan oluşturulmuştur. Bu katmanlar yüzde yirmilik geçişler olacak şekilde belirlenmiştir. Malzeme geçişleri 1.katman %100 Al_2O_3 , 2.katman %80 Al_2O_3 ve %20 ZrO_2 , 3.katman %60 Al_2O_3 ve %40 ZrO_2 , 4.katman %40 Al_2O_3 ve %60 ZrO_2 , 5.katman ise %20 Al_2O_3 ve %80 ZrO_2 oranlarından oluşmaktadır. Katmanlar istiflenmeden önce 1'er saat mekanik karıştırıcıda karıştırılmış daha sonra ağırlıkça %9 oranında parafin wax eklenmiştir. İstiflenen katmanlar 500 MPa basınçta preslenmiştir. Numuneler 500°C sıcaklıkta yarım saat

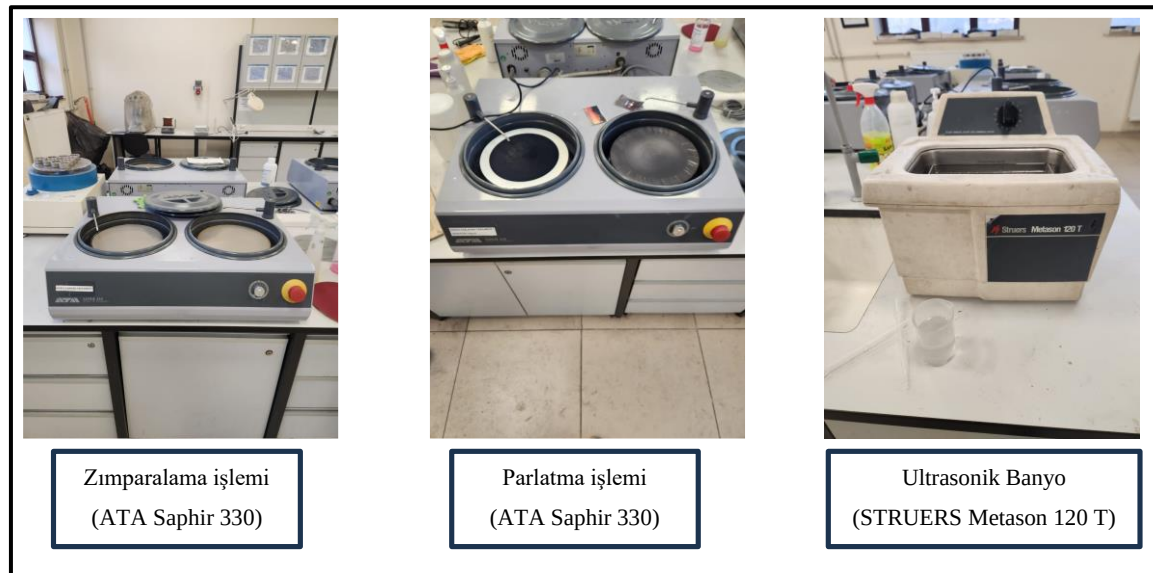
sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı 1300 °C olarak belirlenmiştir. 1300°C’de ise 1, 2, 3 ve 4 saat sürelerince sinterlenmiştir. Bu değerler Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sinterleme süreleri ve sıcaklık değerleri

%9 Parafin wax 500 MPa		Sinterleme Süreleri			
		1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
Sıcaklık Değerleri	1300	X	X	X	X
	1400	X			
	1550			X	

5.4.1. Metalografik numune hazırlanması

Üretilen parçaların sertlik ölçümlerinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi ve gözenek ile katman dağılımının detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla metalografik numune hazırlama işlemi uygulanmıştır. FDM bloklarının hassas yapısı nedeniyle numunelere, ekipman görselleri Resim 5.13’te verilen manuel zımparalama, parlatma, ultrasonik banyoda temizleme ve kurulama işlemi uygulanmış ardından %10 HF(Hidroflorik asit)’te 2 dakika bekletilerek dağlama işlemi ile yüzey kalitesinin korunması sağlanmıştır.



Resim 5.13. Numune hazırlığında kullanılan ekipmanlar

5.4.2. Morfoloji

FDM bloklarının ara yüzey yapılarının ve katman kalınlıklarının incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM, toz parçacıklarını yüksek

özünürlükte görüntüleme ve bu parçacıkların kimyasal bileşimlerini analiz etme olanağı sunan bir yöntemdir. Bu yöntemde, odaklanmış bir elektron demeti, numunenin yüzeyini tarayarak yüzey topografisi ve bileşimi hakkında detaylı bilgiler sunan çeşitli sinyaller üretmektedir. Tez alışması kapsamında üretilen FDM örneklerinin SEM analizleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Malzenin SEM analizi, Resim 5.14'te verilen ekipman ile yapılmıştır. Bu analiz, malzemelerin yapısal özelliklerinin yanı sıra elementel bileşenlerinin yerleşimi hakkında derinlemesine bilgi edinilmesini sağlamıştır (Kütük, Şahin ve diğerkleri, 2024).



Resim 5.14. JEOL JSM-6060 LV model taramalı elektron mikroskoku

5.4.3. Kimyasal kompozisyon analizi

Üretilen FDM bloklarına ait katmanların kimyasal bileşimini tespit etmek amacıyla Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) Analizi kullanılmıştır. EDS Analizi, numuneye yönlendirilen elektron ışınının, malzemenin yüzeyinde yer alan atomlarla etkileşime girerek X-Işınlarının yayılması ve bu ışınların yüksek hassasiyetli elektronik sensörler tarafından tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Elde edilen X-ışını spektrumları, bilgisayar ortamında analiz edilerek her bir elementin dağılımı tespit edilmekte ve bu sayede elementlerin yoğunlukları hakkında bilgi sağlanabilmektedir (Kütük, Şahin ve diğerkleri, 2024). EDS Analizi, SEM görüntülerinin elde edildiği Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, numunelerin

elementel bileşimlerinin detaylı bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Malzemenin EDS analizi Resim 5.14'te verilen ekipman ile yapılmıştır.

5.4.4. Malzeme yüzey analizi

Malzemenin makro görüntü analizi, Resim 5.15'te verilen Leica marka DMC2900 model ekipman ile gerçekleştirilmiştir. Bu ekipman, yüksek kaliteli görüntüler elde edilmesini sağlayarak, malzemenin yüzey yapısının detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, çeşitli ışıklandırma teknikleri ile malzemenin farklı fiziksel özellikleri, doku farklılıkları ve renk değişimlerinin detaylı olarak gözlemlenmesini mümkün hale getirmektedir. Bu analiz, malzemenin genel yapısı hakkında kapsamlı bilgiler sağlayarak, daha ileri düzeydeki mikroyapısal analizler için de temel oluşturmuştur.



Resim 5.15. Leica marka DMC 2900 model mikroskop

5.4.5. X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi

XRD analizi, seramik ve kompozit malzemelerde bulunan mineral bileşiklerin belirlenmesi ile kalitatif ve yarı-kantitatif ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. X-ışını difraksiyonu, karakteristik X-ışınlarının metal bir hedefe yüksek hızlı elektronların çarptırılması sonucu elde edilmesiyle gerçekleşir. Kristal yapılı bir malzemeye çarpan bu X-ışınları, kristal düzlemlerinde bulunan atomlar tarafından kırınıma uğrayarak belirli açılarda yansır. Elde edilen yansıma desenleri, standart paternlerle karşılaştırılarak malzemenin kristal yapısı ve bileşimi tespit edilir. Malzemenin XRD analizi, Resim 5.16'da verilen Bruker D8 Advance model ekipman ile gerçekleştirilmiştir (Cömert, 2018).



Resim 5.16. Bruker D8 Advance Marka XRD Cihazı

5.4.6. Sertlik analizi

Sertlik analizi, malzemenin yüzeyine uygulanan bir kuvvetin, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirençle ölçülmesi işlemidir. Bu analiz, malzemenin aşınma direnci, dayanıklılığı ve genel performansı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Malzemenin sertlik analizi, Resim 5.17’de verilen Qness marka Q30M model ekipman ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik testi, Vickers mikrosertlik ucu ile yapılmıştır (Büyükdoğan, 2024).



Resim 5.17. Qness marka Q30M model sertlik test cihazı

5.4.7. Üç nokta eğme testi

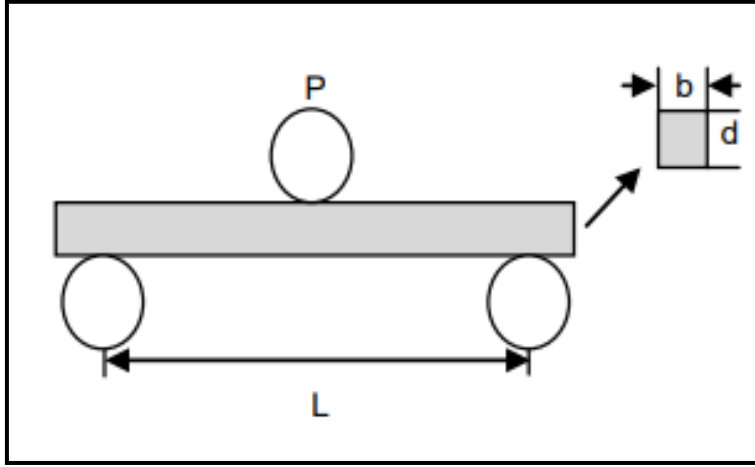
Üç nokta eğme testi, malzemenin kırılma dayanımını belirlemek amacıyla uygulanan bir yöntemidir. Bu test, malzemenin noktasal bir kuvvet altında ne kadar dayanabileceğini ölçerek, malzemenin taşıma kapasitesi ve mekanik dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Malzemenin üç nokta eğme testi, Resim 5.18’de verilen 50kN INSTRON marka 3369 model ekipman ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler, belirli bir yük altında kırılana kadar test edilmiş ve elde edilen veriler, malzemenin kırılma dayanımının belirlenmesine olanak sağlamıştır.



Resim 5.18. INSTRON marka 3369 model üç nokta eğme test cihazı

Üç nokta eğme testine göre bükülme mukavemeti şematik gösterimi Şekil 5.5'te verilen ve aşağıda bulunan denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Kapucu, 2012).

- $M_{\max} = P.L / 4$
- $M_{\max}$ = Maksimum bükülme momenti.
- P = Uygulanan kuvvet miktarı.
- L = Destekler arası mesafe.
- $I = b.d^3 / 12$
- I = Atalet momenti.
- b = Örneğin genişliği.
- d = Örneğin yüksekliği.
- $\sigma = M.y / I$ (dikdörtgen şeklindeki örnekler için).
- σ = Stres miktarı.
- y = Örneğin yüksekliğinin yarısı ($d/2$).



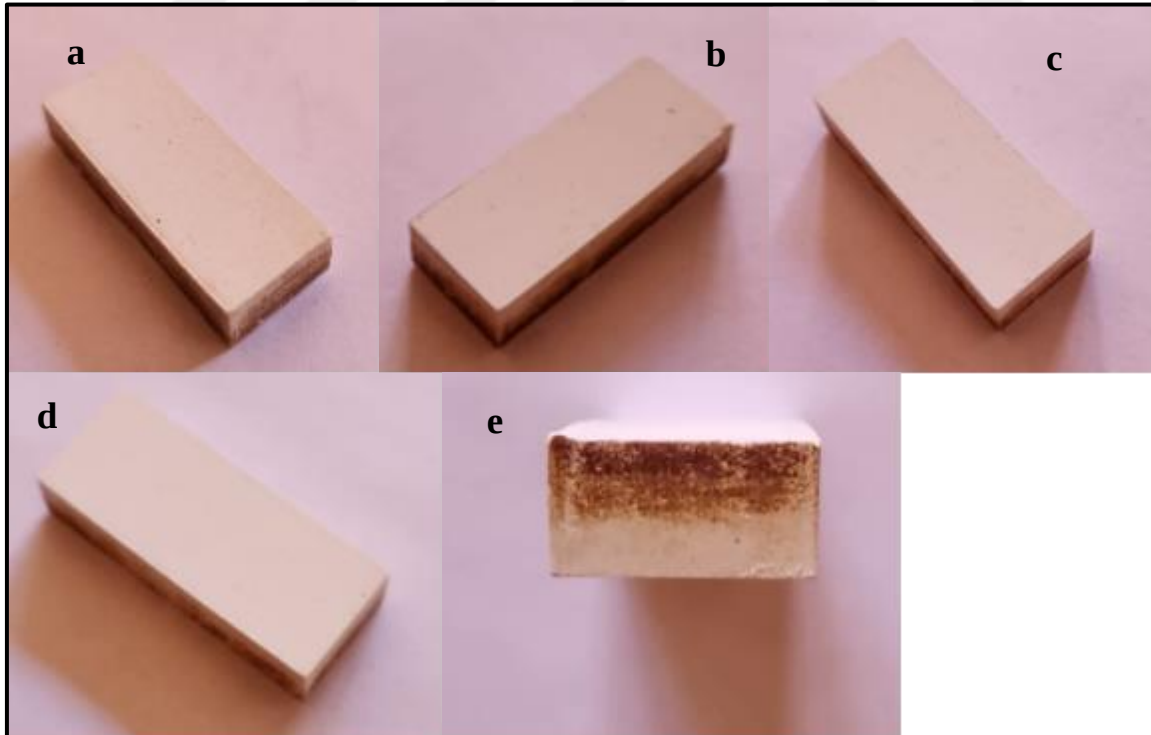
Şekil 5.5. Üç nokta eğme testine göre bükülme mukavemetinin şematik gösterimi (Kapucu, 2012)



6. BULGULAR

Alümina (Al_2O_3) ve Zirkonya (ZrO_2) kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle FDM üretimi yapılan bu çalışmada, üretilen bileşiklerin mikroyapısal, mekanik ve kimyasal özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bulgular kısmında, XRD analizi ile kristal yapı ve faz dönüşümleri, SEM görüntüleri ile partikül dağılımı ve yüzey morfolojisi, EDS analizi ile elementel bileşim, malzeme yüzey analizleri ve mekanik testler (sertlik testi ve üç nokta eğme testi) sunulmaktadır. Bu analizlerin sonuçları, FDM yöntemi ile üretilen zirkonya-alümina seramik malzemelerinin mekanik ve mikroyapısal performansına dair önemli veriler ortaya koymuş ve üretim parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

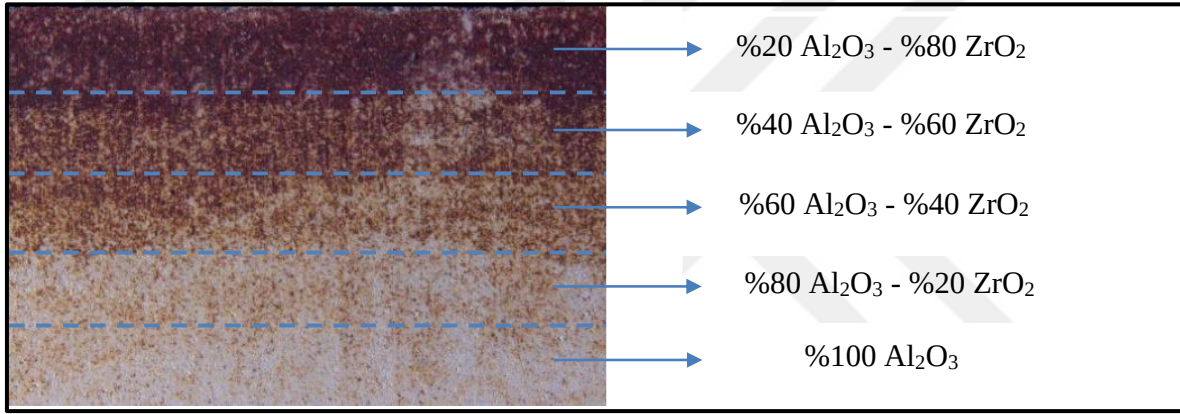
Yapılan analizler ışığında, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için en uygun üretim parametreleri tespit edilmiştir. Bu doğrultuda en iyi sonuç eldesinin 500 MPa basınçta ve 1300°C’de elde edildiği gözlemlenmiştir. Farklı sürelerde sinterlenmiş numuneler Resim 6.1’de gösterilmiştir.



Resim 6.1. 1300°C’de sinterlenmiş numuneler; a) 1 saat sinterlenmiş numune b) 2 saat sinterlenmiş numune c) 3 saat sinterlenmiş numune d) 4 saat sinterlenmiş numune e) 1 saat sinterlenmiş numunenin yandan görünüşü

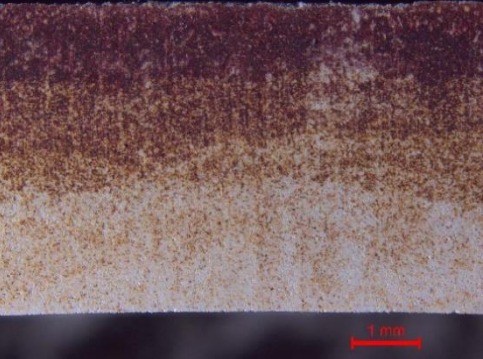
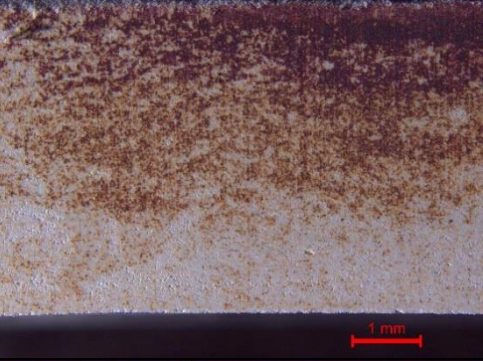
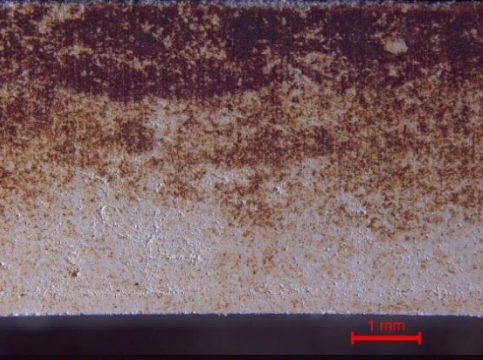
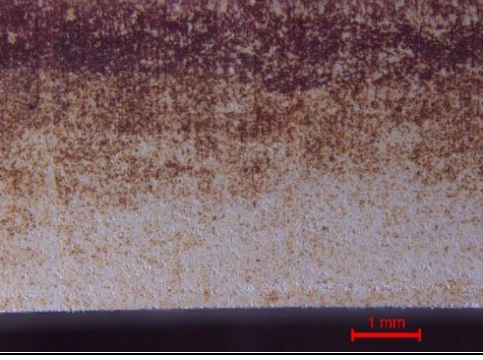
6.1. Malzeme Yüzey Analizi

Aşağıdaki Çizelge 6.1’de 4 farklı sürede sinterlenmiş numunelerin makroyapı görüntüleri verilmiştir. Sıcaklık artış hızı $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ve 1300°C sıcaklıkta 1, 2, 3 ve 4 saatlik sürelerle sinterlenen numunelerde, her bir sinterleme süresinin malzeme yüzeyinde oluşturduğu etkileri görülmektedir. FDM’nin katmanları ve geçişleri net olarak görülmektedir ve makroyapıları incelendiğinde $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sıcaklık artış hızı ile üretilen numune (Resim 6.3) haricinde diğer numunelerde çatlak görülmemiştir. Üretilen FDM’nin katman geçişleri ve yüzde oranları, sinterleme sıcaklık artış hızı $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$, 1300°C sinterleme sıcaklığında 1 saat sinterlenmiş olan numunenin makroyapı görüntüsünde (Resim 6.2) verilmiştir.

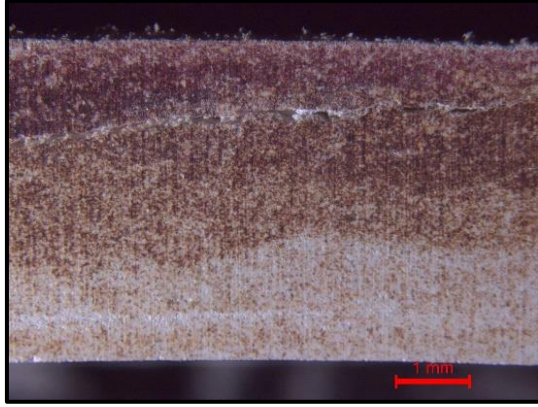


Resim 6.2. Üretilen FDM numunesine ait katman geçişleri ve yüzde oranları

Çizelge 6.1. 4 farklı sürede sinterlenmiş olan numunelerin makroyapı görüntüleri

Sinterleme Süreleri	Sıcaklık/Basınç	
	1300°C/500 MPa	
1 saat		
2 saat		
3 saat		
4 saat		

Yapılan makroyapı analizinde Resim 6.3'te verilmiş olan 2°C/dk sıcaklık artış hızı ile üretilmiş numune haricinde çatlağa rastlanmamıştır. Diğer numunelerde sıcaklık artış hızı düşürülerek çatlak oluşumu engellenmiştir.

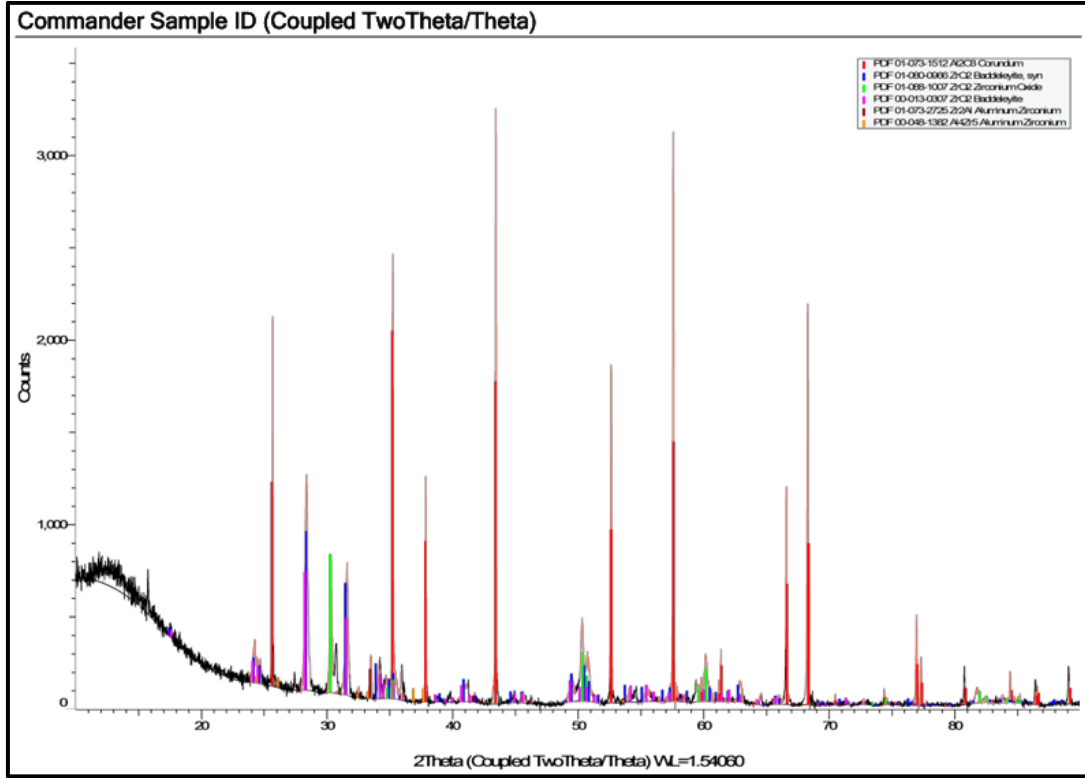


Resim 6.3. 2°C/dk sıcaklık artış hızı ile 1 saat sinterlenmiş numune

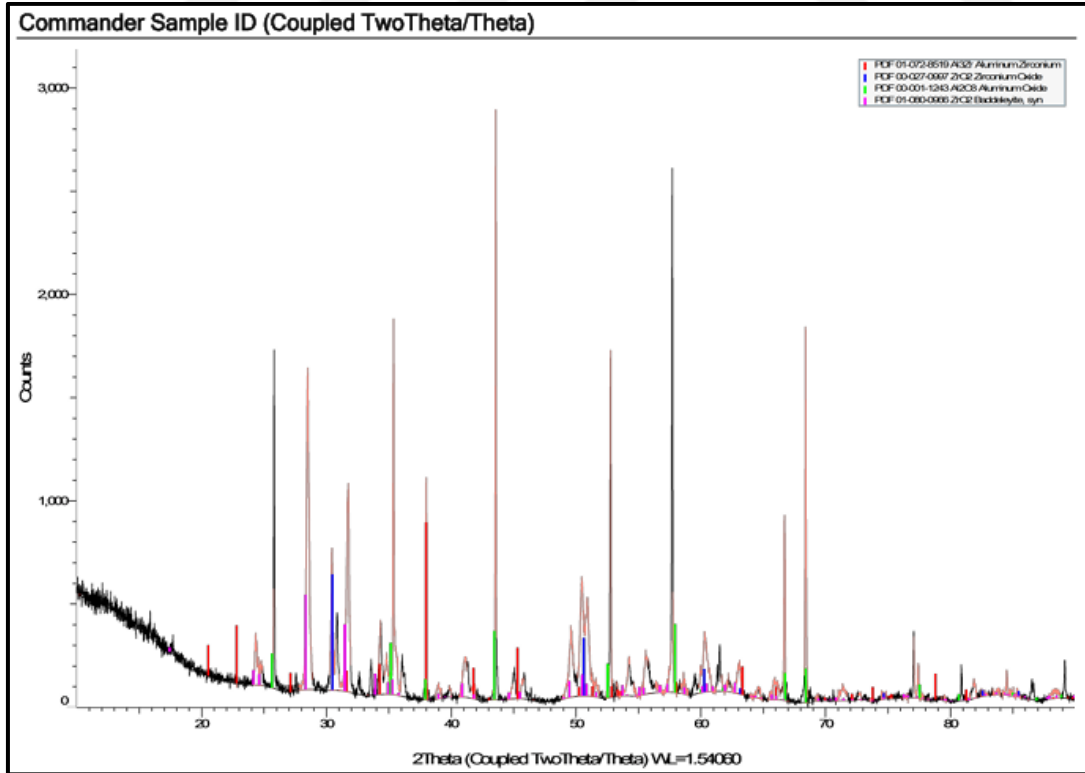
6.2. X Işımları Difraksiyonları (XRD) Analizi

Farklı sinterleme sürelerine ait numunelerin XRD spektrumları incelendiğinde numunelerde Al_3Zr , Al_2O_3 , ZrO_2 , Zr_2Al , Al_4Zr_5 fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. 1 saat sinterlenmiş olan numuneye ait XRD spektrumu Şekil 6.1’de verilmiştir, Al_2O_3 , ZrO_2 , Zr_2Al , Al_4Zr_5 fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. 2 saat sinterlenmiş olan numuneye ait XRD spektrumu Şekil 6.2’de verilmiştir, Al_3Zr , ZrO_2 , Al_2O_3 fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. 3 saat sinterlenmiş olan numuneye ait XRD spektrumu Şekil 6.3’te verilmiştir, Al_4Zr_5 , Al_2O_3 , ZrO_2 fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. 4 saat sinterlenmiş olan numuneye ait XRD spektrumu Şekil 6.4’te verilmiştir, Al_4Zr_5 , Al_2O_3 , ZrO_2 fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir.

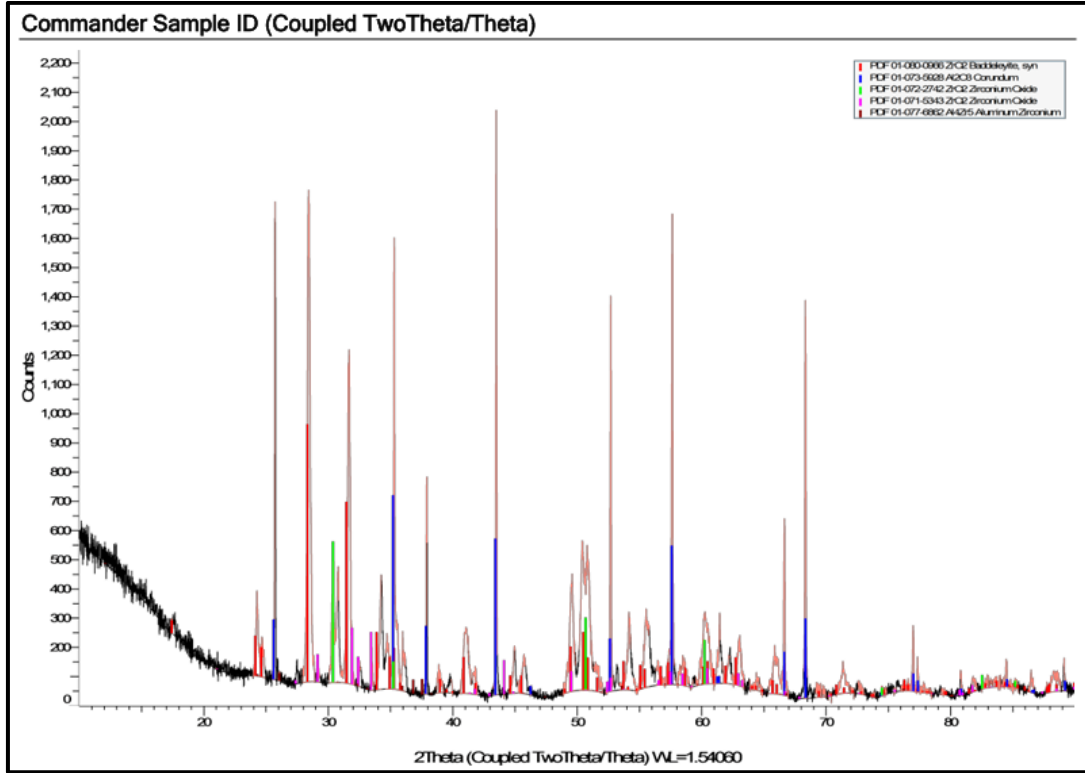
XRD analizi sonucunda, numunenin yüksek korindon fazından oluştuğu belirlenmiş olup, bu durum malzemenin yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Baskın olarak Alüminyum-Zirkonyum fazları, tokluk ve termal şok dayanımını artırmaktadır. Baddeleyit ve Baddeleyit syn fazlarının varlığı ise kimyasal stabiliteyi artırarak asit ve alkali ortamlara karşı dayanıklılığı iyileştirebilir. Elde edilen faz bileşimi, numunenin yüksek mekanik dayanım, termal kararlılık ve kimyasal direnç özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Lumpkin, 1999; Setiawan ve diğerleri, 2021).



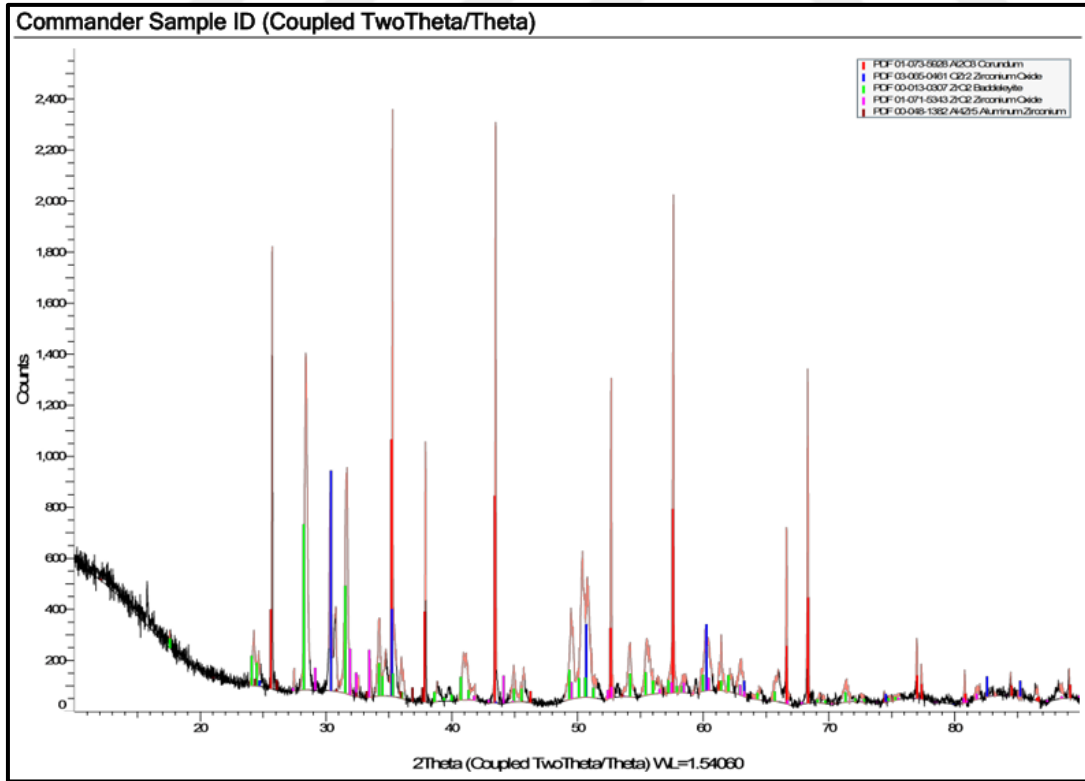
Şekil 6.1. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği



Şekil 6.2. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği



Şekil 6.3. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği



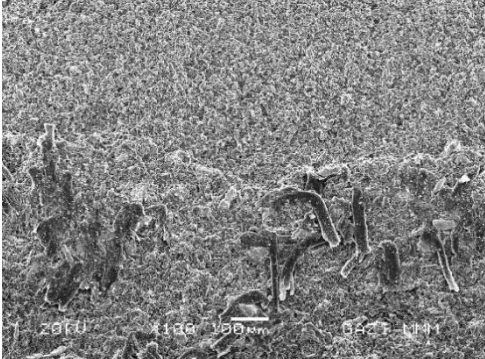
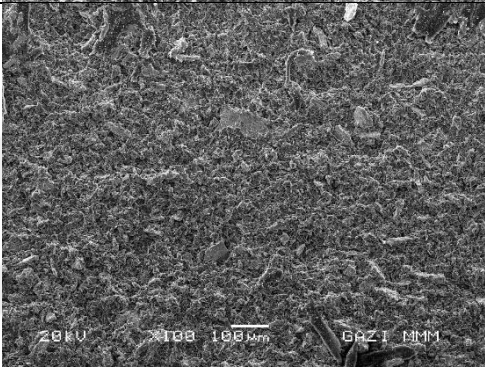
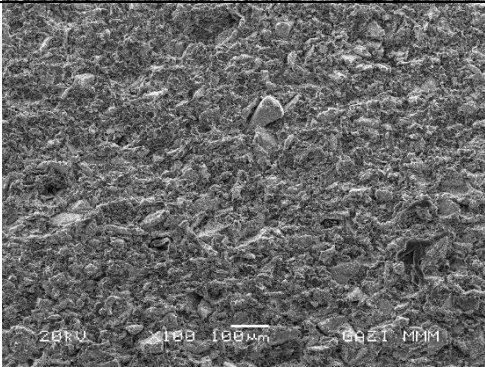
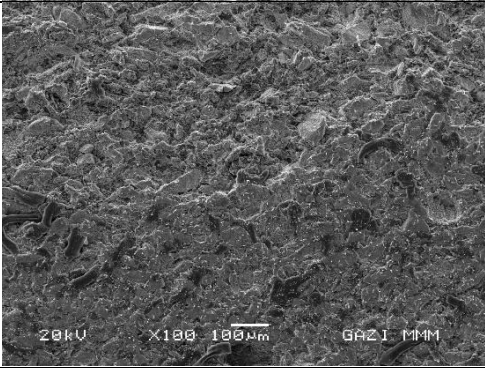
Şekil 6.4. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin XRD analizi sonucu elde edilen grafiği

6.3. SEM Analizi

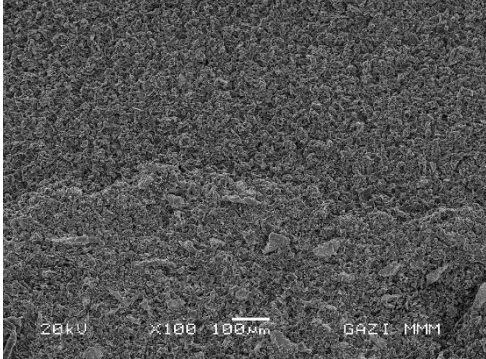
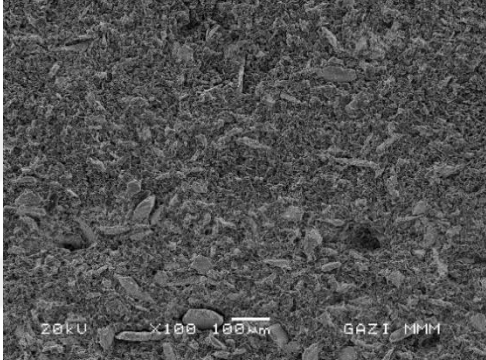
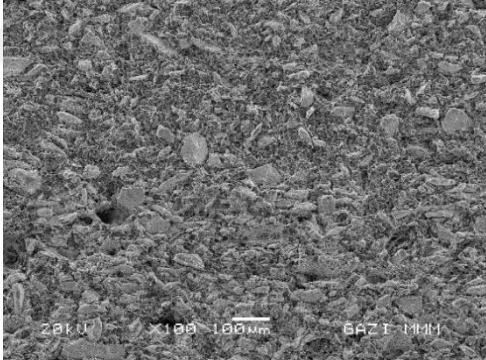
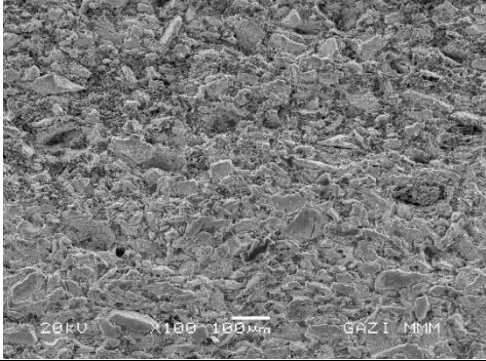
Çalışma kapsamında elde edilen numunelerin zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden oluşan metalografik hazırlığı yapılmış ve elektron mikroskop incelemesine uygun hale getirilmiştir. Elde edilen numunelerin farklı kademelerden alınan SEM görüntü analizleri Çizelge 6.2, Çizelge 6.3, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'te verilmiştir. Aşağıdaki çizelgelerde 4 farklı sürede sinterlenmiş olan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Her bir çizelgede katmanlar arası geçişler görülebilmektedir.

Numunelere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, koyu renkli bölgeler Al_2O_3 açık renkli bölgeler ise ZrO_2 toz dağılımını göstermektedir. Aynı zamanda daha küçük olan toz dağılımı Al_2O_3 daha büyük toz dağılımı ise ZrO_2 tozlarına ait olduğu tespit edilmiştir. 1300°C 'de sinterleme sıcaklıklarında katmanlarda istenilen oranda $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ oranının gerçekleştiği belirlenmiştir. Numunelerde herhangi bir çatlak gözlemlenmemiştir.

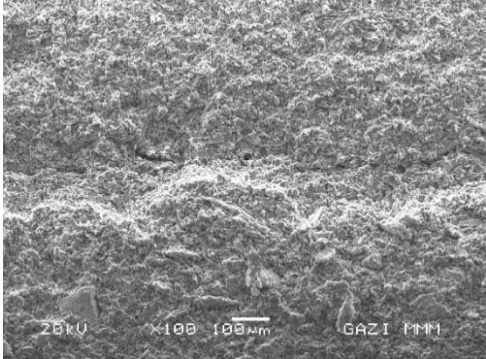
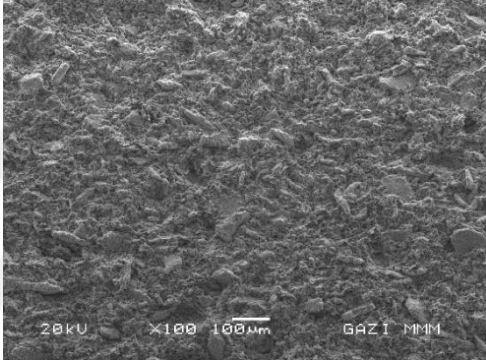
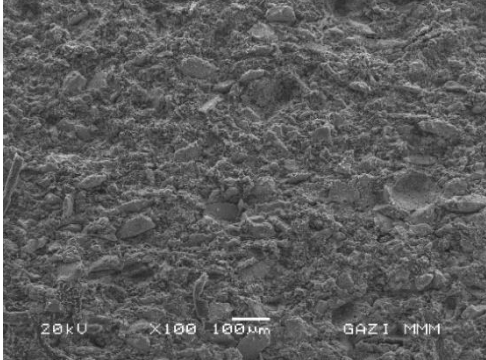
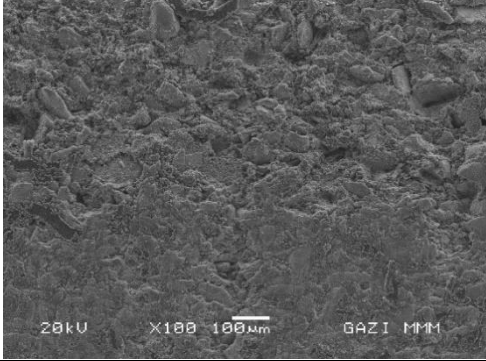
Çizelge 6.2. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü

Katmanlar Arası Geçiş	1300°C - 500 MPa – 1 Saat Sinterleme	
	1300°C/500 MPa	
1-2.Katman %100 Al ₂ O ₃ %0 ZrO ₂ - %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂		
2-3.Katman %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂ - %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂		
3-4.Katman %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂ - %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂		
4-5.Katman %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂ - %20 Al ₂ O ₃ %80 ZrO ₂		

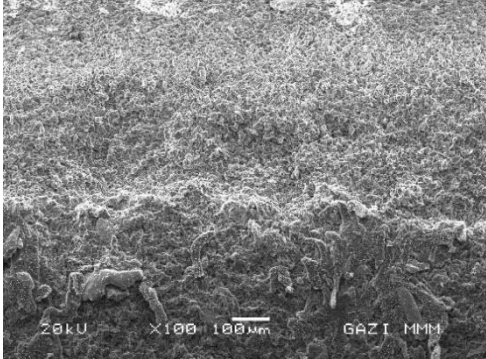
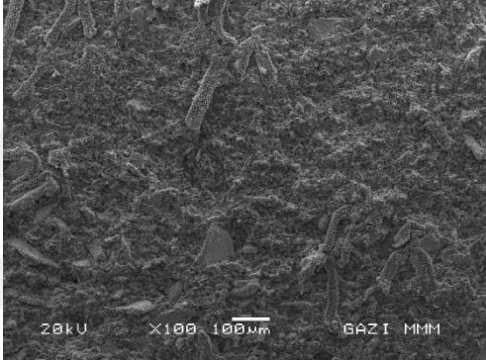
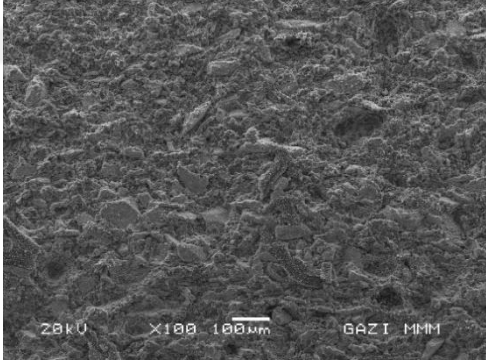
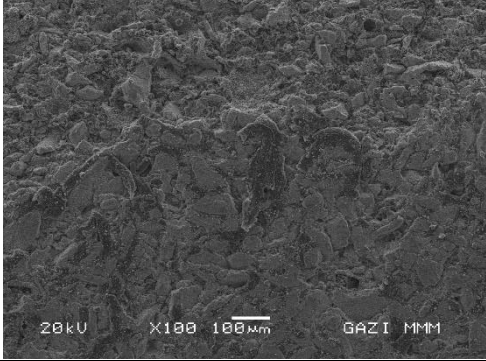
Çizelge 6.3. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü

Katmanlar Arası Geçiş	1300°C - 500 MPa – 2 Saat Sinterleme		
	1300°C/500 MPa		
1-2.Katman %100 Al ₂ O ₃ %0 ZrO ₂ - %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂			
2-3.Katman %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂ - %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂			
3-4.Katman %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂ - %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂			
4-5.Katman %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂ - %20 Al ₂ O ₃ %80 ZrO ₂			

Çizelge 6.4. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü

Katmanlar Arası Geçiş	1300°C - 500 MPa – 3 Saat Sinterleme		
	1300°C/500 MPa		
1-2.Katman %100 Al ₂ O ₃ %0 ZrO ₂ - %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂			
2-3.Katman %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂ - %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂			
3-4.Katman %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂ - %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂			
4-5.Katman %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂ - %20 Al ₂ O ₃ %80 ZrO ₂			

Çizelge 6.5. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin SEM görüntüsü

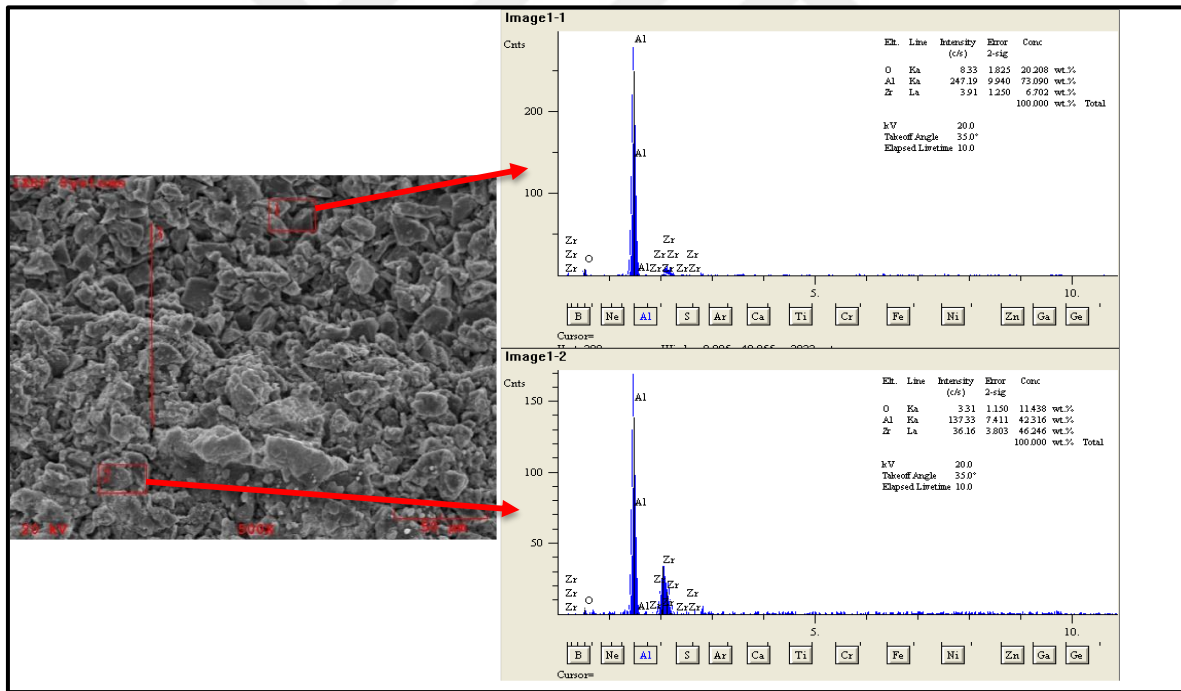
Katmanlar Arası Geçiş	1300°C - 500 MPa – 4 Saat Sinterleme		
	1300°C/500 MPa		
1-2.Katman %100 Al ₂ O ₃ %0 ZrO ₂ - %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂			
2-3.Katman %80 Al ₂ O ₃ %20 ZrO ₂ - %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂			
3-4.Katman %60 Al ₂ O ₃ %40 ZrO ₂ - %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂			
4-5.Katman %40 Al ₂ O ₃ %60 ZrO ₂ - %20 Al ₂ O ₃ %80 ZrO ₂			

6.3.1. EDS analizi

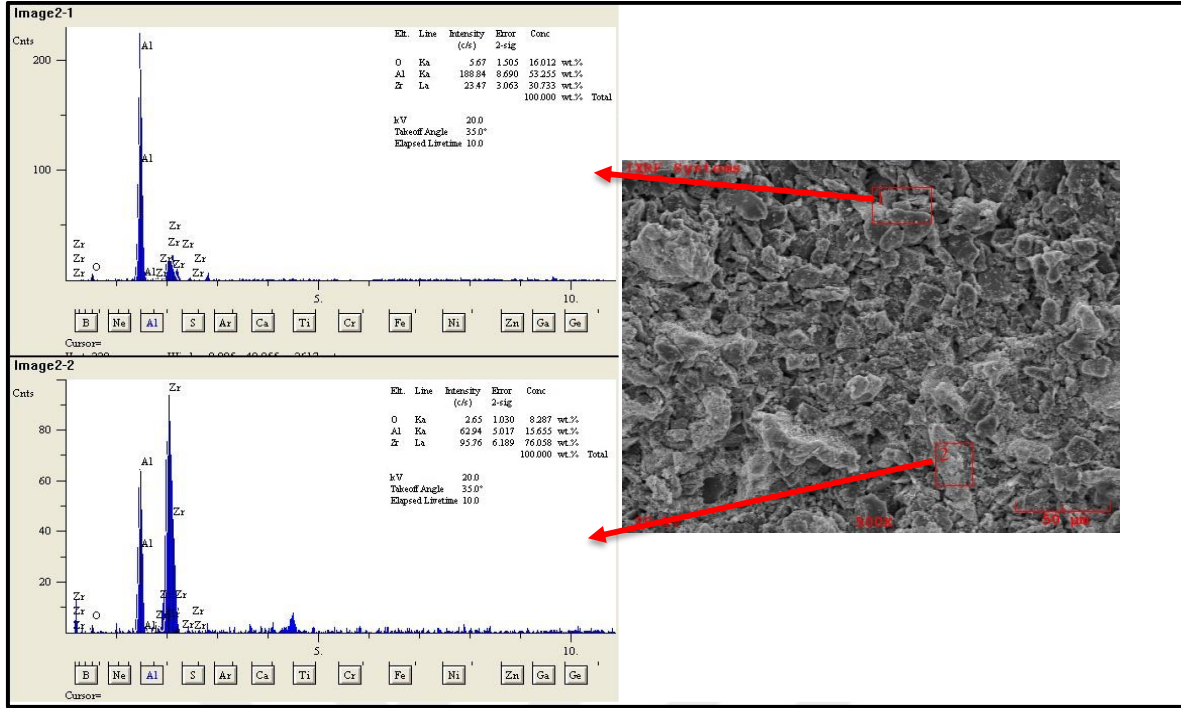
Aşağıda 2 saat sinterlenmiş olan numunenin katmanları arasındaki SEM görüntülerinden elde edilen EDS analizi grafikleri verilmiştir. Şekil 6.5'te 1. ve 2.katman geçişlerine ait,

Şekil 6.6’da 2. ve 3. katman geçişlerine ait, Şekil 6.7’de 3. ve 4. katman geçişlerine ait, Şekil 6.8’de ise 4. ve 5. katman geçişlerine ait EDS analizi sonuçları verilmiştir. Şekil 6.9’da çizgisel EDS analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.10’da numune üzerinde farklı görüntü eldesi görülmüş bu sebeple EDS analizi yapılmıştır, yapılan EDS analizi sonucunda altın-paladyum olduğu ve kullanılan kaplamaya ait olduğu belirlenmiştir.

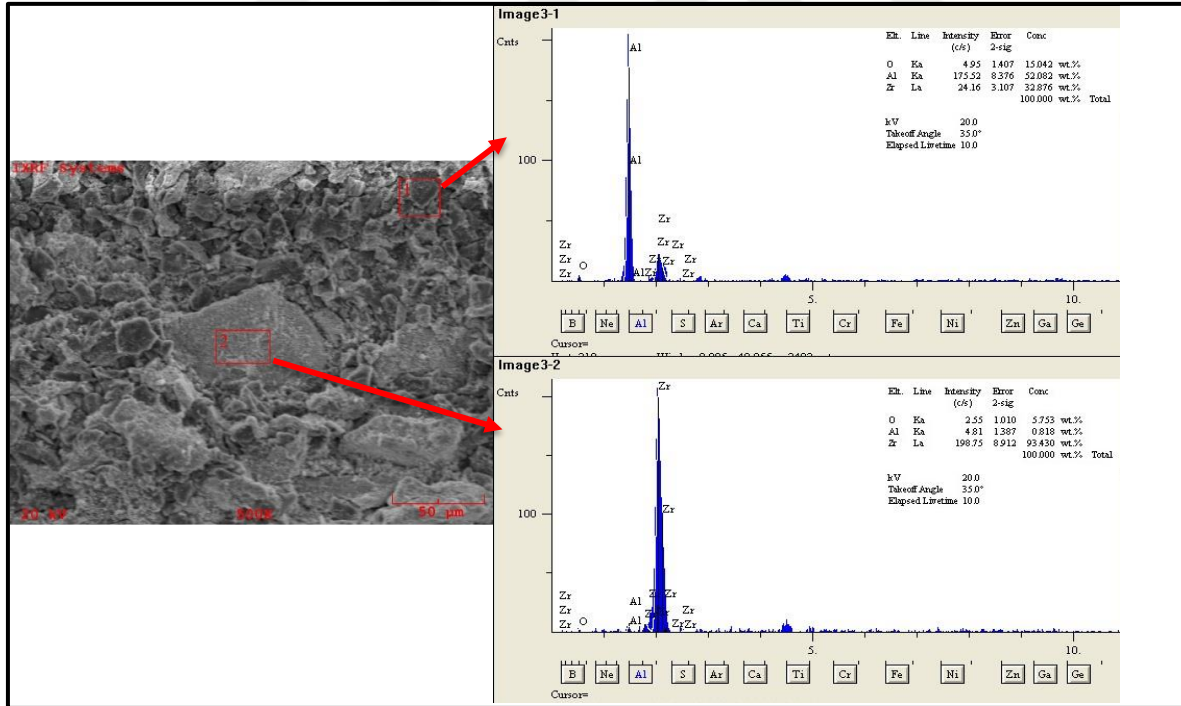
Üretilen FDM’nin mikroyapısındaki elementel dağılımı belirlemek amacıyla gerçekleştirilen EDS analizleri, katmanlar arası geçişlerde hedeflenen kompozisyonel değişimin başarıyla sağlandığını ortaya koymuştur. Elementel haritalama sonuçları, %100 Al_2O_3 içeren katmandan %20 Al_2O_3 - %80 ZrO_2 içeriğine doğru ilerledikçe Zr elementinin dağılımında artış olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, çizgisel EDS analizi sonuçları da bu geçişi doğrulamaktadır ve elde edilen grafiklerde Al_2O_3 içeriğinin azaldığı yönlerde Zr element konsantrasyonlarının arttığı net olarak gözlemlenmiştir.



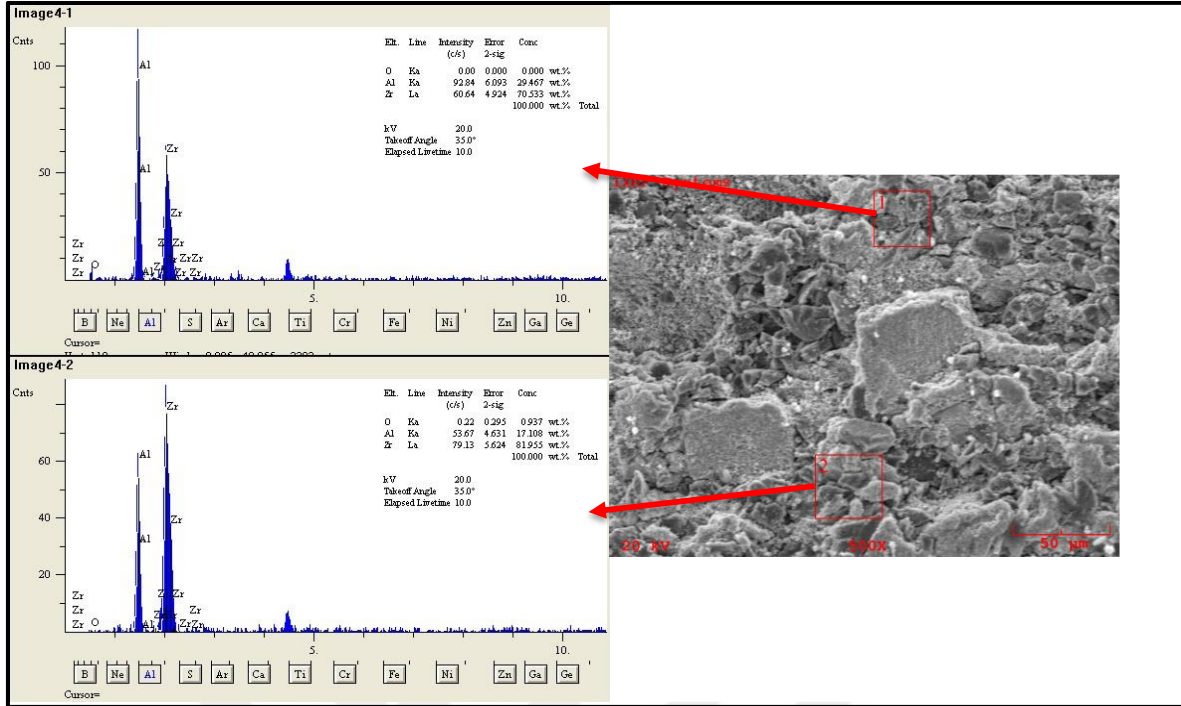
Şekil 6.5. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 1. ve 2. katman geçişlerinin EDS analizi



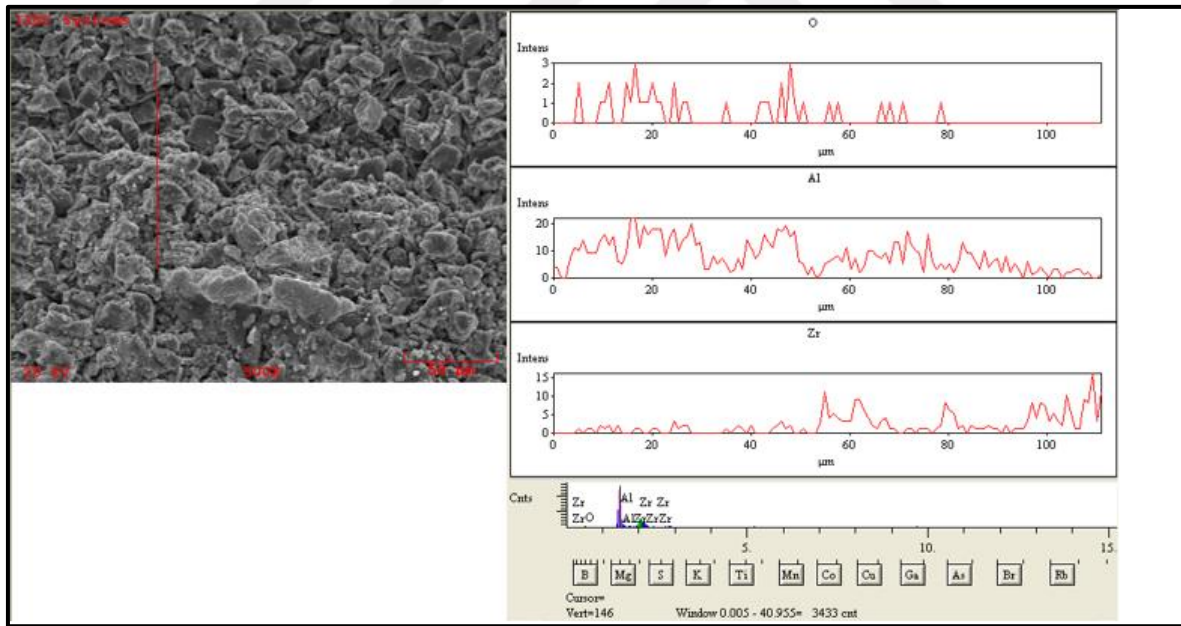
Şekil 6.6. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 2. ve 3. katman geçişlerinin EDS analizi



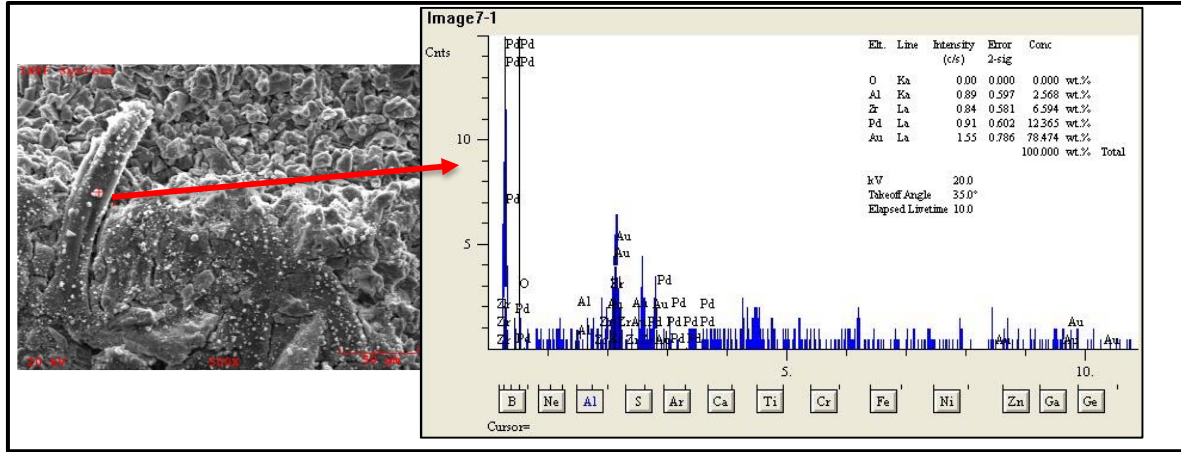
Şekil 6.7. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 3. ve 4. katman geçişlerinin EDS analizi



Şekil 6.8. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 4. ve 5. katman geçişlerinin EDS analizi



Şekil 6.9. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin 1. ve 2. katman geçişlerine ait çizgisel EDS analizi



Şekil 6.10. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin altın paladyum kaplamanın EDS analizindeki görüntüsü

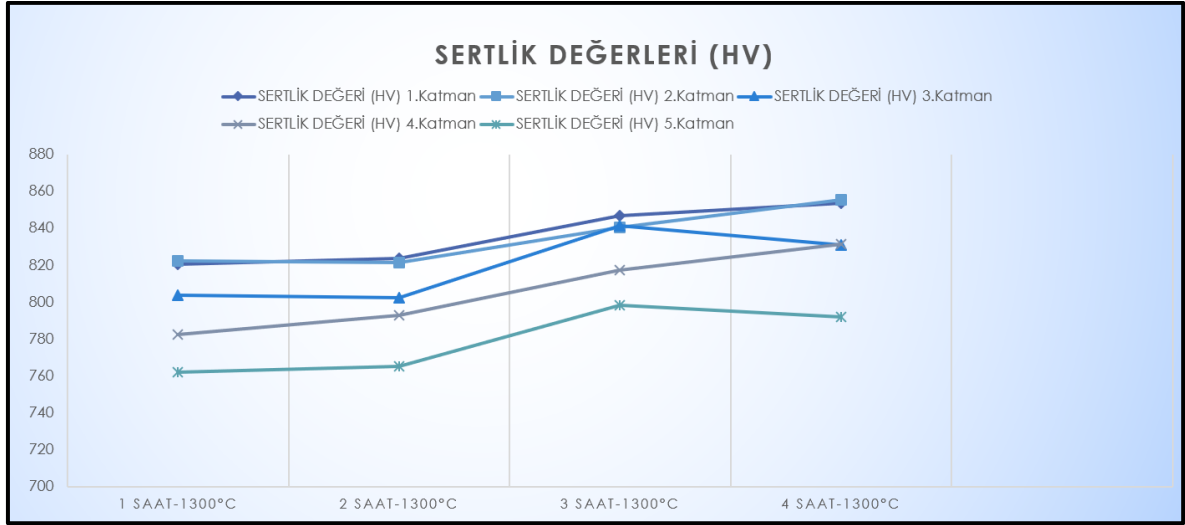
6.4. Sertlik Analizi

Sertlik testi Vickers mikrosertlik ucu ile yapılmıştır. Her konfigürasyon için test tekrar edilmiştir. Üretilen FDM numunelerinin sertlik değerleri her bir katman için alınmıştır. Konfigürasyonlara ait sertlik testi sonuçları Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Numunelerin her bir katmanından alınan sertlik değerlerinin çizelgesi

Sertlik Değeri (HV)					
Numune	1. Katman	2. Katman	3. Katman	4. Katman	5. Katman
1 Saat-1300°C	820,3	822,4	803,8	782,6	762,3
2 Saat-1300°C	823,5	821,6	802,3	793,1	765,2
3 Saat-1300°C	846,6	840,4	841,5	817,4	798,4
4 Saat-1300°C	853,7	855,4	831,1	831,3	792,1

Gerçekleştirilen sertlik testleri sonucunda %100 Al₂O₃ olan katmanda en yüksek, %20 Al₂O₃ + %80 ZrO₂ olan katmana doğru sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik değeri 1.katmanda (%100 Al₂O₃) en yüksek, 5.katmanda (%20 Al₂O₃ + %80 ZrO₂) en düşük sertlik değeri görülmüştür. Sinterleme sıcaklığı arttırıldığında genel olarak sertlik değerlerinde bir artış olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik değerlerinin en uzun sinterleme süresinde (4 saat) elde edildiği yapılan testler sonucunda tespit edilmiştir. Farklı sinterleme sürelerine sahip FDM numunelerinin her bir katman için sertlik değeri grafiği Şekil 6.11’de verilmiştir.

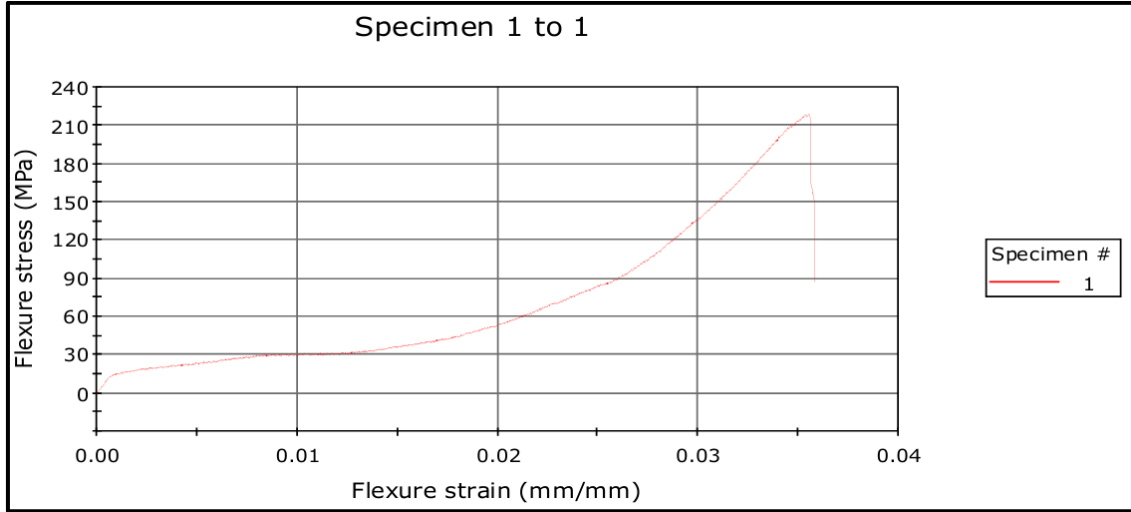


Şekil 6.11. FDM numunelerinin her bir katman için sertlik değer grafiği

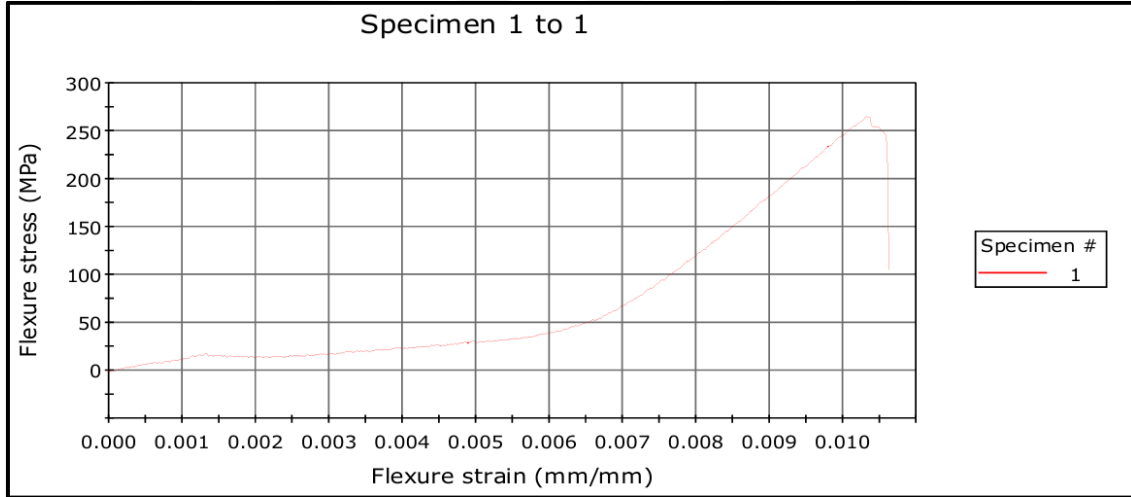
6.5. Üç Nokta Eğme Testi

Aşağıda 4 numunenin üç nokta eğme testi sonucu elde edilen grafikleri verilmiştir. İki noktadan desteklenen numuneye orta noktasından uygulanan yük sonucu meydana gelen deformasyon ve hasar değerleri ölçülerek, numunenin eğilme davranışına karşı gösterdiği mekanik direnç belirlenmektedir. FDM numunelerinin eğilme dayanımı ölçülmesi için 0.5 mm/dk hız ile üç nokta eğme testi yapılmıştır.

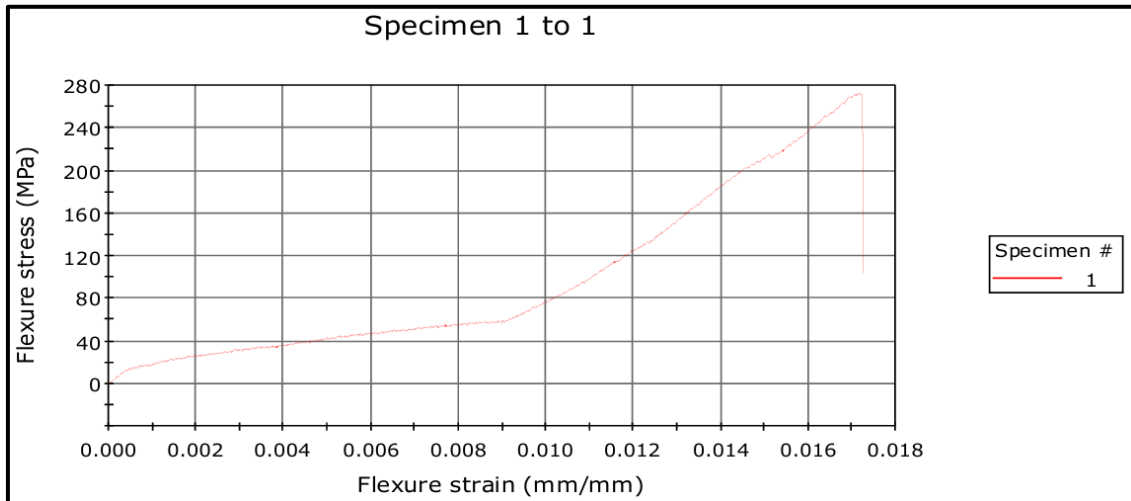
FDM numunelerinde en yüksek kırılma direnci Şekil 6.15'te grafiği verilmiş olan 4 saat sinterlenmiş numunede ≈ 320 MPa gözlemlenmiştir. En düşük kırılma direncinin Şekil 6.12'de grafiği verilmiş olan 1 saat sinterlenmiş numunede ≈ 220 Mpa değerlerinde olduğu görülmüştür. Şekil 6.13'te ve Şekil 6.14'de verilen grafikler ise sırasıyla 2 saat ve 3 saat sinterlenmiş olan numunelere ait üç nokta eğme test sonucu grafikleridir ve kırılma dirençleri sırasıyla ≈ 260 MPa ve ≈ 275 MPa olarak gözlemlenmiştir. FDM numuneler arasında farklı eğilme test davranışları daha uzun süre sinterlenmiş olan numunelerin daha yüksek kırılma direnci gösterdiği belirtmektedir.



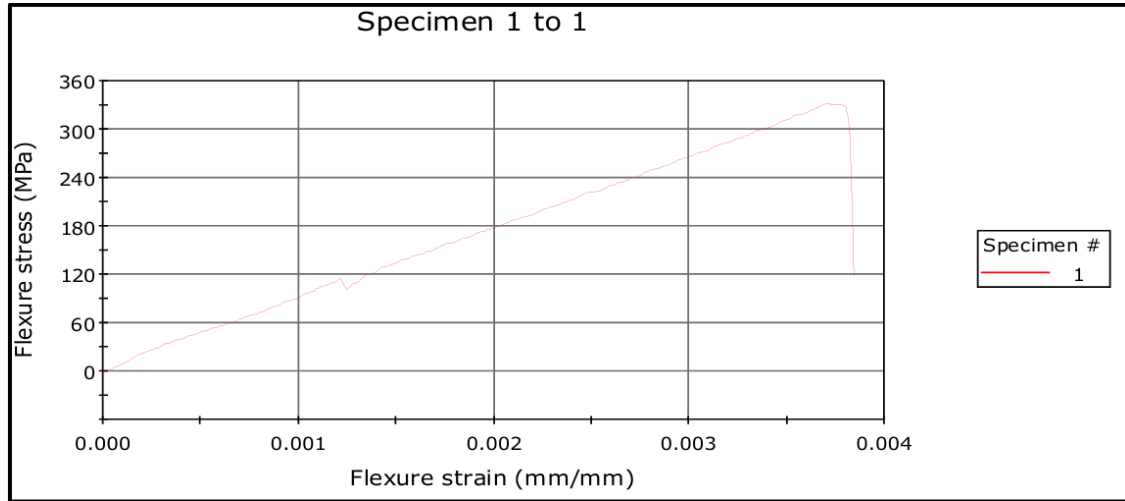
Şekil 6.12. 1 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği



Şekil 6.13. 2 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği



Şekil 6.14. 3 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği



Şekil 6.15. 4 saat sinterlenmiş olan numunenin üç nokta eğme test grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Al_2O_3 ve ZrO_2 tozları kullanılarak toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş FDM'lerin farklı parametrelerde üretilmesinin mekanik etkileri araştırılmıştır. Bu tez çalışmasının sonuçları aşağıda listelenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, Al_2O_3 ve ZrO_2 tozları ile toz metalurjisi yöntemi kullanılarak FDM eldesi sağlanmıştır. Al_2O_3 ve ZrO_2 tozları soğuk pres yöntemi kullanılarak preslenmiştir. Presleme aşamasında farklı pres basınçları kullanılmış bütün halde çatlaklı olarak elde edilen en iyi numune eldesi 500 MPa basınçta sağlanmıştır. Çatlakların giderilmesi için farklı oranlarda bağlayıcı kullanılmıştır. Bağlayıcı oranının yükseltilmeden çatlağın en yoğun olduğu %100 ZrO_2 katmanının çıkarılması üretim kalitesini iyileştirdiği görülmüştür. Bu durum literatürde ZrO_2 tozlarının Al_2O_3 tozlarına oranla daha büyük toz boyutuna sahip olması ve farklı elastikiyet göstermesi kompakt bir katman oluşumunun önüne geçmesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle 5 katmanlı Al_2O_3 matrisli FDM üretilmiştir. FDM numunesi üretiminde farklı bağlayıcı ve bağlayıcı oranları denenmiştir. En iyi sonuç eldesinin %9 bağlayıcı ile sağlandığı görülmüştür. Bu proseslere uygun olarak üretilmiş numuneler 500°C 'de yarım saat ön sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Daha sonra sıcaklık artırılarak önce 1550°C 'de 3 saat daha sonra, 1400°C 'de 1 saat ve son olarak 1300°C ' de farklı sürelerde sinterlenerek bu FDM numunesi için optimal sıcaklık tespit edilmiştir. 1550°C ve 1400°C 'de üretilmiş olan numunelerde eğilme gözlenmiştir. En iyi numune eldesi sağlanan parametreler kullanılarak, 500°C 'de yarım saat ön sinterleme yapıp daha sonra sıcaklığın 1300°C 'ye kadar artırılarak farklı sinterleme sürelerinde (1, 2, 3 ve 4 saat) 12 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numunelerde taramalı elektron mikroskobu ile yapılan analizler sonucunda, numunelerin katmanlarının istenilen ölçülerde olduğu belirlenmiştir. Katman geçişleri gözlemlendiğinde, ZrO_2 'nin istenen oranlarda dağıldığı görülmüştür. Bu aşamada numuneler çeşitli analiz ve testlere tabii tutulmuştur. Yapılan makroyapı analizinde 1 saat sinterlenen numune haricinde çatlığa rastlanmamıştır. Çatlak oluşumunun sebebi olarak sinterleme sıcaklık artış hızının ve soğuma hızının etkili olduğu tespit edilmiştir. XRD analizi sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde numunelerin yüksek mekanik dayanım, termal kararlılık ve kimyasal direnç özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. SEM analizinde elde edilen görüntüler incelendiğinde ise katmanlar arası geçişler net bir şekilde

görülebilmektedir. 1300°C sinterleme sıcaklığında katmanlarda istenilen değerde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ oranının gerçekleştiği belirlenmiştir. EDS analizi sonucunda katmanlar arası geçişlerde hedeflenen kompozisyonel değişimin başarıyla sağlandığı ortaya konmuştur. Gerçekleştirilen sertlik analizi sonucunda %100 Al_2O_3 olan katmanda en yüksek sertlik değerinin olduğu, %20 Al_2O_3 + %80 ZrO_2 olan katmana doğru sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Yapılan üç nokta eğme testi sonucunda numunelerin kırılma direncinin ≈ 220 MPa ile ≈ 320 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Daha uzun süre sinterlenmiş olan numunelerin daha yüksek kırılma direnci gösterdiği belirlenmiştir.

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen FDM, Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik tozları kullanılarak üretilmiş ve mekanik davranışları malzeme tetrahedronu mantığı çerçevesinde değerlendirilmiştir. Yapılan test ve analiz sonuçları, mekanik özellikler açısından bağlayıcı kullanımının, çatlakları minimize etmek için kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca mikroyapı açısından %100 ZrO_2 katmanının çıkarılması ile 5 katmanlı Al_2O_3 matrisli FDM üretimi, bu numunenin dayanıklılığını artırarak malzemenin genel mukavemetini güçlendirmiştir. Üretim yöntemi bakımından sinterleme sıcaklık artış hızının dakikada 2°C'den 1°C'ye düşürülmesi ve sıcaklığın dikkatli bir şekilde kademeli olarak düşürülmesi, malzemenin eğilmesini engellemiş ve daha stabil bir yapının elde edilmesini mümkün kılmıştır. Sonuç olarak, Al_2O_3 ve ZrO_2 ile üretilmiş olan FDM üretimindeki bu optimizasyonlar, FDM'nin mekanik performansını başarıyla iyileştirmiştir.

Bu tez çalışması sonucunda üretilen FDM, sahip olduğu katmanlı yapı ve bileşen özellikleri sayesinde çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilir. Öncelikle, yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüzeylerde kullanılmak üzere ısı bariyer kaplamaları için uygundur; gaz türbinleri, otomotiv egzoz sistemleri ve ısı kalkanları gibi uygulamalarda tercih edilmekte olup, burada yüksek sertlikten ziyade termal şok direnci ve çatlak ilerlemesini önleyici yapı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, farklı genleşme katsayısına sahip malzemelerin birleştirildiği yapılarda, gerilme geçişlerini yumuşatan katmanlı yapısı sayesinde ara yüzey malzemesi olarak da değerlendirilebilir; bu özelliği ile elektronik paketleme, piezoelektrik sensörler ve seramik-metal geçiş bölgelerinde kullanım potansiyeline sahiptir. ZrO_2 'nin faz dönüşümüne bağlı tokluk kazanma özelliği sayesinde, çatlak ilerlemesini sınırlayan mikroyapısı ile darbeye dayanıklı yapısal parçalarda da yer alabilir; özellikle zırh sistemlerinin iç tabakalarında ve darbe emici ara katmanlarda bu avantajdan yararlanılabilir. Son olarak, Al_2O_3 ve ZrO_2 'nin biyouyumlu olması, bu malzemeyi dental ve ortopedik uygulamalarda,

özellikle implant alt yapıları ve destek katmanlar gibi mekanik dayanım gereksinimi görece düşük biyomalzeme alanlarında da kullanıma uygun hale getirmektedir.

Tez süresince yapılan literatür taraması ve elde edilen analizler, gelecek çalışmalarda nihai ürünlerin dayanıklılığının ve kalitesinin daha iyi hale gelmesi konusunda etkili olabileceği düşünülmektedir. Numune üretimi sürecinde istiflenen katmanlar arasındaki yüzde oranlarının azaltılmasıyla yeni numune üretiminin denenmesi, malzemenin mekanik davranışları üzerinde olumlu bir etki oluşturabileceği öngörülmektedir. Kullanılan toz parçacıklarının boyutunun homojenleştirilerek eş boyutlu hale getirilmesinin, daha iyi sıkıştırılabilirlik, daha düşük porozite ve homojen sinterleme sağlayarak malzeme mekanik özelliklerini iyileştireceği düşünülmektedir. Ayrıca bağlayıcı ve bağlayıcı oranlarının çeşitlendirilmesi ile malzeme ve katmanlar arasındaki gözeneklilikler üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceği öngörülmektedir. Malzeme presleme sürecinde, farklı presleme yöntemleri bulunmaktadır. Bu süreçte çift etkili zımba yönteminin kullanılması veya sıcak presleme yönteminin kullanılması malzemenin mekanik davranışlarını iyileştirebileceği düşünülmektedir. Farklı gaz atmosferinde sinterlenme yapılarak numunelere olan etkiler incelenebilir. Sinterleme süresi arttıkça sertlik ve kırılma direncinin yükseldiği tespit edilmiştir. Daha uzun sinterleme süresi denenerek ilerleyen çalışmalarda daha iyi mekanik davranış sergileyebileceği düşünülmektedir. Çalışmanın ileri aşamalarında yapılacak deneysel analizler, bu teorik beklentilerin doğruluğunu test etmeyi ve malzeme kombinasyonunun pratik uygulamalardaki performansını netleştirmeyi hedeflemektedir.



KAYNAKLAR

- Akkaş, M., K. F. I. Boushiha ve T. M. K. Tabonah (2021). Toz metalurjisi yöntemi ile WC takviyeli CuNiSi kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(1), 41-48.
- Alagöz, H., M. Gülgeç and A. Konez (2004). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ve kullanım alanları. *Mühendis ve Makina*, 532, 4-68..
- Ansari, M., E. Jabari ve E. Toyserkani (2021). Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 294, 117117.
- Ardıçoğlu, H., H. Karakoç ve H. Çinici (2023). Microstructural properties and impact behavior of AA5083/Al₂O₃ functionally graded composite material with surface foam layer produced through powder metallurgy. *Materials Today Communications*, 35, 106144.
- Boggarapu, V., R. Gujjala, S. Ojha, S. Acharya, S. Chowdary ve D. kumar Gara (2021). State of the art in functionally graded materials. *Composite Structures*, 262, 113596.
- Borand, G. ve D. Uzunsoy (2022). Fabrication of functionally graded few-layered graphene reinforced Al-4.5 Cu alloy by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 923, 166348.
- Büyükdoğan, Ç. (2024). "Çok işlevli alümina-zirkonya kompozit malzemelerinin üretimi, mekanik ve balistik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 3-42.
- Çalışkan, F., S. Cömert and E. Kocaman (2017). Fabrication of functional graded Al₂124 composite reinforced with Al₂O₃ particles. *Acta Physica Polonica A*, 131(3), 437-439.
- Çallı, M. (2022). *Yönlendirilmiş enerji girdili metal katmanlı imalat yöntemi için topoloji optimizasyonu*. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bursa, 6-29.
- Canpolat, Ö., A. Çanakçı ve F. Erdemir (2023). SS316L/Al₂O₃ functionally graded material for potential biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*, 29, 126958.
- Çavdar, B. B. ve G. Ç. Efe (2024). Çok işlevli alümina-zirkonya kompozit malzemelerinin üretimi, mekanik ve balistik özelliklerinin incelenmesi. *Journal of Smart Systems Research*, 5(2), 133-148.
- Chauhan, P. K. ve S. Khan (2020). Microstructural examination of aluminium-copper functionally graded material developed by powder metallurgy route. *Materials Today: Proceedings*, 25, 833-837.
- Chen, F., M. Jia, Y. She, Y. Wu, Q. Shen ve L. Zhang (2020). Mechanical behavior of AlN/Mo functionally graded materials with various compositional structures. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152512.

- Çinici, H., U. Gökmen, G. Kırmızı ve R. Çamkerten (2017). Sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş B4C takviyeli AA 7xxx matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin çapraz kırılma dayanımının belirlenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 383-386.
- Cömert, S. (2018). *Fonksiyonel derecelendirilmiş seramik partikül takviyeli Al₂O₃/Al kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 5-32.
- Confalonieri, C., M. Perrin ve E. Gariboldi (2020). Combined powder metallurgy routes to improve thermal and mechanical response of Al– Sn composite phase change materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(12), 3226-3239.
- Dimitoka, K. ve B. Yıldırım (2003). Katmanlı ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış termal bariyer kaplamalarındaki termal gerilimlerin sonlu elemanlar metodu ile hesaplanması. *Mühendis ve Makina*, 44(525), 34-42.
- Erdemir, F., A. Canakci ve T. Varol (2015). Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al₂O₃/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(11), 3569-3577.
- Erden, M. A., Demirtaş, H. ve Oleiwi, H. F. (2024). Effect of Cr limits on microstructure and mechanical properties of P/M 316L austenitic steel. *Science of Sintering*, (00), 48-48.
- Ghanavati, R. ve H. Naffakh-Moosavy (2021). Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1628-1664.
- Gökmen, U., H. Çinici, A. Uzun ve H. Karakoç (2018). Al 7xxx toz metal fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18).
- Gu, H., C. Wei, L. Li, M. Ryan, R. Setchi, Q. Han ve L. Qian (2021). Numerical and experimental study of molten pool behaviour and defect formation in multi-material and functionally graded materials laser powder bed fusion. *Advanced Powder Technology*, 32(11), 4303-4321.
- Güler, S., H. T. Serindağ and G. Çam (2022). Tel ark eklemeli imalat: Son gelişmeler ve değerlendirmeler. *Mühendis ve Makina*, 63(706), 82-116.
- Hamamcı, M., F. Nair ve A. A. Cerit (2023). Microstructural and mechanical characterization of functionally graded Fe/Fe₂B (Fe/B₄C) materials fabricated by in-situ powder metallurgy method. *Ceramics International*, 49(11), 18786-18799.
- Islak, S. ve A. M. Abushraida (2019). Characterization of functionally graded Bronze matrix ceramic reinforced composite materials. *Sakarya University Journal of Science*, 23(6), 1137-1143.

- Jin, G., M. Takeuchi, S. Honda, T. Nishikawa ve H. Awaji (2005). Properties of multilayered mullite/Mo functionally graded materials fabricated by powder metallurgy processing. *Materials Chemistry and Physics*, 89(2-3), 238-243.
- Jung, Y.-G., C.-G. Ha, J.-H. Shin, S.-K. Hur ve U. Paik (2002). Fabrication of functionally graded ZrO₂/NiCrAlY composites by plasma activated sintering using tape casting and it's thermal barrier property. *Materials Science and Engineering: A*, 323(1-2), 110-118.
- Kapucu, A. (2012). *Yttrium stabilize tetragonal zirkonyum polikristal (y-tzp) sabit protez altyapılarında, kullanım sürecinde ortaya çıkan kristal faz dönüşümleri ile 3-nokta eğme mukavemeti arasındaki ilişkinin araştırılması*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 4-35.
- Kieback, B., A. Neubrand ve H. Riedel (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1-2), 81-106.
- Kırmızı, G., H. Arık ve H. Çinici (2019). Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 345-357.
- Konez, A., Alagöz, H., Topal, S. ve Gülgeç, M. (2005). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri ve kullanım alanları. *Mühendis ve Makine*, 46(547), 1-25.
- Kousksou, T., A. Jamil, T. El Rhafiki ve Y. Zeraouli (2010). Paraffin wax mixtures as phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(12), 2158-2165.
- Kumar, K., S. B. Ingole, A. Kaushik, D. Kumar ve A. Jain (2023). Aluminum-foam by powder metallurgy: A review. *Materials Today: Proceedings*, 3, 6-39.
- Kumar, M. S., P. Chandrasekar, P. Chandramohan ve M. Mohanraj (2012). Characterisation of titanium–titanium boride composites processed by powder metallurgy techniques. *Materials characterization*, 73, 43-51.
- Kütük Şahin, B., H. Çinici ve V. Kılıçlı (2024). *Nikel Esaslı Seramik Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Üzerine Kısa Bir İnceleme*. 4. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, Antalya, Türkiye, 581-587.
- Lumpkin, G. R. (1999). Physical and chemical characteristics of baddeleyite (monoclinic zirconia) in natural environments: an overview and case study. *Journal of nuclear materials*, 274(1-2), 206-217.
- Madan, R. ve S. Bhowmick (2022). Fabrication, microstructural characterization and finite element analysis of functionally graded Al-Al₂O₃ disk using powder metallurgy technique. *Materials Today Communications*, 32, 103878.
- Mahamood, R. M. ve Akinlabi, E. T. (2017). *Functionally graded materials*. Cham: Springer, 7-39.

- Majzoobi, G., M. Mohammadi ve K. Rahmani (2022). Microstructural examination and mechanical characterization of Ti/HA and Ti/SiO₂ functionally graded materials fabricated at different loading rates. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 136, 105497.
- Miyamoto, Y., W. Kaysser, B. Rabin, A. Kawasaki ve R. G. Ford (2013). *Functionally graded materials: design, processing and applications*. Cham: Springer Science & Business Media, 6-39.
- Morampudi, P., V. V. Ramana, C. Prasad ve K. SriramVikas (2022). Physical, mechanical and corrosion properties of Al6061/ZrB₂ metal matrix nano composites via powder metallurgy process. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1708-1713.
- Moustafa, E. B., W. S. AbuShanab, R. A. Youness ve M. A. Taha (2022). Improved mechanical properties of Cu₈Ni₄Sn alloy as functionally graded composites with preserving its thermal and electrical properties. *Materials Chemistry and Physics*, 292, 126778.
- Oksuz, K., S. Sen ve U. Sen (2017). Influence of ZrO₂ Addition on the structure and dielectric properties of BaTiO₃ ceramics. *Acta Physica Polonica A*, 131(1), 197-199.
- Ören, T. (2023). *Alumina ve alumina-zirkonya kompozitine kromoksit katkısının etkisi= The effect of chromium oxide addition on alumina and alumina-zirconia composites*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 4-29.
- Özarslan, O. (2007). *Fonksiyonel derecelendirilmiş bir plağın analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-41.
- Özmen, U. ve B. B. Özhan (2021). *Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik karakterizasyonu*. In 5th International Students Science Congress Proceedings Book, 318-319.
- Özusta, B., Y. Akgül, H. Ahlatcı, S. Yaşın, İ. Esen, Y. Sun ve Y. Türen (2019). *Paslanmaz çelik matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi ve karakterizasyonu*. UDCS'19 Fourth International Iron and Steel Symposium, Karabük, 66-70.
- Paladino, A. E. ve W. Kingery (1962). Aluminum ion diffusion in aluminum oxide. *The Journal of Chemical Physics*, 37(5), 957-962.
- Rajasekhar, K., V. S. Babu ve M. Davidson (2021). Microstructural and mechanical properties of Al-Cu functionally graded materials fabricated by powder metallurgy method. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1156-1159.
- Rodriguez-Albelo, L. M., P. Navarro, F. J. Gotor, J. E. de la Rosa, D. Mena, F. J. García-García, A. M. Beltrán, A. Alcudia ve Y. Torres (2023). Limits of powder metallurgy to fabricate porous Ti₃₅Nb₇Zr₅Ta samples for cortical bone replacements. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6212-6226.
- Saleh, B., J. Jiang, R. Fathi, T. Al-Hababi, Q. Xu, L. Wang, D. Song ve A. Ma (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, applications and future challenges. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108376.

- Setiawan, J., S. Pribadi, G. K. Suryaman ve M. Al Hasa (2021). *Structural analysis on in situ high-temperature XRD of corundum*. Woodbury, Long Island, NY: AIP Publishing, 3-19.
- Shamami, D. Z., S. M. Rabiee ve M. Shakeri (2022). Characterization of magnesium-hydroxyapatite functionally graded composites prepared by rapid microwave sintering technique. *Ceramics International*, 48(9), 12641-12653.
- Singh, P., V. Gupta, R. Mishra ve B. Singh (2022). Mechanical and tribological behaviour of aluminium based functionally graded materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3081-3085.
- Sola, A., D. Bellucci ve V. Cannillo (2016). Functionally graded materials for orthopedic applications—an update on design and manufacturing. *Biotechnology Advances*, 34(5), 504-531.
- Srinivas, P., P. S. Rao, P. Ramakrishna ve D. R. Reddy (2022). Experimental investigation and optimization of multi layered aluminium based functionally graded material reinforced with silicon carbide, nickel and Zinc stearate through powder metallurgical process. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2016-2025.
- Subbarao, E. (1981). Zirconia-an overview. *Advances in Ceramics*, 1, 1-24.
- Surya, M. S. ve T. V. Nilesh (2019). Synthesis and mechanical behaviour of (Al/SiC) functionally graded material using powder metallurgy technique. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3501-3506.
- Thümmeler, F. ve R. Oberacker (1993). *An introduction to powder metallurgy*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 7-62.
- Türker, M. (2007). Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 22-28.
- Turon-Vinas, M. ve M. Anglada (2018). Strength and fracture toughness of zirconia dental ceramics. *Dental Materials*, 34(3), 365-375.
- Übeyli, M., E. Balci, B. Sarikan, M. K. Öztaş, N. Camuşcu, R. O. Yildirim ve Ö. Keleş (2014). The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials & Design*, 56, 31-36.
- Uluköy, A. (2011). *Santrifüj döküm ile üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin fretting yorulması davranışının deneysel ve nümerik analizi*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 3-18.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*, Cambridge: Cambridge Int Science Publishing, 7-26.
- Van Do, V. N. ve C.-H. Lee (2018). Numerical investigation on post-buckling behavior of FGM sandwich plates subjected to in-plane mechanical compression. *Ocean Engineering*, 170, 20-42.

- Wang, H. ve Y. Wei (2012). Effect of material nonhomogeneity on the mechanical behaviors of a thick-walled functionally graded sandwich cylindrical structure. *Results in Physics*, 2, 118-122.
- Wang, J., Z. Pan, Y. Ma, Y. Lu, C. Shen, D. Cuiuri ve H. Li (2018). Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behaviour. *Materials Science and Engineering: A*, 734, 110-119.
- Yan, L., Y. Chen ve F. Liou (2020). Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition. *Additive Manufacturing*, 31, 100901.
- Yıldız, T. (2021). *Aa7xxx ve seramik parçacıklardan oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimi ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 3-23.
- Yıldız, T. ve G. Sur (2019). Fonksiyonel derecelendirilmiş Al7075/Al₂O₃ kompozitlerin mikroyapısının incelenmesi. *Karabük Üniversitesi Dergisi*, 3, 6-19.
- Yin, H., L. Sun ve G. H. Paulino (2004). Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions. *Acta Materialia*, 52(12), 3535-3543.
- Yurdakul, A. (2023). *Zirkonya matrisli seramik-seramik kompozitler*. Gaziantep: Özgür Yayınları, 81-100.
- Yurdakul, A., H. Gocmez ve H. Yurdakul (2021). Macro to atomic scale characterization of 3 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline (3Y-TZP) ceramics for welding pin applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 7171-7183.
- Zhu, J., Z. Lai, Z. Yin, J. Jeon ve S. Lee (2001). Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, 68(1-3), 130-135.



Gazili olmak ayrıcalıktır