



**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ INCONEL 718 VE ZrO₂ MALZEMELERİNİN
ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONU**

Beyza KÜTÜK ŞAHİN

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2024

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.

Beyza KÜTÜK ŞAHİN

06/04/2024

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ INCONEL 718 VE ZrO₂ MALZEMELERİNİN ÜRETİM VE
KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Beyza KÜTÜK ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2024

ÖZET

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM'ler), belirli uygulamalara göre uyarlanmış benzersiz mekanik, termal ve kimyasal özellik kombinasyonları sunarak malzeme bilimi ve mühendisliğinde devrim niteliğinde bir bakış açısını temsil etmektedir. Bu tez, Zirkonya (ZrO₂) ve Inconel 718 oluşan yeni bir işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemenin sentezini, karakterizasyonunu ve performansını araştırmakta ve her iki malzemenin gelişmiş mekanik mukavemet, yüksek sıcaklık kararlılığı ve korozyon direnci için farklı avantajlarından yararlanmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, termal stabilite incelenmiştir. FDM'nin termal döngüye ve agresif ortamlara maruz kalmaya verdiği tepki, havacılık, enerji ve diğer zorlu uygulamalara uygunluğunu doğrulamak için analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez, özellikle Zirkonya ve Inconel 718 arasındaki etkileşime odaklanarak, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kapsamlı bir araştırmasını ortaya koymayı hedeflemiştir.

Bilim Kodu : 91528
Anahtar Kelimeler : Toz metalürjisi, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, süperalaşımlar, seramikler
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF FUNCTIONALLY GRADED
INCONEL 718 AND ZrO₂ MATERIALS BY POWDER METALLURGY METHOD

(M. Sc. Thesis)

Beyza KÜTÜK ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

Functionally Graded Materials (FGMs) represent a revolutionary perspective in materials science and engineering by offering unique combinations of mechanical, thermal and chemical properties tailored to specific applications. This thesis investigates the synthesis, characterisation and performance of a novel functionally graded material consisting of Zirconia (ZrO₂) and Inconel 718 and aims to exploit the distinct advantages of both materials for improved mechanical strength, high temperature stability and corrosion resistance. Furthermore, the thermal stability is investigated. The response of FGM to thermal cycling and exposure to aggressive environments has been analysed to confirm its suitability for aerospace, energy and other demanding applications. In conclusion, this thesis aimed to put forward a comprehensive investigation of functional graded materials, with a particular focus on the interaction between Zirconia and Inconel 718.

Science Code : 91528

Key Words : Powder metallurgy, functionally graded materials, superalloys, ceramics

Page Number : 81

Supervisor : Assist. Prof. Hanifi ÇİNİCİ

TEŞEKKÜR

Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye tez çalışmamı her zaman desteklediği, değerli fikirleriyle yol gösterdiği ve her durumda benim için motivasyon kaynağı olduğu için teşekkür ederim.

Doç. Dr. Volkan KILIÇLI'ya, Öğr. Gör. Damla Dilara ÇAKIL'a ve Arş. Gör. Sevda ALBAYRAK'a tez deneylerimin gerçekleşmesine büyük katkı sağladıkları ve değerli fikirleriyle tezi bir üst seviyeye taşıdıkları için teşekkür ederim.

Tez deneylerim sırasında bana her zaman destek olan sevgili arkadaşlarım Oğuzcan DEDECİ, Okay TUTAR'a, destekleri için Murat ÖZCAN ve Mehmet KURT'a en derin şükranlarımı sunarım. Bir diğer teşekkürüm ise tezimin ilk aşamalarından beri beni her konuda destekleyen sayın yöneticim Orkun Umur ÖNEM'e.

Çalışmalarım boyunca desteğini hep benimle hissettiğim, bir an olsun beni yalnız bırakmayan kıymetli dostum Ece KAHRAMAN ULAŞ, bu süreçlerde yanımda olduğun için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bana her zaman destek olan, her koşulda motivasyon sağlayan, beni bugünlere getiren ve geleceğe her zaman umutla bakmamı sağlayan sevgili aileme en büyük şükranlarımı sunarım bilhassa hem meslektaşım hem akıl koçum olan biricik ablam Büşra KÜTÜK SEVİM'e en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bir meslektaşım olarak değerli bilgilerini benimle paylaşan, tez çalışmalarım boyunca desteğini benden hiç esirgemeyen sevgili eşim Ömer ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatın her alanında bana her zaman destek olduğun ve yüzümü her zaman güldürdüğün için sana minnettarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM).....	5
2.1.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sınıflandırılması.....	6
2.1.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları	8
2.1.3. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri	11
2.2. Toz Metalurjisi.....	18
2.2.1. Toz metalurjisinin avantajları ve dezavantajları	18
2.2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretimi.....	19
2.3. Süperalaşımlar	22
2.3.1. Süperalaşımların Sınıflandırılması	23
2.3.2. Inconel 718 süperalaşımı	24
2.4. Seramikler	25
2.4.1. Seramiklerin sınıflandırılması	26
2.4.2. ZrO ₂ Genel özellikleri.....	26
3. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
4.1. Toz Özellikleri	41
4.2. Üretim Planı (Blok numune Üretimi).....	41

	Sayfa
4.2.1. Tozların tartılması.....	43
4.2.2. Tozların karıştırılması.....	44
4.2.3. Tozların kalıba alınması	46
4.2.4. Ön ısıtma prosesi	46
4.2.5. Pres Prosesi.....	47
4.2.6. Sinter prosesi	49
4.2.7. Metalografik numune hazırlanması	50
4.3. Karakterizasyon Çalışmaları	51
4.3.1. Morfoloji.....	51
4.3.2. Kimyasal kompozisyon analizi.....	52
4.3.3. Malzeme Yüzey Analizi	52
4.3.4. Mikroyapı analizi.....	52
4.3.5. Dinamik görüntü analizi	53
4.4. Mekanik Testler	54
4.4.1. Termal iletkenlik analizi	54
4.4.2. Sertlik analizi	56
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
5.1. A Planı	57
5.2. B Planı	57
5.3. Malzeme Yüzey Analizi	59
5.4. SEM Analizi	59
5.5. Termal İletkenlik analizi	65
5.6. Sertlik Analizi	67
5.7. Toz Boyut ve Şekil Analizi.....	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73

ÖZGEÇMİŞ	81
----------------	----



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. FDM'nin geleneksel üretim teknikleri.....	12
Çizelge 2.2. Farklı elementlerin süper alaşımlar üzerindeki etkisi.....	24
Çizelge 4.1. A planına göre üretilecek numune katman bilgileri	42
Çizelge 4.2. B planına göre üretilecek numune katman bilgileri.....	42
Çizelge 4.3. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için toz kütlesi hesabı	43
Çizelge 4.4. 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için toz kütlesi hesabı.....	44
Çizelge 4.5. Pres için uygulanan basınç parametreleri	49
Çizelge 4.6. Sinter sıcaklığı parametreleri ve numune adetleri	50
Çizelge 5.1. B planı pres ve sinter prosesi sonrası fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler.....	58
Çizelge 5.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme makro görüntüleri	59
Çizelge 5.3. Numunelerin farklı sıcaklıklara göre termal iletkenlik katsayıları	66
Çizelge 5.4. Numunelerin 3 farklı bölgeden alınan ortalama sertlik değerlerinin çizelgesi	67
Çizelge 5.5. Tozların parçacık boyutu dağılımı.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. FDM'nin günümüze kadar olan önemli dönüm noktaları	1
Şekil 1.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme gösterimi	2
Şekil 2.1. Homojen seramik kaplama ve malzeme üzerinde meydana gelen çatlaklar	6
Şekil 2.2. a) Süreksiz ve (b) sürekli FDM, (c), (d) ve (e) süreksiz FDM'yi gösteren şematik diyagram, (f), (g), (h) sürekli FDM'yi gösteren şematik diyagram	8
Şekil 2.3. FDM uygulama alanları	8
Şekil 2.4. FDM'nin havacılık uygulamaları	9
Şekil 2.5. FDM savunma alanı uygulamaları.....	10
Şekil 2.6. FDM'nin otomotiv uygulamaları.....	11
Şekil 2.7. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin eklemeli imalat ile üretim akışı	12
Şekil 2.8. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin lazer-bazlı metotlarla üretilmesi (a) SLS, (b) SLM, (c) DED	13
Şekil 2.9. SLM prosesi ile FDM'nin üretilmesi.....	14
Şekil 2.10. SLM yöntemi ile üretilmiş bakır-tungsten FDM.....	14
Şekil 2.11. DED çalışma prensibi	15
Şekil 2.12. (a) SLA prosesi, (b) SLA prosesi ile üretilmiş FDM.....	16
Şekil 2.13. SLA formları (a) normal düzende olan (b) baş aşağı yönde olan.....	16
Şekil 2.14. (a) Malzeme püskürtme metodu şematik illüstrasyonu, (b) malzeme püskürtme ile üretilmiş FDM.....	17
Şekil 2.15. Eriyik biriktirme metodu şematik illüstrasyonu	17
Şekil 2.16. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretim akış şeması	19
Şekil 2.17. Toz karıştırma cihazları, a) vidalı karıştırıcı, b) bıçaklı karıştırıcı, c) dönen tambur ve d) dönen çift koni	20

Şekil	Sayfa
Şekil 2.18. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemenin preslenme aşamaları, 1) kalıbın toz ile doldurulması, 2) presleme işleminin başlaması, 3) nihai presin yapılması, 4) üst kalıbın kaldırılarak green kompakt malzemenin çıkarılması.....	21
Şekil 2.19. Sinterleme aşamasında parçacıkların bağlanma aşamaları.....	21
Şekil 2.20. Sinterleme çeşitleri	22
Şekil 3.1. Kullanılan malzemelerin şematik ve fotoğraf ile gösterimi	30
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.3. TZ3Y/Ni et kalınlığı kesiti.....	33
Şekil 3.4. Bir P/M yolu kullanarak FG diskinin üretim sürecini gösteren akış şeması	34
Şekil 3.5. FDM katmanlarının mikrogramları (gri kısım nikeldir YSZ'de).....	35
Şekil 3.6. Farklı oranlarda oluşturulmuş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler	37
Şekil 3.7. 1) 1400°C'de basınçsız sinterleme; 2) 1250°C, 5 MPa'da sıcak presleme mikroyapıları	38
Şekil 3.8. Üretilen farklı kaplanmış FG-TBC numunelerinin resimli görüntüsü 1) Tek katman, 2) İki katman, 3) Üç katman.....	39
Şekil 4.1 Inconel 718 toz kimyasal kompozisyon (wt%)	41
Şekil 4.2. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı	42
Şekil 4.3. 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı	43
Şekil 4.4. Katmanları oluşturacak tozların konulduğu kaplar.....	44
Şekil 4.5. Toz Ayırıcı Ünite.....	45
Şekil 4.6. Turbula Ekipmanı	45
Şekil 4.7. (a) Pres kalıbı boyutları, (b) alt zımba ve (c) üst zımba	46
Şekil 4.8. Protherm marka ısıtma işlem fırını	47
Şekil 4.9. Ön ısıtma proses parametresi.....	47
Şekil 4.10. Carvex marka pres cihazı.....	48
Şekil 4.11. Pres prosesi	48
Şekil 4.12. Protherm ACF 13.55 Atmosfer Kontrollü Isıl İşlem Fırını	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Sinterleme prosesi parametreleri	50
Şekil 4.14 Hitachi SU5000 FE-SEM	51
Şekil 4.15. Leica M205C model stereo mikroskop.....	52
Şekil 4.16. Axiscope 5 model optik mikroskop	53
Şekil 4.17. Camsizer X2 model dinamik görüntü analizi ekipmanı	53
Şekil 4.18 Muhafazalı sıcak plaka yönteminin şematik görünümü	55
Şekil 4.19 Muhafazalı sıcak tabla cihazı ve cihaz bileşenleri.....	55
Şekil 4.20. Emcotest mikro sertlik cihazı	56
Şekil 5.1. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ¼ inç ve ½ inç görüntüsü	57
Şekil 5.2. (a) 400 MPa basınç, (b) 500 MPa basınç uygulanmış pres sonuçları.....	58
Şekil 5.3. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %100 Inconel 718 olan katmanın SEM görüntüsü.....	60
Şekil 5.4. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %90 Inconel 718 ve %10 ZrO ₂ olan katmanın SEM görüntüsü.....	60
Şekil 5.5. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %80 Inconel 718 ve %20 ZrO ₂ olan katmanın SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.6. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %70 Inconel 718 ve % 30 ZrO ₂ olan katmanın SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.7. (a) 600, (b) 700 ve (c) 800 MPa’da 1200 derece sinterleme sonrası numunelerde meydana gelen çatlakların SEM görüntüsü	62
Şekil 5.8. %100 Inconel 718 ile %90 Inconel 718+ %10 ZrO ₂ ara yüzeyi EDS haritalama sonuçları	63
Şekil 5.9. %100 Inconel 718 ile %90 Inconel 718+ %10 ZrO ₂ ara yüzeyi çizgisel EDS sonuçları.....	63
Şekil 5.10. %90 Inconel 718+ %10 ZrO ₂ %80 Inconel 718+ %20 ZrO ₂ ara yüzeyi EDS haritalama sonuçları	64
Şekil 5.11. %90 Inconel 718+ %10 ZrO ₂ %80 Inconel 718+ %20 ZrO ₂ ara yüzeyi çizgisel EDS sonuçları.....	64
Şekil 5.12. %80 Inconel 718+ %20 ZrO ₂ %70 Inconel 718+ %30 ZrO ₂ ara yüzeyi EDS haritalama sonuçları	65

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. %80 Inconel 718+ %20 ZrO ₂ %70 Inconel 718+ %30 ZrO ₂ ara yüzeyi çizgisel EDS sonuçları	65
Şekil 5.14. Numunelerin termal iletkenlik katsayılarının sıcaklığa göre değişim grafiği	66
Şekil 5.15. 3 farklı bölgeden alınan sertlik noktalarının gösterimi.....	67
Şekil 5.16. CamsizerX2 ekipmanı tarafından çekilen toz görüntüsü.....	68
Şekil 5.17. Parçacık boyutu dağılım eğrileri.....	69



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. a) Kimyasal bileşimi geçişli FDM, b) gözenekliliği geçişli FDM'nin	7
Resim 3.1. Çatlağın görüntüsü (a); çatlaktan 100 mikron ağırlık yüzdesi olarak planan ve ölçülen bileşim tablosu (b); EDS haritaları (c-h).....	29
Resim 3.2. Farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen Inconel 625 mikroyapısı	31



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Zr

Zirkonyum

ZrO₂

Zirkonyum oksit (Zirkonya)

Kısaltmalar

Açıklamalar

CAD

Bilgisayar Destekli Tasarım

DED

Direkt Enerji Biriktirme

FDM

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

LENS

Lazer ile Net Şekillendirme

MPa

Megapaskal

SLA

Stereolitografi

SLM

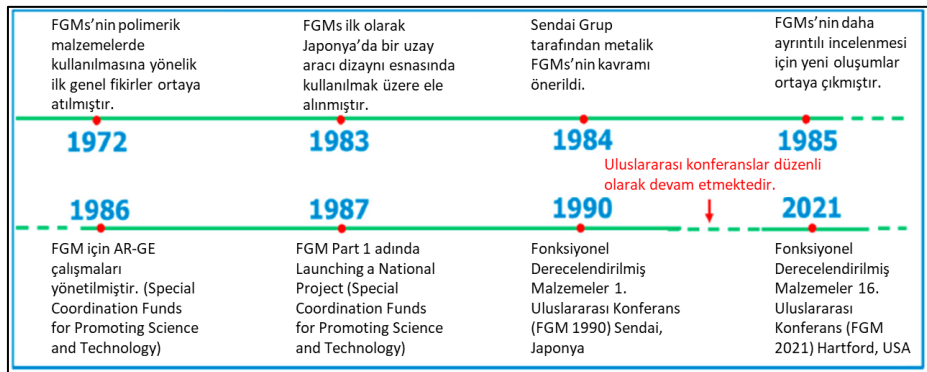
Seçici Lazer Ergitme

SLS

Seçici Lazer Sinterleme

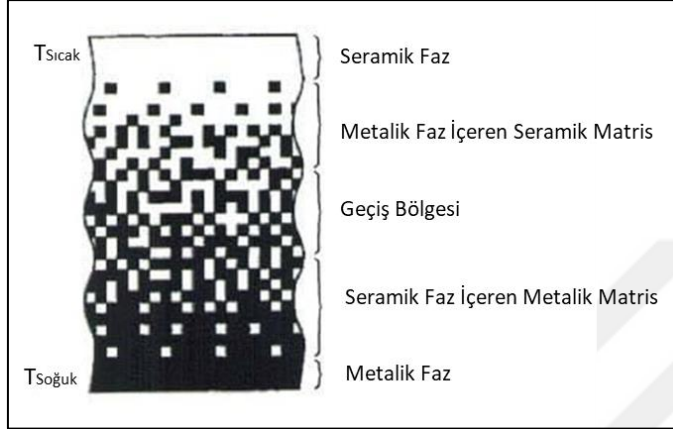
1. GİRİŞ

21. yüzyılda ivme kazanan havacılık ve uzay sistemleri çalışmalarında kullanılan malzemeler büyük önem taşımaktadır. Bunun ile birlikte bu malzemelerin çeşitliliği ve malzemelerin çoklu fonksiyonlar içermesi de önemlidir. Özellikle uzay taşıtlarında büyük bir ihtiyaç olan malzemenin yüksek mukavemet ve termal dayanım sağlaması istenirken diğer yandan da kullanılacak malzemelerde hafiflik ihtiyacı en başta aranan temel özelliklerdendir. Bu sebeple mevcut malzemelerin kullanımı yerine yeni bir malzeme ihtiyacı doğmuştur. Bu doğrultuda araştırmacıların yeni malzeme arayışı sonucunda Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) ortaya çıkmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sahip olduğu kompozisyon, mikroyapı ve malzeme davranışlarının kademeli olarak değiştiği bir yapıdır [1]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin temelleri Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere ilk olarak 1972 yılında polimerik malzemelerde kullanılması üzerine genel fikirler ortaya atılmasıyla başlamıştır. Fakat ilk hayata geçirilen çalışma 1984 yılında Japonya'da metal matrisli kompozit malzemelerin uzay araçlarının tahrik motorlarında kullanılmasının planlanmasıyla başlamıştır. Tasarlanan parçanın iç ve dış çapları arasında 1000°K sıcaklık farkı olması sebebiyle meydana gelen termal gerilmeler, mevcut malzemeler ile karşılanamamış ve yeni bir malzeme ihtiyacı ortaya çıkmasıyla FDM'nin çalışmaları başlatılmıştır. Ardından çalışmalar hız kazanmış ve 1990 yılında uluslararası konferanslar yapılmaya başlanarak ve günümüzde de birçok çalışmada Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler etkin şekilde kullanılmaya başlanmıştır [2].



Şekil 1.1. FDM'nin günümüze kadar olan önemli dönüm noktaları

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler farklı iki malzeme türünün birleştirilmesi ile oluşur. En yaygın olarak kullanılanı, metal bir malzemeden seramiğe doğru geçişin olduğu bir yapıdır (Şekil 1.2). Metaller; yüksek tokluk, işlenebilirlik ve bağ kurma yetisi sağlarken, seramikler; yüksek mukavemet, ısıl direnç, aşınma, oksitlenme dirençleri ve düşük yoğunluğu ile malzemede sağladığı hafiflikler sebebiyle tercih sebebi olmuştur [3].



Şekil 1.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme gösterimi [4].

Uzay ve havacılık sistemlerinde atmosfer dışı koşullarda çalışılması istenen malzemelere, yüksek sıcaklık maruziyetlerine karşı kaplama alternatifleri bulunmaktadır. Ancak yapılan kaplamalar neticesinde arayüz çatlakları, tutunamama gibi durumlar söz konusu olmaktadır. Ayrıca kaplama uygulanan plaka kalınlığından ötürü çarpılmalar görülmektedir. Bu çalışmanın amacı metalden seramiğe bir geçişin sağlandığı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ile malzeme yüzeyinde yüksek termal özellik sağlamak, bunu direkt olarak sprey yöntemi uygulanmadan fonksiyonel olarak derecelendirerek malzemenin tutunmasını ve ara yüzey çatlaklarının önüne geçmektir. Bu çalışmada, Inconel718 ve ZrO_2 'den oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle sıcak pres kullanılarak üretilmiştir. Böylelikle üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ile metal ve seramiklerin dayanım, termal direnç, yüksek aşınma direnci vd. gibi üstün özelliklerinden aynı anda yararlanılabilecek yeni bir malzeme elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, ağırlıkça %100 Inconel 718, %90 Inconel 718- %10 ZrO_2 , %80 Inconel 718- %20 ZrO_2 ve %70 Inconel 718- %30 ZrO_2 içeren derecelendirilmiş numuneler, 500°C ön ısıtılmış ardından 400 MPa, 500 MPa, 600 MPa, 700 MPa ve 800 MPa basınçlarında preslenmiştir. Pres işlemi tamamlanan numuneler 1000°C, 1100°C ve 1200°C'de sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin, mikroyapı, mekanik ve optik incelemek

için çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Mikroyapı analizinde optik mikroskop ve elektron mikroskobu, mekanik özelliklerin analizinde malzeme sertlik testleri uygulanmıştır. Bu sonuçlar ışığında en üstün özelliklerin sağlandığı optimum aralık tespit edilmiştir.

Bu tez toplam 6 başlıktan oluşmaktadır. Giriş başlığını, genel bilgiler içeren Bölüm 2 takip etmektedir. Bu bölümde, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sınıflandırılması, genel tanımı, avantajları ve dezavantajları karşılaştırılarak sunulmuştur. Bunların haricinde kullanılmış olan Inconel718 ve ZrO_2 tozlarının genel özelliklerinden bahsedilmiştir. Ardından Bölüm 3 literatür araştırması ile devam etmektedir. Bu bölümde, literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve metalden seramiğe geçişin kullanılarak oluşturulduğu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle ilgili akademik makaleler özetlenmiştir. Bölüm 4, tez deneylerinin deneysel prosedürünün açıklandığı kısımdır. Bu bölümde kullanılan ana tozun özellikleri verilmiş ve üretim planlaması anlatılmıştır. Testler için tasarlanmış aparatlardan bahsedilmiştir. Ayrıca hem tozlar hem de elde edilen nihai parçalar için test yöntemleri de bu bölümde yer almaktadır. Bölüm 5, prosedürü açıklanan deneylerden sonraki sonuçları ve yorumları içermektedir. Son olarak, kapanış ve planlanan gelecek alışmalar Bölüm 6'da açıklanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Tezin bu bölümünde Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin genel tanımına yer verilmiştir. Ardından bu malzemelerin sınıflandırılması ve üretim yöntemlerinden olan toz metalurjisi ve eklemeli imalat yöntemlerinden bahsedilmiştir. Son olarak bu tez özelinde kullanılan malzemelerin genel özellikleri açıklanmıştır.

2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)

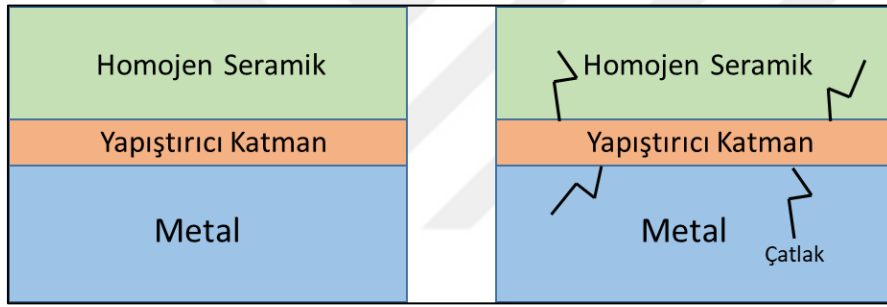
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), günümüz malzeme bilimi ve mühendisliği alanında hızla gelişen bir araştırma ve uygulama alanıdır. Bu malzemeler ile geleneksel malzemelerin erişemeyeceği mekanik ve kimyasal özellikleri sağlamak mümkündür [3, 5-7, 8, 9]

FDM'ler, belirli bölgelere veya katmanlara özgü olarak tasarlanmış ve üretilmiş özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin özellikleri, işlevselliğin artırılması veya belirli uygulamalara uyum sağlanması amacıyla kontrollü bir şekilde değiştirilir [10]. Fonksiyonel derecelendirme, malzemenin mikro yapısal düzeyde kontrolü ile mümkündür, bu da malzemenin farklı bölgelerinde farklı özelliklere sahip olmasına olanak tanır. Örneğin akıllı malzemeler (sıcaklık sensörleri, piezoelektrik bileşenler vd.), biyomalzemeler (implantlar, mikro ilaçlar vd.), elektronik bileşenler (diyotlar vd.) gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır [10-13, 14,15]

FDM'ler sağladıkları hafiflik, yüksek mukavemet ve yüksek termal kararlılık özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayiinde sıklıkla tercih edilen ve özellikleri geliştirilmesine ihtiyaç duyulan bir malzeme türüdür [2, 16-20]. Jet motorları, roket itki sistemleri, endüstriyel fırınlar ve enerji üretim tesisleri gibi yüksek sıcaklık gerektiren ortamlarda kritik parçaların üretiminde kullanılır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, özel termal izolasyon özellikleri, yüksek sıcaklıkta korozyona direnç ve uzun ömürlü performans gibi avantajlar sağlar. Ayrıca, bu malzemelerin özel üretim süreçleri sayesinde karmaşık geometrili parçaların üretimi ve özelleştirilmiş tasarımların yapılması mümkün olur. Bu nedenle, yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda fonksiyonel

derecelendirilmiş malzemeler, dayanıklılık, performans ve özel gereksinimlere uyum gibi kritik faktörleri karşılamak adına önemli bir çözüm sunar [5-6, 9, 21-28]

Yüksek sıcaklık ile çalışan kısımlarda malzemenin sıcaklık dayanımı en önemli kriterdir. Bu malzemelerin sıcaklık dayanımını artırmak için malzemelere çeşitli seramik kaplamalar yapılarak malzemenin dayanımı üst seviyelere çıkarılır. Fakat bu kaplamalar beraberinde birçok sorunu getirir. Metal ve seramik yüzeyler arasında iki malzemeyi birbirine bağlayıcı herhangi bir geçiş olmadığından malzeme özelliklerinin bir anda değiştiği bir alan oluşur. Bu alan ısıl dayanımı çok farklı olan iki malzemeyi birbirine bağladığından yüksek ısıl gerilmelere sebebiyet verir. Zamanla bu gerilmeler bağlanma yüzeyinden başlayarak her iki malzemeyi de hasara uğratar ve Şekil 2.1’de görüldüğü gibi malzemede çatlaklara yol açar [29]



Şekil 2.1. Homojen seramik kaplama ve malzeme üzerinde meydana gelen çatlaklar [29].

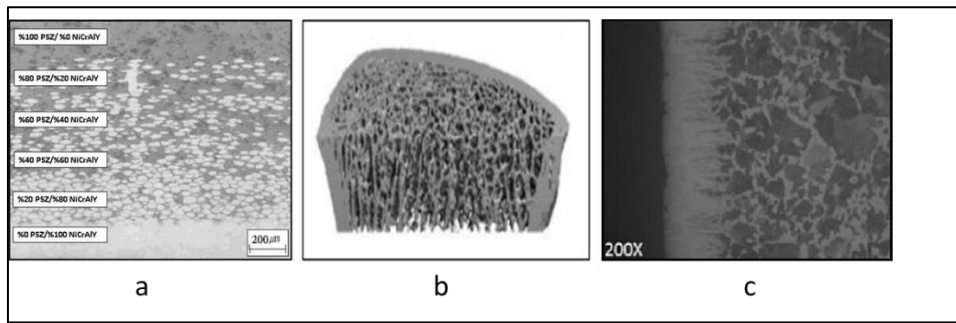
Bu kısıtlamalar sebebiyle yüksek sıcaklıklarda çalışan malzemelerde herhangi bir deformasyona sebebiyet vermeden çalışması beklenen alternatif malzemelere büyük oranda ihtiyaç duyulmuş ve bu ihtiyacı Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) karşılamıştır [29]

2.1.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sınıflandırılması

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üç grupta incelenebilir. Bunlar;

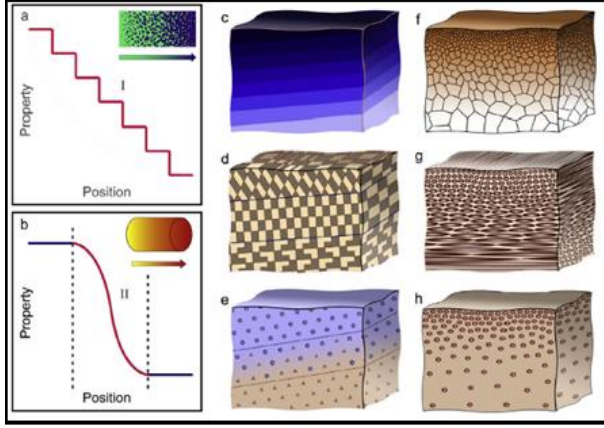
- Kimyasal kompozisyonu geçişli fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
- Gözeneklilik ve gözenek boyutu geçişli fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
- Mikroyapısı geçişli fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme

Kimyasal bileşimi geçişli olan malzemelerde, FDM içerisinde kimyasal yapısı farklı olan iki malzeme kademeli olarak elde edilmektedir. Bu oluşturulan kademeler sonucu elde edilen oran farklılıkları malzemelerin mekanik özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Bu özellikler, ısıl direnç, sertlik, tokluk, korozyon ve aşınma direnci gibi. Örnek olarak, Şekil 2.1. a'da fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ile malzemenin yapısında bir geçiş sağlanmış ve bu geçiş ile birlikte malzemede bağlanma, uyumsuzluk ya da gerilme problemleri olmadan rahatlıkla kullanılabilir bir malzeme ortaya çıkmıştır. Gözenekliliği geçişli malzemelerde, gözenek boyutu değiştirilen ana parametredir. Bu malzemeler özellikle biyomedikal alanında sıklıkla kullanılır. Şekil 2.1. b'de yer alan gözenekli insan kemiğinde gözenek boyutları değişmektedir, bu da doğal insan vücudu yapısında oluşturulmuş olup herhangi bir komplikasyona sebebiyet vermeden kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Özellikle biyomalzeme alanında kullanılan bu yapılar, doku entegrasyonu ve implant kullanımlarında hayati önem taşımaktadır. Son olarak mikroyapısı geçişli olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde, malzeme yüzeyi boyunca ilerledikçe malzemenin mikroyapısının değiştiği görülmüştür. Bu alanda dişliler sıklıkla kullanılmaktadır. Dişlilerin kullanımında özellikler yüzeyinde oluşabilecek aşınmalara karşı sert, merkeze doğru gidildikçe darbelere karşı tok olması beklenmektedir. Bu beklentileri karşılayabilmesi için de dişli malzemelerinin yüzeyinin martenzit, merkezin ise beynitik veya ferritik mikroyapı özelliği göstermektedir [30] (Şekil 2.1. c).



Resim 2.1. a) Kimyasal bileşimi geçişli FDM, b) gözenekliliği geçişli FDM'nin insan kemiği yapısı gösterimi, c) mikroyapısı geçişli FDM [30]

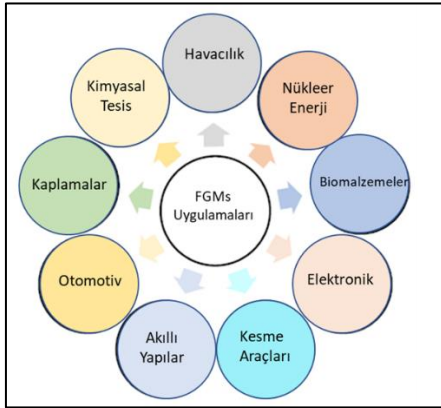
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin bir diğer sınıflandırılması ise sürekli (*ing. continuous*) ve süreksiz (*ing. discontinuous*) şeklindedir. Süreksiz FDM'de, kompozisyonlar ve/veya mikroyapılar, kademeli bir arayüz varlığında değişir. Buna karşılık sürekli FDM'de kompozisyonlar ve/veya mikroyapılar pozisyonlarda sürekli olarak değişir [10, 20] .



Şekil 2.2. a) Süreksiz ve (b) sürekli FDM, (c), (d) ve (e) süreksiz FDM'yi gösteren şematik diyagram, (f), (g), (h) sürekli FDM'yi gösteren şematik diyagram [10].

2.1.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, aynı bileşenlerde bazen bu bileşenlerin dışta yüksek sertlik ve içte yüksek süneklik gibi farklı malzeme özellikleri gerektirdiğinde çelişen özelliklere ihtiyaç duyan uygulamalara yönelik artan talep için ideal bir çözümdür [2, 8, 31]. Bu nedenle gradyan özelliklerine sahip FDM'nin Şekil 2.3'te gösterildiği gibi havacılık, otomotiv, kaplama, elektronik, biyomalzemeler gibi birçok alanda uygulanabilirliği mevcuttur [17, 32-39].



Şekil 2.3. FDM uygulama alanları [2].

Havacılık ve uzay uygulamaları

FDM için ilk gerçek uygulama, dış ve iç yüzeyler arasındaki termal gerilmeleri azaltarak uzay aracında kullanılması olsa da kullanıldığı zaman malzemede oluşturduğu birçok önemli

avantajından dolayı diğer çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Uzay aracı ve uçakların çoğu parçası roket motorları, dişli yapıları, ısı değişim plakaları, reflektörler, güneş panelleri, kamera yatakları, türbin çarkları, türbin kanat kaplamaları, burun kapakları gibi çok çeşitli yapılarda (Şekil 2.4.) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılmaktadır [2, 10, 16, 20, 40-41]



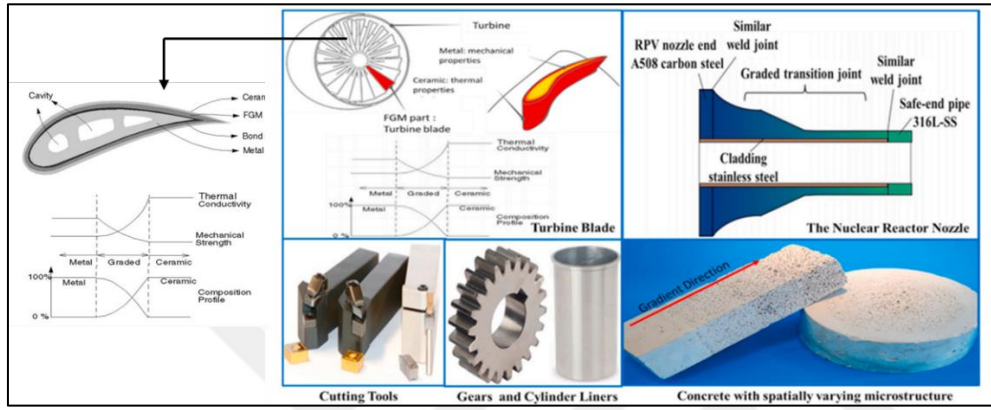
Şekil 2.4. FDM'nin havacılık uygulamaları [2]

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler olarak; Al-Al₂O₃, SiC-C, C-C, WC-Co, Be-Al, TiAl-SiC, Al₂O₃/ZrO₂, Al₂O₃-LHA gibi sistemler kullanılır. Bu bileşenler, belirli alanlarda yüksek sıcaklıklara veya aşırı bozulmaya maruz kalır ve bu bileşenleri korumak için FDM devreye girer. Son yıllarda mükemmel termal ve korozyon direncine sahip FG Al₂O₃/Al alaşımı, motor parçaları ve roket nozullarında kullanılmaktadır. Geçişli malzemeler arasındaki bağın güçlendirilmesi ve havacılık uygulamalarında geçişli özellikleri iyileştirmek için sıcak presleme yöntemi kullanarak FG W ve W-Cu kompozitleri için yeni bir bağlama yöntemi önerilmiştir [42]

Savunma alanı uygulamaları

Şu anda savunma alanındaki genel trend, kullanılan silahların ağırlıklarını azaltmak üzerinedir. Araçlar ve FDM'nin kullanımıyla birlikte malzemelerdeki çatlakların yayılmasını önlemek, geçişli yapıların, zırh ve kurşun geçirmez yeleklerin imalatında ve ayrıca kılavuz çubuklar, türbin kanatçığı, hassas silindirler, şaftlar, borular, mandallar, aks yuvaları ve ateşleme pimleri gibi savunma parçalarının imalatında delinmeye dayanıklı malzemeler kullanıldığı spesifik alanlardandır (Şekil 2.5). Yapılan bir çalışmada, FDM

ilkesini kullanarak düşük ağırlıklı, yüksek darbe dayanımı ve daha az maliyetli Al_2O_3 – ZrO_2 'den kompozit zırh malzemesini toz metalurjisi kullanarak üretmişlerdir. Deneysel sonuçları doğrulamak ve analiz etmek üzerine bir simülasyon geliştirmişler ve sonuçlar, geçişli kompozit malzemelerin, geleneksel kompozitlere kıyasla muazzam özellikleri nedeniyle savunma uygulamalarında kullanılmak üzere umut verici bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir [7].



Şekil 2.5. FDM savunma alanı uygulamaları [43, 2].

Otomotiv uygulamaları

Otomotiv parçalarının birçoğunda gerilimin, ısının ve basıncın geçişli hale getirilebilmesi yani motor pistonları, fren diskleri, hareket milleri gibi parçaların fonksiyonel derecelendirilmesi uzun ömür ve ekonomi açısından elzem hale gelmiştir. Bu nedenle, gradyan özellikli FDM, Şekil 2.6’da gösterildiği gibi bu parçalar için uygundur. Her ne kadar gerekli olsa da yüksek maliyetli oluşları sebebiyle büyük bir kısıtlayıcılık özelliği vardır ve bundan dolayı yalnızca otomobillerde çok kritik parçalarda kullanılırlar [2]



Şekil 2.6. FDM'nin otomotiv uygulamaları [2].

Otomotiv uygulamaları için geçişli yapının mikroyapı davranışı, fiziksel ve termal özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için toz metalürjisi kullanarak FG Al_2O_3/Al_2TiO_5 kompozitleri üretilmiştir. Sonuçlar, kademeli yapıya sahip FDM'nin arabaların frenlerinin çürümesinde mekanik ve termal özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir [44]. Ram vd. santrifüj döküm yapılarak ürettikleri fonksiyonel derecelendirilmiş $Al-Mg_2Si$ silindir mmotor gömleklerinin geleneksel malzemelere nispetle çok daha iyi aşınma dayanımı sergilediğini ileri sürmektedirler [45]

2.1.3. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri

Geleneksel üretim yöntemleri

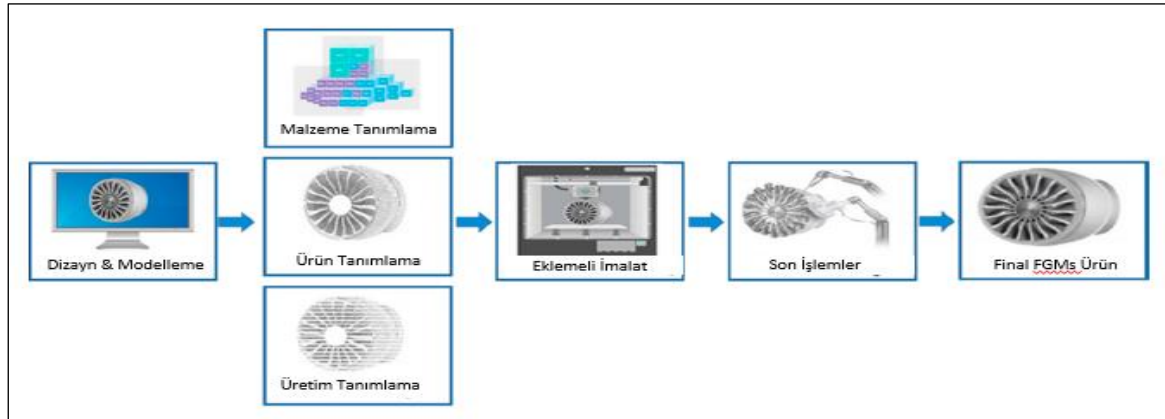
Fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzemenin nasıl üretildiği hangi üretim yolunun kullanıldığı ve tasarımı özelliklerinin (mikroyapı, mekanik dayanım vd. gibi) elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler geometri açısından değerlendirildiğinde iki kategorisi vardır: ince film/kaplama ve bulk malzemedir. İnce film/kaplama FDM'yi sentezlemek için kullanılan işleme teknikleri, gaz bazlı yöntemleri ve diğer yöntemleri içerir. Bulk haldeki FDM'yi üretmek için kullanılabilecek işleme teknikleri, sıvı faz ve katı faz yaklaşımlarına ayrılabilir. Hem ince film/kaplama hem de kitle FDM'nin üretim yöntem tekniklerinin detaylandırılması kısaca Çizelge 2.1'de verilmiştir [20]

Çizelge 2.1. FDM'nin geleneksel üretim teknikleri [20].

Kategori	Yöntem	FDM Türü
Gaz Bazlı Yöntem	- Kimyasal Buhar Biriktirme - Fiziksel Buhar Biriktirme - Termal Sprey - Yüzey Reaksiyon Prosesi	İnce Film/Kaplama
Sıvı Faz Proses	- Santrifüj Döküm - Jel-Döküm - Sedimentasyon - Slip-Döküm - Elektroforetik Biriktirme - Yönlü Katılaşma	Bulk
Katı Faz Proses	- Toz Metalurjisi - Spark Plazma Sinterleme	Bulk
Diğer Teknikler	- Plazma Sprey - Elektrot Biriktirme	İnce Film/Kaplama

Eklemeli imalat ile üretim yöntemleri

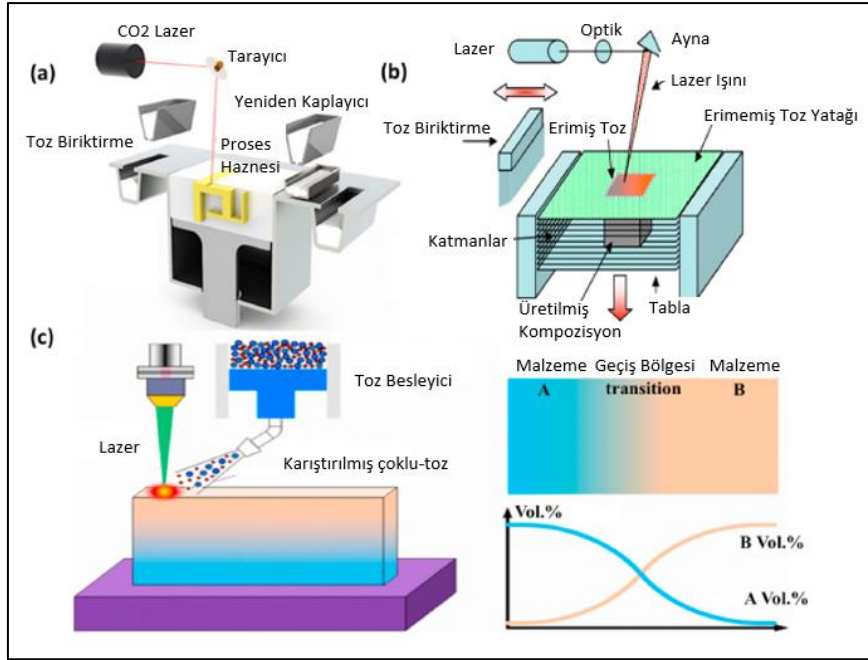
Son zamanlarda, birçok farklı eklemeli imalat yöntemi yaygın olarak birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin; mimari, tıp, uzay, enerji gibi bir dizi farklı malzemelerin işlenebiliyor olması her alana yayılmasına katkı sağlamıştır. Lazer tabanlı yöntemler, stereolitografi, malzeme püskürtme ve biriktirme işlemleri FDM'nin üretimi için eklemeli imalat yöntemleri olarak geniş bir şekilde kategorize edilmektedir [20]



Şekil 2.7. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin eklemeli imalat ile üretim akışı [20]

Lazer tabanlı metotlar

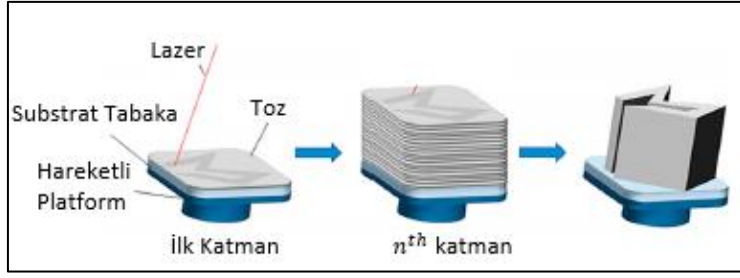
Eklemeli imalatla lazer kullanılarak yapılan 2 temel lazer-bazlı metot mevcuttur. Bunlar, Seçici Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/SLM) ve Lazer ile Net Şekillendirme (LENS), diğer yaygın kullanılan ismi ile ise de Direkt Enerji Biriktirme (DED)'dir [2]



Şekil 2.8. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin lazer-bazlı metotlarla üretilmesi (a) SLS, (b) SLM, (c) DED [2].

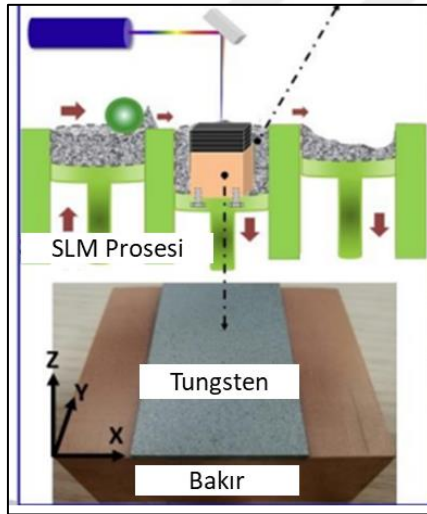
Seçici lazer eritme (SLS/SLM)

Seçici lazer sinterleme (SLS) / seçici lazer eritme (SLM), toz malzemelerle ilgili lazer tabanlı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen, birbirinin yerine geçen kavramlardır. SLS/SLM, toz yataklarına lazer enerjisi uygulayarak, parçayı temsil eden 2 boyutlu bir katman yığınının çıkarıldığı bileşen geometrisi üzerinde 3 boyutlu CAD'deki bir tanım aracılığıyla 3 boyutlu elemanlar oluşturur [46]



Şekil 2.9. SLM prosesi ile FDM'nin üretilmesi [46].

SLM prosesi ile üretilen malzemelerde sabit bir toz kullanımı, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimini sınırlandırmaktadır. Bir fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede iki tozun belirli oranlarda azalıp artmasını isterken burada bu işlem uygulanamamaktadır. Ancak, sericilerin birine bir toz diğerine kullanılmak istenen diğer toz eklenerek, geçişli değil fakat katmanlı bir yapı oluşturulabilir. Örneğin, Şekil 2.10'te sericinin bir haznesine bakır eklenerek bakır bir altlık oluşturulmuş, bakır serme işlemi bittikten sonra da tungsten malzeme diğer sericiden eklenmiştir [2, 47]

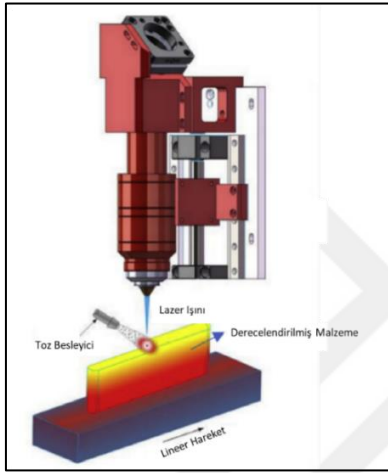


Şekil 2.10. SLM yöntemi ile üretilmiş bakır-tungsten FDM [47]

Direkt enerji biriktirme (DED)

Direkt enerji biriktirme işlemi (DED), ayrı bir gradyan ile bir ürün FDM için yaygın olarak kullanılan büyük bir doğrudan metal biriktirme teknolojisi geliştirilmiştir. İşlem sırasında, malzeme ve enerji kaynağı Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi DED yöntemlerine aynı anda entegre edilir. Bu enerji kaynağı, malzemeyi biriktirme alanındaki doğrudan ısıtmak için

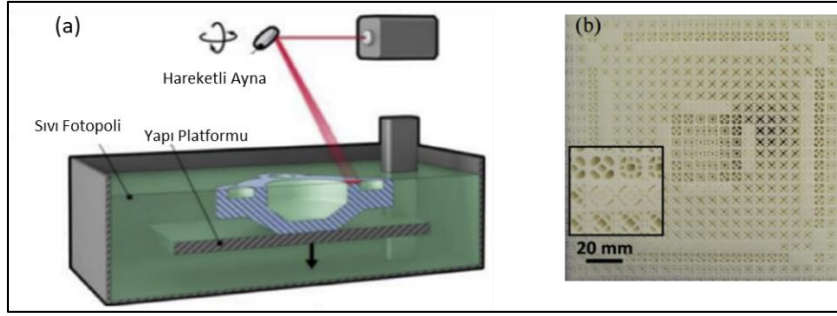
kullanılmaktadır [48]. Yüksek konsantrasyonlu lazer ışını nedeniyle, parça oluşturma işlemi sırasında hızlı ısıtma ve soğutma döngüleri yüksek termal gradyan nedeniyle bozulmalara ve artık gerilimlere sebebiyet verir. Artık gerilimin neden olduğu eğrilme, çatlak ve delaminasyon gibi işlem kusurları, üretilen bileşenlerin mekanik mukavemetini ve geometrik doğruluğunu azaltacaktır. Ayrıca, bozulmalar ve artık gerilmeler deneysel parametreler, bileşen özellikleri ve biriktirilen malzemenin termofiziksel özellikleri ve ara katman bekleme süresi ile ilişkilidir [35, 49].



Şekil 2.11. DED çalışma prensibi [50].

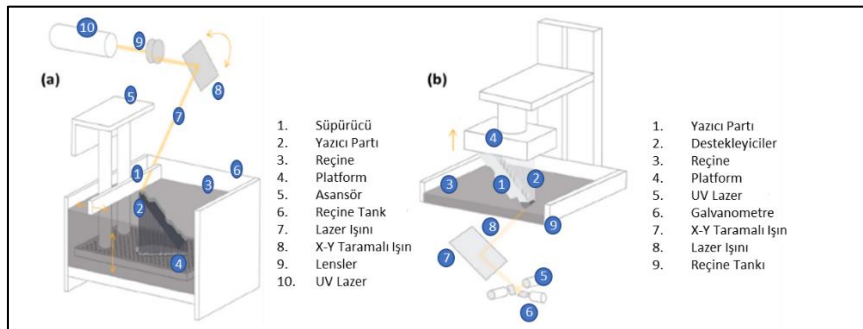
Stereolitografi metodu (SLA)

Fotopolimerizasyon temelli bir üretim yöntemi olan Stereolitografi (SLA), katı kompozit malzemelerin üretimi için diğer malzemelerle birlikte kürlenebilir reçinelerin yapıştırılması için bir ışın kaynağının uygulanmasını içermektedir. SLA, diğer üretim yöntemlerine nispetle daha hızlı prototipleme özelliğine sahip olduğundan çeşitli endüstrilerde fazlasıyla tercih edilen bir yöntemdir. Havacılık, otomobil, güç ekipmanı ve tüketici ürünleri başta olmak üzere iyi yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk ile birlikte süreç otomasyonu sağlama yetenekleri nedeniyle Şekil 2.12.'de gösterildiği gibi bir prosese sahiptir [20].



Şekil 2.12. (a) SLA prosesi, (b) SLA prosesi ile üretilmiş FDM [20].

SLA'nın iki biçimi vardır: normal düzende olan (ing. right side up) ve baş aşağı (ing. upside-down)'dır. Normal yöntem (Şekil 2.13. a) büyük reçine tankları, yüksek başlangıç harcaması, büyük saha dağıtımı, servis ve ürün boyutu sebebiyle çalıştırılması fazladır bu sebeple SLA yönteminin ilk kullanılmaya başlandığı zamanlar kullanılmış, daha sonra diğer yöntemler eklenince tercih edilirliliği azalmıştır. Diğer taraftan baş aşağı yöntem, platform ağırlığının aksine çok daha küçük bir reçine tankına ihtiyaç duyduğundan, ters çevrilmiş SLA'nın tasarımı (Şekil 2.13. b)'de gösterildiği gibidir. Baş aşağı cihazların geliştirilmesi SLA'nın bilgisayarda daha küçük bir alan kaplaması ve çok daha düşük maliyetlere ulaşmasını sağlayarak, çok daha fazla şirketin bu son derece hassas endüstriyel makineleri kullanmasına olanak sağlamıştır. Bu nedenle gradyan özelliklere sahip FDM üretmek için SLA yöntemi kullanılmaktadır [2].

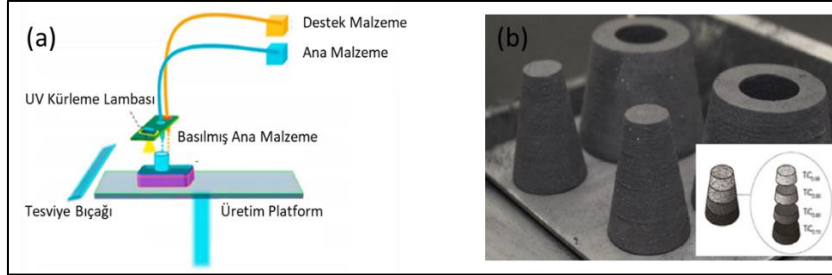


Şekil 2.13. SLA formları (a) normal düzende olan (b) baş aşağı yönde olan [2]

Malzeme püskürtme metodu

Malzeme püskürtme metodu, iki boyutlu mürekkep yazıcıya benzer şekilde çalışır. Malzeme, devam eden veya talep üzerine düşen bir yöntemle bir platform sistemine beslenir. Malzemeleri oluşturan bileşenler katılaşmanın gerçekleşeceği bir platforma serilmek

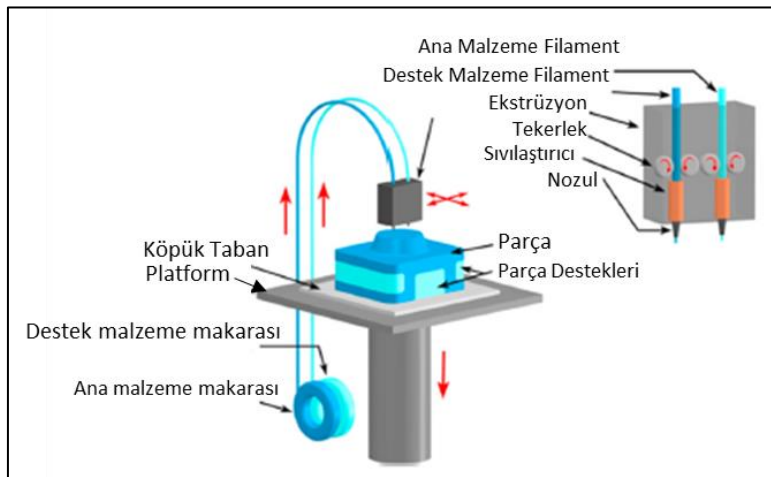
suretiyle katman katman esas malzeme üretilir. Yöntemin sınırlaması damla oluşturulabilen (polimer, mum vd.) gibi malzemelere uygulanabilmesidir. Bu yöntem, tıbbi ve dişçilik uygulamaları için gradyan özelliklerine sahip FDM yapısı üretmek için kullanılabilir [2]



Şekil 2.14. (a) Malzeme püskürtme metodu şematik illüstrasyonu, (b) malzeme püskürtme ile üretilmiş FDM [20].

Eriyik biriktirme metodu

Eriyik biriktirme metodu, plastik veya mumlu bir malzeme bir kaba ekstrüde edilir ve enine kesit yapı yüzeyinin, Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi katman katman izlendiği bir proses oluşturulur. Malzeme genellikle filament biçiminde sağlanır, ancak bazı uygulamalarında bunun yerine plastik pelletler de kullanılır. Nozul, plastiği bir sıcaklıkta erime noktasının hemen üzerinde tutan dirençli ısıtıcılar içerir, böylece nozul boyunca hızla dalgalanır ve tabakayı oluşturur [20].



Şekil 2.15. Eriyik biriktirme metodu şematik illüstrasyonu [20].

2.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisinin temelleri bundan binlerce yıl öncesine uzanmaktadır. Gelişen teknoloji ve imkanlar sayesinde yakın dönemde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu yöntem başlıca: elektrik elektronik, uzay ve savunma sanayii, otomotiv, kimya, tarım gibi birçok alanda gerekli parçaların üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Toz metalurjisini diğer yöntemlerden ayıran en temel özellik bir post proses ihtiyacı duymadan, tek bir yöntem ile istenilen sonuç ürünün elde edilme imkanının tanınıyor olmasıdır [51]. Toz metalurjisinin tercih edilme sebeplerinden biri, metal tozları ve seramik tozları gibi hemen hemen her malzemenin bu yöntemle üretilmesinin mümkün olmasıdır. Bunların yanısıra, malzeme geometrisinde de herhangi bir kısıt bulunmamaktadır, karmaşık geometriye sahip şekiller de büyük bir rahatlık ile üretilebilmektedir [52]. Bir diğer avantajı istenilen kompozisyonun kontrollü olarak oluşturabilmesi, ilave edilen malzemenin matris içerisindeki dağılımını, mikroyapısı ve kimyasal bileşiminin istenildiği şekilde oluşturulabiliyor olmasıdır. Bu yöntemin sağladığı bir diğer katkı ise, üretim yönteminin diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha ekonomik olması, bu sebeple yapılan tekrarlarda ve parametre çalışmalarında yüksek bütçe gereksinimi olmamasıdır [53].

2.2.1. Toz metalurjisinin avantajları ve dezavantajları

Toz metalurjisinin yaygın olarak kullanılıyor olması diğer yöntemlere kıyasla birçok avantajının olmasından kaynaklanmaktadır. Avantajlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Tek seferde üretilmesi mümkün olmayan malzemeleri kolaylıkla üretme kapasitesine sahiptir.
- Kompleks geometrili malzemelerde herhangi bir zorluk çekmemektedir.
- Nihai ürüne varana dek malzeme kaybı minimumdardır.
- Diğer alternatif yöntemlere kıyasla, bu yöntem çok daha ekonomiktir.
- Dökümde üretilmeyen parça geometrilerinin burada üretilme imkânı vardır.
- Malzemenin mekanik özelliklerinin istenildiği gibi değiştirilerek üretebilme imkânı sağlar.
- Birden fazla üretilmesi gereken parçalarda oldukça elverişlidir.

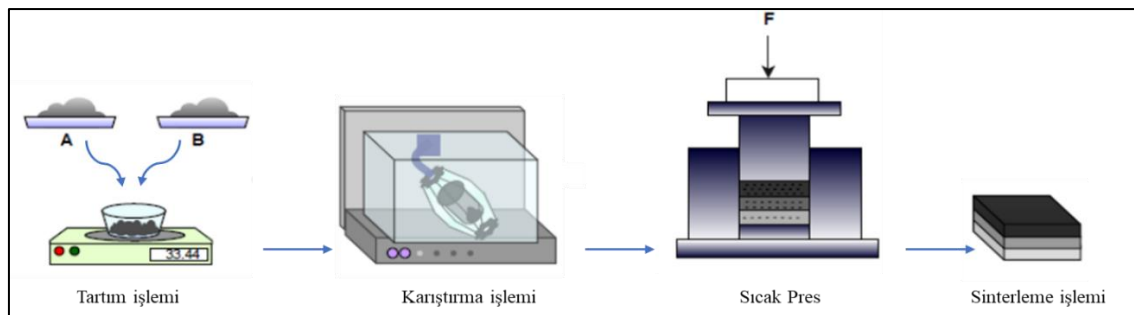
- Diğer yöntemlere kıyasla herhangi bir ikincil işleme gerek duyulmaz.
- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ürünlerde gözeneklilik derecesi ayarlanabilmektedir. Bu sayede ortopedide kullanılan implantlarda ve kendinden yağlamalı burç üretimine olanak sağlamaktadır.
- Refrakter malzemelerden olan tungsten, molibden gibi malzemelerin başka üretim yöntemleri ile imal edilmesi güç iken, toz metalurjisi yöntemi ile üretilebilmektedir.
- Yüksek termal iletkenliği ve yüksek mukavemete sahip olan amorf malzemelerin üretilmesi sadece toz metalurjisi yöntemi ile mevcuttur.

Toz metalurjisi yöntemi yukarıda bahsedilen avantajları sayesinde özellikle ekonomik oluşu ve post proses ihtiyacı duymaması sebebiyle diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunların yanında her üretim yönteminin olduğu gibi bu yöntemin de bazı sınırlandırıcı özellikleri mevcuttur. Bu dezavantajları ele aldığımızda:

- Seri üretim yapılmadığı takdirde, proses maliyeti fazla olabilmektedir.
- Kullanılan bazı sarf malzemelerde de yüksek maliyet olabilmektedir.
- Bu yöntem çok büyük hacimlerde ve kütlelerde üretim için elverişli değildir [53].

2.2.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretimi

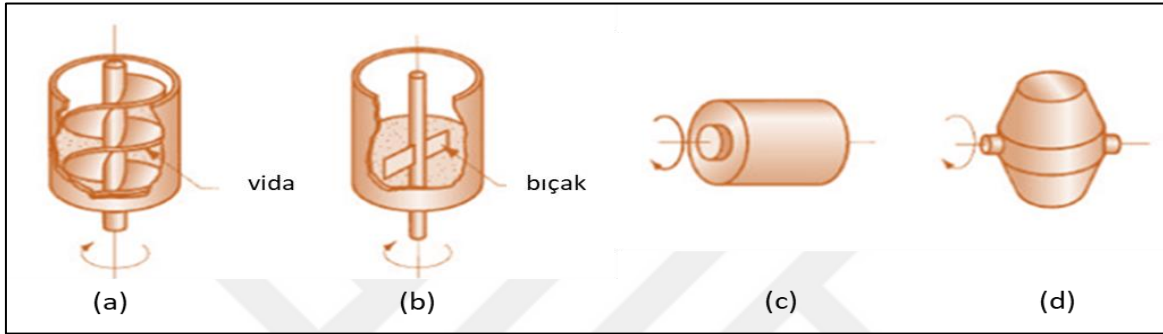
Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretimi tozlar tartıldıktan sonra 3 ana adımdan oluşmaktadır. Tozların karıştırılması, bir kalıpta şekillendirilmesi ve son olarak sinterlenmesi işlemleridir.



Şekil 2.16. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretim akış şeması [30]

Tozların karıştırılması

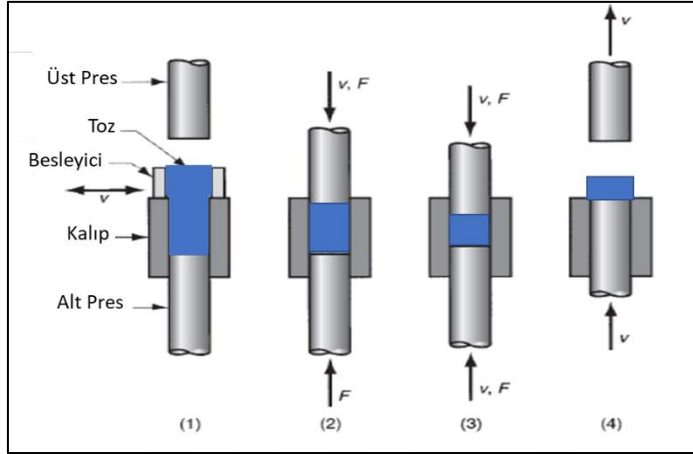
Toz metalürjisinin temel prensibi; ilk olarak kullanılacak tozların gerçekleştirilecek parametrelere göre yüzde oranında hesaplanarak tartılmasıyla gerçekleştirilir. Her kademede olması gereken oranda tartılan tozlar kapalı bir kaba alınır, ardından homojenizasyonu sağlayabilmek için karıştırma işlemi uygulanır. Karıştırma işleminde tozların boyutu, geometrisi dikkate alınması büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.17. Toz karıştırma cihazları, a) vidalı karıştırıcı, b) bıçaklı karıştırıcı, c) dönen tambur ve d) dönen çift koni [51].

Tozların preslenmesi

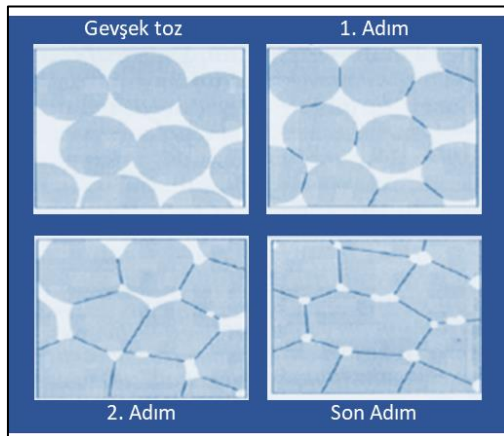
Toz metalürjisi üretim yöntemlerinin ikinci aşamasından olan tozların preslenmesi bir kalıp içerisindeki tozların belirli bir basınç altında sıcak veya soğuk olarak sıkıştırılması sonucunda elde edilir. Presleme işlemi tek veya çift yönlü olarak gerçekleşebilir. İstenilen boyutlardaki kalıplara tozlar serilir ve sıcak ya da soğuk pres yöntemi ile tozlar sıkıştırılır. Presleme işleminde kullanılan malzemelerin türü, yapısı uygun parametrelerin oluşturulmasında rol oynamaktadır. Pnömatik pres, hidroli pres ve mekanik presler bu aşama için kullanılan cihazlardır [53]. Her malzemenin kompakt bir halde çıkabilmesi için gerekli olan basınç miktarları farklılık göstermektedir. Presleme işleminden sonra elde edilen malzemeye ‘green kompakt’ malzeme denir ve bu malzemenin üretim aşamaları Şekil 2.18’de verilmiştir [30, 53]



Şekil 2.18. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemenin preslenme aşamaları, 1) kalıbın toz ile doldurulması, 2) presleme işleminin başlaması, 3) nihai presin yapılması, 4) üst kalıbın kaldırılarak green kompakt malzemenin çıkarılması [51].

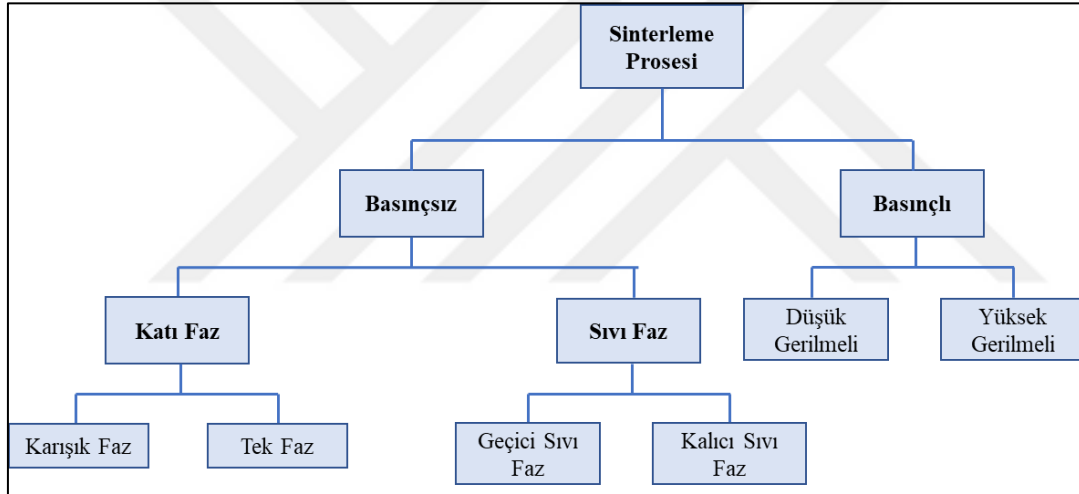
Tozların sinterlenmesi

Presleme işleminin ardından, malzemeler arası herhangi bir boşluğun kalmaması, varsa uygulanmış olan bağlayıcıların uçması ve malzeme homojenizasyonunu sağlamak için sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme prosesinde de malzeme türüne göre çıkılması gereken sıcaklıkların belirlenmesi kritik bir önem taşımaktadır. Sinterleme prosesindeki en temel amaç, sıcaklık ile birlikte malzemeler arası bağlanmayı artırarak malzemenin dayanım ve yoğunluğunun belirli bir noktaya taşınmasını sağlamaktır. Bu işlem esnasında parçacıklar Şekil 2.19’de gösterildiği şekilde birbirlerine bağlanırlar [54].



Şekil 2.19. Sinterleme aşamasında parçacıkların bağlanma aşamaları [55].

İstenilen dayanım ve yoğunluğu elde edebilmek için sinterleme işlemi çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Fonksiyonel derecelendir malzemelerde yapılan işlemlerde, birden fazla malzeme bileşeni bulunduğundan her zaman için en düşük ergime sıcaklığına sahip olan malzeme baz alınır, böylece çıkılması gereken maksimum sıcaklık belirlenmiş olur. Sinterleme prosesinde bir diğer parametre ise malzemelerin ne kadar bir sürede bu prosese maruz kalacağıdır. Genellikle malzemelere uzun sinter süreleri uygulanmaz birkaç saatlik operasyonlar yeterli olmaktadır. Bunun yanında, ne kadar fazla sıcaklıklarda çalışılıyor ise bununla ters orantılı olacak şekilde prosesin süresi kısalmaktadır [53] Sinterleme işlemleri uygulanan malzemeye ve süresine göre değişiklik göstermektedir. Katı ve sıvı faz sinterleme olarak genel kullanımı mevcut olsa da farklı türleri de mevcuttur ve bu Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Sinterleme çeşitleri [51].

2.3. Süperalaşımlar

Nispeten yüksek sıcaklıklarda (540 °C) formunu ve termal kararlılığını koruyan malzemeler süper alaşımlar olarak adlandırılmaktadır. Süper alaşımlar, nikel, demir-nikel ve kobalt bazlı alaşımlardır. Üretim yöntemleri farklılık gösterse de en temel üretim yöntemleri dökümdür. Arzu edilen mekanik özellikler doğrultusunda hadde veya dövme gibi termomekanik işlemler uygulanabilir. Nihai üründe mükemmel yüksek sıcaklık özellikleri elde etmek için, bileşimde ayarlamalar yapılabilir veya ısıtılma işlemi gibi işlemlerle süper alaşımların özellikleri kontrol edilebilir. Süper alaşımlar önemli miktarda nikel, alüminyum, krom gibi elementler içerirler ve erime noktalarına yakın sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya karşı

mükemmel direnç gösterirler. 1950'lerde ilk piyasaya sürüldüklerinden beri birçok endüstride büyük bir etkiye sahip oldular. Özelliklerine bağlı olarak ağır yükler altında en sıcak bölümlerde kullanılırlar. Süper alaşımlar, üç ana özelliğinden dolayı yüksek sıcaklık malzemeleri olarak adlandırılır. İstenen ilk özellik, erime noktasına yakın bir çalışma sıcaklığında yüklere dayanma kabiliyetine sahip olmasıdır. İkinci özellik, uzun süreler boyunca mekanik bozulmaya karşı önemli bir dirence sahip olmasıdır. Son olarak, üçüncü özellik, sıcak gazların neden olduğu aşındırıcı koşullar gibi zararlı çalışma ortamlarına toleranslıdır [56]

2.3.1. Süperalaşımların sınıflandırılması

Farklı şirketler tarafından geliştirilen birçok süper alaşım vardır ve uygulamaları genellikle uçak endüstrisinde, nükleer santrallerde, güç türbinlerinde ve kimya tesislerinde bulunabilir. Süper alaşımların çoğu genellikle en az 10 element içerir, ana alaşım elementlerine bağlı olarak 3 farklı tipte sınıflandırılırlar [57]

- Nikel Esaslı
- Demir-Nikel Esaslı
- Kobalt Esaslı

Bütün süperalaşımlar kristal kafes yapılarında yüzey merkezli kübik östenitik özellik sergilerler. Nikel, demir ve kobaltın periyodik cetveldeki konumlarına bakıldığında ardışık pozisyonlarda olduğu görülmektedir. Bu alaşımların matris fazları gama- γ ve çeşitli ikincil fazlardan oluşmaktadır. İkincil fazlara bakıldığında, MC, $M_{23}C_6$, M_6C ve M_7C_3 karbürlerini içermektedir.

Nikel-esaslı süper alaşımlar hacim merkezli tetragonal gama double prime- γ'' Ni_3Nb , hekzagonal eta- η Ni_3Ti , yüzey merkezli kübik gama prime- γ' $Ni_3(Al, Ti)$ ve ortorombik delta- δ Ni_3Nb bileşikler içermektedirler. Bu alaşımların ana güçlendirici mekanizmalarını çökelti fazları olan γ' ve γ'' oluşturur [24]. Bu fazlara sahip alaşımlar, $0,7T_m$ 'de bile oldukça yavaş yaşlanır. Bir başka güçlendirme mekanizması, ana element krom ile katı çözelti sertleştirilmesi ile sağlanır. %20'lik kobalt ve molibden, tungsten, tantal gibi diğer elementler toplam %15'e kadar eklenebilir. γ' fazında, bu elementler çözülebilir ve sertleştirme etkisi

iki yönlü olabilir. Yüksek sıcaklıkta servis sırasında, taneler içindeki güçlendirme aşaması γ' ile birlikte, tane sınırlarının özellikleri de önemlidir. Tane sınırlarının güçlendirilmesi, esas olarak krom ve diğer refrakter metal karbürlerin çökeltilmesiyle sağlanabilir. Az miktarda zirkonyum ve bor ilavesi, karbürlerin morfolojisini ve stabilitesini iyileştirir. Süper alaşımların optimum özellikleri, çok aşamalı ısıtma işlemi prosedürleri ile sağlanabilir. Isıtma işleminin ilk aşamaları, bir film formuyla γ' içindeki karbür parçacıklarının istenen tane sınırı mikroyapısını üretir ve diğer aşamalar, orta ve yüksek sıcaklıklarda en iyi mukavemet özellikleri için iki boyut aralığı üretmektedir [58]. Farklı alaşım elementlerinin süper alaşımlar üzerindeki etkisi Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Farklı elementlerin süper alaşımlar üzerindeki etkisi [59].

Etkileri	Cr	Al	Ti	Co	Mo	W	B	Zr	C	Nb	Hf	Ta
Matriks güçlendirmesi	+			+	+	+						
γ' biçimlendirici		+	+							+		+
Karbür biçimlendirici	+		+		+	+				+	+	+
Tane sınırı güçlendirmesi							+	+	+		+	
Oksit biçimlendirici	+	+										

2.3.2. Inconel 718 süperalaşımı

Inconel 718, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek oksidasyon korozyon direnci nedeniyle en yaygın kullanılan nikel bazlı süper alaşımdır. 1960'ların başında piyasaya sürülmesi, gaz türbini motor teknolojisinde önemli bir ilerleme sağlamıştır. 1963 yılında SR71 Blackbird J58 motorunun difüzör kasası için ilk kullanımından itibaren, günümüzde özellikle havacılık endüstrisinde birçok endüstride nikel alaşımlarının en yaygın olarak kullanılabildiği. Disklerde, millerde, kasalarda, statorlarda, kanatlarda, contalarda, desteklerde, borularda ve bağlantı elemanlarında kullanılmaktadır [60]

Inconel 718'in fcc matrisinde, çöken ana fazlar yarı kararlı γ'' -Ni₃Nb, denge γ' -Ni₃Al ve denge δ fazlarıdır. Inconel 718'in sertleşmesi, alışkanlık düzlemi ile uyumlu disk şekilli morfolojiye sahip γ'' -Ni₃Nb faz parçacıklarının çökeltilmesiyle sağlanır. Güçlendirmenin bir kısmı, uyumlu γ' -Ni₃Al fazının çökeltilmesiyle de sağlanabilir. δ denge fazı, yarı kararlı γ'' -Ni₃Nb fazına karşılık gelir. Ara sıcaklıklarda çok uzun süre maruz kalma sırasında, δ fazı, γ'' fazının bir dönüşüm ürünü oluşturur. δ faz, östenit tane sınırlarında ve düşük

sıcaklıklarda uyumlu ve tutarsız ikiz sınırlarda çekirdeklenir. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda taneler arası çökelirler. δ partiküllerinin çökeltilmesinin γ ile güçlendirilmiş alaşımların gücünü azalttığı bilinmektedir, ancak faz çökmesi kontrol edilebilirse, iyi gerilme kırılma özellikleri ve tane stabilizasyonu gibi faydalı etkileri vardır [61-64]

Inconel 718'in önerilen çalışma sıcaklığı 649°C'dir. Alaşımın özellikleri büyük ölçüde sertleşme sırasında γ -Ni₃Nb çökeltme güçlendirmesine bağlıdır. Standart ısıtma işlem prosedürleri, 930-1010°C'de hızlı soğutma ve ardından 720°C'de 8 saat sertleştirme ısıtma işlemi ve 50°C/saat hızında 620°C'ye kadar yavaş soğutma ve sertleşme süresi yaklaşık 18 saat sürer [32]. Yaklaşık 649°C'de γ 'nin δ 'ye dönüşümü gerçekleşir ve bu, mukavemetin önemli ölçüde bozulmasına yol açar. Ayrıca Inconel 718'de oluşan koruyucu oksit tortusu Cr₂O₃'tür ve Cr₂O₃ oluşturan alaşımların yüksek sıcaklıklarda etkin kullanımı, uçucu CrO₃ oluşumu nedeniyle kısıtlanır ve 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tufal kaybına neden olur. Özelliklerdeki bu değişiklikler, alaşımın çalışma sıcaklığı yüksekse, belirli uygulamalar için gereksinimleri karşılamak için yüzey işlemlerinin uygulanabileceğini göstermektedir [65]

2.4. Seramikler

Seramik terimi, temel olarak yanmış malzemeler anlamına gelen "Keramicos" kelimesinden gelmektedir. Binlerce yıldan fazla bir süredir bilinmekte olup doğal olarak oluşan hammaddeler kullanılarak hazırlanırlar. Seramikler, yüksek erime noktalarına sahiptir. Bu nedenle işleme ve uygulamaları için yüksek sıcaklık gerektirmektedirler. Toz formundaki malzemelerden oluşturulan inorganik ve metalik olmayan katılardır. Seramikler genellikle metalik ve metalik olmayan farklı elementlerin bir bileşiğidir. Bu elementler genellikle oksijen, bor veya karbondur ve oksitler, karbürler ve boritler oluştururlar. Sahip oldukları bağlar tamamen iyonik veya kovalent ve iyonik bağ kombinasyonudur. Seramikler diğer malzemelere kıyasla, termal yalıtım, hafiflik, yüksek spesifik yüzey alanı ve termal şok direnci de dahil olmak üzere birçok avantajlı özellikler sergilemektedirler. Aynı zamanda çeşitli organik çözücülerde mükemmel stabiliteye sahiptirler. Genellikle, seramikler uzun çalışma döngüsünde deforme olmaz ve bu sayede daha düşük bakım maliyetini gerektirirler [66]

2.4.1. Seramiklerin sınıflandırılması

Seramikler literatürde 2 tür olarak sınıflandırılmaktadır:

- Geleneksel seramikler
- Gelişmiş seramikler

Geleneksel seramikler, metalik olmayan veya metalik bileşikler kullanılarak oluşturulan inorganik metalik olmayan katılardır. Kil (plastik malzemeler), silika (dolgu) ve feldspar (akı) içerirler. Gelişmiş seramikler ise oksitlerden, nitrat bileşiklerinden, karbürlerden ve silikat olmayan camlardan oluşmaktadırlar. Geleneksel olarak, seramikler yaygın olarak oksit kompozisyonuna sahiptir. Hem amorf hem de kristalli durumlarda üretilir. Tamamen yoğun değildirler, mikro ve daha yüksek boyut aralığında gözenekler içerirler. Geleneksel seramiklerde kil sertlik ve süneklik sunarken, silika yüksek erime noktasında ve yüksek sıcaklıkta yüksek stabiliteyi belirler ve feldspar seramikler yakıldığında cam fazını üretir. Geleneksel seramiklerin bazı örnekleri arasında fayanslar, camlar, porselen ve tuğlalar bulunmaktadır. Gelişmiş seramikler, geleneksel seramiklere göre daha yüksek mukavemet sağlamaktadır. Ayrıca, amaca yönelik ayarlanabilir özellikler, gelişmiş tokluk, daha yüksek çalışma sıcaklıkları sağlar ve bu özellikler modern seramik bileşenleri oluşturur [67]

2.4.2. ZrO₂ genel özellikleri

Zirkonya, monoklinik, tetragonal ve kübik fazlara sahip yarı kararlı bir seramiktir. Çeşitli sıcaklık, nem ve yük kombinasyonları uygulandığında tetragonal yapıdan monoklinik yapıya doğru bir faz dönüşümü geçirir. Bu faz dönüşümü sonucunda hacimsel değişimler meydana gelir. Bu durumun arzu edilen sonuçları olmaktadır. Örneğin, faz dönüşümü ile beraber ilerleyen bir çatlağın ucunda basınç stresi oluşur ve çatlağın büyümesine karşı bir direnç oluşmuş olur. Bu fenomene “faz dönüşümü sertleştirme” adı verilmektedir. Bununla birlikte, faz indüklenmiş hacimsel dönüşüm uygun şekilde kontrol edilmezse istenmeyen sonuçlar elde edilebilir. Bu nedenle Zirkonya’nın faz dönüşümü özelliği Magnezya veya Yttria eklenmesi ile stabilize edilmelidir. En yaygın zirkonya türü yttria ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ)’dir. Bu yapıda yaklaşık %5,1 oranında yttria (Y₂O₃) ve %93-94 oranında zirkonya (ZrO₂) bulunmaktadır [68]. YSZ aşağıda listelenen üstün yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir.

- Termal şoklara karşı yüksek tolerans
- Düşük termal iletkenlik
- Yüksek erime sıcaklığı
- Faz kararlılığı
- Mükemmel oksitlenme direnci

Sonuç olarak, bu özelliklerinden dolayı YSZ oldukça önemli bir seramik malzemedir ve yüksek sıcaklık yapısal seramiği olarak oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [69].

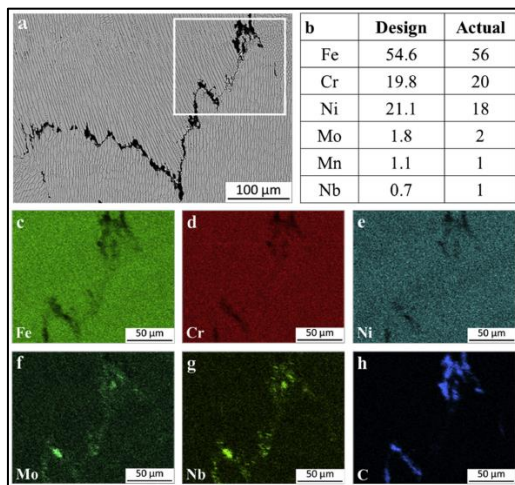




3. LİTERATÜR İNCELEMESİ

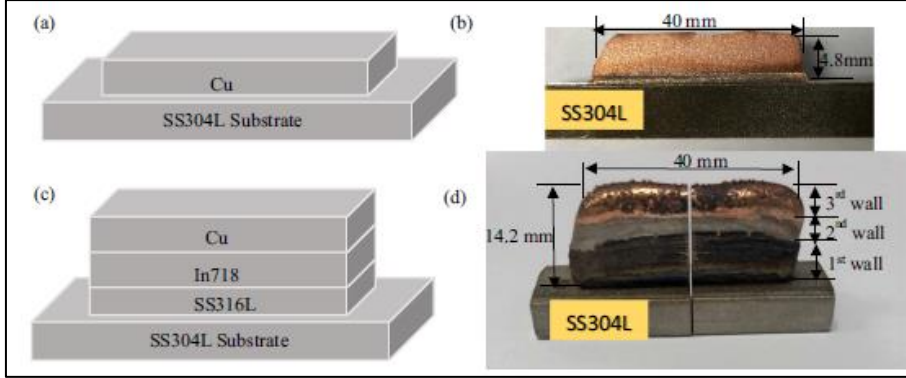
Tezin bu bölümünde literatürden elde edilen bilgiler ışığında fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan çalışmalardan hem toz metalürjisi yöntemi hem de eklemeli imalat ile üretilmiş olan malzemeler incelenmiştir. Son olarak bu tez özelinde kullanılan Inconel 718 ve ZrO_2 ile diğer metalik malzemeler ve seramiklerle oluşturulmuş olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler özelindeki çalışmalar açıklanarak literatürde yer alan örnek çalışmalar incelenmiştir.

Carrol ve arkadaşları [31], SS304L altlık üzerine, 16 mm genişliğinde 34 mm uzunluğunda bir FDM'nin argon atmosferinde direkt enerji biriktirme yöntemi ile üretmişlerdir. Geçiş bölgesinden önce ilk olarak SS304L tozu 20 kat serilmiştir. Geçiş bölgesinde ise SS304L tozları her katmanda %4 azaltılmış buna karşılık aynı oranda IN625 tozları arttırılmış ve 24 katman boyunca bu işlem gerçekleştirilmiştir. En üst kısımda bulunan Inconel 625 ise toplamda 19 katmandan oluşmakta olup, her katman yaklaşık olarak 0,5 mm kalınlığındadır. Nihai ürüne X-RD, EDS, SEM ve mikro sertlik testleri uygulanmıştır. SS304L ucunun yakınında (ağırlıkça yaklaşık %82 SS304L) imalatla ve mikro sertlikteki çatlakların oluşmasından sorumlu ikincil bir faz gözlemlenmiştir. CALPHAD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen termodinamik hesaplamalar, bu bölgedeki refrakter metal monokarbürün stabilitesini tahmin ederken, EDS haritalaması (Şekil 2) çatlakların Mo ve Nb açısından zengin olduğunu göstermektedir.



Resim 3.1. Çatlağın görüntüsü (a); çatlaktan 100 mikron ağırlık yüzdesi olarak planan ve ölçülen bileşim tablosu (b); EDS haritaları (c-h) [31].

Literatürde yapılmış olan başka bir çalışmada ise, FDM parçalarının direkt enerji biriktirme yöntemi ile sıcaklık ve artık gerilim (ing. residual stress) dağılımı sürecinin modellenmesi ve deneysel doğrulaması üzerinedir. Bu çalışmada iki farklı geçişli yapı kullanılmıştır. İlk olarak SS304L çeliği üzerine Cu biriktirerek ve SS304L çeliği üzerine SS316L, IN718, Cu kademeli olarak biriktirilerek uygulanmıştır.

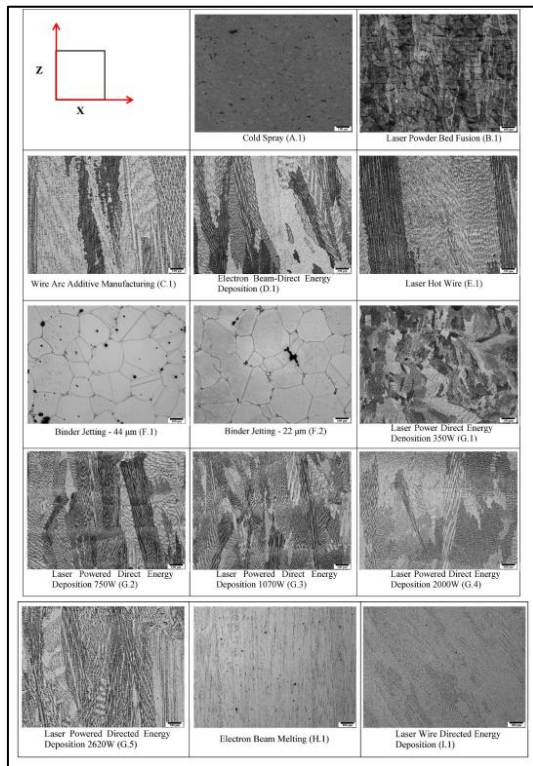


Şekil 3.1. Kullanılan malzemelerin şematik ve fotoğraf ile gösterimi [70]

Sonuçlara bakıldığında, öngörülen sıcaklık ve stres, yapılan deneysel çalışma ile iyi bir uyum göstermiştir. Üretilen her iki duvarının çarpılma sonuçları yukarı doğru bir bükülme eğilimi göstermiştir. Farklı malzemelerin termal genleşme katsayısındaki uyumsuzluğun neden olduğu yüksek sıcaklık graydanı nedeniyle, FDM parçasının ikinci baskı malzemesinin iki kenar bölgesinde çok yüksek bozulmalar gözlemlenmiştir. Kalıntı gerilim açısından bakıldığında, Cu'nun SS304L üzerinde doğrudan birleştirilmesi, farklı malzemelerin termal genleşme katsayısındaki uyumsuzluk nedeniyle iki malzemeli arayüzde son derece yüksek bir gerilim ile sonuçlanmıştır. Diğer üretimde ise ara katmanlardaki SS316L ve IN718 sayesinde üretilen üst katmandaki Cu'da herhangi bir artık gerilme oluşmadığından, malzemeler arasındaki termal genleşme katsayısı farkı azaltılarak, istenilen nihai ürüne ulaşılabileceği anlaşılmıştır [70].

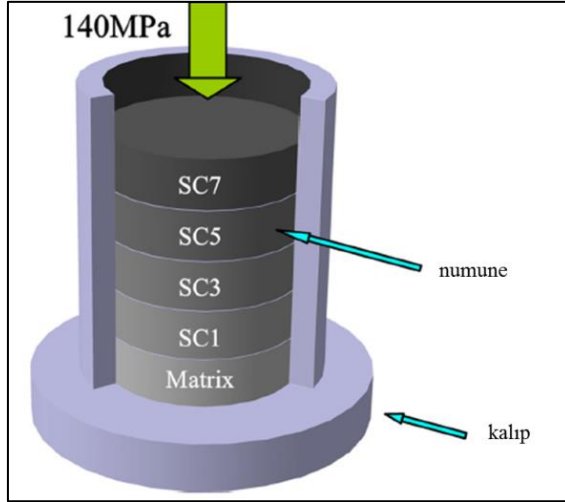
Gamon ve arkadaşları [71], Inconel 625 malzemesinde farklı eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılmasının, malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 3'te sunulan bulgulara göre, soğuk püskürtmeden lazer teli ile yönlendirilen enerji birikimine kadar uzanan çeşitli üretim süreçleri, malzemenin mikroyapısında gözle görülür farklılıklar oluşturmuştur. Farklı eklemeli imalat yöntemleri kullanıldığında, Inconel 625 malzemesinin mikroyapısında çeşitli değişiklikler gözlemlenmiştir.

Bu değişiklikler arasında sütunlu mikrodendrit dizileri, hücresele dendrit yapıları içeren düzensiz, sütunlu ve eş eksenli tane yapıları bulunmaktadır. Ayrıca, çökelti dizileri de üretim yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu değişen eklemeli imalat işlemleri ve mikroyapılar, malzemenin mikro-sertlik değerlerinde (~ HV 590 ila HV 180) değişikliklere yol açmıştır. Lazer veya elektron ışınlarını içeren eklemeli imalat teknikleri kullanıldığında, kalıntı mikro yapılar genellikle yapı yönünde uzanan taneleri içermektedir. Bu tane genişliği genellikle artık mikro-sertlik değeri ile ilişkilendirilmektedir, bu da malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür.



Resim 3.2. Farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen Inconel 625 mikroyapısı [40].

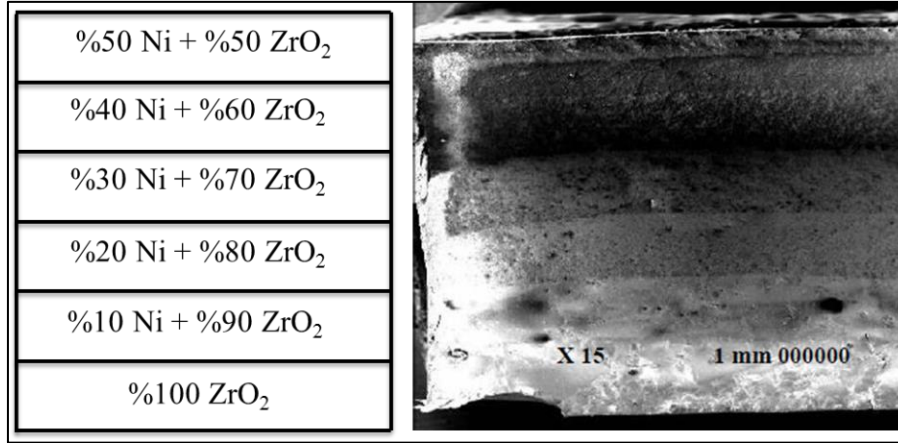
Yapılan bir diğer çalışmada ise Nano-SiC partiküllerinin (n-SiCp) değişen hacim fraksiyonlarına (%1-7) sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş 2014Al/SiC fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, toz metalurjisi ile üretilmiştir.



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Bu çalışmada toz metalurjisi tekniği ile soğuk ve sıcak presleme ile yüksek performanslı fonksiyonel derecelendirilmiş n-SiCp/ 2014Al kompozitleri üretilmiştir. Üretilen malzemelerin korozyon davranışlarının tayininde ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen testler sonucu %3SiCp içeren numunenin standart 2014 Al den çok daha korozyon dayanımı sergilediği görülmüştür. Aşınma dayanımlarında ise artan yük ile birlikte (15-30N) kompozit malzemelerin aşınması giderek artmıştır. Bu sonuçlar, n-SiCp'nin, sert bir çekirdek ve sert, aşınmaya veya korozyona dirençli bir yüzey gerektiren uygulamalar için FDM'lerin üretilmesi için etkili adaylar olduğunu göstermektedir [41].

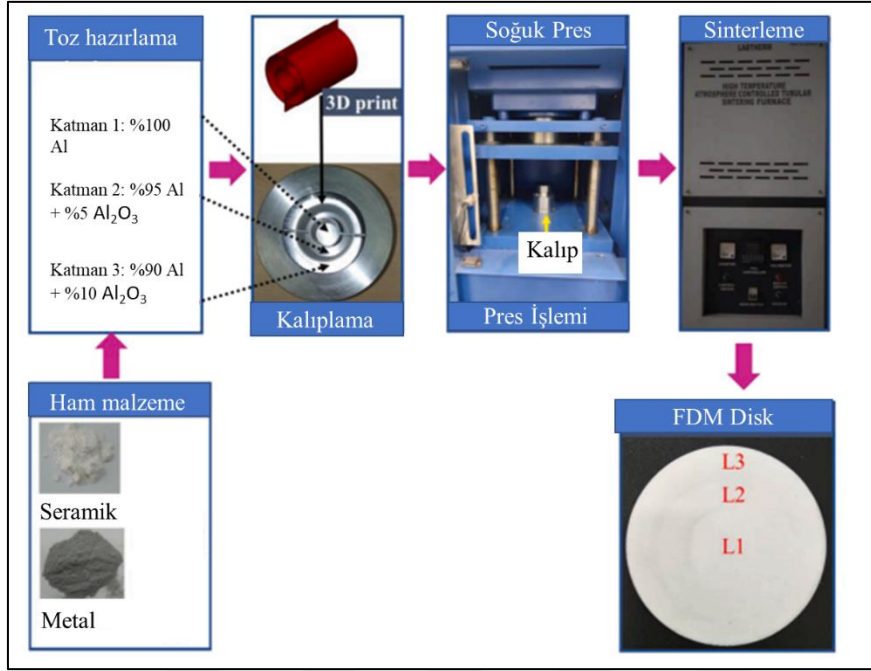
El-Wazery ve arkadaşları [72] toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri TZ3Y/Ni FDM'lerin ve derecelendirilmemiş malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hem derecelendirilmemiş kompozitin (non-FDM) hem de FDM göreceli yoğunluğu ölçülmüştür. Mikroyapı incelemeleri, FDM'lerin malzeme bileşimi ve mikroyapısının kademeli olarak değiştiğini göstermektedir (Şekil 1). FDM'lerdeki mekanik özelliklerin dağılımı, farklı nikel hacim oranlarına sahip homojen kompozit örneklerin mekanik testi ile elde edilmiştir. Sonuçlar, non-FDM ve FDM'ler için oldukça yüksek yoğunluk (teorik yoğunluğun %86-98 aralığı) göstermektedir. Elastik modül ve eğme dayanımı, nikel içeriği %0'dan %50'ye kadar arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeninin olarak zayıf bağlı seramik/metal arayüzünden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, FDM'lerde kırılma tokluğunun ve elastik modülün, tüm derecelendirilmemiş kompozitten daha yüksek olduğu bulunmuştur.



Şekil 3.3. TZ3Y/Ni et kalınlığı kesiti [72].

Bir başka çalışmada, B4C partikül takviyeli (ortalama 40µm) AA7075 matris (ortalama 60µm) FDM kompozitlerinin üretim fizibilitesini ve bazı üretim sonrası mekanik/fiziksel özelliklerini, yüksek sıcaklıkta izostatik presleme toz metalurjisi kullanan dikey ayırıcı kalıplama tekniği ile araştırılmıştır. Üretilen FDM'ler üç (0 – 30 – 60 wt. % B4C) ve dört (0 – 20 – 40 – 60 wt. % B4C) katmandan oluşur. Tozlar, 2 saat boyunca bir güç karıştırıcı karıştırıcıda karıştırılmış ve dikey bir ayırıcı ile kalıp bölümlerine yerleştirilmiştir. FDM'ler 325 MPa basınç altında 30 dakika boyunca 560°C'de sinterlenmiştir. Mikroyapısal incelemeler, FDM'lerin katman geçiş bölgelerinde herhangi bir ayrılma veya çatlak oluşumu ortaya çıkmamıştır. Ayrıca (ağırlık %20 ve %30) katmanlarda diğer katmanlara göre nispeten homojen bir B4C dağılımı gözlenmiştir. Ağırlıkça %40 B4C takviyesi içeren dört katmanlı FDM'nin bir katmanında en yüksek sertlik 170 HBN saptanmıştır. En yüksek enine kopma mukavemeti, 482MPa'da dört katmanlı FDM'nin en fazla takviye edildiği bölgeden yapılan testte ölçülmüştür [73].

Başka bir çalışmada, üç katmanlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FG) bir disk üretmek için toz metalurjisi tekniği kullanılmıştır. Metal-seramik bileşimin hacim oranı, katman-1 (%100 Al), katman-2 (%95 Al +5 % Al₂O₃) ve katman-3 (%90 Al + %10 Al₂O₃) olarak radyal olarak değişmektedir.



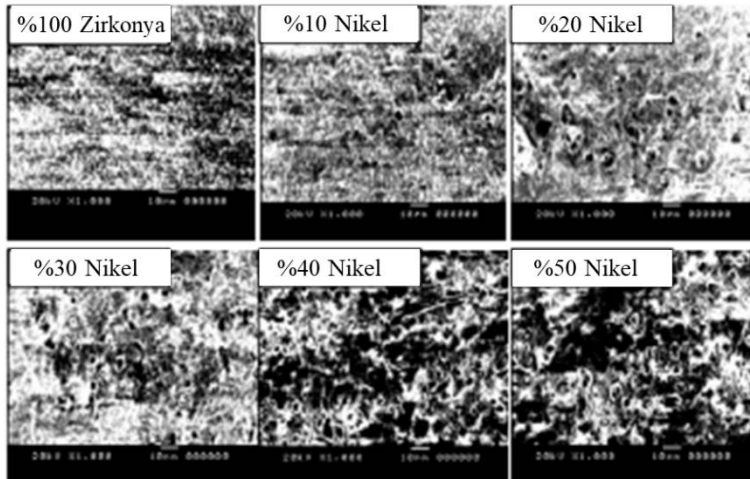
Şekil 3.4. Bir P/M yolu kullanarak FG diskinin üretim sürecini gösteren akış şeması [74]

EDS ile entegre optik mikroskop ve SEM (taramalı elektron mikroskobu), matriste (alüminyum) takviye partiküllerinin (alümina) tek tip dağılımını doğrulamıştır. Arayüz mikro yapısı, arayüzde herhangi bir çatlak veya boşluk gelişmeden kademeli katmanda geçiş tekdüze olduğundan, FDM'nin (işlevsel olarak derecelendirilmiş malzeme) başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir. Tabaka-1'e göre sertlik değerlerindeki ortalama artış, tabaka-2 ve tabaka-3 için sırasıyla %18 ve %29 olarak bulunmuştur. Alümina bileşiminin daha yüksek olduğu katmanlarda sertlikte bir artış gözlemlenmiştir. Numunenin deneysel yoğunluğunu hesaplamak için Arşimet ilkesi kullanılmış ve gözenekli FG malzemelerinin yoğunluğunu etkin bir şekilde tahmin etmek için teorik modeller sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında, arayüzde hiçbir boşluk veya çatlak görülmediği ve kademeli katmanda geçişin uniform olduğu için yaklaşımın başarılı olduğu bulunmuştur. Mikroyapı görüntüleri homojen bir dağılım göstermektedir. Saf alüminyumdaki (kat-1) gözeneklilik en fazladır ve alümina partiküllerinin eklenmesi sonucu tabaka-2'de azalma eğilimi göstermektedir [74].

Bir diğer çalışmada, Al_2O_3 takviyeli SS316L matrisli kompozitler, toz metalurjisi tekniği ile üretilmiştir. Al_2O_3 'ün ağırlıkça %5, %10 ve %15 gibi değişken içerikteki yüksek enerjili bilyalı öğütme etkisi, kompozitin mekanik özellikleri, korozyon direnci ve mikro yapısı üzerinde incelenmiştir. Al_2O_3 içeriği %0'dan %10'a değiştiğinde, kompozit tozların kristalit boyutu 22.6 nm'den 4.29 nm'ye düşmüştür. Kompozitlerin korozyon direnci Tafel yöntemi

ile belirlenmiştir. Ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi içindeki kompozitlerin korozyon süreci, ağırlıkça %10 Al_2O_3 içeren kompozitin korozyon oranının (0.062 mm/y) saf SS316L (0.156 mm/y) ve SS316L/ağırlıkça %15 Al_2O_3 kompozitinden çok daha düşük olduğunu göstermektedir. Al_2O_3 içeriği, kompozit tozların partikül boyutundaki azalma, ortalama kristalit boyutu ve kompozitlerin korozyon ve mekanik özelliklerindeki iyileşme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir olduğu saptanmıştır [13].

El-Wazery ve arkadaşları [72], toz metalurjisi tekniği ile altı katmanlı (Zirkonya/Nikel) FDM'ler üretmiştir. Hazırlanan FDM'lerin mikroyapı ve kırılma yüzeyleri incelenmiş ve lineer büzülme, elektriksel iletkenlik, kırılma toklukları ve Vickers sertlikleri değerlendirilmiştir. Yapılan testler neticesinde, artan nikel oranı ile derecelendirilmemiş kompozitlerin lineer büzülmelerinin azaldığını göstermektedir. Nikel içeriğinin bir fonksiyonu olarak elektriksel iletkenlik, tipik bir 'S' şekil eğrisine sahiptir. Vickers'ın YSZ/Ni sertliği, saf seramik YSZ'ninkinden daha düşük çıkmış ve sinterleme aşamasından sonra FDM'deki ara katmanlardaki gözeneklere atfedilen YSZ/Ni FDM tabakasının yoğunluğu azalmıştır. Ayrıca, elde edilen kırılma tokluğu Nikel içeriğinde %0'dan %50'ye gidildikçe arttığı gözlemlenmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler, derecelendirilmemiş kompozit malzemelere nispetle daha yüksek bir kırılma tokluğu ($31 MPa.m^{1/2}$) sergilemişlerdir.



Şekil 3.5. FDM katmanlarının mikrografları (gri kısım nikeldir YSZ'de) [72].

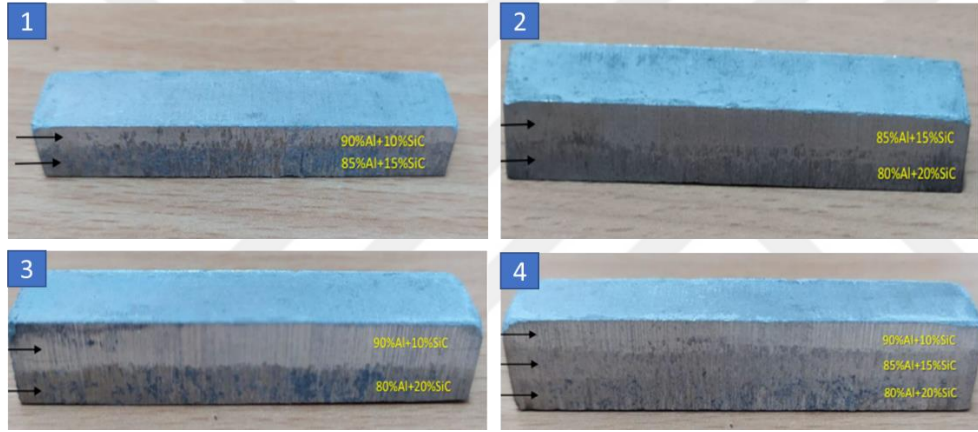
Bu araştırmada, 6061-T6 alüminyum alaşımlı levha ile desteklenen fonksiyonel derecelendirilmiş Al_2O_3 - ZrO_2 kompoziti toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir.

Karşılaştırma amacıyla, aynı alan yoğunluğu altında çok katmanlı $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ kompozit ve saf Al_2O_3 kompozitler denenmiştir. 0,30" zırh delici mermi (AP) kullanılarak üç çeşit numune üzerinde balistik test yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, balistik testten FDM'nin en iyi darbeye dayanıklı performansa sahip olduğu anlaşılmıştır. Normalde, çok katmanlı seramik yapı, ara katmanın neden olduğu çekme dalgası nedeniyle çarpmadan sonra kırılma eğilimi göstermektedir. Diğer yandan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere uygulanan SEM metodu yöntemi ile katmanlar arasında herhangi bir delaminasyon görülmemiştir. Bu da göstermektedir ki, normal yapılı bir seramiğe kıyasla FDM numunelerinde herhangi bir çatlak görülmemiş, bu katmanlar arayüzeydeki meydana gelen çekme dalgasını azaltmış ve yayılmasını geciktirerek, daha yüksek bir balistik direnç kazanma kabiliyeti sağlamıştır. Seramik-metal kompozit, balistik darbeye direnmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, mevcut çalışma, bir seramik-seramik FDM tasarımının darbe direncini artırabileceğini doğruladı. Bu nedenle, gelecekteki FDM tasarım ve üretiminde yüksek sertlik ve yüksek tokluğa sahip seramiklerin karışımı kullanılabilir [7].

Srinivas vd. çalışmalarında alüminyum, silisyum karbür ve magnezyum peroksit kullandıkları çalışmalarında dört katmanlı FDM'ler üretmişlerdir. Üretim geleneksel toz metalürjisi yöntemi ile gerçekleşmiştir. FDM'ler dört katmanı %100 saf alüminyum, %90 Al + %10SiC, %90Al + %5SiC + %5MgO₂ ve %85Al + %5SiC + %10MgO₂ şeklinde üretilmiştir. Üretilen numuneler mekanik, aşınma ve mikroyapısal açıdan karakterize edilmiştir. Gerçekleştirilen testler neticesinde FDM'lerin kompozit malzemelerden daha yüksek (315 MPa, 1,26 GPa ve 1,87 GPa) gibi en iyi basınç dayanımı, mikrosertlik ve makro sertliği sağladığı gösterilmiştir. Son olarak, mekanik özellikler açısından optimum proses parametrelerini belirlemek için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taguchi optimizasyonunun sonuçları, FDM'nin mekanik özelliklerinin yüksek oranda sinterleme sıcaklığına ve biraz da sıkıştırma basıncına ve sinterleme süresine bağlı olduğunu göstermiştir [75].

Bir diğer çalışmada, silikon karbürün (SiC) katman sayısı ve ağırlık yüzdeleri değiştirilerek dört farklı tipte Al7075/SiC fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretilmiştir. Her katman, geleneksel toz metalürjisi tekniği kullanılarak önceden belirlenmiş bir konfigürasyonla üretilmiştir. Her katmanda farklı ağırlık yüzdelerinde SiC parçacıklarının eklenmesinin sonucu ve bunların fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mikroyapısal analiz, takviye

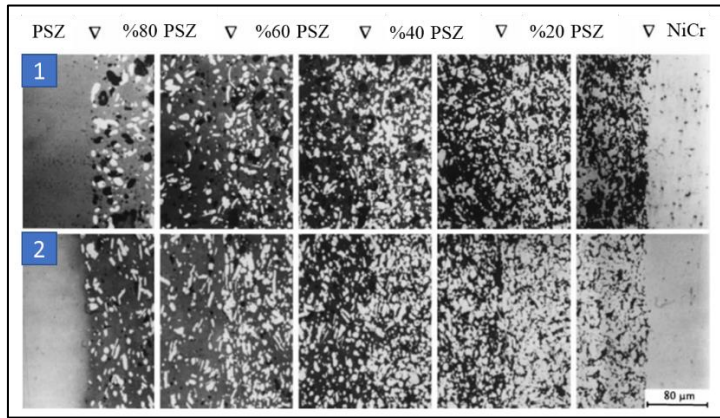
malzemesi gradyanının yukarıdan aşağıya tek biçimli dağılımını ve FDM'lerin katmanları arasında iyi ara yüzey bağına açıkça göstermektedir. Artan kusurlar nedeniyle SiC ağırlık yüzdesindeki artışla fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin yoğunluğu azalır. Her katmandaki sertlik değişimi, Al7075/SiC fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin farklı katmanlarla başarılı bir şekilde üretildiğini doğrulamaktadır. Al7075/SiC fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik özellikleri, esas olarak katmanlar, mikro çatlaklar, gözenekler ve SiC aglomerasyonları arasındaki arayüzey bağının türüne bağlıdır. Hazırlanan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler, genişletilmiş mekanik ve aşınma özellikleri sergiler ve dişliler, tahrik milleri, fren kampanaları ve yatakların imalatında tavsiye edilmektedir [76].



Şekil 3.6. Farklı oranlarda oluşturulmuş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler [76].

Bir diğer çalışmada, Ti-ZrO₂ nanokompozitleri, toz metalurjisi yolu ile üretilmiştir. ZrO₂ ilavelerinin Ti bazlı kompozitlerin mikro yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, mikrosertlik ve aşınma özellikleri testleri ile incelenmiştir. Sonuç, Ti matrisinde ZrO₂ nanoparçacıklarının yayıldığını göstermiştir. Sinterlenmiş nanokompozitlerin yoğunlaştırma davranışı, artan ZrO₂ yüzdesi ile artar. En yüksek mikrosertlik, ağırlıkça %10 ZrO₂ nanoparçacıkları kullanılarak üretilen titanyum matrisli nanokompozitler için 570 HV olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, normal yükün artmasıyla kayma aşınma hızının arttığını ve ZrO₂ nanoparçacıklarının eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Ayrıca normal yükün artması ve ZrO₂ nanoparçacıklarının eklenmesiyle sürtünme katsayısını azalmaktadır. Mikroyapı, Ti matrisinin aşınma davranışında önemli bir işlevi gösteren ZrO₂ eklemenin aşınmayı azalttığı görülmüştür [77].

Zhu ve arkadaşları [78], ZrO_2 -NiCr FDM'leri, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmişlerdir. Kademeli yapısal derecelendirmeye sahip ZrO_2 -NiCr FDM'lerin üretiminde basınçsız sinterleme yöntemi kullanılmıştır. ZrO_2 -NiCr sisteminin mekanik özellikleri de yapısal değişime karşılık gelen çeşitli gradyan dağılımları göstermiştir. NiCr içeriği ve gözenekliliğin artmasıyla Vickers sertliği azalmıştır. Eğme dayanımı ise toz karışım oranlarına bağlı olarak değişmiştir. Matris fazının karışımdaki oranının azalmasıyla eğme dayanımı azalmıştır.

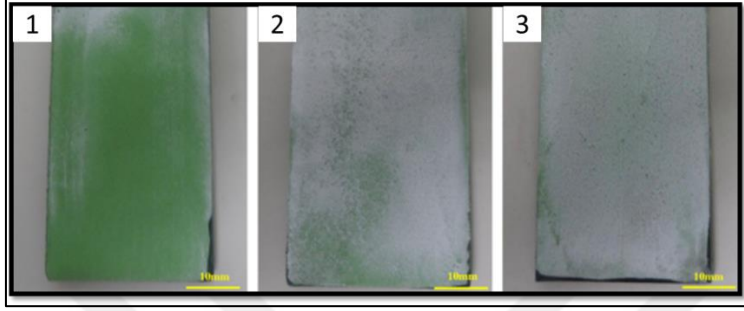


Şekil 3.7. 1) 1400°C'de basınçsız sinterleme; 2) 1250°C, 5 MPa'da sıcak presleme mikroyapıları [78].

Bhaskararao vd. [11] Al_2O_3 ve ZrO_2 ilavesinin Ni esaslı FDM'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırmıştır. Üç katmanlı FDM farklı bileşimlerinin silindirik peletleri, mekanik alaşımlama, ardından presleme ve geleneksel sinterleme yoluyla hazırlanmıştır. Sinterleme, 1200°C'de 90 dakika vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapısı, sertliği ve eğme dayanımı incelenmiş ve Al_2O_3 ve ZrO_2 alaşımları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Al_2O_3 ile ZrO_2 alaşımlı FDM'ler 258 HV ile en yüksek sertliği göstermiştir. Al_2O_3 ve ZrO_2 'nin birlikte alaşımlanmasıyla FDM'lerin eğme dayanımı %18'e yükselmiştir.

Abbas vd., [79] turboşarj uygulaması için fonksiyonel derecelendirilmiş termal bariyer kaplama (FG-TBC) üretmek için bulamaç kaplama işlemi kullanılmıştır. Yitriya stabilize zirkonya seramik ve nikel metal tozları uygun oranda karıştırılarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir malzeme karışımı elde edilmiştir. Kaplama bileşimleri birinci, ikinci ve üçüncü katmanların yerleştirilmesinde ağırlıkça %30 Yitriya stabilize Zirkonya ve ağırlıkça %70 Nikel, ağırlıkça %55 Yitriya Stabilize Zirkonya ve ağırlıkça %45 Nikel ile

ağırlıkça %75 Yitriya stabilize Zirkonya ve ağırlıkça %25 Nikel kullanılmıştır. Sonuçlar, çalışmada kullanılan yöntemin, iyi ve kaliteli fonksiyonel dereceli termal bariyer kaplama ve alt tabakaya iyi tutunan üretimi açısından sürdürülebilirliğini ve uygunluğunu göstermiştir.



Şekil 3.8. Üretilen farklı kaplanmış FG-TBC numunelerinin resimli görüntüsü 1) Tek katman, 2) İki katman, 3) Üç katman [79].



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında, bu tezde kullanılan toz malzeme tanıtılmış ve tozların üretim aşamalarına ve parametrelerine yer verilmiştir. Daha sonra toz karakterizasyon testlerinde kullanılacak toz numunelerin hazırlanma prosedürü, karakterize edilecek toz özellikleri ve bu testler için kullanılan ekipmanlar detaylı olarak verilmiştir. Son olarak üretimler sonucunda elde edilen parçalar üzerinde yapılan testler bu bölümün son başlığında yer almaktadır.

4.1. Toz Özellikleri

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretmek için Inconel 718 ve ZrO_2 tozlar seçilmiş olup Inconel tozunun kimyasal kompozisyonu aşağıda verilmiştir.

Demir	Denge
Nikel	50.00-55.00
Krom	17.00-21.00
Niyobyum	4.75-.5.50
Molibden	2.80-3.30
Titanyum	0.65-1.15
Alüminyum	0.20-0.80
Kobalt	1.00 max.
Karbon	0.08 max.
Silisyum	0.35 max.
Fosfor	0.015 max.
Sülfür	0.015 max.

Şekil 4.1. Inconel 718 toz kimyasal kompozisyon (wt%)

4.2. Üretim Planı (Blok numune Üretimi)

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme numuneleri için 2 farklı üretim planı oluşturulmuştur.

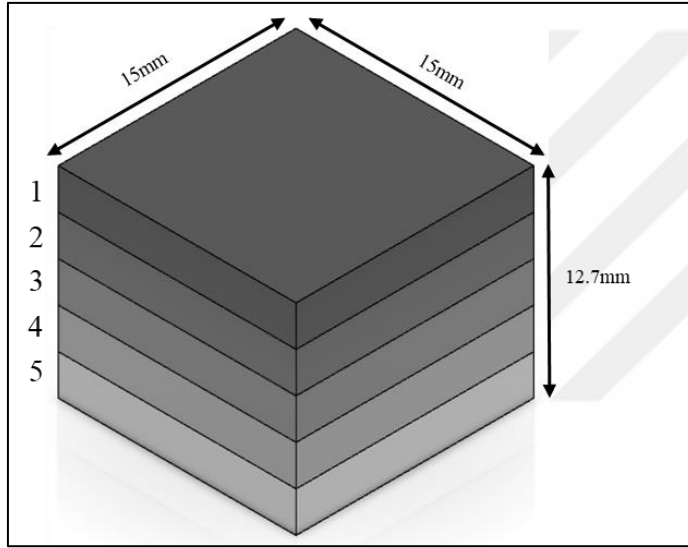
A. Planı

Bu aşamada 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi planlanmıştır. Katmanlarda bulunması planlanan Inconel 718 ve ZrO_2 miktarları ağırlıkça yüzde olarak Çizelge 4.1..'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. A planına göre üretilecek numune katman bilgileri

Katman Numarası	Inconel 718	ZrO ₂
1	%100	%0
2	%90	%10
3	%80	%20
4	%70	%30
5	%60	%40

A planına göre üretimi gerçekleşen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı Şekil 4.2.'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.2. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı

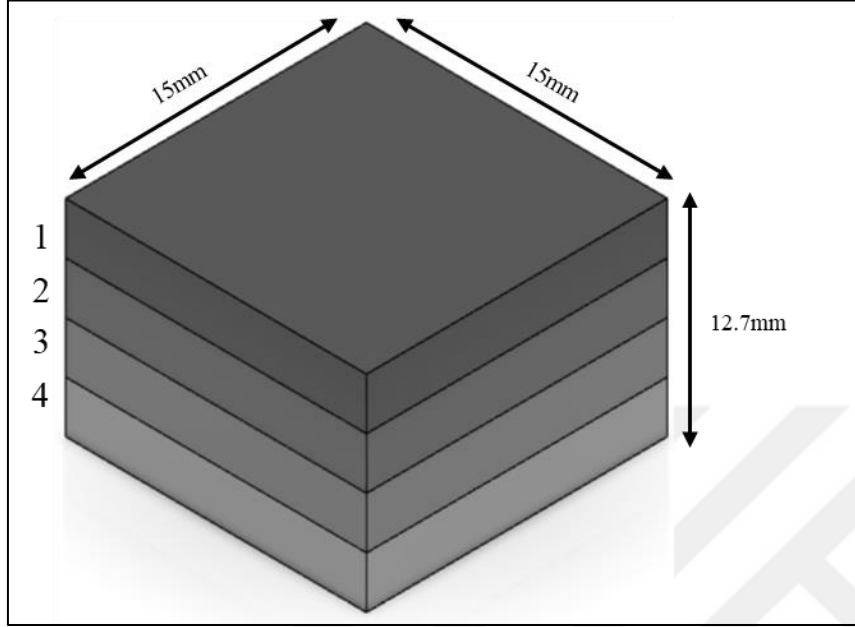
B. Planı

Bu aşamada 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi planlanmıştır. Katmanlarda bulunması planlanan Inconel 718 ve ZrO₂ miktarları ağırlıkça yüzde olarak Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. B planına göre üretilecek numune katman bilgileri

Katman Numarası	Inconel 718	ZrO ₂
1	%100	%0
2	%90	%10
3	%80	%20
4	%70	%30

B planına göre üretimi gerçekleşen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı Şekil 4.3.'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.3. 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tasarımı

4.2.1. Tozların tartılması

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeyi oluşturmak için A ve B planlarında verilen ağırlık yüzdeleri baz alınarak her katman için gereken Inconel 718 ve ZrO_2 toz kütleleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken özkütle formülü ($d=m/V$) kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan özkütle değerleri Inconel 718 için $8,19 \text{ g/cm}^3$ ve ZrO_2 için $6,0 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Her bir numunenin $\frac{1}{2}$ inç uzunluğunda üretilmesi planlandığı için 5 katmanlı numunede her bir katmanın kalınlığı 2,540 mm, kullanılan kalıbın ölçüleri 15 mm x 15 mm olduğundan her katmanın hacmi $0,5715 \text{ cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Katmanlar için toz kütlesi hesaplarının sonuçları Çizelge 'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için toz kütlesi hesabı

Katman Numarası	Katman Hacmi (cm^3)	Inconel 718 Miktarı (g)	ZrO_2 Miktarı (g)
1	0,5715	4,6806	0
2	0,5715	4,2125	0,3429
3	0,5715	3,7445	0,6858
4	0,5715	3,2764	1,0287
5	0,5715	2,8084	1,3716

Her bir numunenin ½ inç uzunluğunda üretilmesi planlandığı için 4 katmanlı numunede her bir katmanın kalınlığı 3,175 mm, kullanılan kalıbın ölçüleri 15 mm x 15 mm olduğundan her katmanın hacmi 0,7144 cm³ olarak hesaplanmıştır. Katmanlar için toz kütlesi hesaplarının sonuçları Çizelge 'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.4. 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için toz kütlesi hesabı

Katman Numarası	Katman Hacmi (cm ³)	Inconel 718 Miktarı (g)	ZrO ₂ Miktarı (g)
1	0,7144	5,8509	0
2	0,7144	5,2658	0,4286
3	0,7144	4,6807	0,8573
4	0,7144	4,0957	1,2859

Hesaplanan kütlelere göre tüm numuneler özelinde her katman için Inconel 718 ve ZrO₂ tozları hassas terazi ile tartılarak Şekil 4.4.'te gösterilen kaplara alınmıştır.



Şekil 4.4. Katmanları oluşturacak tozların konulduğu kaplar

4.2.2. Tozların karıştırılması

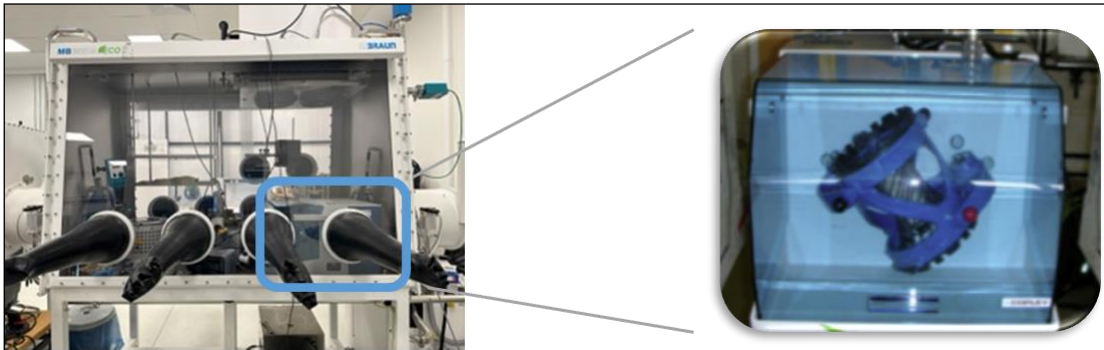
Her katman için ayrı kaplara alınan tozlar, homojen bir karışım elde edilebilmesi adına iki aşamadan oluşan karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. İlk aşamada tozlar Şekil 4.5.'te görseli verilmiş olan toz ayırıcı ünite kullanılarak karıştırılmıştır. Bu ünite, 6 adeti sağ tarafta 6 adeti

sol tarafta bulunan toz toplama haznesine açılmak üzere toplamda 12 adet kanaldan oluşmaktadır. Üst kısımda bulunan ızgaradan beslenen tozlar bu kanallar aracılığı ile ikiye ayrılmaktadır. Toz toplama haznelerinden bir tanesi alınarak aynı işlem tekrar uygulanmaktadır.



Şekil 4.5. Toz Ayırıcı Ünite

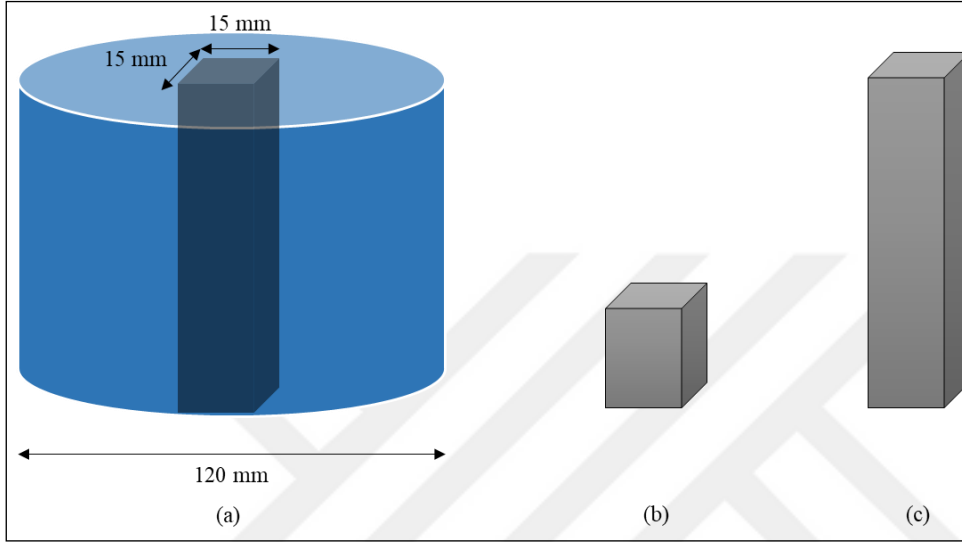
Tozlar bu şekilde karıştırıldıktan sonra tekrar kaplara konarak farklı özgül ağırlıkları ve farklı tanecik boyutları olan tozların homojen karışımı için kullanılan turbula ekipmanına yerleştirilmiştir. Atmosfer kontrollü kabin (ing. glove box) içerisinde bulunan TURBULA marka T 2F model turbula Şekil 4.6’da görülmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin katmanlarını oluşturacak olan tozlara turbula ekipmanında 15 dakika süresince karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Turbula Ekipmanı [57]

4.2.3. Tozların kalıba alınması

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeyi oluşturan katmanlarda bulunacak olan tozların karıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kalıbın detayları Şekil 4.7’da paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. (a) Pres kalıbı boyutları, (b) alt zımba ve (c) üst zımba

Tozların kalıba yapışmasının önüne geçmek amacıyla kalıp, alt ve üst zımbalara yağlayıcı uygulanmıştır. Detayları 4.2.4. numaralı başlıkta verilmiş olan ön ısıtma prosesi de uygulanacağı için yağlayıcı olarak Molykote 1000 yüksek sıcaklık gresi seçilmiştir. Yağlayıcı uygulamasının ardından alt zımba kalıba yerleştirilmiştir. Üzerine %100 Inconel 718 tozundan oluşan 1. katman ve sırası ile diğer katmanlar serilmiştir. Katman dizilimi tamamlandıktan sonra ise üst zımba yerleştirilerek tozların kalıba alınması işlemi sonlandırılmıştır.

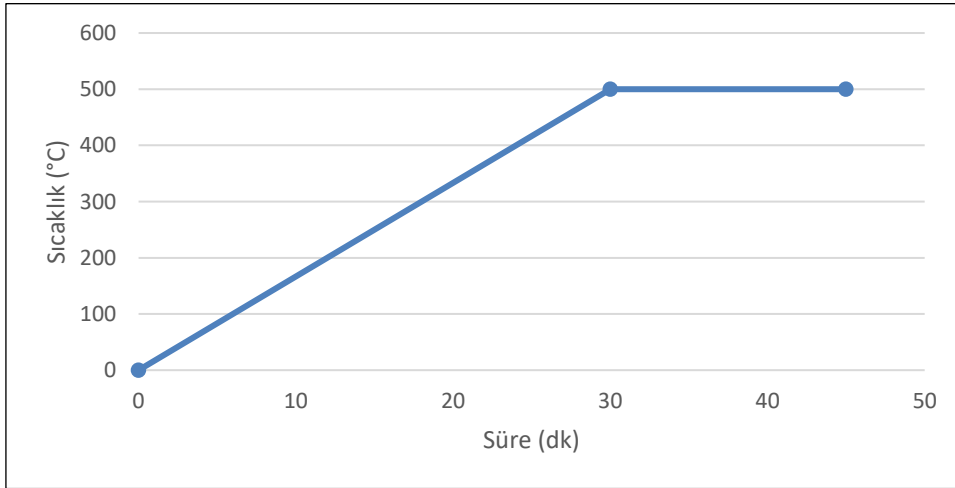
4.2.4. Ön ısıtma prosesi

Kalıba alınan tozlar ön ısıtma prosesi için Protherm marka fırına yerleştirilmiştir. Kullanılan fırın Şekil 4.8.’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Protherm marka ısıtım fırını

Ön ısıtmada uygulanan prosedür Şekil 4.9.'de verilmiştir.



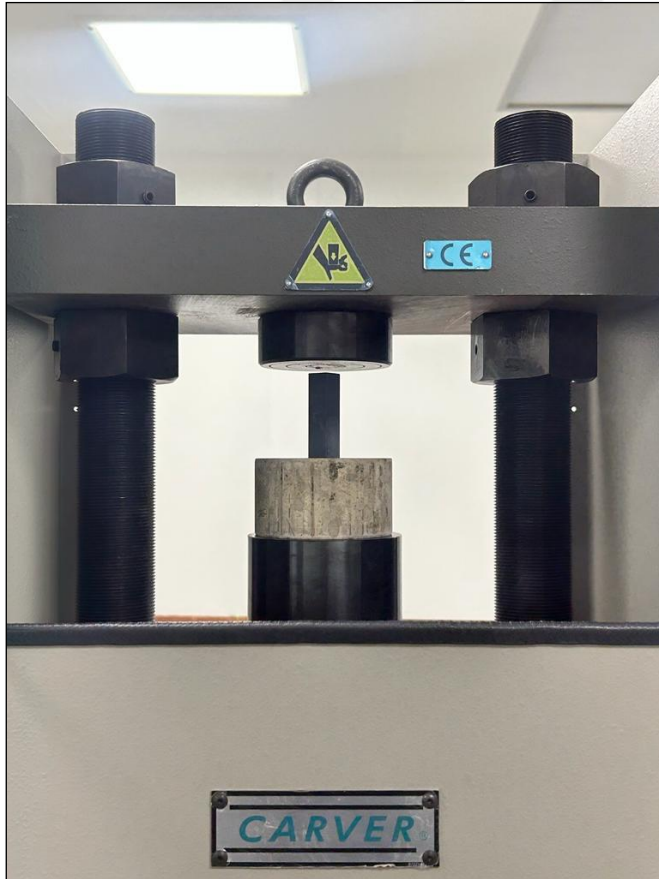
Şekil 4.9. Ön ısıtma proses parametresi

4.2.5. Pres prosesi

Ön ısıtma prosesinin ardından fırından alınan kalıba Carvex marka manuel pres cihazında Çizelge 4.5.'te verilen parametrelere göre pres işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.10. Carver marka pres cihazı



Şekil 4.11. Pres prosesi

Çizelge 4.5. Pres için uygulanan basınç parametreleri

Basınç (MPa)	5 Katman	4 Katman
400	3 adet	3 adet
500	3 adet	3 adet
600	3 adet	3 adet
700	3 adet	3 adet
800	3 adet	3 adet

4.2.6. Sinter prosesi

Pres işlemi tamamlanan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere Protherm ACF 13.55 Atmosfer Kontrollü Isıl İşlem Fırınında, Çizelge 'da verilmiş olan üç farklı sinterleme işlemi uygulanmıştır.

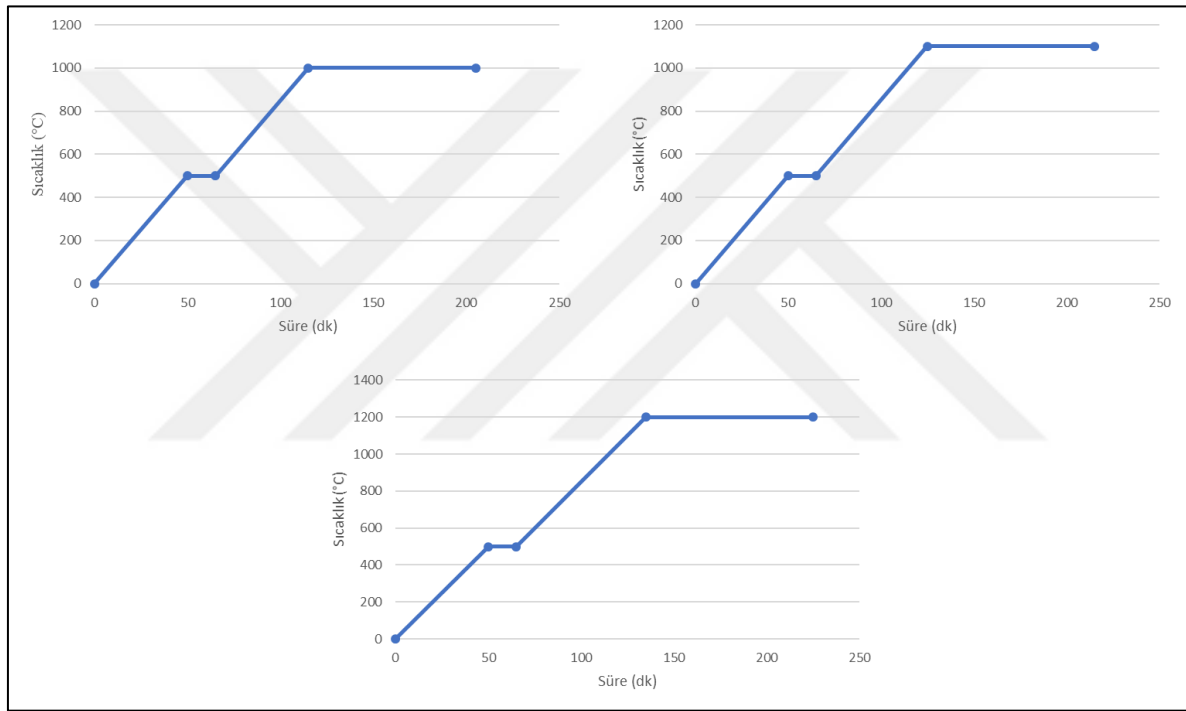


Şekil 4.12. Protherm ACF 13.55 Atmosfer Kontrollü Isıl İşlem Fırını

Çizelge 4.6. Sinter sıcaklığı parametreleri ve numune adetleri

Basınç (MPa)	Sinter Sıcaklığı		
	1000°C	1100°C	1200°C
400	2 adet	2 adet	2 adet
500	2 adet	2 adet	2 adet
600	2 adet	2 adet	2 adet
700	2 adet	2 adet	2 adet
800	2 adet	2 adet	2 adet

Sinter prosesinde uygulanmış olan ısıtma prosedürü Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Sinterleme prosesi parametreleri

4.2.7. Metalografik numune hazırlanması

Üretilen parçaların sertlik ölçümlerini doğru şekilde yapabilmek, gözenek ve katman dağılımını incelemek amacıyla metalografik numune hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme bloklarının hassasiyeti sebebi ile manuel zımpara ve parlatma işlemi uygulanmıştır.

4.3. Karakterizasyon Çalışmaları

Elde edilen numuneler, fonksiyonel derecelendirilmiş yapının ayrıntılı incelemeleri için birtakım testlere tabi tutulmuştur. Testler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

4.3.1. Morfoloji

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme bloklarının katman kalınlıklarını ve ara yüzeylerini görmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM, toz parçacıklarının yüksek yakınlaştırmalarda görüntülenmesine ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesine olanak tanır. Odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak bir görüntü elde eder. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyinde topografi ve bileşim hakkında bilgi içeren farklı sinyaller üretir.

Tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen fonksiyonel derecelendirilmiş numunelerin taramalı elektron mikroskop analizleri Ankara Yıldırım Beyazid Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Fe-Sem) ile gerçekleşmiştir. Mikroyapıdaki elementel dağılımın belirlenmesi amacıyla yine aynı cihaza bağlı olan EDX aparatı kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Hitachi SU5000 FE-SEM

4.3.2. Kimyasal kompozisyon analizi

Üretilmiş olan FDM bloklarının katmanlarının kimyasal bileşimini ölçmek için enerji dağılımlı element analizi (EDS) gerçekleştirilmiştir. EDS analizi, numuneye bir tarama elektron ışını gönderilerek gerçekleştirilir. Yayılan x-ışınları elektronik sensörler tarafından algılanır. Elde edilen veriler bilgisayar monitöründe tepe noktaları oluşturur ve element analizi yapılır. Kimyasal bileşim verileri SEM görüntüleri Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopi (Fe-Sem) mikroskobundan elde edilmiştir.

4.3.3. Malzeme yüzey analizi

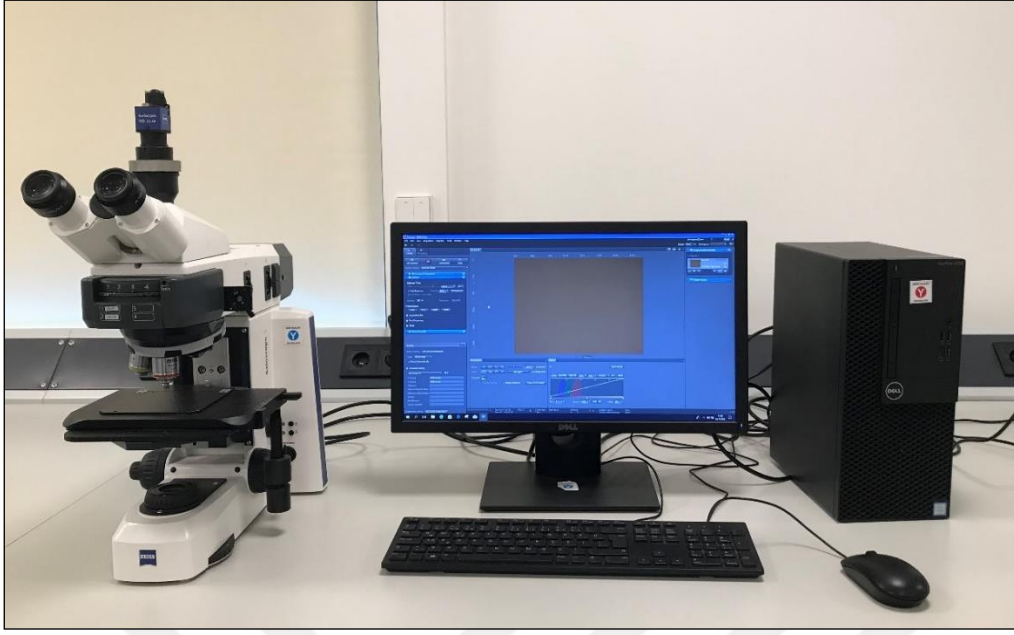
Malzemenin makro görüntü analizi Leica marka M205C model ekipman ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15. Leica M205C model stereo mikroskop

4.3.4. Mikroyapı analizi

Malzemenin mikroyapı analizi ZEISS marka Axiscope 5 model optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Axiscope 5 model optik mikroskop

4.3.5. Dinamik görüntü analizi

Kullanılan Inconel 718 tozunun parçacık büyüklüğü dağılımı incelenmiştir. Dinamik görüntü analizi, serbest düşen ve hareket eden tozlarla yüksek hız ve boyutsal çözünürlüğe sahip bir kamera ile parçacık boyutu ve şeklinin belirlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Çalışmalar Microtrac marka Camsizer X2 model ekipman ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17. Camsizer X2 model dinamik görüntü analizi ekipmanı

4.4. Mekanik Testler

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme bloklarının mekanik özelliklerini belirlemek için birtakım testlere tabi tutulmuştur. Testler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

4.4.1. Termal iletkenlik analizi

Malzemelerin ısı enerjisini soğurması ile sıcaklıkları ve buna bağlı olarak iç enerjileri artar. Artan enerji titreşimlerle kinetik enerjiye dönüşürken, genleşme ile potansiyel enerjiye dönüşür. Soğurulan ısı enerjisi, malzemenin termal iletkenli yani enerjinin iletim hızı ve termal genleşme yani boyutlardaki değişim, malzemenin türü, mikroyapısı ve dış etkiler gibi özelliklere bağlıdır.[80]

Termal iletkenlik, malzemelerin karakteristik özelliği olup ısı iletim potansiyellerini gösteren bir özelliktir. Birim alanda, birim uzunluk boyunca malzeme üzerindeki enerji (ısı) transferi olarak bilinir. Yüksek termal iletkenlik değeri malzemelerin iyi ısı iletken olduğunun bir göstergesidir. Aksi şekilde düşük termal iletkenlik katsayısı değeri malzemenin zayıf iletken veya yalıtkan özellikler taşıdığını göstermektedir [80]. Isı iletim katsayısı “k” ile ifade edilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen numunelerin termal iletkenlik katsayıları muhafazalı sıcak plaka yöntemi ile yüksek sıcaklık ve yüksek ısı iletkenlik gösteren malzemelere özel aparat kullanılarak belirlenmiştir.

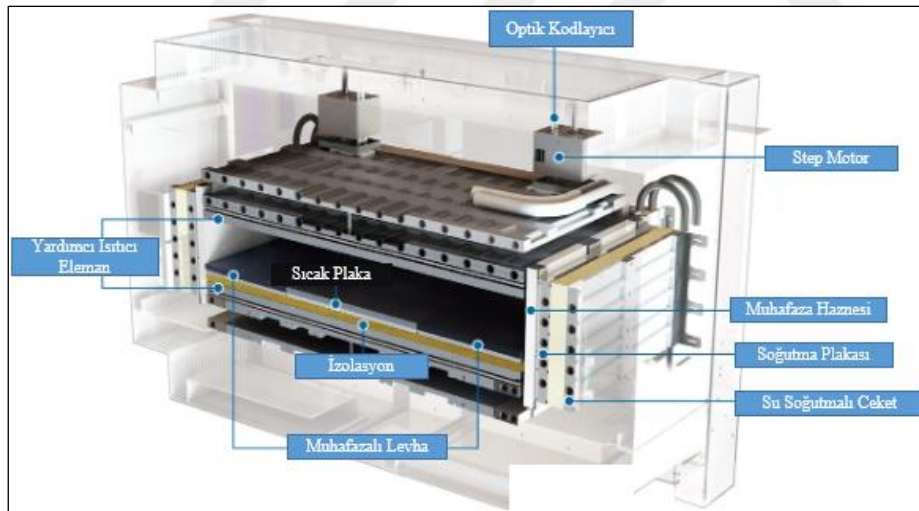
Muhafazalı sıcak plaka yöntemi

Bu yöntem, özellikle düşük (metallere vs. nispetle) ısı iletkenlik değerine sahip (cam, polime, seramik vs.) malzemeler için kullanılan bir yöntemdir. Ölçümlerin bulunması karmaşık denklemler gerektirmediği gibi deneyin uygulanması da oldukça kolaydır. Bu metotta ihtiyaç duyulan girdiler malzeme kalınlığı, ölçümlerin gerçekleştiği sıcaklıklar ve numuneye uygulanan elektrik güç ölçümleridir. Tek veya çift numune haznesine sahip olmalarına göre iki farklı muhafazalı sıcak plaka yöntemi bulunmaktadır. Bu tez kapsamında tek hazneli muhafazalı sıcak plaka yöntemi kullanılmıştır. Bu neden tek hazneli olan yöntem açıklanacaktır.

Ölçüm prensibi Şekil 4.18’da gösterildiği gibi, dörtgen boyutlara sahip (kare ve dikdörtgen) belirli bir kalınlıkta ve farklı sıcaklıklara sahip iki levha (sıcak ve soğuk) arasına yerleştirilmiş test numunesinden geçen ısı akısının ölçümüne dayanmaktadır. Akı, test numunenin alt yüzeyi ile temas halinde olan bir ısı sensörü aracılığı ile tespit edilir. Isı iletim katsayısı Fourier kanunu kullanılarak yani test numunesinin kalınlığı, sıcaklık gradyanı, temas halindeki yüzeyin alanı ve ölçülen ısı akısı ile belirlenir [81-83] .



Şekil 4.18. Muhafazalı sıcak plaka yönteminin şematik görünümü [81]



Şekil 4.19. Muhafazalı sıcak tabla cihazı ve cihaz bileşenleri [81]

Fourier kanunu

Isı iletim katsayısı (k) bir malzemenin birim alanı başına belirli bir kalınlıkta iletebileceği ısı miktarını belirtir. Bir malzemenin ısı iletim katsayısı, malzemenin cinsi, sıcaklık, yoğunluk ve nem gibi faktörlere bağlıdır.

Isı iletim katsayısı, malzemenin fiziksel özelliklerine ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak hesaplanabilir. Genellikle, ısı transferi problemlerinde Fourier'un ısı iletim denklemi kullanılarak hesaplanır. Fourier'un ısı iletim denklemi ya da Fourier Kanunu;

Fourier Kanunu : $q_x = -kA \frac{dT}{dx}$ şeklinde ifade edilir.

Burada;

q_x : x yönünde ve bu yöne dik A alanı üzerinden geçen ısı miktarı (W)

A: Isı akışına dik olan yüzey alanı (m^2)

T: Sıcaklık (K)

x: kalınlık (m)

k: Isı iletim katsayısı (W/m.K)

4.4.2. Sertlik analizi

Elde edilen parçaların sertlikleri 7 farklı noktadan 3 tekrar yapılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler için Emcotest marka Durascan model donanım kullanılmıştır. Üretim yönü boyunca ölçümler alınmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers ucu ile alınmış ve ardından ilgili Rockwell C değerine dönüştürülmüştür.



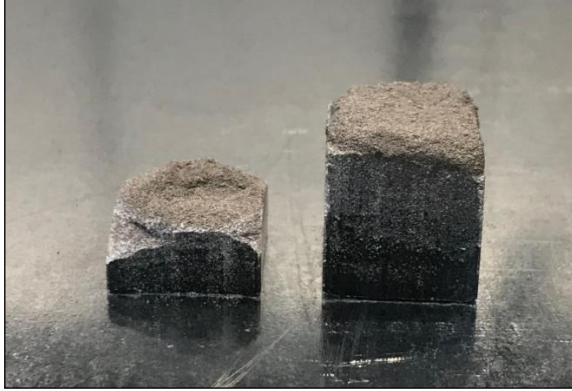
Şekil 4.20. Emcotest mikro sertlik cihazı

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde öncelikle üretim süreci anlatılmış, üretim sonucunda elde edilen nihai parçalar paylaşılmış ve ardından yapılan testlerin sonuçları detaylandırılmıştır. Üretim parametrelerindeki farklılıkların parçaların özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir değerlendirmeye tabi tutulmuş ve detaylı olarak açıklanmıştır.

5.1. A Planı

Bu aşamada üretilmesi planlanmış olan 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için belirlenen parametrelere göre pres işlemi uygulanmıştır. Ancak en üst katmanda (ağırlıkça %60 Inconel 718, %40 ZrO₂) tutunma gerçekleşmediği görülmüştür. Bunun üzerine ½ inç olan yükseklik ¼'e indirilmiş, tekrardan pres işlemi yapılmıştır. Fakat herhangi bir tutunma gözlemlenmemiştir. Pres sonrası elde edilen numune görüntüleri Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. 5 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ¼ inç ve ½ inç görüntüsü

A planına göre üretilen 5 katmanlı FDM'nin son katmanının tutunmaması sebebi ile B planına geçiş yapılmıştır.

5.2. B Planı

Bu aşamada üretilmesi planlanmış olan 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için belirlenen parametrelere göre pres işlemi uygulanmıştır. Ancak 400 MPa ve 500 MPa basınçlarda herhangi bir tutunma gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.2. (a) 400 MPa basınç, (b) 500 MPa basınç uygulanmış pres sonuçları

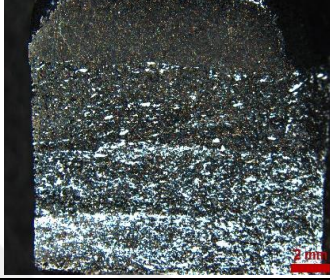
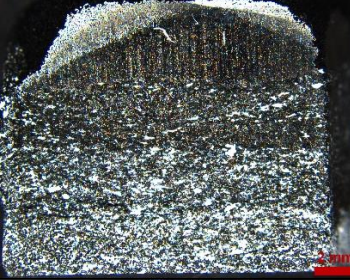
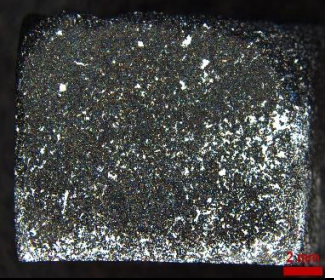
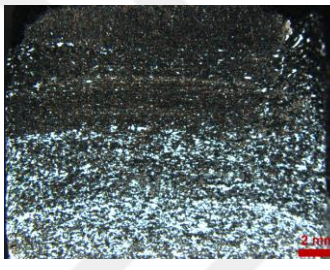
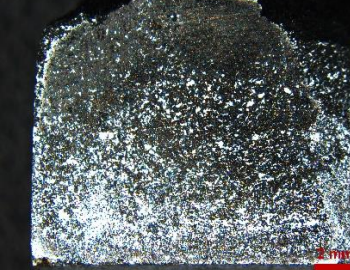
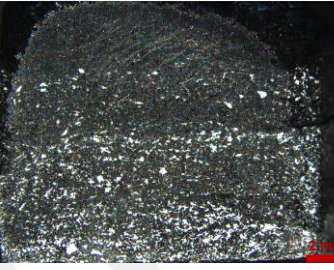
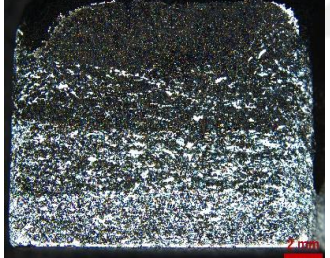
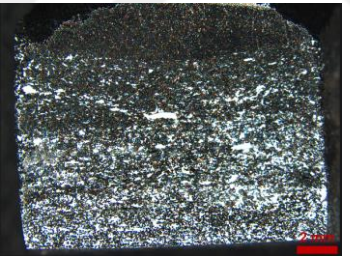
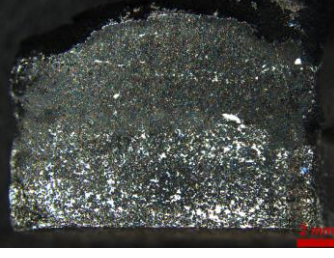
4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi için 600 MPa, 700 MPa ve 800 MPa basınçlar uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen 9 adet numune 1000°C, 1100°C ve 1200°C’de sinterlenmiştir. Nihai numune görüntüleri Çizelge 5.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 5.1. B planı pres ve sinter prosesi sonrası fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler

Basınç (MPa)	Sinter Sıcaklığı (°C)		
	1000°C	1100°C	1200°C
600			
700			
800			

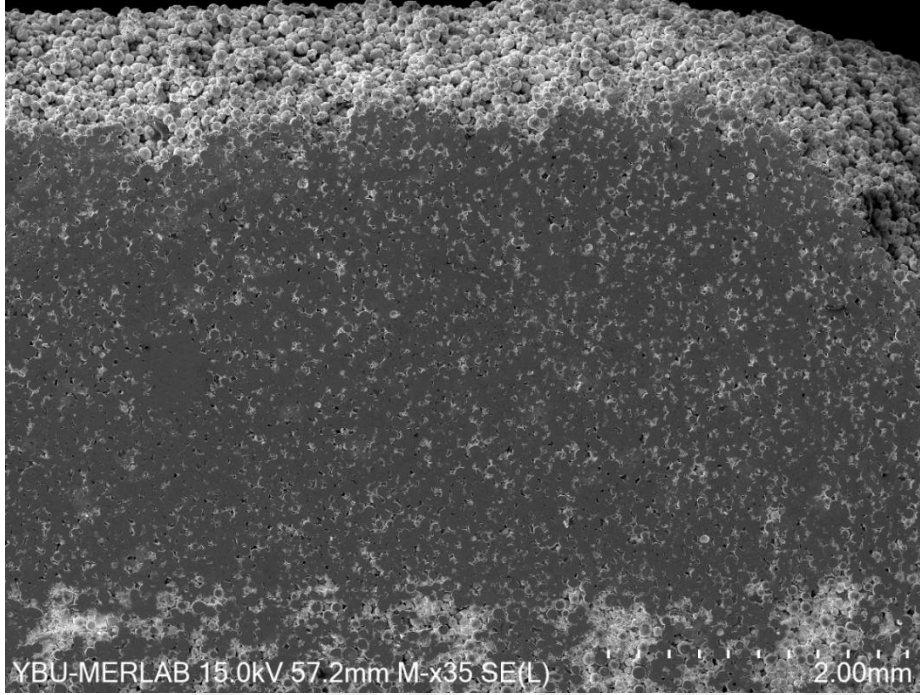
5.3. Malzeme Yüzey Analizi

Çizelge 5.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme makro görüntüleri

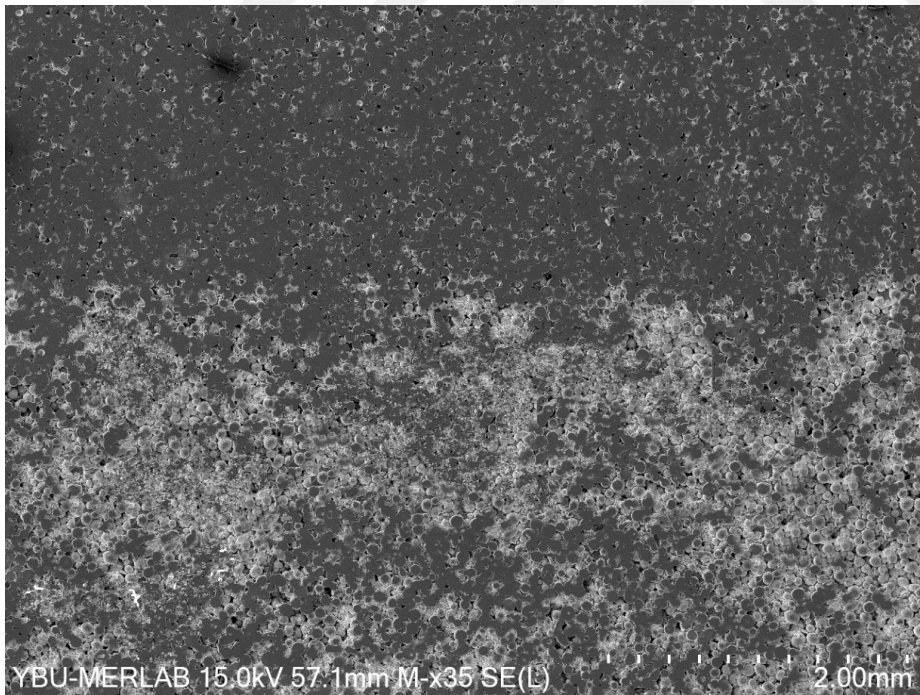
Basın ç (MPa)	Sinter Sıcaklığı (°C)		
	1000°C	1100°C	1200°C
600			
700			
800			

5.4. SEM Analizi

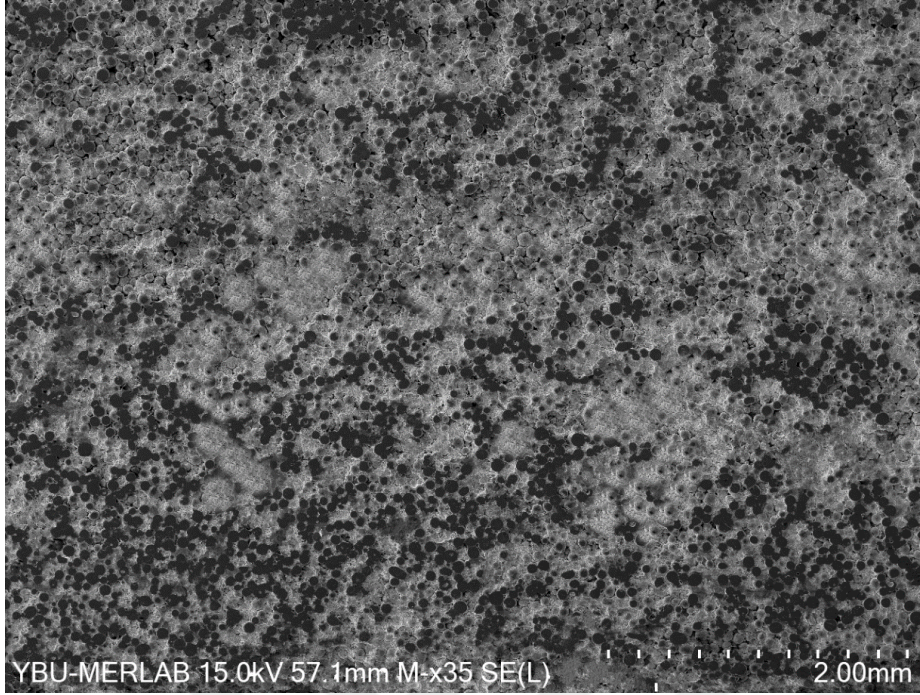
Tez kapsamında üretilen numunelerin metalografik hazırlığı yapılarak (zımparalama + parlatma işlemleri) elektron mikroskop incelemesine uygun hale getirilmiştir. Üretilen numunelerin farklı kademelerden alınan SEM görüntü analizleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.7 arasında verilmiştir.



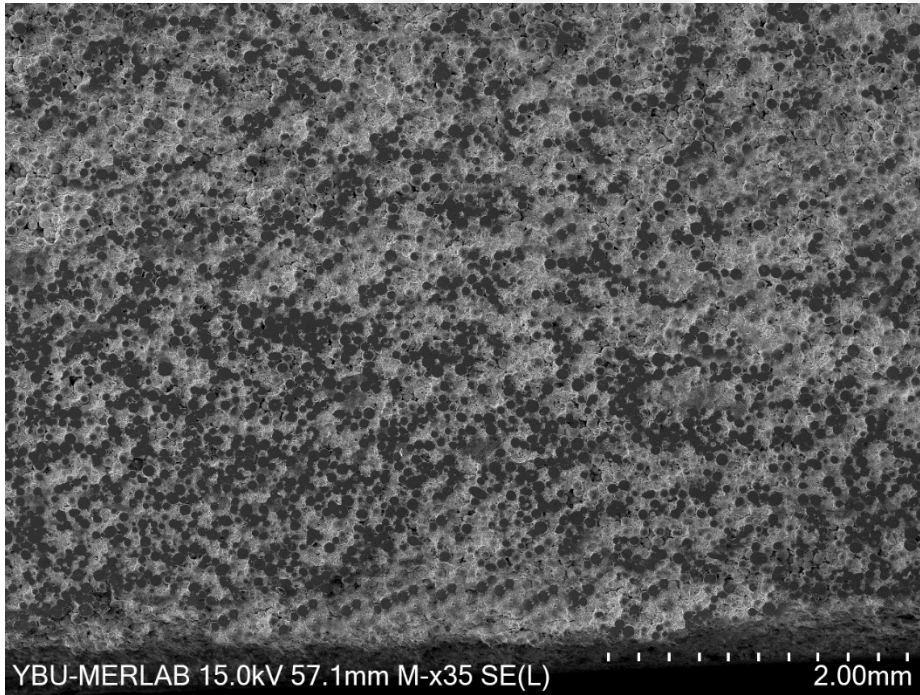
Şekil 5.3. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %100 Inconel 718 olan katmanın SEM görüntüsü



Şekil 5.4. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %90 Inconel 718 ve %10 ZrO₂ olan katmanın SEM görüntüsü



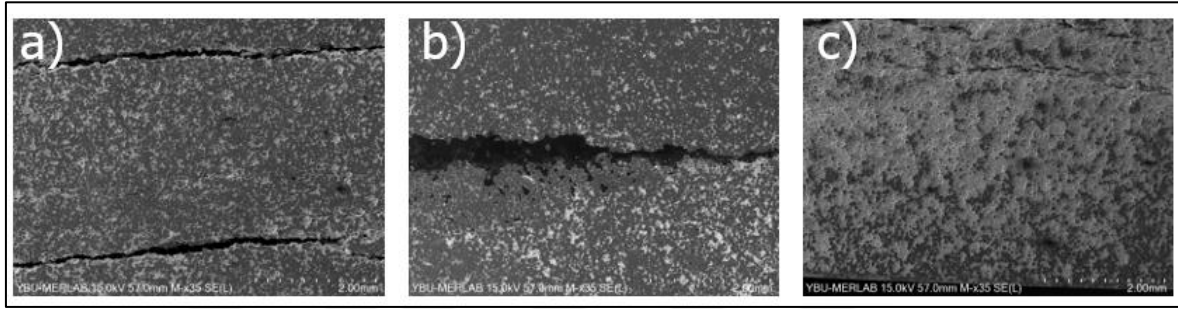
Şekil 5.5. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %80 Inconel 718 ve %20 ZrO₂ olan katmanın SEM görüntüsü



Şekil 5.6. 600 MPa ile preslenmiş ve 1000 °C’de sinterlenmiş FDM malzemenin %70 Inconel 718 ve % 30 ZrO₂ olan katmanın SEM görüntüsü

Çalışma kapsamında 600 MPa’da ve 1000 derecede sinterlenmiş numunenin elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.6 arasında verilmiştir. Koyu bölgeler Inconel 718 açık bölgeler ise ZrO₂ tozlarının dağılımını göstermektedir. SEM görüntüleri ve optik

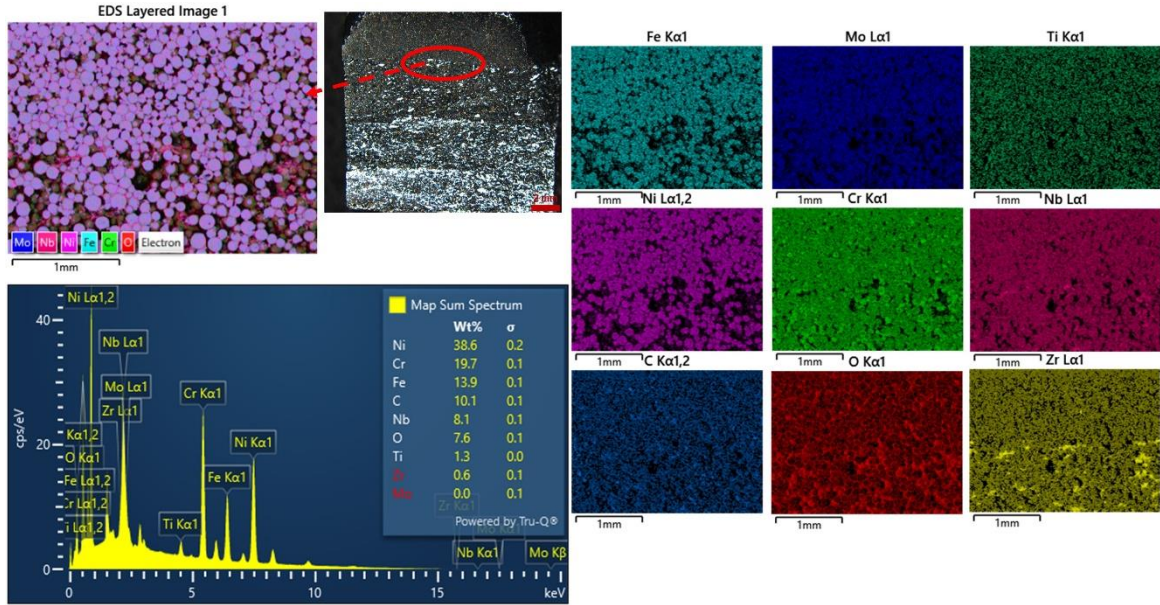
görüntüler incelendiğinde 600, 700 ve 800 MPa'da 1000°C ve 1100°C sinterleme sıcaklıklarında katmanlarda istenilen Inconel718/ZrO₂ oranının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ancak 1200 °C'de her bir presleme basıncı için katmanlı bir yapı oluşmadığı gözlemlenmiştir (Çizelge). Üstelik söz konusu sıcaklıkta gerçekleştirilen üretimlerde numunelerde aglomerasyon, boşluk ve çatlak oluşumu diğer üretim parametrelerine kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.7).



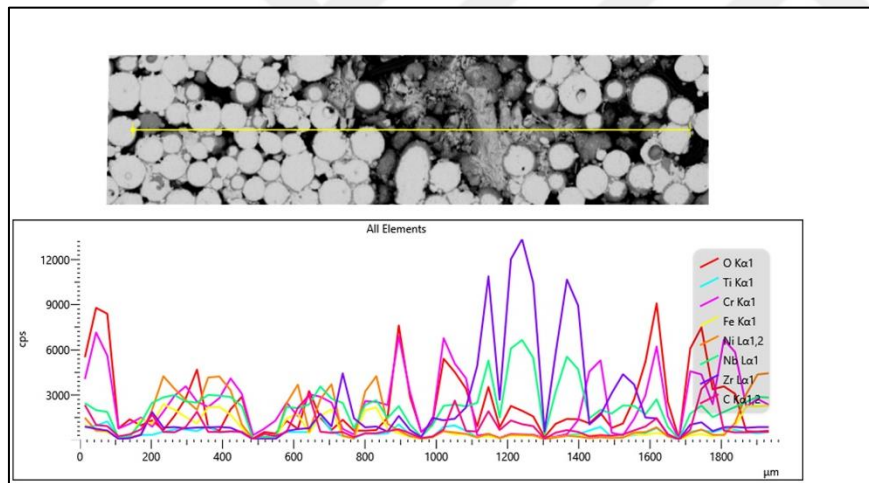
Şekil 5.7. (a) 600, (b) 700 ve (c) 800 MPa'da 1200 derece sinterleme sonrası numunelerde meydana gelen çatlakların SEM görüntüsü.

Bu durumun özellikle seramik malzemelerde meydana gelen soğuma çatlğından ileri geldiği düşünülmektedir. Seramik malzemelerin doğal refakat bileşenleri olan karbonat ve sülfatlar sırasıyla 1100°C ve 1200°C'de yapıdan ayrıştığından altındaki sıcaklıklarda sinterleme için sorun teşkil etmemektedir. Ancak sinterleme sıcaklığının söz konusu sıcaklıklar olması durumunda, sinterleme esnasında sorun oluşturmamalarına karşın soğuma esnasında gerçekleşen polimorfik dönüşümler neticesinde çatlaklara sebebiyet verirler. Özellikle bu tez kapsamında fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi için kullanılan ZrO₂ bu tür hasarlara karşı oldukça hassas bir malzemedir. Bu problemin önlenmesi adına MgO, CaO ve Y₂O₃ gibi diğer oksitler ile yeteri kadar stabilize edilmesi büyük önem taşımaktadır[84, 85].

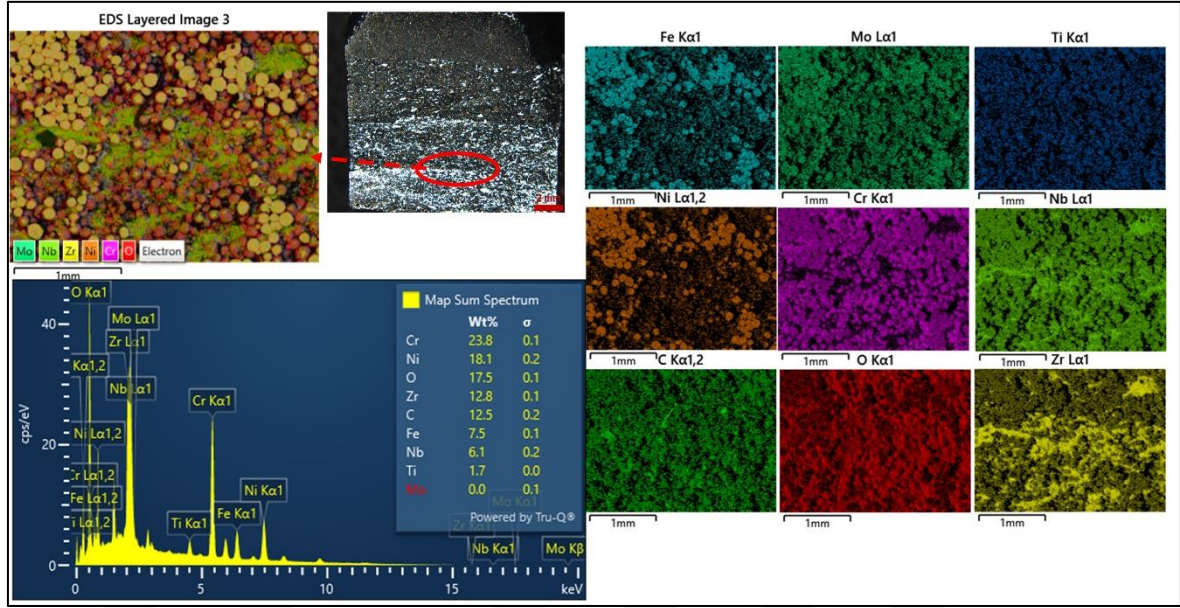
Şekil 5.8 ve Şekil 5.13 arasında 600 MPa'da 1000 °C'de üretilmiş numunenin haritalama ve çizgisel EDS analizleri verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu katmanlar arası geçişlerde Inconel 718 ve ZrO₂ oranlarının üretime uygun olarak gerçekleştiği ve homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir.



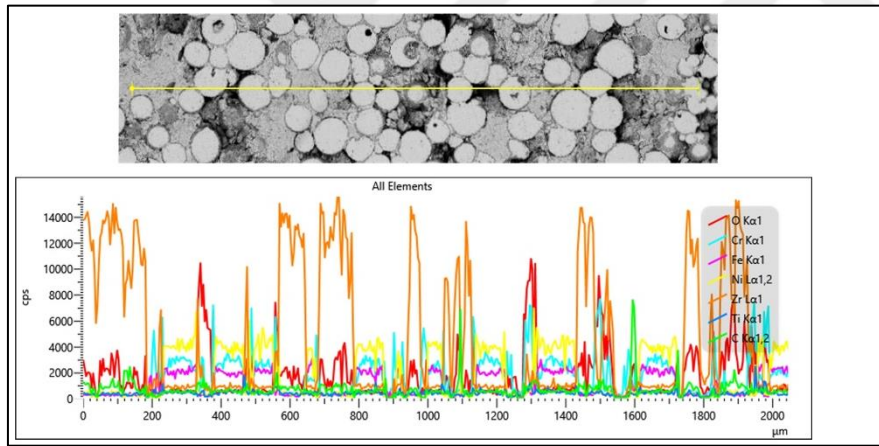
Şekil 5.8. %100 Inconel 718 ile %90 Inconel 718+ %10 ZrO₂ ara yüzeyi EDS haritalama sonuçları



Şekil 5.9. %100 Inconel 718 ile %90 Inconel 718+ %10 ZrO₂ ara yüzeyi çizgisel EDS sonuçları



Şekil 5.12. %80 Inconel 718+ %20 ZrO₂ %70 Inconel 718+ %30 ZrO₂ ara yüzeyi EDS haritalama sonuçları



Şekil 5.13. %80 Inconel 718+ %20 ZrO₂ %70 Inconel 718+ %30 ZrO₂ ara yüzeyi çizgisel EDS sonuçları

5.5. Termal İletkenlik analizi

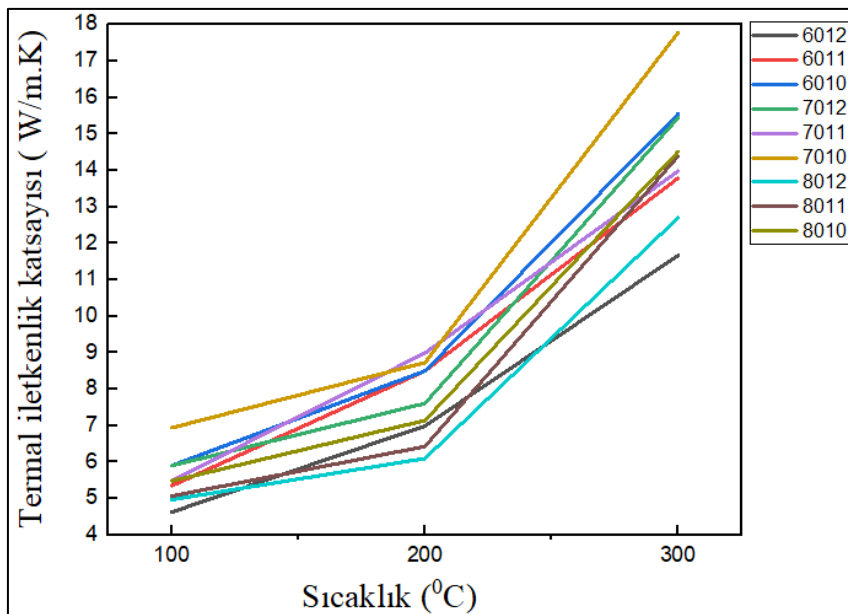
ZrO₂ ve Inconel 718'den üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş numunelerin termal iletkenlik analizleri Çizelge 'de verilmiştir. 100 °C'de en düşük termal iletkenlik katsayısının (4,63 W/m.K) 6010 nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (6,94 W/m.K) 7012 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir. 200 °C'de en düşük termal iletkenlik katsayısının (6,1 W/m.K) 8010 nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (8,99 W/m.K) 7011 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir. 300 °C'de en düşük termal iletkenlik katsayısının (11,67 W/m.K) 6010

nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (17,78 W/m.K) 7012 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde artan sıcaklıkla ZrO_2 'nin termal iletkenlik değerinin düştüğü Inconel 718 ise artan sıcaklıkla termal iletkenlik katsayısının arttığı belirtilmiştir [86, 87]. Sonuçlar incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte üretilen numunelerin termal iletkenlik katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.14). Termal iletkenlik malzemenin birden çok özelliğine (termal genişleme, mikroyapısal hatalar, kristal kafes yapısı vd. gibi) bağlıdır. Bu tez kapsamında üretilen numunelere bakıldığında, numunelerde Inconel 718'in hacim fraksiyonunun ZrO_2 'a nispetle daha fazla olması ile açıklanabilir.

Çizelge 5.3. Numunelerin farklı sıcaklıklara göre termal iletkenlik katsayıları

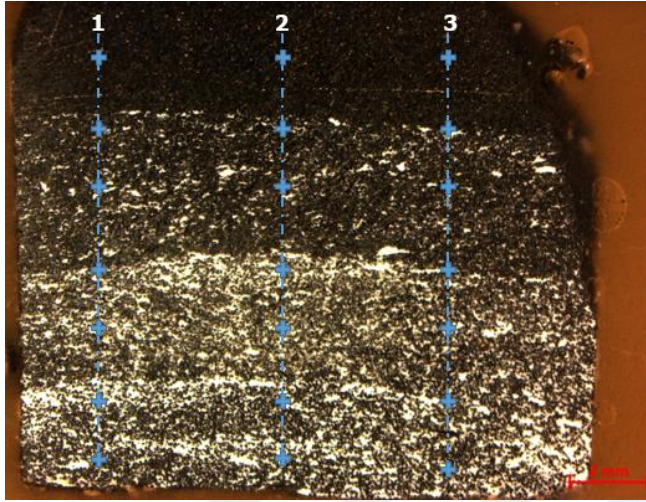
Termal İletkenlik Katsayısı (W/m.K)			
Numune	100 (°C)	200 (°C)	300 (°C)
6010	4,63	6,99	11,67
6011	5,35	8,5	13,79
6012	5,9	8,5	15,55
7010	5,9	7,61	15,44
7011	5,49	8,99	13,98
7012	6,94	8,73	17,78
8010	4,97	6,1	12,7
8011	5,07	6,43	14,39
8012	5,48	7,14	14,51



Şekil 5.14. Numunelerin termal iletkenlik katsayılarının sıcaklığa göre değişim grafiği

5.6. Sertlik Analizi

Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sertlik testleri Rockwell C skalası kullanılarak belirlenmiştir. Söz konusu numunelerin sertlik testleri farklı 3 bölgeden alınmıştır. Sertlik değerleri her bir katmandan (Şekil 5.15) ve katmanlar arası ara yüzden alınmıştır ve değerler verilmiştir.



Şekil 5.15 3 farklı bölgeden alınan sertlik noktalarının gösterimi

Çizelge 5.4. Numunelerin 3 farklı bölgeden alınan ortalama sertlik değerlerinin çizelgesi

Sertlik Değerleri (HRC)							
Numune	1. Katman	1. ve 2. Katman Arayüz	2. Katman	2. ve 3. Katman Arayüz	3. Katman	3. ve 4. Katman Arayüz	4. Katman
6010	37	37,1	37	40	44,2	45,3	46,4
6011	37,4	38	38,7	42	45	45,2	47
6012	35	38	37,5	34	45	46,2	46,4
7010	36	37,7	40,4	43	43,4	45	45
7011	37	39,1	42,4	46,4	45	47,2	47,5
7012	33,4	34	34	40,7	42,5	46,4	42
8010	38,7	39,4	42,9	43,6	43,9	44,4	44,8
8011	39	40	41,7	45,3	47,6	47,8	48
8012	33	34	42,1	42	43,7	42	45,9

*1. Katman %100 Inconel 718, 2. Katman %10 ZrO₂ ve %90 Inconel 718, 3. Katman %20 ZrO₂ ve %80 Inconel 718, 4. Katman %30 ZrO₂ %70 Inconel 718

Gerçekleştirilen sertlik testleri neticesinde %30 ZrO₂ içeren katmandan %100 Inconel 718 içeren katmana doğru sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri (47,5 HRC) 7011 nolu numunenin %30 ZrO₂ içeren katmanında (4. Katman), en düşük sertlik değeri ise 8012 nolu numunenin %100 Inconel 718 (1. Katmanında) gözlemlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile %100 Inconel 718 içeren katmanda sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Sinter sıcaklığı arttıkça malzemenin sertlik değerlerinde 2-3 HRC düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Artan sıcaklığın tanecik büyümesine yol açması sebebi ile numunelerde sertlik değerinin düşüşüne sebep olduğu değerlendirilmektedir. Artan basınç değerlerinin malzeme sertlik değerlerinde büyük farklara yol açmadı belirlenmiştir. Tez çalışmasında uygulanan basınç değerleri arasında büyük farklar olmadığı için sertlik değerlerine yansımadağı düşünülmektedir.

5.7. Toz Boyut ve Şekil Analizi

Dinamik görüntü analizi, tozların partikül boyutu dağılımı ve şekilleri hakkında bilgilerin elde edildiği yöntemdir. Bu test sırasında parçacık boyutu dağılımı ve şekli hakkında bilgi elde etmek için yaklaşık 10 milyon parçacık yüksek çözünürlüklü kameralarla izlenmiştir.



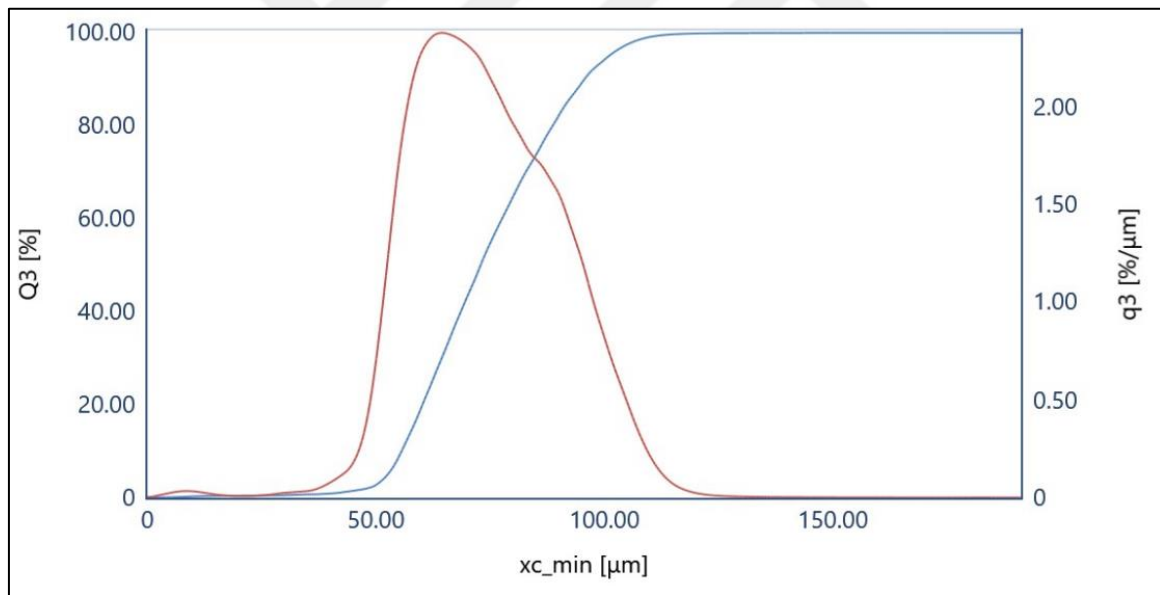
Şekil 5.16. CamsizerX2 ekipmanı tarafından çekilen toz görüntüsü

Dinamik görüntü analizi ile test edildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.5. Tozların parçacık boyutu dağılımı

Toz Boyutları (%)	D10	D50	D90
Toz Boyut değerleri (μm)	56,11	73,40	96,14

Yüzdelere D harfi ile gösterilmiştir. Dolayısıyla, D10=56,11 μm , D50=73,40 μm ve D90=96,14 μm , numunenin %10'unun 56,11 μm 'den, %50'si 73,40 μm 'den ve %90'ı 96,14 μm 'den az olduğu anlamına gelmektedir. Kullanılmış olan toz boyutunun analizi sonucunda istenilen değerler arasında olduğu görülmüştür.



Şekil 5.17. Parçacık boyutu dağılım eğrileri

Küresel parçacıklar, daha iyi paketleme yoğunluğu sağladıkları için deforme parçacıklardan daha fazla tercih edilir. Bu çalışma ile bir toz parçacığının en boy oranını ölçülmüştür. En-boy oranı (genişlik/uzunluk), 0 ile 1 arasında bir ölçekte ölçülür, uzatılmış şekiller daha düşük değerlere sahiptir ve parçacığın küresel olmadığını gösterir. Bu nedenle, en boy oranı, bir tozun üretim süreci için uygun olup olmadığını ölçerken kontrol edilmesi gereken yaygın

bir parametredir. Kullanılan tozun en boy oranı 0,85 olarak elde edilmiştir. Bu da göstermiştir ki, kullanılan tozlar küreselliğe çok yakındır ve kullanım için uygundur.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Inconel 718 ve ZrO_2 tozları ile üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin farklı parametrelerde üretilmesinin mekanik ve termal etkileri araştırılmıştır. Bu tez çalışmasının sonuçları aşağıda listelenmiştir.

- Tez çalışması kapsamında, Inconel 718 ve ZrO_2 tozlarından toz metalürjisi yöntemi ile FDM üretilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda üretim için iki ayrı üretim planı hazırlanmıştır. Bunlardan A ve B planı maksimum ağırlıkça %40 ZrO_2 içeren 5 katmanlı yapı B planı maksimum ağırlıkça %30 ZrO_2 içeren 4 katmanlı yapıdan oluşmaktadır. Ancak A planı %40 ZrO_2 içeren katmanın tutunamamasında dolayı gerçekleştirilmemiş olup B planına geçiş yapılmıştır. Bu durumda 4 katmanlı numunelere ilk olarak soğuk pres yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan bu proses sonrası numunelerde herhangi bir tutunma gözlemlenmemiş bu neden sıcak presleme prosesi ile 3 farklı basınçta (600-700-800 MPa) toplam 9 adet numune üretilmiştir.
- Üretilen numuneler sinterlendikten ve metalografik hazırlıkları yapılmış sonrasında katmanlar stereo mikroskopta incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinden artan sinter sıcaklığı ve basınç değerlerinin numune ara yüzeylerinde çatlaklara sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu durum literatürde artan sinterleme sıcaklığının, ZrO_2 içerisindeki polimorfik dönüşümlerden dolayı malzemeyi daha kırılgan bir yapı haline getirmesi ile ilişkilendirilmiştir. Malzemedeki çatlakları önleyebilmek amacı ile MgO , CaO ve Y_2O_3 gibi diğer oksitler ile yeteri kadar stabilize edilmesinin büyük önem taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan analizler sonucunda, üretilen malzemelerde 4 katmanın istenilen ölçülerde olduğu belirlenmiştir. Katman geçişleri gözlemlendiğinde, ZrO_2 'in homojen olarak dağıldığı değerlendirilmiştir.
- Mikroyapıdaki elementel dağılımın belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen EDS analizi sonucunda katman geçişlerinde istenilen elementel dağılımı sağladığı belirlenmiştir. %100 Inconel 718 içeren katmandan %70 Inconel 718 - %30 ZrO_2 katmanına doğru gidildikçe Zr ve O elementlerinin arttığı yapılan haritalama sonucunda saptanmıştır. Numunelere uygulanan çizgisel EDS analizi sonucunda da, %100 Inconel 718 içeren

katmandan %70 Inconel 718 - %30 ZrO₂ katmana doğru gidildikçe Zr ve O elementlerinin arttığı grafikte desteklenmektedir.

- 45-105 µm olarak tedarik edilen Inconel 718 tozlarının, dinamik görüntü analizi sonucunda 85 µm olarak tespit edilmiştir.
- Yapılan termal iletkenlik analizleri neticesinde, 100 °C’de en düşük termal iletkenlik katsayısının (4.63 W/m.K) 6010 nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (6.94 W/m.K) 7012 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir. 200 °C’de en düşük termal iletkenlik katsayısının (6.1 W/m.K) 8010 nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (8.99 W/m.K) 7011 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir. 300 °C’de en düşük termal iletkenlik katsayısının (11.67 W/m.K) 6010 nolu numuneye ait olduğu ve en yüksek termal iletkenlik katsayısının (17.78 W/m.K) 7012 nolu numuneye ait olduğu gözlemlenmiştir.
- Sertlik analizi sonucunda %100 Inconel 718 katmanında sertlik değerleri 37 HRC olarak, %70 Inconel 718 - %30 ZrO₂ katmanına doğru gidildikçe 45-47 HRC olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Gülcan, O., Simsek, U., Kavas, B. (2021). Eklemeli imalatla üretilen işlevsel olarak derecelendirilmiş metal yapılar. *Mühendis ve Makina*, 62(702), 1-22.
2. Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Ma, A. (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108376.
3. Ichikawa, K., (2001). *Functionally graded materials in the 21st century: a workshop on trends and forecasts*. Norwell, Massachusetts: Springer Science & Business Media.
4. Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., Pityana, S. L. (2012, 4-6 July). *Functionally graded material: an overview*. Proceedings of the World Congress on Engineering. London.
5. Ashwinkumar, A., (2017). Review on functionally graded materials and various theories. *International research journal of engineering and technology*, 4(9), 890-893.
6. Gupta, A., Talha, M. (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 1-14.
7. Huang, C. Y., Chen, Y. L. (2016). Design and impact resistant analysis of functionally graded Al₂O₃–ZrO₂ ceramic composite. *Materials & Design*, 91, 294-305.
8. Miyamoto, Y., Kaysser, W. A., Rabin, B. H., Kawasaki, A., Ford, R. G. (Eds.). (2013). *Functionally graded materials: design, processing and applications*. New York: Springer Science & Business Media, 329.
9. Srivastava, M., Rathee, S., Maheshwari, S., Kundra, T. K. (2019). Design and processing of functionally graded material: review and current status of research. *3D Printing and additive manufacturing technologies*, 243-255.
10. El-Galy, I. M., Saleh, B. I., Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, 1, 1-23.
11. Bhaskararao, K. A., Janardhana, G. R. (2020). Influence of Al₂O₃ and ZrO₂ alloying on microstructure, hardness and flexural strength of Ni based functionally graded composites by vacuum sintering. *Composites Communications*, 22, 100458.
12. Bhattacharyya, M., Kumar, A. N., Kapuria, S. (2008). Synthesis and characterization of Al/SiC and Ni/Al₂O₃ functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1-2), 524-535.
13. Canpolat, Ö., Çanakçı, A., Erdemir, F. (2022). Evaluation of microstructure, mechanical, and corrosion properties of SS316L/Al₂O₃ composites produced by hot pressing. *Materials Chemistry and Physics*, 280, 125826.

14. El-wazery, M., (2013). Electrical and mechanical performance of zirconia-nickel functionally graded materials. *International Journal of Engineering*, 26(4), 375-382.
15. Madan, R., Bhowmick, S. (2022). Fabrication, microstructural characterization and finite element analysis of functionally graded Al-Al₂O₃ disk using powder metallurgy technique. *Materials Today Communications*, 32, 103878.
16. Nath, S., Das, A., Inaba, K., Karmakar, A. (2019). Simulation of laser cutting on functionally graded material used in aviation industry. American Society of Mechanical Engineers. In Gas Turbine India Conference, Delhi, 83532.
17. Orlov, M., Orlov, Y., Glazyrin, V., Orlova, Y. (2018). Investigation of the behaviour of functionally graded materials under impact loads. In *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences, 183, 01049.
18. Ruzuqi, R. (2020). Analysis Two Dimension Heat Conduction in Functionally Graded Materials Using Finite Element Methods. *International Journal of Science and Society*, 2(2), 91-101.
19. Sharma, K., Srinivas, G. (2020). Flying smart: Smart materials used in aviation industry. *Materials Today: Proceedings*, 27, 244-250.
20. Zhang, C., (2019). Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 764, 138209.
21. Gupta, V., (2023). Investigate of Creep Response in Functionally Graded Material Rotating Disc with variable Thickness. *Journal of Machine and Computing*, 011-016.
22. Kattimani, M. A., Venkatesh, P. R., & Kirthan, L. J. (2021). Functionally Graded Material for Aircraft Turbine Disc on Fatigue Failure—An Overview. *Fatigue, Durability, and Fracture Mechanics: Proceedings of Fatigue Durability India 2019*, 423-440.
23. Mathew, T. V., Natarajan, S., Martínez-Pañeda, E. (2018). Size effects in elastic-plastic functionally graded materials. *Composite Structures*, 204, 43-51.
24. Ostolaza, M., (2023). Latest Developments to manufacture metal matrix composites and functionally graded materials through AM: A State-of-the-Art Review. *Materials*, 16(4), 1746.
25. Sadowski, T., Pietras, D. (2016). Heat transfer process in jet turbine blade with functionally graded thermal barrier coating. *Solid State Phenomena*, 254, 170-175.
26. Sarathchandra, D. T., Subbu, S. K., Venkaiah, N. (2018). Functionally graded materials and processing techniques: An art of review. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 21328-21334.
27. Wang, Z. G., (2017). Wear and corrosion behavior of functionally graded nano-SiC/2014Al composites produced by powder metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 729-735.

28. Yan, L., (2017). Fabrication of functionally graded Ti and γ -TiAl by laser metal deposition. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 69, 2756-2761.
29. Karahalil, B., (2012). *Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Fonksiyonel Derecelendirilmiş malzemelerde Gerilme Yığılmalarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 93
30. Yıldız, T., (2021). *Aa7xxx Ve Seramik Parçacıklardan Oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretimi Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük
31. Carroll, B. E., Otis, R. A., Borgonia, J. P., Suh, J. O., Dillon, R. P., Shapiro, A. A., Beese, A. M. (2016). Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling. *Acta Materialia*, 108, 46-54.
32. Arsha, A. G., Jayakumar, E., Rajan, T. P. D., Antony, V., Pai, B. C. (2015). Design and fabrication of functionally graded in-situ aluminium composites for automotive pistons. *Materials & Design*, 88, 1201-1209.
33. Bohidar, S. K., Sharma, R., Mishra, P. R. (2014). Functionally graded materials: A critical review. *International journal of research*, 1(4), 289-301.
34. Chen, X., Bian, H., Song, X., Song, X., Cao, Y., Chen, Y. (2023). Effect of glucose contents on electrochemical corrosion behavior of Ti/ZrO₂ brazing joint in SBF. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 9(3), 1332-1340.
35. Dubey, A., Jaiswal, S., Lahiri, D. (2022). Promises of Functionally Graded Material in Bone Regeneration: Current Trends, Properties, and Challenges. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 8(3), 1001-1027.
36. Mallick, A., Setti, S. G., Sahu, R. K. (2022). Centrifugally cast functionally graded materials: Fabrication and challenges for probable automotive cylinder liner application. *Ceramics International*, 49(6), 8649-8682
37. Oguntala, G. A., Sobamowo G. M., Abd-Alhameed, R. A. (2019). Numerical study of performance of porous fin heat sink of functionally graded material for improved thermal management of consumer electronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(7), 1271-1283.
38. Olatunji-Ojo, A. O., Boetcher, S. K., Cundari, T. R. (2012). Thermal conduction analysis of layered functionally graded materials. *Computational Materials Science*, 54, 329-335.
39. Xu, F., Zhang, X., Zhang, H. (2018). A review on functionally graded structures and materials for energy absorption. *Engineering Structures*, 171, 309-325.

40. Kannan, A. R., Kumar, S. M., Kumar N. P., Shanmugam, N. S. (2020). Process-microstructural features for tailoring fatigue strength of wire arc additive manufactured functionally graded material of SS904L and Hastelloy C-276. *Materials Letters*, 274, 127968.
41. Surya, M. S., Prasanthi, G. (2018). Tribological behaviour of aluminum silicon carbide functionally graded material. *Tribology in Industry*, 40(2), 247.
42. Zhao, P., Wang, S., Guo, S., Chen, Y., Ling, Y., Li, J. (2013). Effects of temperature and holding time on bonding W and W–Cu composites with an amorphous W–Fe coated copper foil as the interlayer by hot-pressing. *Journal of nuclear materials*, 438(1-3), 72-76.
43. Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., Patil, S., Singh R. K. P. (2017). *A review on functionally gradient materials (FGMs) and their applications*. in IOP Conference Series: materials science and engineering.
44. Rong Kimberly, F., Oo, Z., Debnath, S. (2015). Microstructure analysis, physical and thermal properties of Al₂O₃-Al₂TiO₅ functionally graded ceramics for the application of car brake rot. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 23(1), 153-161.
45. Ram, S., K. Chattopadhyay, Chakrabarty, I. (2017). High temperature tensile properties of centrifugally cast in-situ Al-Mg₂Si functionally graded composites for automotive cylinder block liners. *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 84-97.
46. Yeganeh, M., Shahryari, Z., Khanjar, A. T., Hajizadeh, Z. (2023). Inclusions and Segregations in the Selective Laser-Melted Alloys: A Review. *Coatings*, 13(7), 1295.
47. Tan, C., Zhou, K., Kuang, T., (2019). Selective laser melting of tungsten-copper functionally graded material. *Materials Letters*, 237, 328-331.
48. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies* Springer. New York.
49. Mukherjee, T., Zhang, W., DebRoy, T. (2017). An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Computational Materials Science*, 126, 360-372.
50. Zhang, X. (2019). A hybrid process integrating reverse engineering, pre-repair processing, additive manufacturing, and material testing for component remanufacturing. *Materials*, 12(12), 1961.
51. Doğan, M., Uğur, A. (2022). Farklı Basınç Oranlarında Ham Pelet Haline Dönüştürülen Al-15Cu Alaşımının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(3), 1423-1432.
52. Ramazan, C., Kocaman, E. (2023). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Tane İnceltici Üretimi ve Döküm Performansının İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 151-163.

53. Yirik, A. G. (2022) *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Aisi 4340 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Sıcak Deformasyonun Ve Soğutma Ortamının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 126
54. Park, S. J., German R. M. (2010). *Modeling and Simulation of Press and Sinter Powder Metallurgy*. Cleveland: ASM international Materials Park, 530.
55. Cura, M.E., 2002, *Sıcak preslenmiş Wc-Co/B4C kompozitlerinin mekanik, manyetik ve mikroyapısal incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 67.
56. Donachie, M.J. S.J. Donachie, 2002, *Superalloys: a technical guide*. Pittsburgh: ASM international, 245.
57. Moiz, M. (2013). *The influence of grain size on mechanical properties of Inconel 718*. Master of Degree, Linköping University, Department of Management and Engineering, Engineering Materials, Sweden, 93.
58. Smallman, R. E., Bishop, R. J. (1999). *Modern physical metallurgy and materials engineering*, (6) Oxford: Butterworth-Heinemann, 427.
59. Nan, X., Nan, S., Zeng, X., Kang, L., Liu, X., Dai, Y. (2021). Inhibition Kinetics and Mechanism of Glutathione and Quercetin on Acrylamide in the Low-Moisture Maillard Systems. *Journal of Food Protection*, 84(6), 984-990.
60. Paulonis, D. F., Schirra J. J. (2001). Alloy 718 at Pratt & Whitney—Historical perspective and future challenges. *Superalloys*, 718(625,706),13-23.
61. Basile, A. (1991). *A Current TTT Diagram for Wrought Alloy 718, Superalloys 718,625 and Various Derivatives*, Edited by Edward A. Loria.
62. Mahadevan, S. (2010). *Evolution of δ phase microstructure in alloy 718*. in Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy, Pittsburgh, 737-750.
63. Moll, J. H., Maniar, G. N., Muzyka, D. R. (1971). Heat treatment of 706 alloy for optimum 1200 F stress-rupture properties. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2, 2153-2160.
64. Sundararaman, M., Mukhopadhyay, P., Banerjee, S. (1988). Precipitation of the δ -Ni 3 Nb phase in two nickel base superalloys. *Metallurgical transactions A*, 19, 453-465.
65. Belan, J., Kucharikova, L., Tillova, E., Vasko, A. (2017). The influence of applied heat-treatment on in 718 fatigue life at three point flexural bending. *Metalurgija*, 56(1-2), 167-170.
66. Liang, J., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Liu, Z., Cai, J., Zhang, C., Gao, H., Chen, Y. (2014). Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 47, 922.

67. Otitoju, T. A., Okoye, P. U., Chen, G., Yang, L., Okoye, M. O. (2020). Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 85, 34-65.
68. Kurtz, S.M., Ong, K. (2016). *Contemporary total hip arthroplasty: alternative bearings*, in *UHMWPE biomaterials handbook*, Elsevier, 72-105.
69. Xiwen, S., Xie, M., Zhou, F., Jia, G., Hao, X., An, S. (2011). High-temperature thermal properties of yttria fully stabilized zirconia ceramics. *Journal of Rare Earths*, 29(2), 155-159.
70. Lan, Li., Zhang, X., Cui, W., Liou, F., Deng, W., (2020). Temperature and residual stress distribution of FGM parts by DED process: modeling and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 451-462.
71. Gamon, A., Arrieta, E., Gradl, P. R., Katsarelis, C., Murr, L. E., Wicker, R. B., Medina, F., (2021). Microstructure and hardness comparison of as-built Inconel 625 alloy following various additive manufacturing processes. *Results in Materials*, 12, 100239.
72. El-Wazery, M.S., El-Desouky, A.R., Hamed, O.A., Mansour, N.A., Hassan, A. (2012). Preparation and mechanical properties of zirconia/nickel functionally graded materials. *Arab Journal of Nuclear Science and Application*, 45(2), 435-446.
73. Kayabasi, I., Sur, G., Gokkaya, H., Sun, Y. (2022). Functionally Graded Material Production and Characterization using the Vertical Separator Molding Technique and the Powder Metallurgy Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(4), 8785-8790.
74. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J.S., Mukherjee, T. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
75. Srinivas, P. N. S., B. Balakrishna, (2020). Microstructural, mechanical and tribological characterization on the Al based functionally graded material fabricated powder metallurgy. *Materials Research Express*, 7(2), 026513.
76. Surya, M. S., Prasanthi, G. (2022). Effect of silicon carbide weight percentage and number of layers on microstructural and mechanical properties of Al7075/SiC functionally graded material. *Silicon*, 14(4), 1339-1348.
77. Abd-Elwahed, M., Ibrahim, A., Reda, M. (2020). Effects of ZrO₂ nanoparticle content on microstructure and wear behavior of titanium matrix composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8528-8534.
78. Zhu, J., Lai, Z., Yin, Z., Jeon, J., Lee, S. (2001). Fabrication of ZrO₂–NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials chemistry and physics*, 68(1-3), 130-135.

79. Abbas, M. R., Uday, M.B., Noor, A. M., Ahmad, N., Rajoo, S. (2016). Microstructural evaluation of a slurry based Ni/YSZ thermal barrier coating for automotive turbocharger turbine application. *Materials & Design*, 109, 47-56.
80. Basar, Z. S. (2020). *Titanyum, zirkonyum ve bor katkılı a356 alaşımlarının termal iletkenliklerinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
81. Işıker, Y. (2018). *Enerji verimli alternatif yapı malzemelerinin ısı performanslarının belirlenmesine yönelik deneysel yöntem geliştirilmesi/Development of an experimental method for determination of thermal performances of energy efficient alternative building materials*, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa
82. Kalkan, R. (2008). *Kompozit yapı malzemelerinde ısı özellik ölçümü/Thermal property measurement in composite construction materials*, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa
83. Korkmaz, M., Yurtseven, S., Nasibli, H. (2019). *Tübitak Ume'de (Süper) Yalitim Malzemelerinin Termal İletkenlik Ölçümleri. Ölçümbilim Sempozyumu ve Sergisi, Türk Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği, İzmir*
84. Arcasoy, A. (1983). *Seramik Teknolojisi*, Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi. *Seramik Ana Sanat Dalı Yayınları, İstanbul.*
85. Geçkinli, A. E. (1991). *İleri teknoloji malzemeleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
86. Mistarihi, Q., Umer, M. A., Kim, J. H., Lee, B. (2014). *Fabrication of ZrO 2-based nanocomposites for TRU-burning inert matrix fuel*. Korean Radioactive Waste Society, Deajeon, 510, 31-32
87. Woo, W. S., Lee, C. M. (2015). A study of the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with a cylindrical shape in laser-assisted milling. *Applied Thermal Engineering*, 91, 33-42.





Gazili olmak ayrıcalıktır