T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ TABAKALI ALÜMİNYUM KOMPOZİT MALZEMELERİN ARDIŞIK SIKIŞTIRMA DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

SERHAN KARAMAN GENÇ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

EDİRNE-2022

SERHAN KARAMAN GENÇ'in hazırladığı "**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ TABAKALI ALÜMİNYUM KOMPOZİT MALZEMELERİN ARDIŞIK SIKIŞTIRMA DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Prof. Dr. Metin AYDOĞDU

Prof. Dr. Anıl NOMAK AKDOĞAN

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Dr.Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

Dr.Öğr. Üyesi Andaç ŞAHİN MESUT

Tez Savunma Tarihi: 27/12/2021

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

27/12/2021
Serhan KARAMAN GENÇ
İmza

Doktora Tezi

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tabakalı Alüminyum Kompozit Malzemelerin Ardışık Sıkıştırma Döküm Yöntemiyle Üretilebilirliğinin İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği

ÖZET

Bu tezde, doğrudan yarı-katı karıştırma ve ardışık sıkıştırma döküm yöntemleri kullanılarak seramik takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler fonksiyonel derecelendirilmiş yapıda üretilmiştir (FD-Al-MMK). Yarı-katı haldeki alüminyum içine SiCp takviyelerinin mekanik olarak karıştırılmasıyla farklı takviye oranlarına sahip alüminyum kompozit malzemeler hazırlanmış ve sıvı halde üst üste kalıp içerisine dökülüp her tabaka basınç altında katılaştırılarak FD-Al-MMK'lar üretilmiştir. İki tabaka arasında meydana gelen kısmi ergime ve uygulanan basıncın etkisiyle tabakalar arasında birleşme sağlanmıştır. Farklı takviye oranları içeren dökümlerin tekrarlanmasıyla istenen kalınlıkta ve özellikleri kesit boyunca değişen bir yapı oluşturulmuştur. FD-Al-MMK malzemenin özelliklerini belirlemek için mekanik ve metalografik incelemeler yapılmıştır.

Yıl : 2021

Sayfa Sayısı : 137

Anahtar Kelimeler : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Metal Matrisli Aliminyum Kompozit, Ardışık Döküm, Yarı-Katı Karıştırma, SiC, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Termal Özellikler.

Doctoral Thesis

Investıgatıon of The Manufacturing Materials of Functionally Graded Layered Aluminum Composite Materials by Sequential Compression Casting Method

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this thesis, ceramic reinforced aluminum matrix composite materials were produced in a functionally graded structure using direct semi-solid mixing and sequential squeeze casting methods (FG-Al-MMC). By mixing mechanically SiCp reinforcements into semi-solid aluminum, aluminum composite materials with different reinforcement ratios have been prepared and poured into the mold on top of each other in liquid form and FG-Al-MMCs have been produced by solidifying each layer under pressure. With the effect of partial melting occurring between the two layers and the pressure applied, bonding was achieved between the layers. By repeating castings containing different reinforcement ratios, a structure with the desired thickness and features varying throughout the section was created. Mechanical and metallographic examinations were carried out to determine the properties of FG-Al-MMC material.

Year : 2021

Number of Pages : 137

Keywords : Functionally Graded Materials, Functionally Graded Metal Matrix Aluminum Composite, Sequential Casting, Semi-Solid Stirring, SiC, Mechanical Properties, Microstructure, Thermal Properties.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince güven ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve önerileriyle beni yönlendiren değerli hocam, tez danışmanım, Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN'a, çalışmalarım boyunca bir an olsun yardımlarını ve desteğini esirgemeyen değerli hocam, Doç. Dr. Vedat TAŞKIN'a, tavsiyeleri ile bana destek olan hocalarım, Prof. Dr. Metin AYDOĞDU ve Dr. Öğr. Üyesi Andaç ŞAHİN MESUT'a, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin, araştırmacılar için sunduğu proje (Proje Numarası: 2017/22 ve 2016/173) olanağından yararlandığım, tezimin gerçekleşmesinde maddi kaynak sağlayan değerli kurumum TRAKYA ÜNİVERSİTESİ'ne, çalışmalarım sırasında ümit veren ve destek olan arkadaşlarım Araş. Gör. Dr. Pınar AYDAN DEMİRHAN, Araş. Gör. Dr. Hacer AKHAN ve Araş. Gör. Dr. Tolga AKSENCER'e, sabır ve desteği ile bana güç veren eşim Mert Aykut GENÇ'e, beni bugünlere getiren annem Hanife KARAMAN ve babam Ali KARAMAN'a, çalışmalarım süresince sevgisini esirgemeyen, güç aldığım canım kızım Masal GENÇ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
SİMGELER DİZİNİ ..... **x**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xiv**
BÖLÜM 1 ..... **1**
GİRİŞ **1**
1.1. Tezin Konusu ve Kapsamı 1
1.2. Literatür Özeti 3
1.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme 14
1.4. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Tarihçesi 20
1.5. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Kullanım Alanları 22
1.6. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Yöntemleri 27
1.6.1. Buhar biriktirme yöntemi (VD) 31
1.6.2. Termal sprey 34
1.6.3. Savurma döküm 36
1.6.4. Kendiliğinden Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi (SHS) 36
1.6.5. Bant döküm 37
1.6.6. Jel döküm 37
1.6.7. Elektroforetik Biriktirme/Çökeltme 38
1.6.8. Kimyasal Çözelti Biriktirme (CSD) 39
1.6.9. Lazer Biriktirme 39
1.6.10. Yönlü Katılaşma 40
1.6.11. Sedimantasyon 40
1.6.12. Elektro Kimyasal Geçiş 41

1.6.13. Plazma Sinterlemesi 41
1.6.14. Toz Metalürjisi 42
1.6.15. Sıkıştırma Döküm 43
BÖLÜM 2 44
MATERYAL VE METOT 44
2.1. Malzemeler 44
2.1.1. Matris Malzemesi 44
2.1.2. Takviye Malzemesi Seçimi 45
2.2. Deney Düzeneği 46
2.2.1. Sıkıştırma Döküm Presi 46
2.2.2. Kalıplar ve Kalıp Isıtıcıları 48
2.2.3. Ergitme ve Karıştırma Ünitesi 50
2.3. Üretim Prosesi 54
BÖLÜM 3 62
MALZEME KARAKTERİZASYONU 62
3.1. Numune Hazırlama 62
3.2. Metalografik İnceleme 63
3.3. Sertlik Ölçümleri 64
3.4. Yoğunluk Ölçümleri 66
3.5. Spektrometre Analizi 67
3.6. SEM-EDS Analizi 68
3.7. Dilatometre Testi 69
3.8. Üç Nokta Eğme Testleri 71
3.9. Isıl İşlemler 73
BÖLÜM 4 75
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 75
4.1. Seramik Takviyelere Uygulanan Isıl İşlem Sonuçları 75
4.2. FD-Al-MMK Malzeme Üretimi 75
4.3. Spektrometre Analizi Sonuçları 77
4.4. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları 77
4.5. Sertlik Testi Sonuçları 80
4.6. Metalografik İnceleme Sonuçları 84

4.7. SEM-EDS Analiz Sonuçları..... 87
4.8. Dilatometre Test Sonuçları 93
4.9. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları..... 96
BÖLÜM 5..... 101
SONUÇ VE ÖNERİLER..... 101
KAYNAKLAR..... 104
ÖZGEÇMİŞ..... 119
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER..... 120

SİMGELER DİZİNİ

Al	Alüminyum
CH_4	Metan
H_2	Hidrojen
HV	Vickers sertlik
K	Kelvin
K_{IC}	Kırılma tokluğu
MZP	Monolitik zirkonya polikristal
Ni	Nikel
TiC	Titanyum karbür
SiC	Silisyum karbür
SiC_P	Silisyum karbür parçacık
TZP	Tetragonal zirkonya polikristal
ρ	Yoğunluk

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	Alüminyum alaşım
APS	Atmosferik plazma spreyi
CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
CSD	Kimyasal çözelti biriktirme
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DLMS	Direk lazer matel biriktirme
EPD	Elektroforetik çökeltme
EPMA	Elektron ışınlı mikro analiz
ETC	Elektrotermal yanma
FD-Al-MMK	Fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum metal matrisli kompozit
FDM	Fonksiyonel dereceli malzeme
FDMMK	Fonksiyonel derecelendirilmiş metal matrisli kompozit
MMK	Metal matrisli kompozit
MOD	Metallo-organik ayrışma
MRI	Manyetik rezonans görüntüleme
N	Newton
Pa	Paskal
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
SEC	Spesifik enerji tüketimi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SHS	Yüksek sıcaklık sentezi
SHS	Kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentesi
SPS	Plazma sinterleme

TEM	Geçirimli elektron mikroskobu

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1. AA7075 alaşımının fiziksel özellikleri. 45
Çizelge 2. 2. AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu. 45
Çizelge 2. 3. AA7075 alaşımının mekanik özellikleri. 45
Çizelge 2. 4. SiCp takviyelerinin karakteristik özellikleri. 46
Çizelge 2. 5. SiCp takviyelerinin kimyasal bileşimi (Ürkmez, 2004). 46
Çizelge 2. 6. Kullanılan SiCp takviyeler. 46
Çizelge 2. 7. Optimum basınç ve sıcklık belirleme çalışmaları. 57
Çizelge 3. 1. Yoğunluk ölçümü bölgeleri. 66
Çizelge 4. 1. Farklı tabakaların spektrometre sonuçları. 77
Çizelge 4. 2. Yoğunluk ölçümü sonuçları. 79
Çizelge 4. 3. Takviye oranlarına bağlı sertlik değişimi. 81
Çizelge 4. 4. Dilatometre test sonuçları. 93
Çizelge 4. 5. Ara bölge ve kesit boyunca yapılan dilatometre test sonuçları. 94
Çizelge 4. 6. FD-Al-MMK malzeme takviye oranına bağlı eğme gerilmeleri. 97
Çizelge 4. 7. FD-Al-MMK malzeme birleşme bölgeleri eğme gerilmeleri. 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Ağaç kesitinden; merkezden dışa doğru gözenek sıklaşması ve küçülmesiyle oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş yapı örneği 15
Şekil 1. 2. Bambudaki fonksiyonel dereceli yapı 15
Şekil 1. 3. At toynağı kesitindeki fonksiyonel dereceli yapı 15
Şekil 1. 4. Palmiye ağacı gövde kesiti, dinazor kemiği kesiti ve geyik boynuzu kesiti üzerinde benzer fonksiyonel derecelendirilmiş yapılar 16
Şekil 1. 5. İnsan kemiğine ait dereceli yapı örneği 16
Şekil 1. 6. İnsan dişi kesitinde diş minesi-dentin arası (DEJ) ve dentin-sementum arası (CDJ) geçiş bölgelerindeki FDM yapılar 16
Şekil 1. 7. Yüksek sıcaklık farklılığında termal şoka dirençli malzeme gelişiminde oluşturulan FDM örneği 17
Şekil 1. 8. Malzeme yüzeyinde (a), malzeme birleşme noktasında (b) ve malzeme tamamında FDM 18
Şekil 1. 9. Sürekli (a) ve kademeli (b) yapıda FDM 18
Şekil 1. 10. (a) Kompozisyon, (b) mikro yapı ve (c) porozite derecelendirilmesiyle oluşturulmuş FDM yapılar. 19
Şekil 1. 11. Hacimsel dağılım oranının derecelendirilmesi (a), boyutsal derecelendirme (b), oryantasyon derecelendirmesi (c) ve şekil değişimi derecelendirilmesi (d) FDM yapı örnekleri 19
Şekil 1. 12. (a) Scopus verilerine göre FDM üzerine yapılan yayın sayıları, (b) bu yayın sayılarında ülkelerin katkı payları 21
Şekil 1. 13. FDM uygulama alanları. 22
Şekil 1. 14. Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan bazı FDM yapılı parçalar 24
Şekil 1. 15. Otomotivde kullanılan bazı FDM yapılı parçalar 25
Şekil 1. 16. FDM kemik implantı örneği 25
Şekil 1. 17. FDM bir diş implantı örneği 26
Şekil 1. 18. FDM üretim yöntemleri ve yapılan çalışmalara göre dağılımı 28

Şekil 1. 19. FDM'lerin üretim yöntemlerine göre sınıflandırılması 28
Şekil 1. 20. FDM üretim yöntemlerinin ürün şekli karmaşıklığına göre sınıflandırılması 29
Şekil 1. 21. FDM üretim yöntemlerin derece kontrol edilebilirliğine göre sınıflandırılması 29
Şekil 1. 22. FDM üretim yöntemlerinin kalıntı gerilme durumuna göre sınıflandırılması 30
Şekil 1. 23. FDM üretim yöntemlerinin enerji sarfiyatı durumuna göre sınıflandırılması 30
Şekil 1. 24. FDM üretim yöntemlerinin toplam maliyete göre sınıflandırılması..... 31
Şekil 1. 25. Buhar biriktirme yöntemi 32
Şekil 1. 26. FDM üretimde kullanılan Buhar biriktirme yöntemlerinin sınıflandırılması 33
Şekil 1. 27. FDM üretimde kullanılan termal sprey yöntemi 34
Şekil 1. 28. FDM üretimde kullanılan termal sprey yöntemin alt kolları..... 35
Şekil 1. 29. Savurma döküm yöntemi 36
Şekil 1. 30. Jel döküm. 38
Şekil 1. 31. Toz metalurjisi yöntemi 42
Şekil 2. 1. Pres önünde ısıtma tertibatı için hazırlanan tezgâh ve yapısı..... 48
Şekil 2. 2. Döküm kalıbı (a) üst kalıp (b) alt kalıp..... 49
Şekil 2. 3. Üst ve alt kalıp teknik çizimleri..... 49
Şekil 2. 4. Alt plaka ve tutucu plaka..... 50
Şekil 2. 5. Üst ve alt kalıp ısıtma tertibatı..... 50
Şekil 2. 6. Kompozit malzeme hazırlama ünitesi..... 51
Şekil 2. 7. Ergitme potası, yuvası ve fırın içi görünüm..... 52
Şekil 2. 8. Fırın sıcaklık-zaman karakteristik eğrisi..... 52
Şekil 2. 9. Yarı-katı metal karıştırma işlemlerinde kullanılan karıştırıcılar. 53
Şekil 2. 10. Deney düzenek ve ekipmanları şematik yerleşim planı..... 54
Şekil 2. 11. FD-AL-MMK üretim işlem basamakları şeması..... 54
Şekil 2. 12. Küçük parçalar halindeki Al 7075 55
Şekil 2. 13. Seramik takviye malzemelerine uygulanan ısıl işlemde kullanılan fırın ve soğutma evreleri. 56

Şekil 2. 14. Malzemede ilk tabaka üretim işlem basamakları şeması. 58
Şekil 2. 15. Döküm kalıpları ve pres görünümü. 59
Şekil 2. 16. FD-Al-MMK üretim işlem basamakları..... 60
Şekil 2. 17. FD-Al-MMK malzeme..... 61
Şekil 3. 1. Hassas kesme cihazı ve FD-Al-MMK kesitleri..... 63
Şekil 3. 2. Ana gövdeden çıkarılan kesit parçaların şematik gösterimi..... 63
Şekil 3. 3. Metalografik inceleme hazırlık işlemleri şematik gösterimi..... 64
Şekil 3. 4. Struers Rotopol 25- Rotoforce 4 otomatik zımpara- parlatma cihazı ve Nikon Eclipse L150 Optik mikroskop..... 64
Şekil 3. 5. Qness GMBH Q10A+ tam otomatik mikro sertlik ölçüm cihazı ve Universal sertlik ölçüm cihazı..... 65
Şekil 3. 6. Hazırlanan FDM numuneler üzerinde mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar 65
Şekil 3. 7. Yoğunluk ölçümü numuneleri ve numunelerin alındıkları bölgelerin şematik gösterimi..... 66
Şekil 3. 8. Hassas kesme cihazı ve yoğunluk ölçüm cihazı..... 67
Şekil 3. 9. Optik Emisyon Spektrometre (OES) cihazı. 68
Şekil 3. 10. Spektrum analizi numuneleri ve ölçüm bölgelerinin şematik gösterimi..... 68
Şekil 3. 11. SEM-EDS analizi için belirlenen inceleme bölgelerinin şematik resmi..... 69
Şekil 3. 12. SEM-EDS cihazı..... 69
Şekil 3. 13. Dilatometre testi için kesit boyunca numune çıkarılan bölgeler. 70
Şekil 3. 14. Netzsch DIL 402 C dilatometre test cihazı 71
Şekil 3. 15. Üç nokta eğme testi deney numuneleri ve numune alınan bölgeler. 72
Şekil 3. 16. Üç nokta eğme test cihazı..... 72
Şekil 3. 17. Üç Nokta Eğme Testi (K1 numunesi)..... 73
Şekil 3. 18. T6 ısıl işlemi aşamaları. 73
Şekil 3. 19. Buzlu su ile soğutma tertibatı. 74
Şekil 3. 20. Isıl işlem fırını Protherm ELV..... 74
Şekil 4. 1. Isıl işlem sonrası takviye tozları SEM ve EDS analizleri. 75
Şekil 4. 2. FD-Al-MMK malzeme örnekleri..... 76
Şekil 4. 3. FD-Al-MMK numune kesitindeki dereceli yapı. 76
Şekil 4. 4 Yoğunluk ölçümü yapılan numuneler..... 78

Şekil 4. 5. FD-Al-MMK numune kesit boyu yoğunluk dağılımı grafiği..... 79
Şekil 4. 6. FD-Al-MMK numunesi üzerindeki farklı kademelerden alınan sertlik sonuçları. 81
Şekil 4. 7. FD-Al-MMK numunesi üzerindeki farklı kademelerden alınan mikro sertlik sonuçları. 82
Şekil 4. 8. FD-Al-MMK numunesi T6 ısıl işlemi sonrası sertlik sonuçları..... 83
Şekil 4. 9. FD-Al-MMK numunesi T6 ısıl işlemi sonrası mikro sertlik sonuçları..... 83
Şekil 4. 10. FD-Al-MMK malzmenin ara ve ana bölgelerinden alınan optik mikroskop görüntüleri. 85
Şekil 4. 11. FDM yapı mikroskobik görünüm. 86
Şekil 4. 12. SiC takviye tozlarının SEM ve EDS analizleri..... 87
Şekil 4. 13. Alüminyum matris içinde SiC takviye parçacıklarının SEM ve EDS analizleri. 88
Şekil 4. 14. Sırasıyla x1000, x2500 ve x5000 büyütmede SEM görüntüleri..... 88
Şekil 4. 15. %0-%5 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü. 89
Şekil 4. 16. %5-%10 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü. 90
Şekil 4. 17. %10-%15 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü. 90
Şekil 4. 18. %15-%20 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü. 91
Şekil 4. 19. %0, %5, %10, %15,%20 SiC takviyeli bölgelerden SEM görüntüleri. 92
Şekil 4. 20. a=%10-15-20 SiC/kesiti boyunca alınan ve b=%0-5-10 SiC/kesiti boyunca alınan dilatometre test numuneleri. 95
Şekil 4. 21. Ana ve ara bölgelerden alınan dilatometre test numuneleri. 96
Şekil 4. 22. H1 kodlu üç nokta eğme numunesi..... 98
Şekil 4. 23. H1-H5 kodlu üç nokta eğme numuneleri. 98
Şekil 4. 24. H1 kodlu üç nokta eğme numunesi..... 99
Şekil 4. 25. K1-K4 kodlu 3 nokta eğme numuneleri. 100

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme; uzay teknolojilerinde ve yüksek teknoloji ürünlerin farklı özelliklere sahip yapıların bir arada bulunmasıyla istenen değişken mekanik ve fiziksel (dayanım, tokluk, korozyon, ısıl iletim v.b.) özelliklerin kontrolü amacıyla ortaya çıkmış ve bu fonsiyonelliği sayesinde yaygın uygulama alanı bulmuştur.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler; savunma sanayi, havacılık ve uzay sanayi, enerji, nükleer enerji, medikal endüstri, bio malzemeler, otomativ, elektronik akıllı yapılar v.b. uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle ilgili gün geçtikçe ihtiyaca yönelik yeni üretim yöntemleri denenmekte ve modifiye edilerek çeşitlendirilmektedir. Bu da her bir ihtiyaca özgün tasarlanan FDM'ye, çeşitli üretim yöntemlerinden faydalanmayı beraberinde getirmiştir. Böylece denenen bir çok farklı üretim yöntemi, FDM'nin farklı uygulama alanları bulmasına ışık tutmuş ve ileri mühendislik malzemeleri ihtiyaçlarına çözüm olarak kullanım ağını genişletmiştir. Fakat bunların bir çoğu ince film tabakası ve ya geçiş bölgesinde FDM oluşturmaya yönelik çalışmalar olmuştur. Bu nedenle daha kütlesel yapıda FDM üretimine yönelik literatürde görülen açığa katkı sağlamak ve FDM üretim yöntemi çeşitliliğine katkıda bulunmak amacıyla doğrudan yarı-katı karıştırma ve ardışık sıkıştırma döküm yöntemi kullanılarak FDM üretim çalışması yapılmıştır.

1.1. Hipotez, Tezin Konusu ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum metal matrisli kompozit malzemenin doğrudan yarı-katı karıştırma ve ardışık sıkıştırma döküm yöntemi

kullanarak üretmek suretiyle, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretiminde kullanılan çeşitli üretim yöntemlerine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Bu bağlamda literatürde FDM üretimi için kullanılmış üretim yöntemlerinin teorik ve deneysel çalışmaları incelenmiştir. Literatür taraması neticesinde farklı yöntemlerle üretilmiş FDM üretim yöntemlerinin çoğunun ince film (genellikle kaplama) tabakası üretmeye yönelik olduğu görülmüş olup daha büyük hacimli/kütlesel formda FDM üretim yöntemlerine yönelik halen çalışılmamış yöntemlerin olduğu görülmüştür. Bu kapsamda; farklı üretim yöntemlerinden kaynaklı; homojen olmayan karıştırma, takviye malzemesinin topaklanması, karışım dışına itilmesi, ayrışması ve istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşması vb. sorunları azaltmak amacıyla yarı-katı karıştırma yöntemiyle ardışık sıkıştırma döküm yöntemini birleştirerek daha yüksek dayanımlı ve porozite oranı düşük, farklı ve birbirine yakın takviye oranlarına sahip tabakalar ile derecelendirilmenin sağlandığı, daha büyük hacimlerde FDM üretilebileceği öngörülmüştür. Bu hipotezden yola çıkarak, 110x110x50 mm hacimli 5 tabakadan oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum metal matrisli kompozit malzemenin elde edildiği çalışmada; matris malzemesi olarak Al7075 ve takviye malzemesi olarak SiC parçacıkları kullanılmış olup, alüminyum matris malzemesi tarafından iyi ısıtılabilmesi için yüzeyde gereken oksit tabakası SiC parçacıklarına ısıl işlem uygulanarak oluşturulmuştur. FD-Al-MMK malzemesi üretilirken her bir tabakanın ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 oranında SiC_p takviyeli kompozit karışımları ayrı ayrı yarı-katı halde karıştırılarak oluşturulmuştur. Her bir tabaka sırasıyla oluşturulurken; kalıba kompozit karışım dökülüp pres vasıtasıyla sıkıştırılarak basınç altında katılaşması sağlanmıştır. Bu aşamada uygulanan ardışık sıkıştırma döküm yönteminde önemli olan basınç ve sıcaklık parametreleri yapılan ön çalışmalarla belirlenmiş olup malzeme üretimi süresince sabit tutulmuştur. Uygulanan basıncın etkisiyle ve tabakalar arası meydana gelen kısmi ergime ile tabakalar arası birleşme sağlanmış olup belirlenen kalınlıkta ve özellikleri kesit boyunca değişen derecelendirilmiş bir yapıdaki FD-Al-MMK üretimi gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin yapısını, ara geçiş bölgelerini ve SiC parçacıklarının dağılımını incelemek amacıyla metalografik SEM-EDS incelemeleri takviye oranlarındaki artışın ve ardışık sıkıştırma dökümün malzemede kesit boyunca oluşturacağı sertlik dağılımını tespit etmek amacıyla normal ve T6 ısıl

işlemli sertlik ve mikro sertlik ölçümleri, gözenekliliğin belirlenmesi amacıyla yoğunluk ölçümleri, kimyasal birleşimlerin belirlenmesi amacıyla spektrometre analizi yapılmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde, derece geçişi tabakalı yapıdaysa, bu tabakalar arası ısıl genleşme katsayısının ısıl gerilmeler sebebiyle malzeme tabaka arası bağlantı kopması ve çatlamalara sebep olmaması açısından birbirine yakın olması istediğinden, ısıl genleşme katsayılarını tespit etmek amacıyla dilatometre analizi, malzeme dağılımını ölçmek ve parçacık takviyelerin çentik etkisinden kaçınmak amacıyla da üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Özetle 5 tabakalı FD-Al-MMK malzeme yarı-katı karıştırma ve ardışık sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilerek, özellikleri detaylı bir biçimde deneysel olarak incelenmiştir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen bu deneysel çalışmanın daha büyük hacimli fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretim yöntemlerine katkı sağlayarak bu alanda literatüre ışık tutması hedeflenmiştir.

Tezin birinci bölümünde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin üretim çeşitliliğinin ve yeni üretim yöntemlerinin öneminden bahsedilmiş, tezin konusu ve kapsamı sunulmuş, ilgili literatüre yer verilerek, FDM ve üretim yöntemlerine ait genel bilgiler literatürle desteklenerek verilmiştir. İkinci bölümde üretim için gerekli materyal seçimi, üretim tesisatının oluşturulması ve üretim prosesi anlatımına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde malzeme karakterizasyonu için yapılacak test ve analizlerin hazırlıklarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır. Beşinci bölümde elde edilen bulgular özetlenmiş ve önerilere yer verilmiştir.

1.2. Literatür Özeti

Sasaki ve Hirai (1994), CVD tekniği ile fonksiyonel olarak derecelendirilmiş SiC/C malzeme ürettiler. Yüzey sıcaklığını 1700°K dan 1150°K'ya indirerek ürettikleri malzemenin termal şok direncini ve termal bariyer performansını incelediler. Isıtma işleminden kaynaklı SiC / Grafit ara yüzündeki artık gerilmeye bağlı dikey çatlaklar olsa da ürettikleri fonksiyonel derecelendirilmiş yapıda bozulma ve çatlama olmadığını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2014), yarı iletken uygulama için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ZnO'nun CVD prosesinde reaksiyon kaynağı oranını ve gaz akış oranını değiştirmenin etkisini incelediler. Fonksiyonel olarak derecelenmiş malzemelerdeki tabakaların kalınlık ve kompozit profillerinin hassas kontrolü, kimyasal buhar infiltrasyonu (CVI) kullanılarak elde edilebilir. Kawase, Tago, Kurosawa, Utsumi ve Hashimoto (1999), CVI ve CVD yöntemiyle fonksiyonel dereceli C / SiC üretim sürecini incelediler. FDM örneklerinin hızlı bir sıcaklık değişiminden (1000°C ila 0°C) sonra, hiçbir çatlak gözlenmedi ve ara yüzey yapısı bozulmadan kaldığını gözlemlemişlerdir.

Gaz içeriğindeki ve akış hızındaki değişiklikler sadece CVD ve CVI işlemleriyle üretilen FDM'nin nihai özelliklerini etkiler. FDM'lerin kalınlığını, kimyasal bileşimini ve mikro yapısını kontrol etmek için CH_4 ve H_2 içerik oranlarındaki değişimi fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TiC / SiC / grafit üretimine etkisini araştıran Jung, Park ve Choi (1997), bu değişimin H ile sağlanmasının CH_4'e göre daha kolay kontrol edildiğini bulmuşlardır.

Termal bariyer kaplama, yaygın olarak kabul edilen ve çoğunlukla püskürtme işlemi ile üretilen FDM'lerin en önemli uygulamalarından biridir (Choi vd., 2016). Jet motorlarında süper ısınma gaz türbini motor parçaları ve tungsten kaplı damperler, termal bariyer kaplamaların geliştirilmiş yorulma ve sürünme direncini ve yakıt verimliliğini sağlamak için uygulandığı bazı örneklerdir. Bununla birlikte, taban ve kaplama malzemesi arasındaki termal genleşme uyumsuzluğu termal bariyer kaplamasının geliştirilmesinde ciddi bir sorundur (Kawasaki ve Watanabe, 1997, Kim, Kim ve Park, 2003; Miller ve Lowell, 1982). Bu sorunu gidermek için kaplama malzemeleri fonksiyonel dereceli kaplama ile değiştirilmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş termal bariyer kaplamalarda ara katman/geçiş bölgesi ve ana malzeme arasındaki termal genleşme katsayılarındaki süreksizliğin kayda değer ölçüde azaldığı ve kademeli termal bariyer kaplamalarla karşılaştırıldığında kaplamadaki kalıntı gerilmenin en aza indirildiği bildirilmiştir (Pan ve Chen, 1995, Hu, 1997).

Khor ve Gu (2000), fonksiyonel gerilmeli ZrO2 / NiCoCrAlY performansı üzerindeki kalıntı gerilmelerin etkisini araştırmışlar ve tabaka kalınlığında ve kaplama sayısında azalma ile kalıntı gerilmenin arttığını bulmuşlardır. Bu sonuçlar Kim, Kim ve Park (2003), tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla örtüştüğünü göstermişlerdir.

Cannillo, Lusvarghi ve Sola (2008), Ti_6Al_4V üzerinde atmosferik plazma spreyi (APS) ile fonksiyonel olarak derecelenmiş TiO2-hidroksiapatit (HAp) biriktirmiştir. İşlemin optimizasyonu, HAp kristalinin ve Vickers sertliğinin artmasına neden olan bir son işlemin geliştirilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda (750 °C'den fazla), yeniden kristalleşme sonucu oluşan stres, zayıf bir ara yüze yol açan çatlak ilerlemesini hızlandırdığını belirlemişlerdir.

Stewart, Ahmed ve Itsukaichi (2004), yuvarlanma temas yorulması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Termal sprey yöntemiyle üretilmiş fonksiyonel dereceli termal bariyer kaplamaların üretim sonrası işlemi olarak sıcak izostatik presleme ve ısıl işlem uygulayarak bu işlemlerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelediler. Yüksek sıcaklıkta uygulanan izostatik preslemede işlemlerinde; yüksek yuvarlanma temas yorulmasına, yüksek sertlik ve yüksek Elastisite modülüne ulaşmışlardır.

Patlamalı püskürtme tekniğine dayanan farklı YSZ / NiCrAIY atış kontrolü kullanılarak daha iyi yüzey FDM kaplaması elde etmişlerdir (Kim, Kim ve Park, 2003). YSZ'nin miktarını FDM'de değiştirerek, NiCrAlY'nin metalik davranışına kıyasla YSZ'nin seramik karakteristiğine bağlı olarak kaplamanın sertlik değeri değişmiştir. Atış kontrol tekniğinin üniform bir kaplamaya yol açtığı ve kaplama sırasında bir bileşenin çökeltildiği için kaplama sırasında bozunma, oksidasyon ve faz dönüşümünü önlediği görülmüştür. Termal şok direncinin FDM kaplamasının doğası gereği önemli ölçüde iyileştiğini görmüşlerdir.

Plazma sprey kaplamanın MgO-ZrO / NiCrAl kaplamasında üzerindeki etkisi TEM, SEM ve EPMA karakterizasyonu ile araştırılmıştır (Pan ve Xu, 2003). Mikroyapı incelemelerinde, Cr ve Al'in püskürtülen lamel sınırları boyunca oksit oluşturma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kırık yüzey analizi, sırasıyla metallerin ve seramik fazların sünek doğası ve taneler arası bölünme nedeniyle, FDM'de, FDM olmayan numunelere kıyasla daha iyi mekanik özelliklere yol açtığını göstermiştir. Plazma spreyi ile üretilen FDM'lerin yapısal, mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen tüm tartışılmış faktörlerin yanı sıra, plazma sprey tekniğinin etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek bazı ek parametreler de vardır. Bu parametreler; biriktirme sırasında torç-tipi, iç çap, güç, püskürtme mesafesi, geçiş sayısı, toz enjeksiyon sistemi, taşıyıcı gaz, plazma

gazı bileşimi ve akış, soğutma sistemi, soğutma gazı, basınç ve uygulama sıcaklığını içerdiğini belirlemişlerdir (Cannillo, Lusvarghi ve Sola, 2008).

Park, Kang, Jung ve Paik (2008), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Al_2O_3/ZrO_2'nin mikroyapısal ve mekanik davranışlarını, jel-dökümü ile hazırlanan substratlarla daldırma ile üretilmişlerdir. Alt tabakadan dış tabakaya kadar sertlikte düzgün bir değişim gözlenmiştir. AZ FDM'nin kaplama kalınlığı ZA FDM'den (iç kısım Al_2O_3 dış kısım ZrO_2 = AZ; iç kısım ZrO_2 dış kısım Al_2O_3 = ZA olarak tanımlanmış) daha büyük olduğunu ve sırasıyla 300 ve 200 μm değerlerinde olduğunu belirtmişlerdir. ZA FGM'de hiçbir çatlama gözlenmemiş olup, ancak AZ FDM'de anizotropik çatlak büyümesi rapor edilmiştir ve arayüz yönüne paralel uzunluktaki çatlağı SEM görüntüleri ile göstermişlerdir.

Titanyum karbür alüminid-alüminyum-demir FDM halkaları, 2925°C'nin üzerinde işlem sıcaklığında santrifüj destekli kendi kendine ilerleyen SHS yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Mahmoodian vd., 2014). Korozyon tabakasının oluşması nedeniyle nemli atmosfere maruz kaldıktan sonra TiO_2 fazı oluşturmak için yaklaşık üç güne ihtiyaç duyulmuştur. Önceden tasarlanmış geometriye ve birkaç intermetalik katmana sahip, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TiC-Fe-Al_2O_3'te, esas olarak Ti_3Al ve TiAl, merkezkaç kuvvetlerinin doğası ve yüksek sıcaklık işlemesi nedeniyle gelişmiş yapısal ve mekanik özellikler oluştuğunu göstermişlerdir.

Zhang, Han, Du ve Wood (2000), 200ton hidrostatik bir pres kullanarak reaktif kompaksiyon sentezi yoluyla üretilen fonksiyonel dereceli TiC-Ni'nin mekanik ve yapısal davranışlarındaki değişiklikleri incelediler. En yüksek mekanik özelliklere optimum miktarda Ni (yaklaşık %20) ile ulaşılmıştır. Mekanik özellikler, yoğunluğa ve Ni içeriğine güçlü bir şekilde bağlıdır. Sertlik, eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğu başlangıçta artar (%20 Ni) ve daha sonra artan Ni içeriği ile azalır. Sertlik ve eğme mukavemeti, sırasıyla, yaklaşık olarak %20 ve %30 Ni oranlarında maksimum değere ulaştığını belirlemişlerdir.

Young modülü, artan Ni içeriği ile azalır. Daha yüksek Ni içeriğine sahip olan katmanlarda gözenekliliğin varlığı ve artışı; yoğunlukta ve mekanik özelliklerde azalmaya yol açmıştır. Shon ve Munir (1998), SHS yöntemi ile fonksiyonel dereceli TiC-Cu üretim sürecini elektromanyetik yanma ve radyal ısıtma olmak üzere iki farklı teknik

kullanarak incelediler. Bu tekniklerinin malzeme performansına etkisini karşılaştırarak; elektrotermal yanma (ETC) ile üretilen örneklerin, ateşleme yöntemine göre daha düşük bir gözeneklilik oranına sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, yüksek bakır oranına sahip FDM'lerin sadece ETC yöntemi ile sentezlenebileceğini de bulmuşlardır.

Burkes ve Moore (2007), yanma metotları ile NiTi-TiCx üretimi sırasında işleme ve mikroyapısal değişikliklerin kinetiğini incelemişlerdir. Bu NiTi'nin şekil belleği ve mükemmel aşınma direnci, korozyon direnci ve TiC fazının sertliğinden kaynaklanmaktadır. Ergimiş halde daha uzun süre kalan FDM tabakalarında daha kalın TiC parçacıkları oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca; NiTi içeriğindeki artışla, en aza indirgenmiş Ostwald olgunlaşması nedeniyle TiC tane boyutunun azaldığı ve sertliğin kademeli olarak azaldığını gözlenmişlerdir.

Acikbas, Suvaci ve Mandal (2006), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş SiAlON seramiği bant dökümü ile gerçekleştirmişlerdir. SiAlON karışımı; %66 hacimde metil etil ketonun, hacimce %34 etanol ile karıştırılmasıyla sağlanmıştır. Detaylı yapısal ve mekanik incelemeler, sinterlenmiş numunelerde SiAlON'un oranını arttırarak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş SiAlON'un sertliğinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir (sertlik (HV): sırasıyla %10 ve %80 SiAlON için 14.5 ve 17.5 GPa). Laminasyon basıncının hassas şekilde ayarlanmasıyla, arayüzey kusurlarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Farnoush, Mohandesi ve Çimenoğlu (2015), Farnoush, Aldıç ve Çimenoğlu (2015), çalışmalarında, HA–TiO_2 kaplamaları Ti-6Al–4V substratları üzerinde EP-biriktirme yoluyla derecelendirilmiş yapı elde etmişlerdir. Dereceli yapının ve kaplamadaki TiO_2'nin ilavesinin, iyon difüzyonuna karşı bir bariyer tabakası olarak işlev gördüğünü ve ayrıştırıldığını göstermiştirler. Mikroyapıda daha düşük gözenekleri, TiO_2 ilavesiyle dereceli yapı kullanılarak elde etmişlerdir.

Schwartz, Schneller ve Waser (2004), özellikle elektronik oksit film uygulamaları için kimyasal çözelti bırakma tekniklerinin farklı yönleri üzerine bir inceleme raporu yayınlamıştır. Bu raporunda; Sol-jel, hibrit ve metallo-organik ayrıştırma (MOD) teknikleri yanı sıra, film kristalleştirme mekanizması ve mikroyapı karakterizasyonu ayrıntılı olarak tartışmışlardır.

He, Zhang, Peng ve Li (2013), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş $PbTiO_3/PbZrx\ Til - xO_3(PT/PZT)$ ve $PbZrO_3/PbZrxTil - xO_3(PZ / PZT)$ filmleri, kimyasal çözelti biriktirme yöntemiyle yapmışlardır. Daha ince taneli ince film tabakası ile tampon tabakalar arasındaki yüzey pürüzlülüğü kaynaklı farklı stres alanlarının artmasıyla malzemenin ferroelektrik özelliğinin arttığını göstermişlerdir. Fonksiyonel olarak derecelenmiş filmlerin ferroelektrik davranışının, birleşik morfoloji ve kompozisyon tasarımı ile kontrol edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Rockland (1967) ve Gessinger (1970), materyal sinterleme işlemlerinde çeşitli difüzyon seviyelerini analiz etmişlerdir. Dört ayrı kaynağın yüzeyler boyunca difüzyon, yüzey veya tanecik sınırları boyunca hacim difüzyonu ve yerel tane sınır difüzyonu da dahil olmak üzere difüzyonda rol oynayabileceğini doğrulamışlardır.

Hong, Zhang, Li, Han ve Meng (2008), önceden imal ettikleri bir grafit kalıp ile $ZrB_2–SiC/ZrO_2$ FDM üreterek; mikroyapısal davranış, sertlik ve kompozisyon derecelendirmesini analiz etmişlerdir. Yapılan mekanik testlere göre, sertlik değerlerinin (HV) tüm derecelendirilmiş bölgede 17.8 GPa ila 19.2 GPa arasında değiştiği ve bu stabil olmayan değişime yol açan kimyasal bileşim değişikliklerinin tabaka ara bölgelerinde önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir.

Yuan, Shen ve Zhang (2012), ZrO_2 ve B_4C'nin, kıvılcım plazma sinterleme reaktif sentezi (SPS-RS) tekniği ile gözenek oluşumuna neden olan katı hal reaksiyonuna maruz kalan ZrB_2 üretimini gerçekleştirmişlerdir. ZrO_2 ve B_4C arasında farklı işlem sıcaklıklarında kimyasal reaksiyonları incelemiş ve en iyi sinterleme koşullarını bulmak için termodinamik denklemleri analiz etmişlerdir. Genel olarak izledikleri yöntemde, en iyi sonucu yüksek sıcaklıkta ($1600^{\circ}C$) minimum tutma süresi ile sinterleme yöntemiyle ile istenmeyen kimyasal reaksiyonların minimize edilebilirliğini göstermişlerdir (Eriksson, Radwan ve Shen, 2013).

Mishina, Inumaru ve Kaitoku (2008), ZrO_2 ve ZrO_2 / AISI316L'den oluşan FDM'lerin mekanik özelliklerinin araştırmışlardır. AISI316L'nin nihai hacim oranı % 50 iken; tabakaların kalınlığının kırılma tokluğunu ve ürünün aşınma özelliğini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Artan kalınlıklarda (yani 2,0 mm veya daha fazla), sırasıyla 2.0mm tabakalar ve 3.0mm tabakalar için kırılma tokluğu 5.5 MPa ve 5.9 MPa'a kadar artmıştır. Katmanların kalınlığı, üretilen FDM'lerin aşınma direncini de önemli

ölçüde etkilemiştir. Numunelerinin aşınma testiyle, 2 mm ve üzeri kalınlıktaki FDM'nin 1.1×10^{-10} ile 1.3×10^{-10} mm^2/N arasında bir aşınma oranına sahip olduğunu göstermişlerdir (ZrO_2 aşınma değeri $3{,}110^{-10}$ mm^2/N). Bu tip FDM'lerin eklem protezleri gibi yüksek aşınma direnci uygulamalarında kullanıma uygun olduğunu göstermişlerdir.

Termal genleşme uyumsuzluğundan kaynaklanan istenmeyen kalıntı gerilme etkilerini azaltmak için, Jin, Takeuchi, Honda, Nishikawa ve Awaji (2005), toz metalurjisi tekniği kullanılarak benzer termal genleşme katsayılarına sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Mullite/Mo yapısını geliştirmişlerdir. Bu yapıdaki fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin, mekanik özelliklerinin ve termal davranışlarının sırasıyla Voigt modeli ve Reuss modelini izlediğini göstermişlerdir.

Ma ve Tan (2001), SiC tozlarının ve başlangıç faz toz tane büyüklüğünün, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Ti / TiB_2'nin mekanik ve yapısal özelliklerine etkisinin bir analizi yapmışlardır. SiC'yi sinterleme yardımı olarak kullanan Ti/TiB_2 örneklerinin diğer FDM'lere göre daha yüksek eğilme mukavemetine ve tokluğa sahip olduğu tespit edilmiştir. FDM üretimi sırasında SiO_2 oluşumu sinterleme mekanizmasını değiştirmekte olduğu ve sıvı faz sinterleme yoluyla tozların yoğunlaşmasına yol açtığı görülmüştür. SiC miktarının arttırıldığında TiB_2 tabaka yoğunluğunun arttığını belirtmişlerdir.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş PNN-PZ-PT Piezoelektrik aktüatörler elde edilmiştir (Zhu, Wang ve Meng, 1995). Poling sisteminde, sadece yarısı değiştirilmiş 90° alanın dışında, 180° alanın tamamı Pb(Zr, Ti)O_3(PZT) seramiklerine geçirilmiştir. Sonuç olarak, tane büyüklüğünde azalma 90° alan frekansı üzerinde bir etkiye sahip olduğu tespit etmişlerdir.

Gooch vd. (1999), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Ti-TiB, basınç destekli yoğunlaşma (PAD) yöntemi olarak da bilinen sıcak presleme (sıvı faz basınç sinterlemesi) kullanarak balistik uygulama için geliştirmişlerdir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TiB'nin balistik bir materyal olarak geliştirilmesi, imalatta kalıntı gerilme dezavantajlarını çözmüştür. Ayrıca termal genleşme katsayısı, balistik performans ve mekanik özellik, özellikle de FDM'deki TiB'nin hacim oranına bağlı olarak elastisite modülünü (117'den 426 Gpa'ya artışı) güçlü bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir.

Übeyli vd. (2014), toz metalurjisi ile üretilen bir SiC-AA7075 FDM'nin balistik performansı araştırmışlardır. Çeşitli kalınlıklarda FDM numunesi hazırlanmış ve zırh delici mermi kullanılarak balistik performans için test etmişlerdir. 25 mm'den büyük kalınlıktaki numunelerde gelişmiş balistik performans gözlenmiştir. Örneklerin analizi, görülen bazı mikro çatlaklar ve örneklerin yük bölgelerinin hemen altında bazı mikro çatlaklar ile deforme taneler ile göstermişlerdir.

Çeşitli çalışmalarda (Bafekrpour vd., 2012a, Bafekrpour vd., 2012b, Bafekrpour vd., 2012c, Bafekrpour vd., 2013), Polimer bazlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozitlerin toz istiflenmesi, fenolik reçine ile sentetik grafit ve karbon nanofiberler gibi nano-dolguların sıkıştırılarak kalıplanması incelenmiştir. Grafitin mekansal dağılımının termomekanik ve viskoelastik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmek için dört farklı gradyan paterninin yanı sıra, aynı kalınlığa ve toplam sentetik grafit içeriğine sahip, sınıflandırılmamış nanokompozitler üretilmiştir. Üst ve alt yüzeylerde en yüksek ağırlıkta sentetik grafit katmanına sahip kompozitler ve merkezdeki en düşük değer, termo-mekanik özelliklerde maksimum %97'lik iyileşme ve tüm kademeli ve indirgenmemiş kompozitler arasında en yüksek %34.7'lik en iyi sürünme direncini gözlemlemişlerdir.

Difüzyon ile birleştirme mekanizmasının, metal matrisli kompozitlerin santrifüj döküm işlemine matematiksel bir yaklaşım uygulanmış (Drenchev, Sobczak, Malinov ve Sha, 2003a, Drenchev, Sobczak, Malinov ve Sha, 2003b) ve bu teknikle imal edilen birçok metal-intermetalik ve metal-seramik FDM'ler gösterilmiştir (Fishman, 1988, Fukui, Takashima ve Ponton, 1994, Gao ve Wang, 2000). Santrifüj döküm yöntemiyle FDM üretiminde üretim parametrelerinin hassas kontrolü ve ikinci fazın homojen dağılımı oldukça sorun oluşturmaktadır. Isıtma / soğutma kontrol sisteminin yanı sıra kalıp döndürme hızı, FDM'lerde bileşim gradyanı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Rajan, Pillai ve Pai (2010), santrifüjlü döküm yöntemiyle fonksiyonel dereceli aluminyum silikon karbür kompozit üretimini incelemişlerdir. Al-A356 ve Al2124 bazlı metal matriks kompozitlerin dış çevresi boyunca maksimum %45 ila %40 SiC parçacıklarının elde edebilmişlerdir. Isıl işlemlerden sonra ve matrise ekstra sert takviye

fazının eklenmesiyle, Al-A356-SiC ve Al2124-SiC FDMMK için maksimum sertlik, sırasıyla 155 ve 145 Brinell olarak bulmuşlardır.

Rodrıguez-Castro, Wetherhold ve Kelestemur (2002), SiC partiküllerinin, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Al359 / SiCp' nin mekanik ve mikroyapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Savurma döküm metoyla ürettiği parçalarda SiC içeriği ve elastisite modülünün sürekli olarak değiştiği gözlenmiştir. Çekme mukavemetindeki artış 0.2 ila 0.3 SiC hacim oranına kadar gerçekleşmiş, ancak 0.3 ila 0.4 SiC hacim oranında maximum çekme dayanımı belirgin şekilde azalmıştır. Bununla birlikte, daha yüksek SiC hacim oranlarında daha yüksek elastik modül ve sertlik rapor edilmişlerdir.

Watanabe, Inaguma ve Sato (2011), nikel-alümina/ çelik kaplı boru imal etmek için yeni bir reaktif santrifüj döküm tekniğinin uygulanabilirliğini denediler. Bu işlem, Ni tozlarının bir boru içerisine yerleştirilmesini ve sıvı alüminyum metalinin boruya dökülmesini içeriyordu. Alüminyum ve Ni tozu arasındaki reaksiyon sayesinde bir kompozit tabaka üretip, çelik borunun iç yüzeyindeki ekzotermik reaksiyon sonucunda kompozit-çelik bağlanmasıyla yapıyı oluşturmuşlardır.

Scaffaro, Lopresti, Botta, Rigogliuso ve Ghersi (2016a), eriyik karıştırma, sıkıştırarak/basınçla kalıplama ve seçici süzme işlemlerini birleştirerek ayrı bir gözenek büyüklüğü derecelendirmesi ile farklı biyopolimerik iskeleler üretmişlerdir (Scaffaro, Lopresti, Botta, Rigogliuso ve Ghersi, 2016b, Scaffaro, Lopresti, Botta, Rigogliuso ve Ghersi, 2016c). PCL/PLA çift katmanlı çok fazlı iskeleler durumunda, yüksek bağlı gözenek yapısı, %70'lik bir gözeneklilik ve eriyik karıştırma adımında NaCI'nin granül boyutu kontrol ederek gözenek boyutunun yüksek tahmin edilebilirliği sağlanır. Bu ekip tarafından yürütülen başka bir çalışmada, Scaffaro, Lopresti, Botta ve Maio (2016), üç katmanlı laminatlar, delaminasyon veya arayüzey ayrılma belirtisi olmaksızın mükemmel birleşme bölgeleriyle iyi sentezlenmişlerdir. PCL ve PLA bazlı üç katmanlı laminatın imalat, morfoloji ve mekanik özellikleri arasındaki korelasyonu araştırmak için her bir tabakanın kalınlığı ile hacim oranı kontrol edilmiştir. Çekme deneyleriyle, E değeri ile laminatlardaki tabakaların kalınlıkları arasındaki güçlü korelasyon olduğunu tespit etmişlerdir.

Basınç altında katılaştırma ile geleneksel döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek basınca gereksinim duyulmaktadır. Sıkıştırma döküm yönteminde takviye malzemesi ile matris arasındaki sürtünme kuvvetlerini ve kapiler etkileri yenmek için 50-150 MPa basınç uygulanmakta ve katılaşma süresince etkiyen basınç sayesinde takviye malzemesi ile matris metali arasındaki ara yüzey bağ mukavemetini olumlu yönde etkilenmektedir. Daha ince taneli, porozitesi düşük ürünler elde edilmektedir (Ürkmez, 2004).

Sıkıştırma dökümde, ergimiş metal yerine yarı-katı metal dökümüyle oluşan küresel tane (dentritik olmayan) yapısıyla daha iyi mekanik özellikler elde edilir. Eğer malzeme tam sıvı halden yarı-katı hale gelene kadarki soğutma esnasında sürekli karıştırılırsa buradaki viskozitesi karıştırılmadan yarı-katı hale getirilmiş durumdan önemli ölçüde düşük olur. Karıştırma işlemi; olağan olarak oluşan dentritleri kırar ve böylece yarı-katı halin mikro yapısı etrafı sıvı ile çevrili küremsi katı taneciklerden oluşur. İşte bu yapı yarı-katı prosesi ve thixotropic hal için gerekli yapıdır. Bu küresel (dentritik olmayan) yapıyı oluşturmanın birkaç farklı yolu vardır; son zamanlarda geliştirilen likidüs eğrisi yakınlarında karıştırarak döküm halidir. Karıştırıcı aynı zamanda soğutucu görevi görür. Karıştırma işlemi başladıktan birkaç saniye sonra ergimiş metalin sıcaklığı düşer ve bir miktar katılaşma/çekirdeklenme başlar. Sıvı faza oldukça yakın çalışıldığından elde edilen tane boyutları da iyidir.

Gaz fazı kullanılarak yapılan FDM üretimlerinde en çok kullanılan yöntem buhar biriktirme yöntemi olup, daha çok yüzey kaplama işlemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık gereksinimi sebebiyle enerji tüketimi yönünden, pahalı ekipmanları bakımından da toplam maliyeti yönünden yüksek oluşu gaz fazı kullanılarak yapılan üretim yöntemlerinin dez avantajlarındandır. Fakat karmaşık geometrili parçalarda etkin oluşu ve ürün bitişinin nihai şekle net yakın oluşu gibi avantajları kullanım alanlarını arttırır.

Sıvı faz kullanılarak yapılan üretimler içinde en çok uygulanan savurma döküm yöntemidir. Sıvı faz kullanılarak elde edilen FDM'lerde monolitik malzemelerde karşılaşılan bilinen katılaşma vb. sorunların yanında malzemenin içinde bulunan seramik malzemeden dolayı homojen karışımın hazırlanamaması, topaklanma, seramik tozlarının malzeme dışına itilmesi gibi sorunlarla da karşılaşılmaktadır.

Katı faz üretim yöntemlerinde ise en fazla toz metalürjisi yöntemleri tercih edilmektedir. Dereceli yapı bu yöntemle daha iyi kontrol edilmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen FDM malzemelerin boyutları sınırlı olmaktadır. Ayrıca yüksek maliyetli bir yöntem olup oldukça hassas ve uzun işlem prosedürleri içermektedir.

Doğrudan yarı katı karıştırma ve kademeli sıkıştırma döküm yöntemi ile FDM üretimine literatürde rastlanmamıştır. Ancak uygulanacak yönteme en yakın yöntem 2008 yılında patenti alınan ve ECK firması tarafından lisanslanan CDC yöntemi (Cast-Decant-Cast) farklı metallerin birleştirilmesi ve özellikle FDM'lerin üretiminde kullanılan yarı katı döküm yöntemi olup diğer yöntemler göre daha ucuz, kolay ve başarılı bir yöntemdir.

Doğrudan yarı katı karıştırma yöntemi ile sıvı ve katı faz üretim yöntemlerinde karşılaşılan sorunlar aşılmaktadır. Takviye malzemesi matris malzemesi içine homojen olarak karıştırılabilmekte, topaklanma takviyenin karışım dışına itilmesi, kontrolsüz segregasyon oluşumu gibi problemler oluşmamaktadır. Ayrıca, takviye ve matris nispeten daha düşük sıcaklıklarda kısa süre temas etmekte, istenmeyen ara yüzey reaksiyonları azaltılmaktadır. İkinci aşamada uygulanan sıkıştırma döküm işlemi, daha iyi içyapı özellikleri sağlanmasını, gözenekliliğin azaltılmasını ve dayanım özelliklerinin artmasını sağlamaktadır (Ürkmez, 2004; Ürkmez Taşkın, Taşkın ve Yurci, 2010).

FDM üretiminde; sıvı fazdan çöktürme, plazma sprey, santrifüj döküm gibi sıvı hal yöntemleri ile yapılan üretimlerde; fonksiyonel dağılımın kontrol edilememesi, takviye ile matris arasında ıslatmanın sağlanamaması, istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşması, içyapı ve dayanım özelliklerinin kontrol edilememesi gibi sorunlarla halen karşılaşılmakta olduğu, toz metalürjisi gibi katı hal ile yapılan üretimlerde ise; karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin zaman aldığı ve elde edilen ürün boyutlarının sınırlı olduğu, hassas ve kontrol edilmesi zor aşamalara sahip olan toz metalürjisi yönteminde karşılaşılan problemlerin aşılması için alınan önlemlerin de işlem maliyetlerini önemli ölçüde arttırmakta olduğu, sıvı ve katı faz yöntemleri ile yapılan çalışmalarda yöntemsel olarak karşılaşılan problemlerin varlığını sürdürdüğü ve çözüm için yapılan çalışmaların halen yeterli seviyeye getirilemediği görülmüştür.

Bu doğrultuda Alüminyum esaslı seramik takviyeli kompozit malzeme ve FDM üretiminde doğrudan yarı-katı karıştırma ve ardışık sıkıştırma döküm yöntemlerinin birlikte kullanılması ile oluşturulacak FDM malzemelerin kütlesel bazda daha büyük

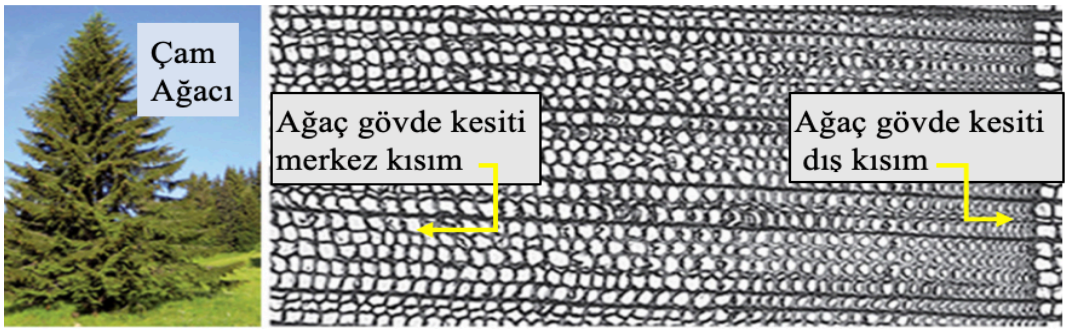
hacimli ürünlerin üretimine ve bazı üretim kaynaklı sorunlara çözüm getireceği (homojen olmayan karıştırma, takviye malzemesinin topaklanması, karışım dışına itilmesi, ayrışması ve istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşması vb.) daha yüksek dayanımlı ve porozite oranı düşük, mekanik özellikleri kontrol edilebilir özelliklerin sağlandığı malzemeler üretilebileceği, literatür çalışmalarında bu yöntemlerin bir arada kullanılarak kütlesel yapıda FDM elde edilme çalışmasına rastlanmayışıyla bu araştırma sonuçlarının bu alanda literatüre katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

1.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

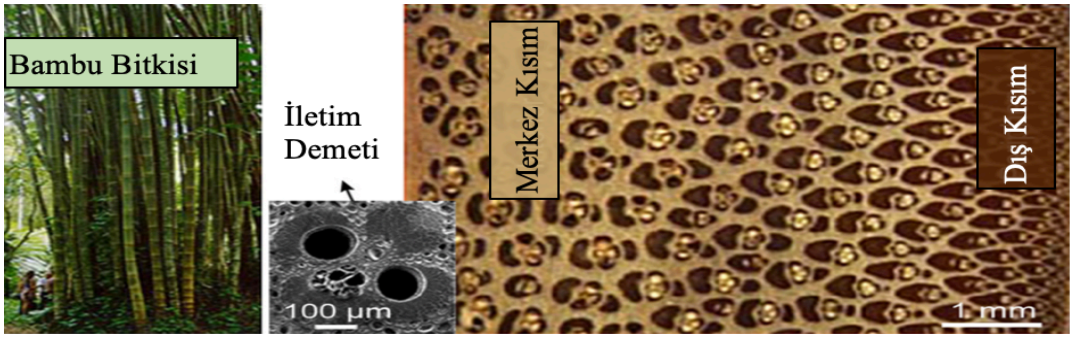
Gelişen teknolojinin en önemli öğelerinden biri olan malzeme bilimi, ihtiyaca göre kendini sürekli yenilemekte ve türetmektedir. Günümüzde bilim adamları ve mühendisler, yenilikçi materyal kullanımının, ekonomik ve çevresel nedenlerden ötürü önemini kabul etmektedir (Joshi, Alwarappan, Yoshimura, Sahajwalla ve Nishina, 2015). Bu bağlamda birçok yeni malzeme ve türleri ortaya çıkmaya devam etmektedir. Özel karaktere sahip malzeme gereksinimi arttıkça, önce Kompozit malzemeler, sonrasında da Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) ortaya çıkmıştır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), yapı ve/veya kompozisyondaki derecelendirmenin sonucu kendine has özellikler kazanarak, belirli bir performans veya işlev için tasarlanan ileri mühendislik malzemeleridir (Kawasaki ve Watanabe, 1997). Bu ileri teknoloji malzemeler (FDM'ler), doğa için ise yeni değillerdir. Diğer birçok insan yapımı malzemeye benzer şekilde, FDM'ler de ilk örneklerini doğadan alırlar ve bu yapılarıyla doğada binlerce yıldır kullanılmaktadırlar (Gottron, Harries ve Xu, 2014).

Ağaç gövdesindeki merkezden dışa doğru küçülen gözenekli yapı (Şekil 1.1), bambu bitkisinin merkezden dışa doğru gözenek ve yönlenme değişimi (Şekil 1.2), at toynağında vücut dokusundan yüzeyle temasına doğru kanalsal gözenek değişimi ile kazanılan sertlik ve oluşabilecek çatlak mekanizmalarına karşı dayanım (Şekil 1.3), palmiye ağacı gövdesi, geyik boynuzu kesiti ve dinazor kemiği kesiti üzerinde benzer gözenek derecelenmesiyle oluşan yapılar (Şekil 1.4), ve insan vücudundan örneklerle kemik yüzeyinden merkeze doğru derecelendirilmiş yapı örneği (Şekil 1.5) ile diş minesi ile dentin bölgesi arası geçiş bölgesinde ve dentin ile cementum bölgesi arası geçiş

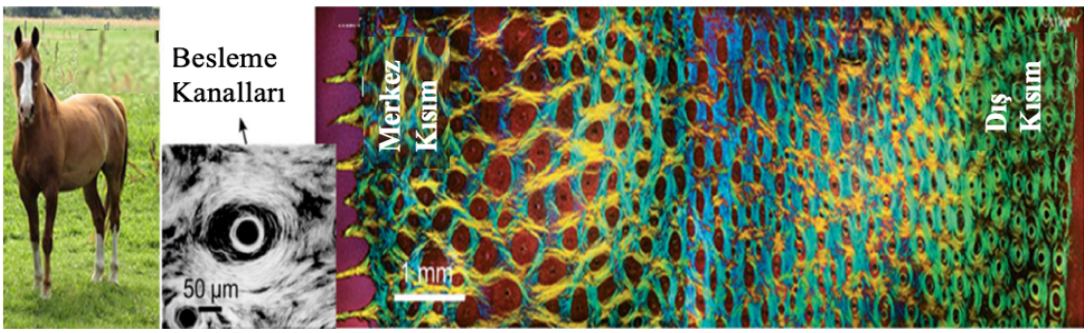
bölgesinde görülen yapılar (Şekil 1.6), doğada çeşitli alanlarda görülen fonksiyonel derecelendirilmiş yapı örnekleridir.



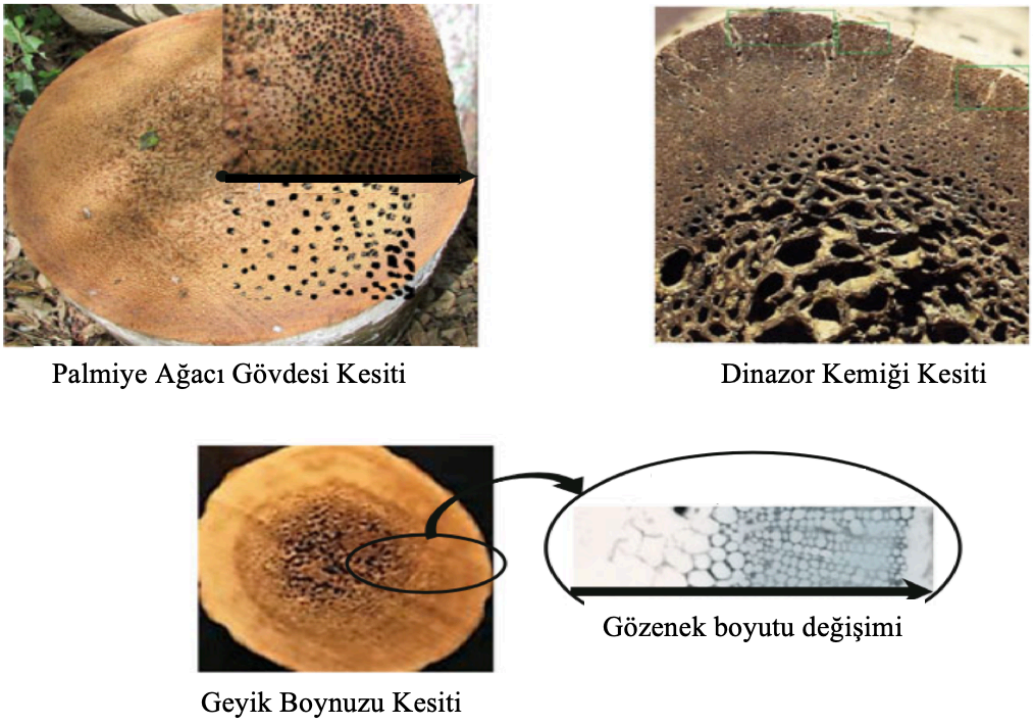
Şekil 1. 1. Ağaç kesitinden; merkezden dışa doğru gözenek sıklaşması ve küçülmesiyle oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş yapı örneği (Gibson, 2012).



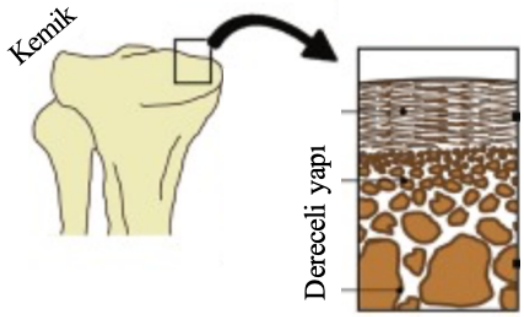
Şekil 1. 2 .Bambudaki fonksiyonel dereceli yapı (Habibi, Samaei, Gheshlaghi, Lu ve Lu, 2015; Silva, Walters ve Paulino, 2006).



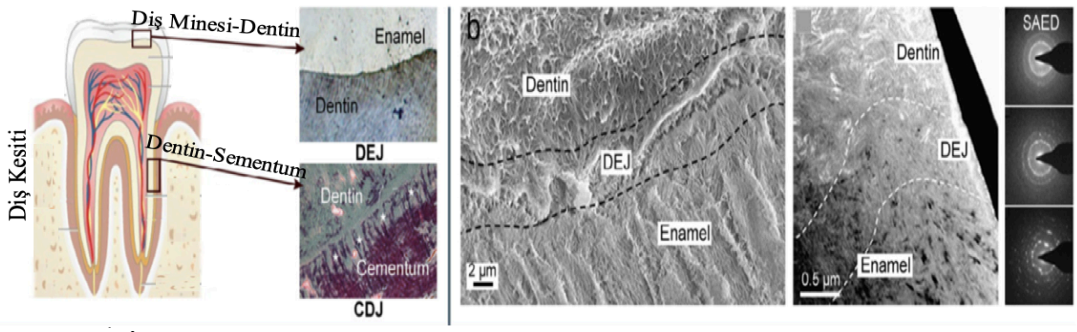
Şekil 1. 3. At toynağı kesitindeki fonksiyonel dereceli yapı (Kasapi ve Gosline, 1997).



Şekil 1. 4. Palmiye ağacı gövde kesiti, dinazor kemiği kesiti ve geyik boynuzu kesiti üzerinde benzer fonksiyonel derecelendirilmiş yapılar (Ramírez-Gil, Murillo-Cardoso, Silva ve Montealegre-Rubio, 2016).

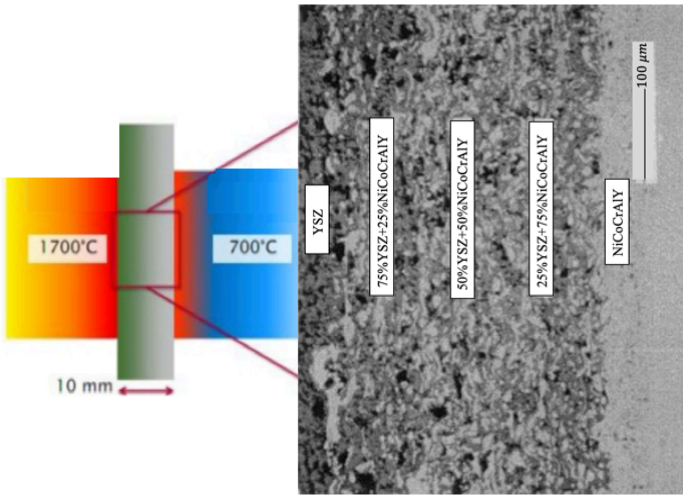


Şekil 1. 5. İnsan kemiğine ait dereceli yapı örneği (Madeira vd., 2018).



Şekil 1. 6. İnsan dişi kesitinde diş minesi-dentin arası (DEJ) ve dentin-sementum arası (CDJ) geçiş bölgelerindeki FDM yapılar (Liu, Meyers, Zhang ve Ritchie, 2017).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin ortaya çıkışı ve bu şekilde adlandırılması; uzay teknolojilerinde ortaya çıkan yüksek sıcaklık problemiyle baş edilmesi amacıyla termal bariyer geliştirilmesi üzerine Japonya'da devlet desteğiyle 1984 yılında başlatılan çalışmalarladır.

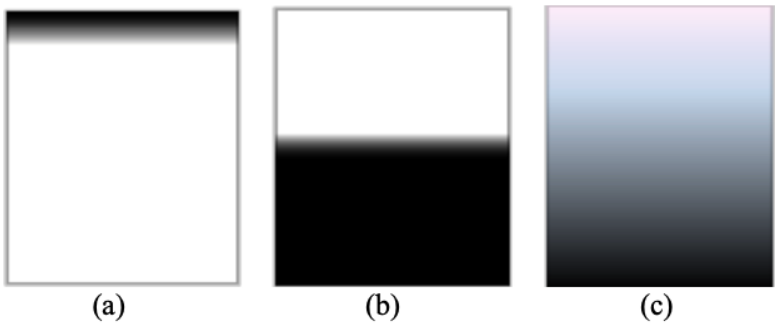


Şekil 1. 7. Yüksek sıcaklık farklılığında termal şoka dirençli malzeme gelişiminde oluşturulan FDM örneği (Khor ve Gu, 2000).

Bu çalışmalarda 10mm gibi bir kalınlıkta 1000 ºC' lik bir sıcaklık değişimine karşı dayanabilecek yapılar aranmış ve böylece ilk geliştirilen FGM yapılar, metal üzeri seramik kaplama ara yüzey bölgesinde oluşturulmuştur (Koizumi, 1997). Bu çalışmalar ile iyi ısıl iletkenlik ve iyi ısıl direnç gibi iki zıt özelliğin bir malzemede bulunabilmesi ve dereceli geçiş sayesinde direkt geçişe nazaran termal şok vb. çatlak ilerleme problemini ortadan kaldırma amacına uygun FDM'ler geliştirilmiştir (Şekil 1.7) (Kawasaki ve Watanabe, 1997; Khor ve Gu, 2000).

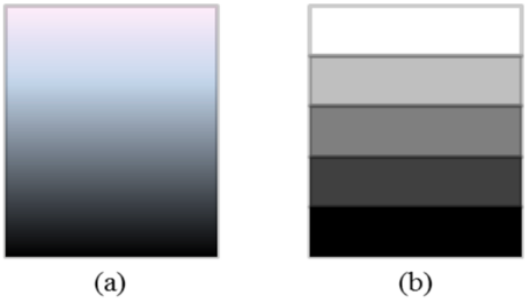
Kompozit yapılardan geliştirilen ve ihtiyaca yönelik kompozitlerden daha iyi performans gösteren fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, başlangıçta kompozitler gibi en az iki malzemeden oluşturulabildiği tanımlanmış olsa da FDM malzeme örnekleri arttıkça derecelendirmenin farklı versiyonlarının malzemenin, fiziksel kimyasal ve mekanik özelliklerine etkisiyle tek bir malzemede de porozite yada mikro yapısal değişimlerin derecelendirilmesiyle gerçekleşebildiği kabul edilmiş ve böylece FDM malzeme tanımı genişlemiştir.

FDM malzemelerde, derecelendirme işlemi istenen fonksiyona göre parça içerisinde herhangi bir yerde birleşme noktasında, malzemenin yüzeyinde yada tamamında olabilir (Şekil 1.8).



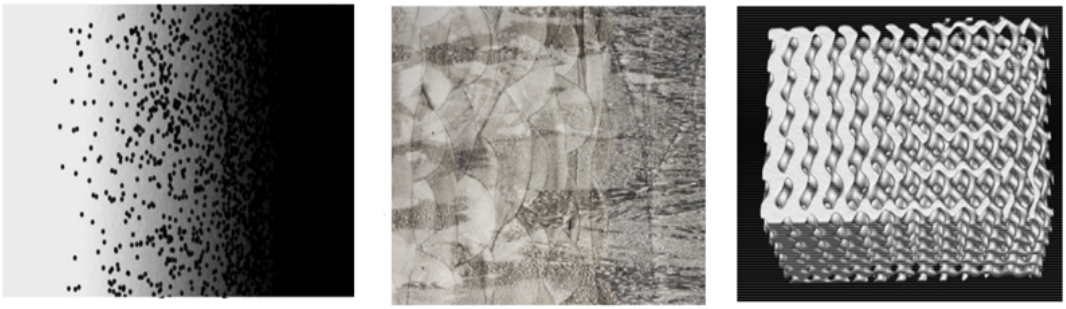
Şekil 1. 8. Malzeme yüzeyinde (a), malzeme birleşme noktasında (b) ve malzeme tamamında FDM (Lee, 2013).

Bu derecelendirilmiş yapılar da ayrıca kendi aralarında sürekli veya kademeli olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 1.9).



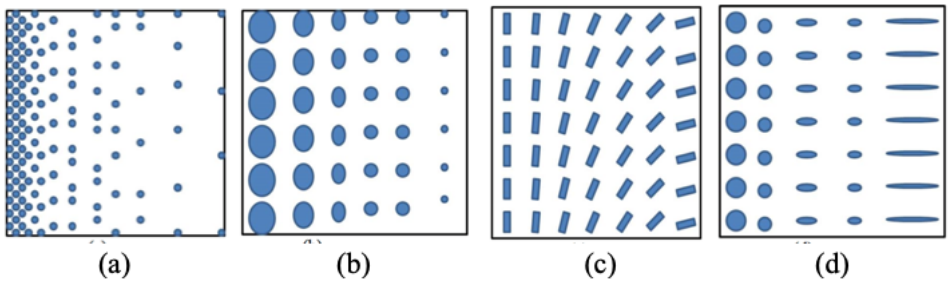
Şekil 1. 9. Sürekli (a) ve kademeli (b) yapıda FDM (Lee, 2013).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler yapı bakımından; kompozisyonun derecelendirilmesi (Şekil 1.10a), mikro yapının derecelendirilmesi (Şekil 1.10b) ve porozitenin derecelendirilmesi (Şekil 1.10c) olarak üç ana sınıfa ayrılırlar.



Şekil 1. 10. (a) Kompozisyon (Hotza ve Greil, 1995), (b) mikro yapı (Burkes ve Moore, 2007) ve (c) porozite (Yeo, Jung ve Choi, 1998) derecelendirilmesiyle oluşturulmuş FDM yapılar.

Derecelendirme şekillerine/çeşitlerine göre ise fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler; hacimsel dağılım oranının derecelendirilmesi (Şekil 1.11a), boyutsal derecelendirme (Şekil 1.11b), oryantasyon derecelendirmesi (Şekil 1.11c) ve şekil değişimi derecelendirilmesi (Şekil 1.11d) olarak dörde ayrılırlar.



Şekil 1. 11. Hacimsel dağılım oranının derecelendirilmesi (a), boyutsal derecelendirme (b), oryantasyon derecelendirmesi (c) ve şekil değişimi derecelendirilmesi (d) FDM yapı örnekleri (Neubrand, 2001).

Tüm bu değişimlerin bir ya da birden fazlasını içeren fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellik bakımından çeşitleneceği ve ihtiyaca yönelik performans göstereceği görülmektedir.

Ayrıca FDM'ler de kimyasal kompozisyon değişimiyle derecelendirme, gözenek oluşumuyla ve bu gözeneğin boyutsal değişimiyle derecelendirme, tanelerin hacimsel değişimiyle ve yönlenmesiyle derecelendirme, takviye parçacık dağılımı, parçacık yüzdesi ve parçacık boyutu değişimiyle derecelendirme, hibrit yapıların

konfigürasyonuyla derecelendirilmeleri gibi pek çok derecelendirme elde edilebilmektedir. Bu çeşitteki derecelendirmelerin pek çok fiziksel ve kimyasal özellik çeşitliliğinin elde edilmesine de yol açacağı açıktır.

Günümüz verilerine dayanarak en kapsamlı haliyle tanımlarsak, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler;

1- Bir veya birden fazla malzemenin bir araya gelerek,
2- Kompozisyon, mikro yapı veya porozite bakımından,
3- Hacimsel dağılım oranı, boyutsal, oryantasyonal ve şekil değişimi açısıyla derecelendirilerek; ihtiyaca yönelik fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri kesit boyunca değişen yapıların elde edildiği malzemelerdir.

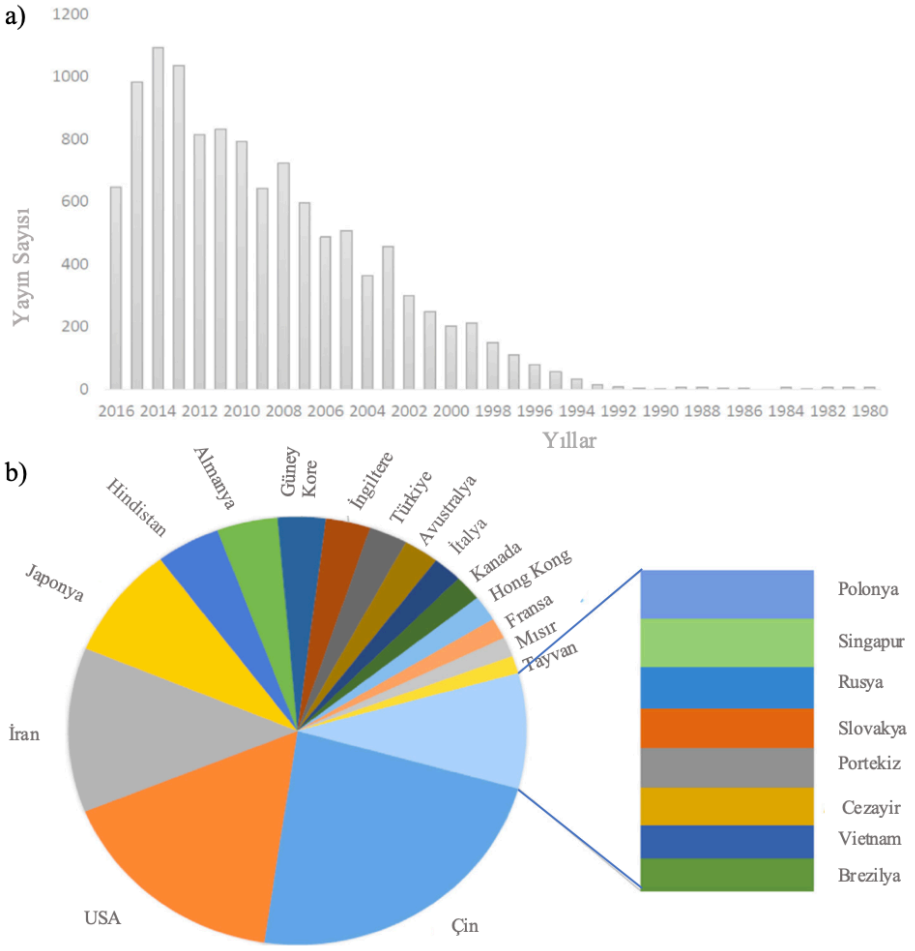
1.4. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Tarihçesi

Bever ve Duwez (1970) ve Shen ve Bever (1972), 1970 yılı başlarında kademeli yapı kompozit materyallerinin teorik etkilerini araştırmışlardır. Ancak, o zamandaki sınırlı üretim süreçleri nedeniyle, kademeli yapı malzemelerinin daha da geliştirilmesi gecikmiştir (Kieback, Neubrand ve Riedel, 2003).

Yüksek teknolojili uzay araçlarında, dış yüzey sıcaklığının 2100°K'nın üzerine çıkmasıyla bu derecelerdeki sıcaklığa dayanabilen ve 1600°K ile 2100°K dereceleri arası sıcaklık değişiminden dolayı ortaya çıkabilecek termomekanik değişimlere dayanıklılık gösterecek malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen metal üzeri seramik kaplamalar geliştirilse de yüksek sıcaklık farkından ortaya çıkan termomekanik değişimler sonucu ortaya çıkan çatlak vb. problemler çalışmaları, malzeme yapısında daha dereceli bir geçişe izin verecek tabakalı yapılara yönlendirmiş ve böylece 1984 yılında Japonya'nın Sendai şehrinde bu yönde termal bariyer oluşturma çalışmalarına başlamışlardır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme terimi de ilk bu yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. 1987'de Japonya Bilim Bakanlığı desteğiyle "Research on the Generic Technology of FGM (Functionally Graded Material) Development for Thermal Stress Relaxation" adı altında ulusal bir proje yürütülmüştür. Bu projeyle birlikte FDM üretim metodları ve malzeme dizaynı gelişme göstermeye başlamıştır (Kawasaki ve Watanabe, 1997; Koizumi, 1997). 1992 yılında FDM'nin on ileri teknolojiden biri olarak kabul edilmesiyle FDM teknolojisi küresel seviyeye ulaşmış, önemli bir teknoloji niteliği kazanmıştır. Ardından 1993 yılında japonya'da "Research on

Energy Conversion Materials with Functionally Gradient Structure" adı altında başlatılan ikinci projeyle daha yüksek sıcaklık farklarına (1000°K) uyum sağlayan enerji sektörüne yönelik malzemeler geliştirmeye devam etmişlerdir (Koizumi, 1997).

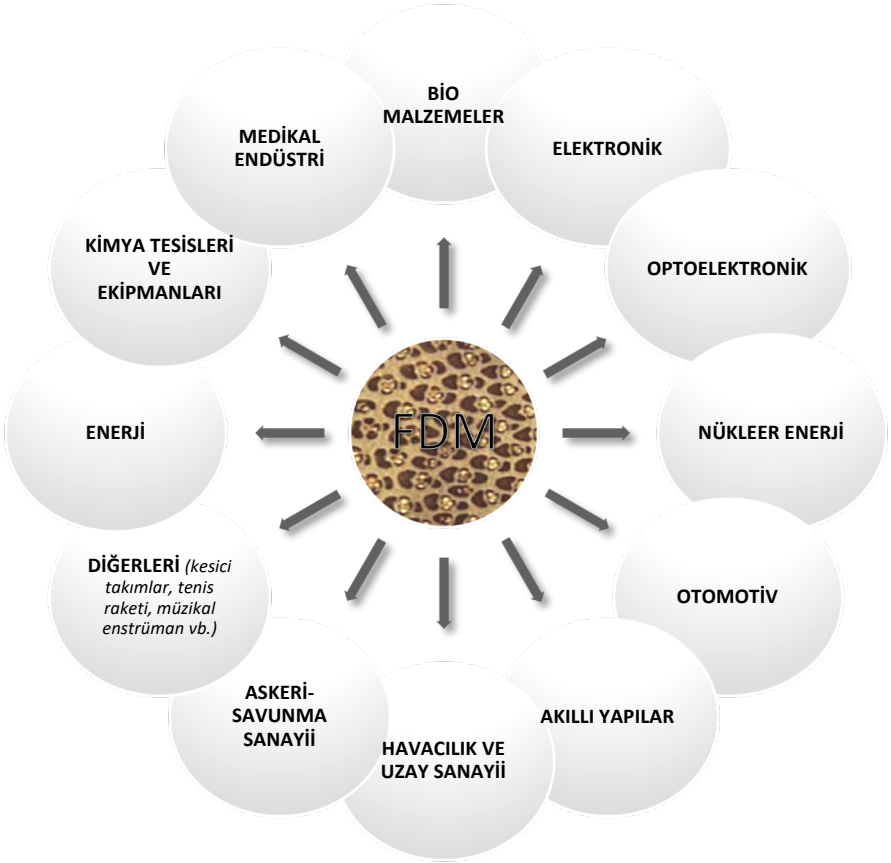
FDM'lere ilgi, havacılık, biyomühendislik ve nükleer endüstriler gibi çok sayıda yüksek teknoloji uygulamaları için uygun malzemeler türetme kabiliyeti nedeniyle giderek artmıştır. Bu ilgiye paralel araştırma alanındaki yayın sayısı son 20 yılda sürekli artış göstermiş olup, Şekil 12a' da, Scopus'un arama motoru tarafından sağlanan FDM'ler konusundaki yıllık yayın sayısı, Şekil 12b' de ise bu alandaki bilginin üretilmesinde farklı ülkelerin katkı payları gösterilmiştir.



Şekil 1. 12. (a) Scopus verilerine göre FDM üzerine yapılan yayın sayıları, (b) bu yayın sayılarında ülkelerin katkı payları (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

1.5. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Kullanım Alanları

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ilk olarak ileri uzay teknolojilerindeki arayışlarla meydana çıksa da devam eden süreç içerisinde derecelendirilmiş yapının sağladığı avantajları ile birçok uygulama alanında yer edinmiştir. FDM'nin; mekanik, fiziksel ve elektriksel özellikleriyle tasarlanabilme becerisi, onları birçok gelişmiş ürünün üretilmesi için ideal bir aday haline getirmektedir (Torres vd., 2016). Bu sayede günümüzde; havacılık ve uzay sanayiinde, askeri sanayide, savunma sanayiinde, medikal endüstride, biomalzemelerde, elektronik, optoelektronik, otomotiv, enerji, nükleer enerji alanlarında, kimya tesisleri ve ekipmanlarında, akıllı yapılarda ve diğer birçok alanda (Şekil 1.13) kullanılmaktadırlar.



Şekil 1. 13. FDM uygulama alanları.

Enerji sektöründe yaygın olarak kullanılan (Ghosh, Mukhopadhyay ve Basu, 2016) fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme örnekleri; termik güç jeneratörleri, güneş enerjisi bileşenleri ve enerji dönüşüm cihazları kapasitörleri, sensörler, elektrotlar, katot malzemeleri, evaporatör tüpleri (Vaidya, 2002, Woolley ve Skinner, 2014) yakıt hücreleri, vakum anahtar tüpleri, elektriksel temas malzemeleri, ısı emici, entegre devreler, yarı iletken cihazlar ve elektronik yüzeyler (Bharti, Gupta ve Gupta, 2013; Li ve Xie, 2006; Mueller, Drašar, Schilz ve Kaysser, 2003; Niino, Kisara ve Mori, 2005; Wośko vd., 2005) olup, diğer uygulamalar arasında sensörler, yüksek akım konnektörleri ve kondansatörler bulunur (Birth, Joensson ve Kieback, 1999; Mueller, Drašar, Schilz ve Kaysser, 2003).

FDM'ler, dereceli yapısının sağladığı kırılma indisi farklılıkları bakımından optoelektronikte; ses-video disklerinde, manyetik depolama disklerinde (Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012) kullanılmaktadırlar.

Fonksiyonel dereceli malzemelerin çok yüksek termal değişimlere dayanabilmesi (Marin, 2005) sayesinde; roket motoru, türbin çarkları, türbin kanat kaplaması, ısı değiştirgeci plakaları, güneş panelleri, füze burun kaplamaları (Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014a), roket nozulu, uzay aracı dişli aksamları, rotor tahrik mili, iniş takımı kapıları, kanatlar, uzay aracı gövdesi ve kafes yapısı gibi; uzay aracı ve uçakların çoğu parçası (Şekil 1.14.) artık FDM den yapılmaktadır (Kim, Kim, Choi, Park ve Ryu, 2005; Limarga, Widjaja ve Yip, 2005; Negahdari, Willert-Porada ve Scherm, 2010; Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014b; Zhang vd., 2020).



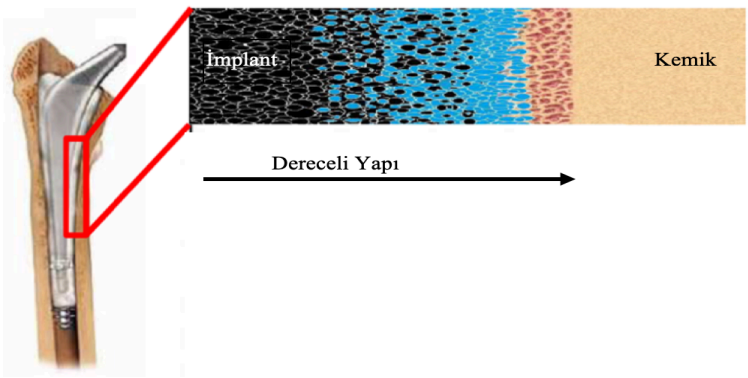
Şekil 1. 14. Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan bazı FDM yapılı parçalar (Saleh vd., 2020).

Otomotiv sektöründe çeşitli amaçlara uygun birçok parçada (Şekil 1.15.) uygulamaya konulmuş olup; fren rotorları, amortisörler, volanlar, yaprak yaylar, dizel motor pistonları, silindir gömlekleri, kasnaklar, tahrik milleri, yanma odaları, CNG depolama silindirleri ve yarış arabası frenlerinde kullanılmaktadırlar (Li, Jian ve Min, 2005; Ram, Chattopadhyay ve Chakrabarty, 2017; Rong Kimberly, Oo ve Debnath, 2015; Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014).



Şekil 1. 15. Otomotivde kullanılan bazı FDM yapılı parçalar(Saleh vd., 2020).

Kemik, diş gibi canlı yapıda bulunan dokuların doğal FDM yapıda olması biomalzeme ve medikal sektörü alanındaki kullanımı desteklemiş ve hızlandırmıştır (Matsuo, Wataru ve Ohata, 2001, Watari vd., 2004). Yaygın Ortopedik uygulamalar; yapay kemik, protez diş, yapay deri, kemik implantı (Şekil 1.16), diş implantı (Şekil 1.17), kemik kıkırdak onarımıdır (Akmal, Khalid ve Hussain, 2015; Almasi, Sadeghi, Lau, Roozbahani ve Iqbal, 2016; Bakar, Basri, Jamaludin ve Sajjad, 2018; Gupta, 2017; Miao ve Sun, 2010; Petit, Montanaro ve Palmero, 2018; Pompe vd., 2003; Tharaknath, Ramkumar ve Lokesh, 2016).



Şekil 1. 16. FDM kemik implantı örneği (Shi, 2016).



Şekil 1. 17. FDM bir diş implantı örneği (Mehrali vd., 2013).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin yapısı gereği en önemli özelliğinden biri olan çatlak ilerleyişini kısıtlayan yapısı sayesinde askeri ve savunma sanayiinde; koruyucu ve zırh plakalar, kurşun geçirmez yelek, kılavuz çubuklar, hassas silindirler, şaftlar, borular, mandallar, aks muhafazaları ve ateşleme pimleri (Chin ve Ernest, 1999, Gupta, Prasad, Madhu ve Basu, 2012; Huang ve Chen, 2016; Li, 2015) FDM'den yapılmaktadır.

Diğer uygulama alanlarında; kesici takım kaplamaları, nükleer reaktör bileşenleri, yangın geciktirici kapılar (Kawasaki ve Watanabe, 2002, Malinina, Sammi ve Gasik, 2005) kesici alet ekleri, rüzgar türbini kanatları, basınçlı kaplar, sondaj motor şaftı, yakıt tankları, makine parçaları, dizüstü bilgisayar çantaları, itfaiyeci hava şişeleri, gözlük çerçeveleri, X-ray masaları, MRI tarayıcı, kriyojenik tüpler, yarış bisikleti çerçevesi, golf ekipmanları, tenis raketleri, kayaklar, müzik aletleri ve yarış aracı çerçevesi (Bahri, Salehi ve Akhlaghi, 2014; Cho ve Park, 2002; Jun, Xing, Jianxin ve Jinghai, 2004, Xing, Jun, Chuanzhen ve Jianhua, 1998, Xu, Zhang ve Zhang, 2018) olarak yer alırlar.

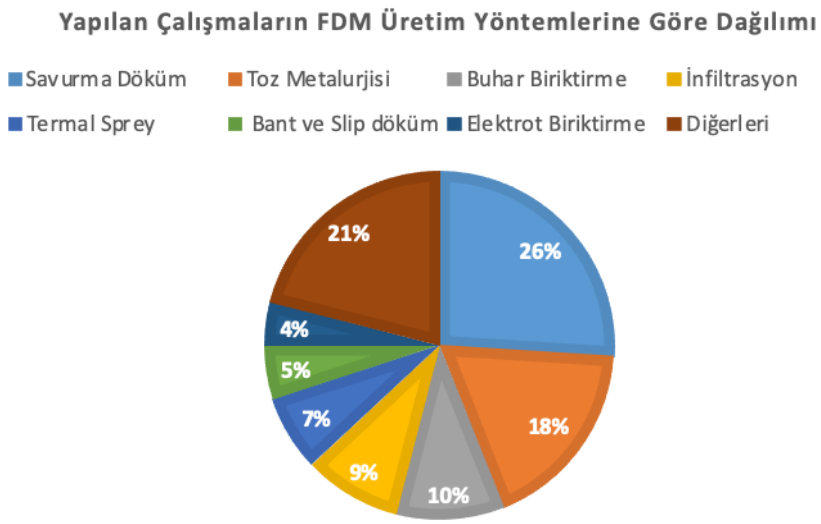
Her geçen gün üretim teknolojileri ve FDM özellikleri geliştirildikçe, daha fazla ürün ve uygulama alanı ortaya çıkmaya devam etmektedir (Woodward ve Kashtalyan, 2012).

1.6. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Yöntemleri

FDM'ler; yüksek kırılma tokluğu, düzlemde ve kalınlık boyunca enine gerilmelerde azalma, termal bariyer sistemlerinin performansını arttırma gibi özellikleriyle birçok uygulamaya onları uygun kılan sayısız avantaja sahiptir (Bhavar, Kattire, Thakare ve Singh, 2017) FDM' ye bu avantajları sağlayan özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar sayesinde üretim süreçleri sürekli gelişmeye devam etmektedir.

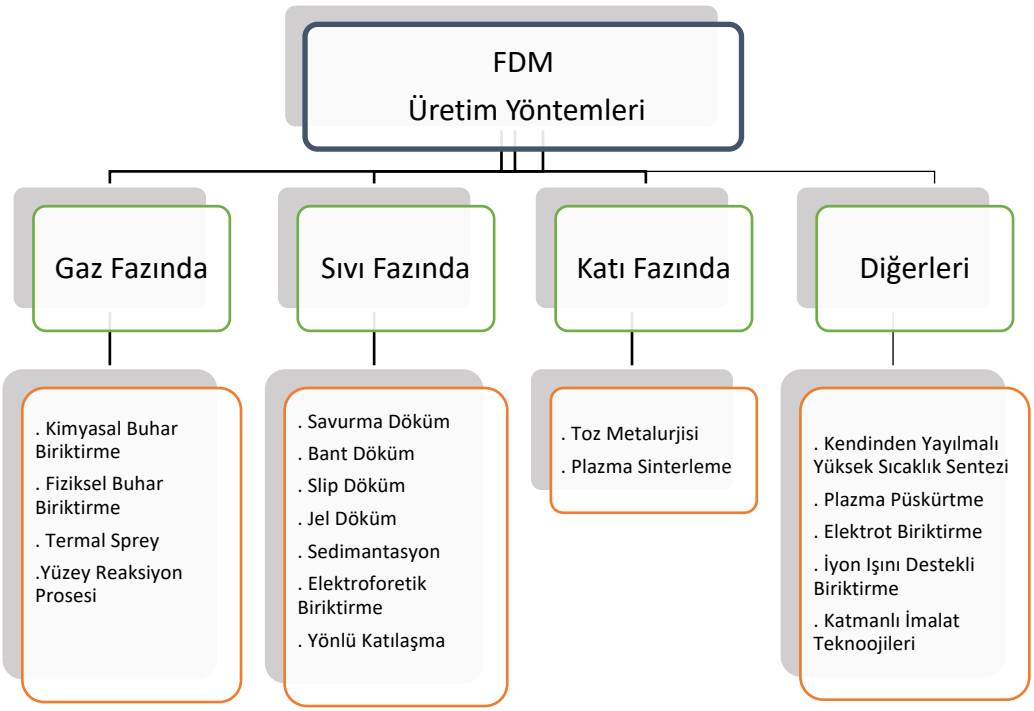
FDM malzemelerin üretimi için geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerin çoğu adapte edilerek kullanılmaktadır. Bunlara toz metalürjisi, buhar biriktirme, santrifüj yöntemi ve katı serbest form teknikleri dahildir. Tüm bu yöntemlerden enerji kaynağı olarak lazer, plazma veya elektron ışını kullanan katı serbest form teknikleri son yıllarda oldukça popüler hale gelmektedir.

Şekil 1.18' de yapılan çalışmaların üretim yöntemine göre dağılımı verilmiştir. Üzerine en çok çalışma yapılmış yöntem ise, savurma dökümdür. Onu sırasıyla toz metalürjisi ve buhar biriktirme yöntemleri takip eder. Grafikte yer alan diğerleri kısmında; kendinden yayılmalı yüksek sıcaklık sentezi (SHS), plazma sprey, elektrot biriktirme, iyon ışını destekli biriktirme ve katmanlı imalat teknolojileri yer alır. Katmanlı imalat teknolojilerinde de oldukça çeşitli uygulamalar farklı malzemelere yönelik kullanılmakta ve gelişmektedir. Bu alan da en çok 3D printer başlığında toplanmaktadır (Saleh vd., 2020).



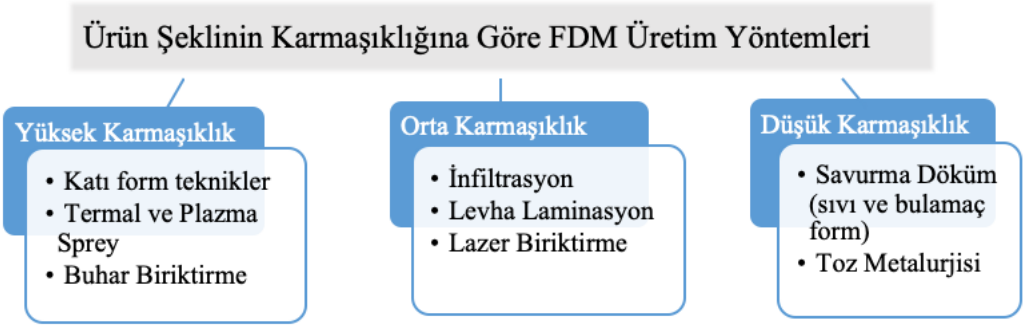
Şekil 1. 18. FDM üretim yöntemleri ve yapılan çalışmalara göre dağılımı.

FDM üretim yöntemleri için çeşitli sınıflandırmalar yapılmış olmakla birlikte en genel hali; katı, sıvı ve gaz fazı başlıkları altında toplanmış olup, sonrasında çıkan bazı çeşitli yöntemler de diğerleri başlığı altında toplanarak sınıflandırılmıştır (Zhang vd., 2019). FDM üretim yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 1.19'da gösterilmektedir.



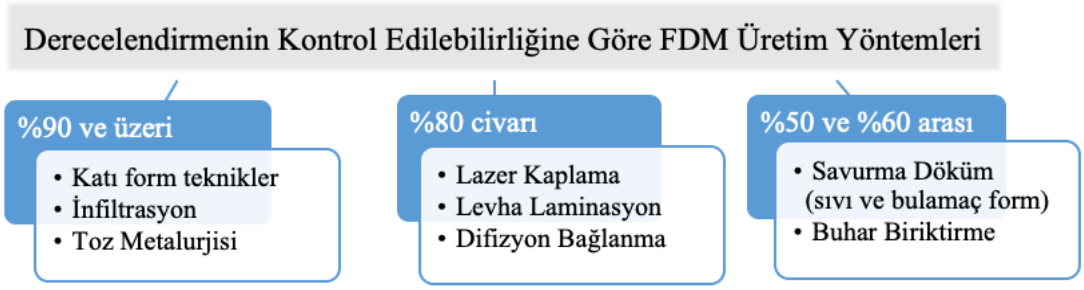
Şekil 1. 19. FDM'lerin üretim yöntemlerine göre sınıflandırılması.

FDM üretiminde, üretim yöntemi seçiminde önemli parametrelerden biri de üretilecek ürünün şeklinin karmaşık (komplex) olup olmamasıdır. Bu durum en belirleyici kriterlerden biridir (Stoner, Bartolai, Kaweesa, Meisel ve Simpson, 2018, Oshkour vd., 2015). Ürün şeklinin karmaşıklığına göre FDM üretim yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 1.20'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. 20. FDM üretim yöntemlerinin ürün şekli karmaşıklığına göre sınıflandırılması.

FDM üretim yöntemlerinin, ürün üzerinde fonksiyonel derecelendirmenin kontrol edilebilirlik yüzde oranına veya takviye dağılımının doğruluğuna göre sınıflandırılması Şekil 1.21'de gösterildiği üzere; yüksek derecede kontrol sağlama (%90 ve üzeri), orta derecede kontrol sağlama (%80 civarı) ve düşük derecede kontrol sağlama (%50-60) olmak üzere üç ana gruba ayrılır (Inaguma, Sato ve Watanabe, 2010).

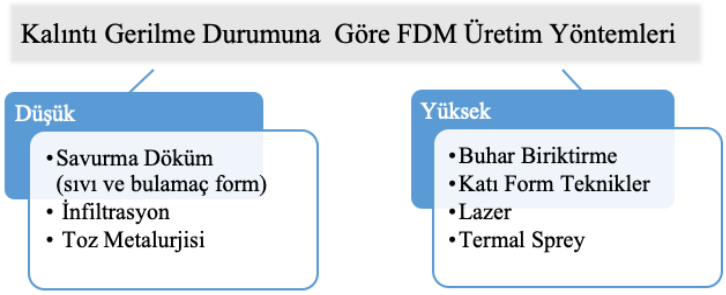


Şekil 1. 21. FDM üretim yöntemlerinin derece kontrol edilebilirliğine göre sınıflandırılması.

Yüksek seviyede derecelendirme kontrolü, esas olarak takviye bileşenlerini yerleştirebilme kabiliyetiyle elde edilir. Katı hal süreçlerde, sıvı hal süreçlere göre daha

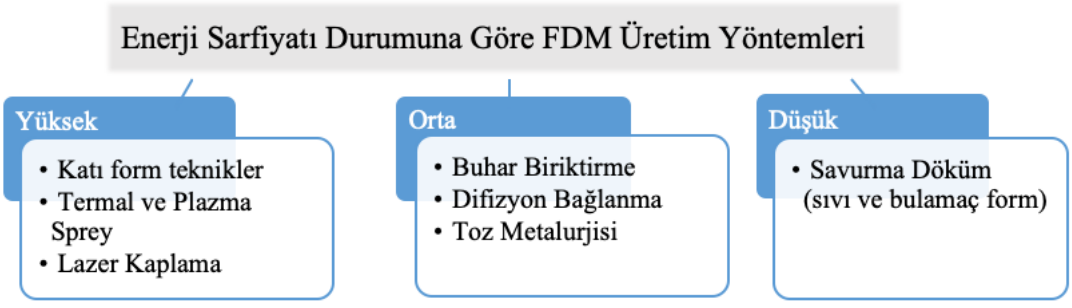
mümkün olan bu kontrollü derecelendirme durumu, beraberinde karmaşık bir süreç te getirebilir (Sudbury vd., 2016). Düşük seviye derecelendirme kontrol tekniklerinde ise; orta seviye derecelendirme kontrol tekniklerine göre, derecelendirmeler arası geçişlerin daha yumuşak bir varyasyonda gerçekleştiği görülmüştür (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019).

Çeşitli üretim yöntemleriyle üretilen FDM'ler farklı düzeylerde kalıntı gerilmeler barındırırlar. Üretim sırasında oluşan bu kalıntı gerilmeler genellikle üretim sıcaklığına bağlıdır. Şekil 1.22'de FDM üretim yöntemlerinin, kalıntı gerilme seviyesine göre sınıflandırılması verilmiştir (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019).



Şekil 1. 22. FDM üretim yöntemlerinin kalıntı gerilme durumuna göre sınıflandırılması.

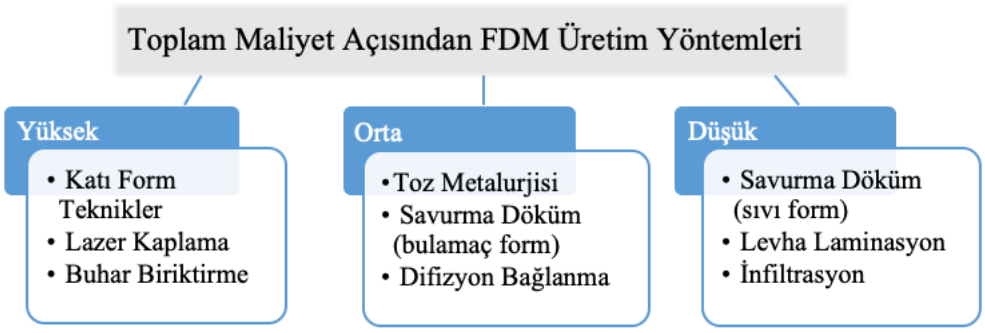
Günümüzde herhangi bir üretim teknolojisi seçerken enerji tüketimi çok kritik bir faktör haline gelmiştir. Üretim sürecinin küresel ısınmaya etki potansiyeli (GWP) ve çevresel koşullara etkisini de kapsayan bir değerlendirme ölçütünde spesifik enerji tüketimi (SEC) verilerine göre FDM üretim yöntemleri üç ana grupta toplanmış olup Şekil 1.23'te gösterilmiştir (Azevedo, CabreraSerrenho ve Allwood, 2018; Previtali, Demir, Bucconi, Crosato ve Penasa, 2017; Reinhold, Richter, Seyfert ve Steuer, 2004).



Şekil 1. 23. FDM üretim yöntemlerinin enerji sarfiyatı durumuna göre sınıflandırılması.

İnceleme verilerinin içerisinde, girdi malzemelerinin ön işlenmesi, üretim hattı enerji ihtiyacı, ek işlemler (ısıtma, besleme, presleme, taşıma hattı vb.) ve son işlemler gibi birçok parametreyi barındırır (Liu, Li, Fang ve Guo, 2018; Previtali, Demir, Bucconi, Crosato ve Penasa, 2017; Liu, Wei, Huang, Yuan ve Zhang, 2019).

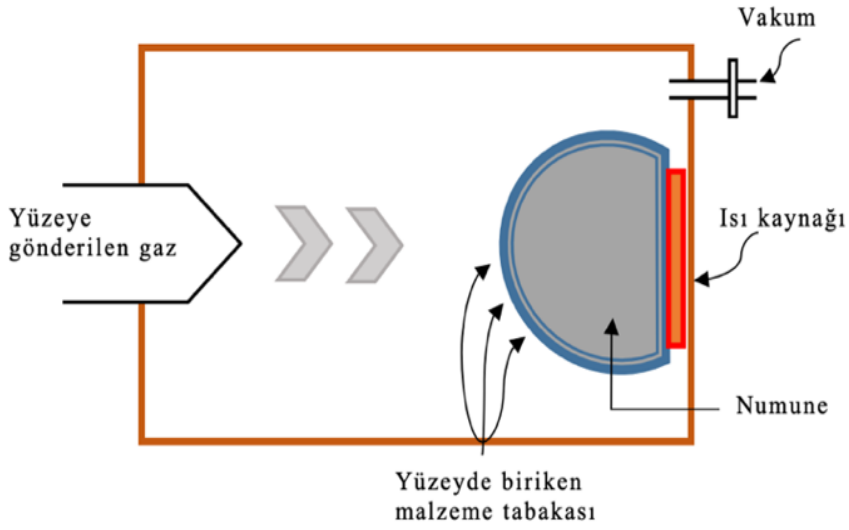
Maliyet hesabı her üretim yönteminde olduğu gibi FDM üretim süreci seçiminde de oldukça önemli bir rol oynar. FDM üretim yöntemlerinde maliyete göre sınıflandırma yapılırken belirleyici faktörler olarak; hem sabit maliyetler (gerekli ekipman ve makine ilk yatırım maliyetleri, ihtiyaç duyulan otomasyonlar) hem de değişken maliyetler (kullanılan malzemeler, hazırlık giderleri, üretim hattı bakım onarımı, üretim sonrası işlem maliyetleri), üretim miktarı ve hacmine göre değerlendirilerek ele alınmıştır. Yapılan bu çalışma ve raporlamalara göre (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019), FDM üretim yöntemlerinin toplam maliyet açısından sınıflandırılması Şekil 1.24'te gösterilmiştir.



Şekil 1. 24. FDM üretim yöntemlerinin toplam maliyete göre sınıflandırılması.

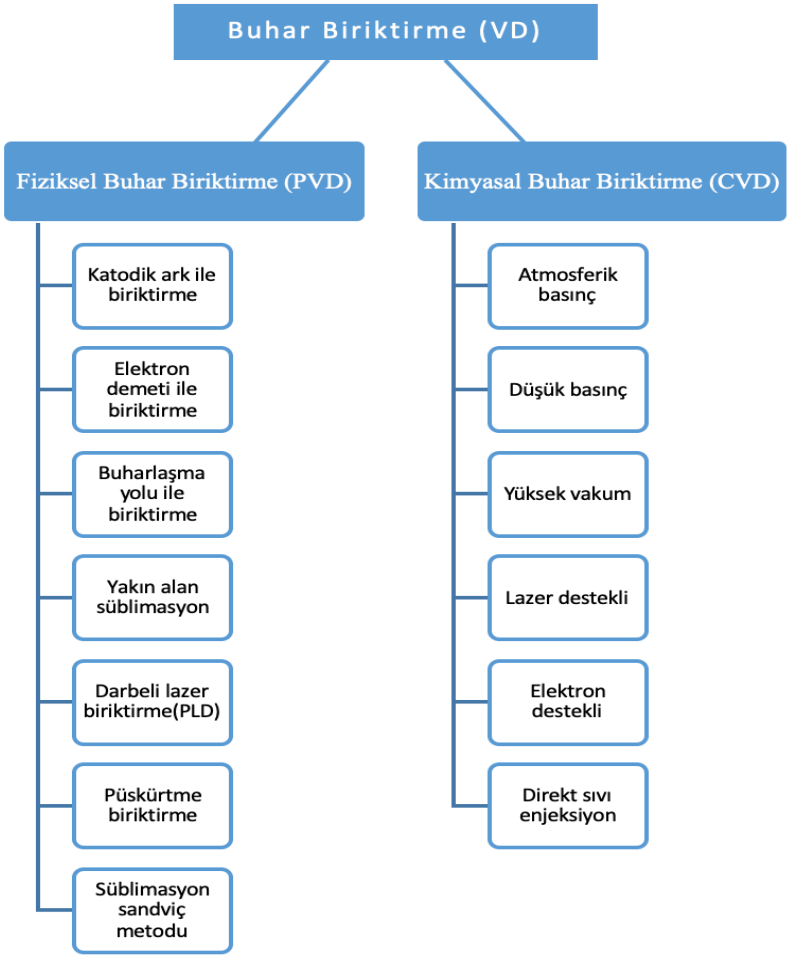
1.6.1. Buhar biriktirme yöntemi (VD)

Buhar biriktirme tekniğinde numune üzerinde malzeme biriktirme işlemi için; ısı, plazma ve ışık gibi çeşitli enerji kaynaklarını kullanır. Bromür, hidrür ve klorür genel olarak kullanılan gazlardır. Bu yöntemde Şekil 1.25'te görüleceği üzere vakum ortamında bir ısı kaynağı tarafından ısıtılan numunenin üzerine kimyasal yada fiziksel olarak birikim yapacak gazın gönderilmesiyle yüzeyde bir çeşit kaplama oluşturulmuş olur.



Şekil 1. 25. Buhar biriktirme yöntemi.

1970'lerin başlarında yarı iletkenin üretimi için kullanılmaya başlanılan bu yöntem sonrasında; ileri seramik, türbin kanatları, kompozit ve güneş pilleri üretimi içinde oldukça yaygınlaşmıştır (Choy, 2003). Yöntem çok çeşitli dallara ayrılmakla beraber ana olarak; kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi olarak ikiye ayrılır. Buhar biriktirme yönteminin FDM üretiminde kullanılan alt dalları Şekil 1.26'da verilmiştir.

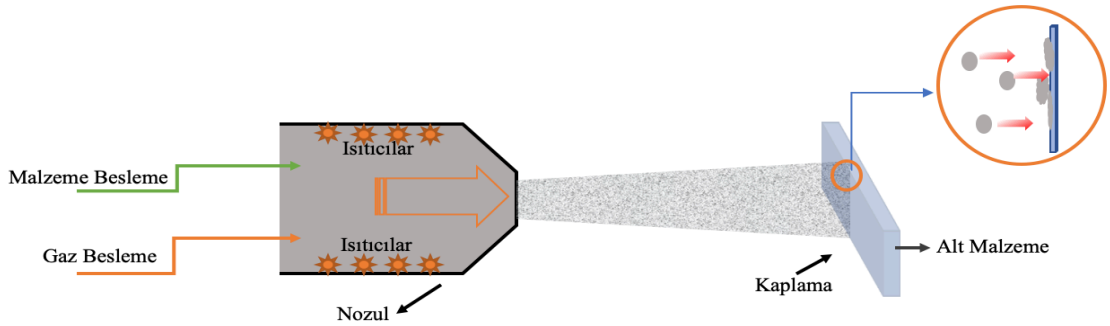


Şekil 1. 26. FDM üretimde kullanılan buhar biriktirme yöntemlerinin sınıflandırılması.

CVD birikiminin en eski örneği yakacak odunun eksik oksidasyonu ile kurum oluşumudur. Vakum ortamında ve kontrollü kapalı bir hacim içerisinde ısıtılmış kaplanacak yüzeye taşıyıcı gazın teması ile yüzeyin kimyasal olarak kaplanması esasına dayanır. CVD yönteminde daha yüksek sıcaklıklar olan 900-1100°C arasında çalışılırken PVD yönteminde daha düşük sıcaklıklar olan 200-500°C arasında çalışılır. Kompozisyonun kontrollü ve sürekli değişimi, farklı sıcaklıklarda üretim tekniği ve oldukça yakın ölçülerde çalışılmış net şekil, FDM ürünlerinin üretimi için buhar birikiminin avantajlarıdır. Gaz oranı, biriktirme sıcaklığı, gaz basıncı, akış hızı ve gaz tipi gibi değişkenler değiştirilerek, FDM'nin istenen derecelendirilmiş yapısı elde edilebilir (Hirai, 1995).

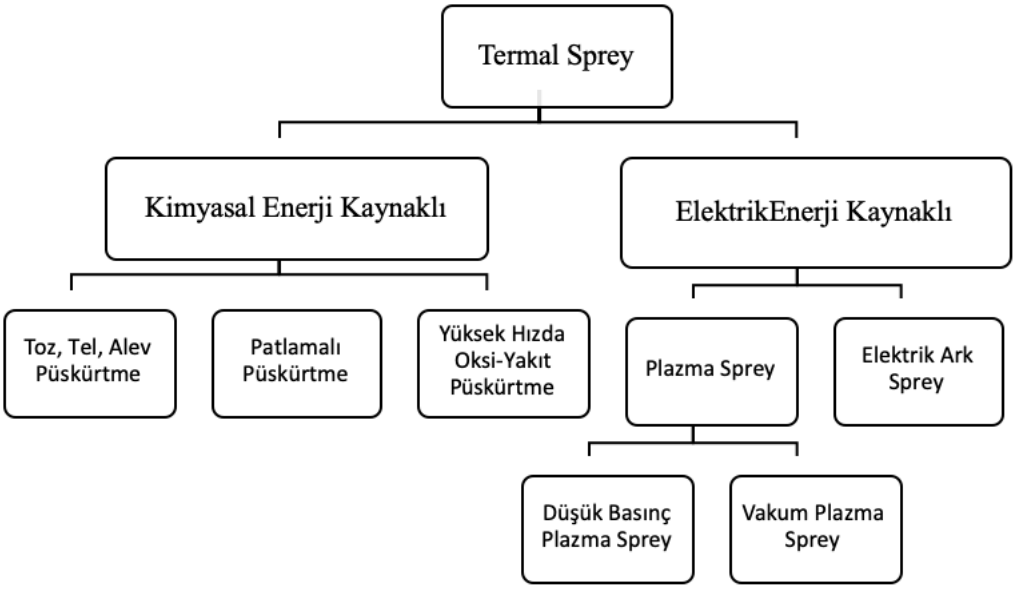
1.6.2. Termal sprey

Tel, çubuk veya toz gibi kaplama malzemelerinin, bir püskürtme tabancasında yanıcı/yakıcı/taşıyıcı gaz vasıtasıyla belirli bir basınçta püskürtülerek yarı-katı veya ergimiş partiküllerin yüksek hızda, kaplama yapılacak yüzeye çarparak yüzeyde oluşan bağlanma ile ince levha şeklini alıp hızlıca soğuyarak oluşturulan bir kaplama yöntemidir. Şekil 1.27'de yöntemin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 1. 27. FDM üretimde kullanılan termal sprey yöntemi.

Metal, seramik, metal oksit ve karbür gibi farklı materyaller, kaplama malzemesi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir ve termal sprey için enerji kaynağı olarak kimyasal ve elektrik kaynakları kullanılabilir (Dorfman, 2002). Şekil 1.28'de geniş malzeme yelpazesi için kullanılan farklı tipte termal sprey/püskürtme işlemlerini göstermektedir.



Şekil 1. 28. FDM üretimde kullanılan termal sprey yöntemin alt kolları.

Termal sprey/püskürtme işleminin tarihi, bir asırdan daha öncesine dayanmaktadır, 1882 ve 1889 yılları arasında yayınlanmış patentler vardır. Havacılık uygulamaları için yüksek sıcaklık kaplama ihtiyacının yanı sıra modern enstrümanların geliştirilmesi ve ticari sektörlerin artan ilgisi sayesinde yöntem oldukça gelişmiştir. Termal sprey büyük ölçüde süper alaşımlar elde etmek için malzemelerin yüzey işlemi, erozyona karşı yüksek direnç ve çalışma aletlerinde aşınma, elektromanyetik ara yüz, kimyasal ve termal bariyer kaplamalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Heimann, 2008).

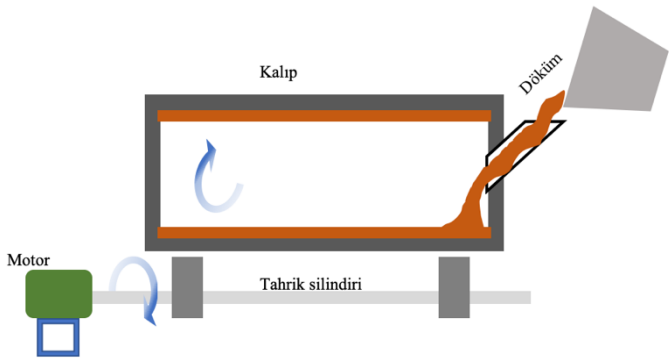
Termal sprey için kullanılan yönteme bağlı olarak farklı gaz sıcaklıkları kullanılır. Alevle püskürtme yöntemi için 3000°C, elektrik arkıyla püskürtme ve yüksek hızda oksijen püskürtme yöntemleri için 4000°C ile karşılaştırıldığında plazma sprey için 12.000–16.000°C olduğu bildirilen çeşitli gaz sıcaklıkları kullanılır (Dorfman, 2002).

Diğer üretim süreçleri gibi, plazma spreyi de çeşitli kaplama parametrelerinin katkısı nedeniyle doğrusal olmayan bir davranış sergiler. Sürecin etkinliğini etkileyen çeşitli faktörlerin varlığı, optimum işleme koşullarının geliştirilmesini zorlaştırır. Optimum işlem koşullarını belirleyen; hareket hızı, püskürtme katmanları, ark akımı, dik durma mesafesi, taşıyıcı gaz akış hızı, toz besleme hızı gibi plazma püskürtme

parametreleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Pakseresht vd., 2014, Pakseresht vd., 2015).

1.6.3. Savurma döküm

Metal bazlı FGM'lerin savurma/santrifüj döküm işleminde, takviye fazı, homojen bir karışım elde etmek için erimiş bir metale dökülür. Takviye parçacıklarının ve sıvıların yerçekimsel / merkezkaç kuvvetler ile ayrılması yoluyla, katılaşma sürecinin kontrol edilmesiyle, kimyasal bileşimde tasarlanmış bir gradyan yaratılır ve korunur (Arsha, Jayakumar, Rajan, Antony ve Pai, 2015). Santrifüj döküm yöntemiyle üretilen FDM'de temel husus ana metal ve takviye edilen parçacık malzemenin yoğunluk farkının olmasıdır (Watanabe vd., 2006).



Şekil 1. 29. Savurma döküm yöntemi.

Ana alaşım sıcaklıkları ve işlem sıcaklığı arasındaki farka dayanan iki farklı santrifüj döküm yöntemi vardır. İşleme sıcaklığı ana alaşım sıcaklığından daha fazlaysa, bu teknik genellikle santrifüj in-sitü teknik olarak adlandırılır ve katılaşma aşaması sırasında santrifüj kuvvetleri kullanılabilir. Alternatif olarak, eğer ana alaşım işlem sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkla karşılaştıysa, ikinci faz erimiş metalde katı kalır ve bu da santrifüj katı-parçacık tekniği olarak bilinir (Watanabe, Yamanaka ve Fukui, 1998).

1.6.4. Kendiliğinden Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi (SHS)

Bu yöntem kendi kendine ilerleyen/yayılan yüksek sıcaklık sentezi (SHS) olarak bilinir. Reaktif hammaddeler arasındaki ekzotermik kimyasal tepkime, SHS tekniğinin

temel prensibidir. Termik enerjinin üretilmesinin ve diğer yöntemlere kıyasla maliyet etkinliğinin basitliği, SHS'nin seramik, nanomateryal ve katalizör endüstrilerinde kullanılırlığını arttırmıştır (Mahmoodian, Hassan, Hamdi, Yahya ve Rahbari, 2014; Matson ve Munir, 1992). SHS ekstrüzyonu, reaktif yanma, dövme, reaktif SHS haddeleme, reaktif presleme, reaktif döküm, SHS-SLS ve mikrodalga destekli CS, hepsi bu alanda çeşitli üretim yöntemleri olarak kategorize edilir. Mükemmel konsolidasyon, yüksek üretim oranı ve yeniden kristalleşme olasılığı, reaktif mekanik şekillendirme proseslerinin (dövme, ekstrüzyon, haddeleme ve presleme dahil) başlıca avantajları iken, daha yüksek bir enerji tasarrufu aralığı, geleneksel döküm yöntemlerine göre reaktif dökümün kullanılmasının temel faydasıdır (Varma, Rogachev, Mukasyan ve Hwang, 1998).

1.6.5. Bant döküm

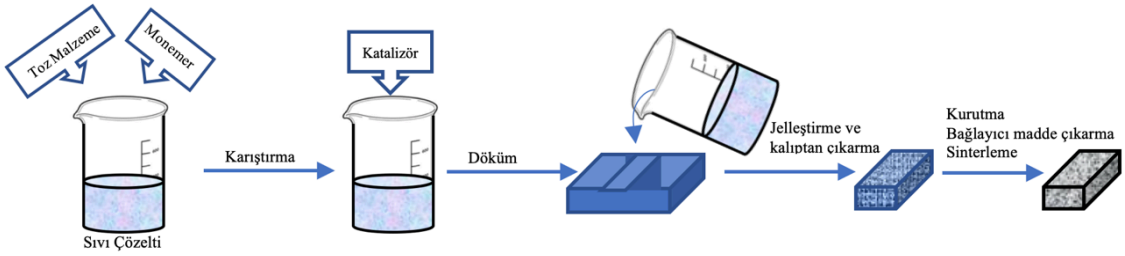
Bant döküm, tabakalı seramik yüzeylerin büyük ölçekli üretimi için uygulanan popüler bir yöntemdir. Bu teknikte, bir çözücü içinde, bağlayıcı ve seramik tozu içeren çeşitli hammaddeler bir araya getirlerek kaplama ana malzemesi üzerine dökülür. İstenen ürün özelliklerini elde etmek için döküm bandın kurutulması ve sinterlenmesi (100–300 mm bant kalınlık aralığı) gerçekleştirilmektedir (Hotza ve Greil, 1995).

Yeo, Jung ve Choi (1998), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ZrO2 / SUS316 hazırlamak için bant döküm yöntemini kullanmışlardır. TZP / SUS316'nın sinterleme işlemini kontrol etmek için TZP (tetragonal zirkonya polikristal) ve MZP (monolitik zirkonya polikristal) kullanılmıştır. ZrO'nun morfolojisi ve tane büyüklüğü kontrolü ile çatlama gibi sinterleme kusurlarının olduğu bulmuşlardır.

1.6.6. Jel döküm

Jel döküm, karmaşık şekillendirilmiş yoğun / gözenekli seramik malzemeler için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kısa şekillendirme süresi, yüksek kapasite, yüksek verim ve düşük maliyetli işleme sunabilen bir üretim tekniğidir. Bu alanda ilk bilimsel çalışmalar 90'lı yıllarda Oak Ridge Ulusal Laboratuarı'nda araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir (Yang, Yu ve Huang, 2011).

Piezoelektrik seramik-polimer kompozitlerin ve FDM'lerin yüksek frekanslı ultrason cihazları için jel-dökümü ile üretilmesini incelemiş çok sayıda araştırma vardır (García-Gancedo vd., 2012). Seramik FDM' ler için bir jel dökümü şematik gösterimi, Şekil 1.30'da verilmiştir.



Şekil 1. 30. Jel döküm.

Jel dökümü sırasında; seramik tozlar ve monomer, çapraz-bağlayıcı, serbest radikal başlatıcı ve katalizör içeren bir sıvı çözeltisine, jelimsi bir karışım yapmak üzere dökülür. Jelimsi karışım, kalıp içine dökülür ve bir polimer-su jeli oluşturmak için in-sitü halinde polimerize edilir. Jelin hala ıslak iken kalıbından çıkarılması, ardından kurutma, bağlayıcı madde çıkarma ve son olarak sinterleme ile jel döküm prosesi tamamlanmış olur (Tallon ve Franks, 2011).

1.6.7. Elektroforetik Biriktirme/Çökeltme

Elektroforetik çökeltme (EPD) ilk olarak Rus bilim adamları tarafından keşfedildi ve sudaki kil parçacıklarının elektrik alanla harekete geçmesi gözlemlendi. ABD'de yapılan deneysel çalışma, bir platin katot üzerindeki Thoria parçacıklarının elektronlar için bir yayıcı olarak biriktirilmesiydi. 1980'lerde EPD yönteminin popülerleştirilmesi, farklı seramik aletlerin üretimi için uygulanmasıyla başlayıp EPD işlem tarihinde bir dönüm noktası olmuştur.

Put, Vleugels, Anné ve Van der Biest (2003), EPD işlemenin ve sonraki sinterlemenin, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ZrO_2/Al_2O_3 ve WC/Co kompozitinin mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, sertlik değeri, kenarlardaki Al_2O_3-zengin bölgesi ve kompozitin çekirdeğindeki ZrO_2/Al_2O_3 açısından zengin bölge nedeniyle çekirdekte 13.5 GPa'dan kenarlara yaklaşık 19.5 GPa

arasında değişmiştir. WC-Co FGM'nin sertliği, çekirdekten kenarlara doğru gidildiğinde 21'den 9 GPa'ya düştüğü görülmüştür (Kobalt gradyanı ağırlıkça %4 ila %17 arasında değişti).

1.6.8. Kimyasal Çözelti Biriktirme (CSD)

Kimyasal çözelti biriktieme yöntemi genellikle organik olan bir çözücü içinde çözülmüş özel bir sıvı kullanır. Bu yöntem stokiometrik olarak hassas kristal fazları üretebilen, oldukça ucuz ve basit bir ince film işleme tekniğidir.

Slowak, Hoffmann, Liedtke ve Waser (1999), kimyasal çözelti biriktirme yöntemi ile Si/SiOz/TiOx/Pt tabakası üzerine fonksiyonel dereceli TiO kaplaması uygulamışlardır. Araştırmaları işleme parametrelerinin uygun seçimi ile düşük maliyetli dielektrik ince film kondansatörünün, bu teknik kullanılarak üretilebileceğini göstermiştir.

1.6.9. Lazer Biriktirme

Metal veya seramik tozun substrat üzerine çökeltilmesi için yüksek yoğunluklu bir lazerin üretilmesi, lazer biriktirme yönteminin temelidir. Lazer biriktirmede, matriks ve takviye malzemelerinin ergime sıcaklıkları arasında önemli bir fark olması gerekir. Aksi bir durumda belirli bir alana hassas enerji iletimi gerçekleşeceğinden, katı metalik fazlar bir araya gelerek tane yaratabilir.

Wilson ve Shin (2012), ticon tozlarının inconel 690 tozlarına takviye olarak eklenmesiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nikel bazlı kaplamalarda lazer biriktirme yöntemini incelemişlerdir. TiC içeriğindeki artış, daha rafine bir yapıya ve sütunlardan eş eksenli bir morfoloji geçişine yol açmıştır. Yüksek TiC hacim oranında (%30 ve üzeri) tamamen dendritik TiC mikro yapısının oluşturulması; %145'lik bir sertlik artışı ile aşınma testlerinde malzeme kaybı oranında %42'lik azalma ile sonuçlanmıştır.

Shishkovsky, Missemer ve Smurov (2012), argon atmosferinde direkt lazer metal biriktirme (DLMS) yöntemi ile fonksiyonel olarak dereceli Ti-Al FDM üretmiş ve kademeli tabaka ara yüzlerinde çatlak oluşumu ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Argon'daki DLMS süreci uygulamasının TiAl'in heterojen fazını oluşturma eğilimine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bunu mikro sertlik analizi ile doğrulamışlardır (130

HV'den 800HV'ye mikro sertlik değişimi Ti'nin içeriğine bağlıdır). Ti-Al FDM, kademeli katmanların kimyasal bileşiminin kontrolünün yanı sıra akış hızı gibi işleme parametrelerini optimize ederek yüksek elastikiyet modülü, düşük yoğunluğu ve mükemmel mekanik özellikleri sayesinde nükleer ve havacılık alanlarında potansiyel olarak kullanılabilir.

1.6.10. Yönlü Katılaşma

Bu yöntem, özellikle metalik ve seramik esaslı sistemlerin farklı alanlarında yaygın olarak uygulanır. Yüksek teknoloji uygulamaları için tek yönlü kristaller sağlamaya odaklanmak, bu tekniğin en önemli özelliklerinden biridir. Kristalin anizotropisinin, metalik sistemlerin yönlü büyümesinde arabirim şekli üzerindeki rolü ve istikrarlı bir durum koşulu için, stabil olmayan dalga boyunun tahmini üzerine çalışmalar, çeşitli araştırma ekipleri tarafından yapılmıştır (Boettinger vd., 2000; Boussinot, Hüter, Spatschek, Brener, 2014; Heo ve Chen, 2014,).

Koide, Yazawa, Asakawa ve Inoue (2007), tek kutuplu bir termal gradyan (Bridgman yöntemi) ile organik polimer karışımlarını kullanarak bir FDM üretmişlerdir. Bu yöntem ilk olarak düşük molekül ağırlıklı bir polimer/katkı maddesi sisteminin (poli (e-kaprolakton) (PCL) / 4,4-thiodiphenol (TDP)) ve bir polimer/polimer sisteminin (PCL / poli (etilen oksit) üretimi için uygulanmıştır. Sıcaklıktaki azalmayla TDP/PCL hidrojen bağının arttığı gözlemlemişlerdir.

1.6.11. Sedimantasyon

Sedimantasyon ve yüzdürme, özellikle partikül ile matris arasındaki yoğunluk farkına dayanan, partikül takviyeli kompozitlerin üretimi için birçok imalat teknolojisinde kullanılmaktadır. Yeryüzünde her yerde bulunan yerçekimi kuvvetinin uygun kullanımı, kademeli yapının üretiminde kullanılabilir. Farklı fazların termal soğuması, morfolojisi, büyüklüğü ve kütle yayılımı gradyanı üzerine odaklanarak, çeşitli fonksiyonel dereceli MMC ve PMC yapıları elde edilmiştir (Drenchev, Sobczak ve Sobczak, 2002; Sobczak ve Drenchev, 2013).

Lucignano ve Quadrini (2009), sedimantasyon yöntemiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş polyester üretmiş ve makro-girinti tekniği ile mekanik özelliklerini

araştırmışlardır. Çalışmalarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit malzemelerde elastik modülün karmaşık dağılımının değerlendirilmesi için sayısal modelleme ile birlikte makro-girinti testinin potansiyelini göstermişlerdir.

1.6.12. Elektro Kimyasal Geçiş

Jedamzik, Neubrand ve Rödel (2000), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş W / Cu üretimini elektrokimyasal geçiş metoduyla incelemişlerdir. Bu yöntem, kademeli yapıların üretimi için çok çeşitli seramik veya metalik hammaddeler ile kullanılabilir. Elektrokimyasal işlem ve gözenekli tungstenin erimiş bakır ile infiltrasyonu sonucu, kimyasal bir derecelendirme başarıyla üretilmiştir. Yoğunluk, elektrolit özdirenci, gözeneklilik ve elektrolit geometrisi gibi bazı işlem parametrelerinin, FGM'lerin hem şekil hem de morfolojisini etkilediğini ortaya koymuşlardır.

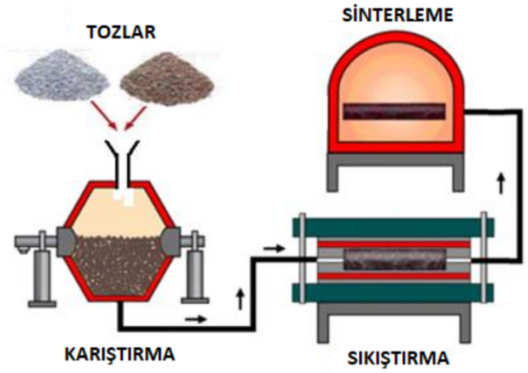
1.6.13. Plazma Sinterlemesi

Oldukça eski bir üretim yöntemi olan plazma sinterlemesinin temelleri mezopotamyada bulunan kazı alanlarından çıkan ısıtılmış kilden yapılmış tuğlalara ve inkaların altın takılarında kullandıkları yöntemlere dayandırılmaktadır. Ayrıca ortadoğu-çin-avrupa üçgeninde seramik ve porselenlerinin dayanım gelişiminde de rol almış bir yöntemdir. Standart SPS'ye benzer bir yöntem ilk olarak 1910 yılında Almanya'da uygulanmış ve toz malzemenin birleştirilmesi için elektrikle enerjinin verildiği bir yöntem olarak kullanılmıştır.

Taylor (1933), tarafından geliştirilen bir patentte sac metaller için direnç sinterleme yöntemi gösterilmiştir. Ardından Cremer (1944), pirinç, bronz ve diğer toz malzemeleri sinterlemek için yaptığı patent çalışmalarıyla, bir sonraki gelişmenin aşamalarını oluşturmuştur (Tokita, 2013). Günümüzde de plazma sinterleme (SPS) seramik ve metal malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel tekniklerle sinterlenmesi zor olan intermetalik bileşikler, fiber takviyeli seramik matriks kompozit (FR-CMC'ler), MMK'lar ve nano ürünlerin üretimi için popüler bir tekniktir (Sobczak ve Drenchev, 2013). Plazma sinterleme (SPS) metodu, formal sinterleme tekniklerinden tamamen farklıdır ve tozlar arasındaki elektrik akımı olgusunun analizine dayanmaktadır (Strojny-Nędza, Pietrzak ve Węglewski, 2016).

Farklı faz erime sıcaklıklarının elde edilmesi, FDM'lerin üretimi için SPS kullanmanın güçlü bir motivasyonudur. SPS işleminde, tozlar diğer geleneksel tekniklere göre daha kolay aktif hale getirilmektedir. Yüksek elektrik akımı uygulandıktan sonra iyonların yüksek hızda ilerleyişi, sinterleme sırasında difüzyonu arttırır. Güçler arasında boşaltma ile lokalize yüksek sıcaklık bölgeleri üretilebilir ve bu parçacıklar arasındaki boşluk sistemdeki yumuşatılmış veya erimiş bileşenlerle doldurulabilir (Lee, Tanaka ve Kagawa, 2009; Yu, Wang, Shen ve Zhang, 2012).

1.6.14. Toz Metalürjisi



Şekil 1. 31. Toz metalurjisi yöntemi (https://www.metalurjik.com/toz-metalurjisi-nedir).

Toz metalurjisi tekniği kullanılarak FGM'lerin imalatı, önceden tasarlanmış bir dispersiyon formülasyonuna göre toz malzemelerin karışımının hazırlanmasını, istiflenmesini ve son olarak sinterlemeyi içerir (Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012; Nemat-Alla, Ata, Bayoumi ve Khair-Eldeen, 2011; Watari, 2001). Şekil 1.31'de FDM'lerin toz metalurjisi yöntemiyle üretiminin akışı şematik olarak gösterilmektedir. Sıcaklık, zaman ve basınç gibi işleme parametrelerinin, toz metalurjisi tekniği kullanılarak üretilen FDM'nin özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu yöntemle FDM üretiminde en iyi performansı elde etmek için sinterleme sürecini kontrol etmek ve aktivasyon fazını eklemek önerilmektedir. Parçacık boyutunun kontrolü, optimum karıştırma koşulunun bulunması ve işlemin sonunda HIP ve sıcak preslemenin uygulanması toz metalurjisi sırasında ortaya çıkan sinterlenme dengesizliğini önleyebilir (Kawasaki ve Watanabe, 1990, Kawasaki ve Watanabe, 1997a, Kawasaki ve Watanabe, 1997a). Toz metalurjisi tekniği, kimyasal bileşimi ve mikroyapıyı iyi bir şekilde kontrol eden materyallerin üretilmesini sağlar (Jin, Takeuchi, Honda, Nishikawa ve Awaji, 2005).

Chenglin, Jingchuan, Zhongda ve Shidong (1999), toz metalurjisi tekniği ile hidroksiapatit (HAp)–Ti FDM üretimini araştırmışlardır. Ti, sinterleme sıcaklığında (1100°C) HA ila -$Ca_3(PO_4)_2$ ve $Ca_4P_2O_9$' un ayrışması için bir motive edici olarak görev yapar. Eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğunun, Ti içeriği ile doğrudan bir ilişki içerdiği tespit edilmiştir. FDM' deki saf Ti bölgeleri, insan kemiği mukavemetinden çok daha yüksek olan kırılma tokluğu ve eğilme mukavemetine (sırasıyla K_{IC}= 29.691 MPa $m^{1/2}$ ve = 971.96 MPa) sahiptir. Bu tip FDM'ler sert doku replasmanı implantları için uygundur.

1.6.15. Sıkıştırma Döküm

Sıkıştırma döküm yönteminde bir metal kalıp içersine yerleştirilmiş bulunan preform veya takviye malzemesi üzerine basınç uygulanarak sıvı metal basılmakta ve sıvı metal takviye ile birlikte yüksek basınç altında hızla katılaştırılmaktadır. Bu sayede sıvı metal emdirme yöntemlerinin kullanılamadığı çeşitli takviye malzemelerinde kolaylıkla kullanılabilmektedir.

Basınç altında katılaştırma ile geleneksel döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek basınca gereksinim duyulmaktadır. Sıkıştırma döküm yönteminde takviye malzemesi ile matris arasındaki sürtünme kuvvetlerini ve kapiler etkileri yenmek için 50-150 MPa basınç uygulanmakta ve katılaşma süresince etkiyen basınç sayesinde takviye malzemesi ile matris metali arasındaki ara yüzey bağ mukavemetini olumlu yönde etkilenmektedir. Daha ince taneli, porozitesi düşük ürünler elde edilmektedir (Ürkmez, 2004).

BÖLÜM 2

MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kalıp boşluğunu dolduran minimum malzeme miktarını ve proses parametrelerini belirlemek amacıyla; matris malzemesi olan Al 7075'ten farklı miktar ve sıcaklıklarda döküm denemeleri yapılarak; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve pres basıncı belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada, FDM malzeme üretebilmek için seçilen matris malzemesi (Al7075) seramik parçacık takviyeleri (SiC) yarı-katı durumda karıştırılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu kompozit malzemeler pres altında kalıba ardışık dökülerek ve sırasıyla basınç uygulanarak tabakalı yapıda FDM üretilmiştir. Elde edilen fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bu malzeme; matris malzemesi olarak Alüminyum barındıran ve seramik takviye (SiC) ile artık bir kompozit haline gelmiş olup, bu haliyle dereceli bir yapı kazandırıldığından, fonksiyonel dereceli alüminyum metal matrisli kompozit (FD-Al-MMK) malzeme üretilmiştir.

Son olarakta, elde edilen FD-Al-MMK malzemenin tabakalarının ve ara birleşme bölgelerinin özelliklerini, dereceli yapının oluşup oluşmadığını belirlemek için, sertlik, mikro sertlik ve yoğunluk ölçümleri, üç nokta eğme ve dilatometre testleri, SEM-EDS ve spektrometre analizleri ile metalografik incelemeler yapılmıştır.

2.1. Malzemeler

2.1.1. Matris Malzemesi

SiC takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için matris malzemesi olarak 7XXX serisi alaşımlarından AA7075 seçilmiştir. Bu alaşımda, bakır esas alaşım elementi olup,

magnezyum, krom ve çinko ilave alaşım elementleri olup en yüksek mekanik dayanıma sahip alüminyum alaşımları arasındadır. AA7075 malzemesi Güray Alüminyum Paz. ve San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiş olup AA7075 özellikleri Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir (https://www.gurayaluminyum.com.tr).

Çizelge 2. 1. AA7075 alaşımının fiziksel özellikleri.

Özgül Ağırlık	2,81	g/cm^3
Elastiklik Modülü	71-72	GPa
Özgül ısı (273-373°K)	0,97	
Lineer Genleşme katsayısı (293-373°K)	$23x10^{-6}$	/°K
Termal iletkenlik (373-673°K)	130	W/m°K
Direnç (293 °K)	$0,049x10^{-6}$	Ωm

Çizelge 2. 2. AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
Minimum	-	-	1,2	2,1	-	0,18	5,1	-
Maximum	0,4	0,5	2	2,9	0,3	0,28	6,1	0,2

Çizelge 2. 3. AA7075 alaşımının mekanik özellikleri.

Isıl İşlem	Çekme Dayanımı (Rm MPa)	Akma Dayanımı (Rp 0,2/MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Brinell)
T0	225	105	17	60
T6	530-570	460-505	10	150

2.1.2. Takviye Malzemesi Seçimi

Yarı–katı halde karıştırılarak yapılacak kompozit malzeme üretimi için takviye çeşidi olarak silisyum karbür (SiC) seçilmiştir. Ucuz ve kolay temin edilebilirliğinin yanında, yüksek dayanıma da sahip olan bu malzeme, lepleme, parlatma işlemleri ile, teknik seramiklerde, yarı iletken teknolojisinde ve fotovoltaik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Matris alaşımının takviye edilmesi için, karakteristik özellikleri Çizelge 2.4'te ve kimyasal bileşimi Çizelge 2.5' te verilen ortalama 12 mikrometre (500 Mesh) tane büyüklüğüne sahip Green SiC tozları (GW Micro) kullanılmıştır. FDM malzeme eldesi için yapılan kademeli dökümlerde kullanılan (her bir tabakaya göre) SiC miktarları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2. 4. SiCp takviyelerinin karakteristik özellikleri.

Parçacık cinsi	Boyut (μm)	Özgül ağırlık (gr/ cm^3)	Çekme dayanımı (GPa)	E- Modülü (GPa)
SiC	15- 340	3,2	3	480

Çizelge 2. 5. SiCp takviyelerinin kimyasal bileşimi (Ürkmez, 2004).

Ürünler	Tane İriliği	% SiC	% Serbest C	% Si	% SO_2	% Fe_2O_3
SiC	F240- F800	99,5	0,10	0,10	0,10	0,05

Çizelge 2. 6. Kullanılan SiCp takviyeler.

Takviye Çeşidi	Takviye Boyutu (Mesh)	İlave edilen takviye (ağırlıkça %)	Karışan takviye (ağırlıkça %)	Kullanım yeri (5 tabakalı FDM içerisinde)
SiC (Green)	500	-	-	1. tabaka
SiC (Green)	500	5	5	2. tabaka
SiC (Green)	500	10	10	3. tabaka
SiC (Green)	500	15	15	4. tabaka
SiC (Green)	500	20	20	5. tabaka

2.2. Deney Düzeneği

2.2.1. Sıkıştırma Döküm Presi

Bu çalışmada, ergiyik haldeki kompozit malzemelerin kalıp içerisine dökülüp hızla katılaşmasını sağlamak amacıyla 150 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır. Hidrolik

pres programlanabilir olup basınç uygulama süreleri, basınç miktarı, kalıp sıcaklıkları ayarlanabilmektedir. Kullanılan presin özellikleri aşağıda verilmiştir.

150 Ton Hidrolik Atölye Tipi Seri Hareketli Pres Özellikleri;

- Maksimum Basınç: 250 Bar
- Presleme kuvveti :150 ton
- Motor: 7,5 Hp
- Koç başı iniş hızı: min-max 20-200 mm/s
- Presleme hızı: 4 mm/s
- Geri kalkış hızı: min-max 40-100mm/s
- Alt tabla faydalı kullanılabilir alan minimum 350x350 mm
- Isıtıcılı alt ve üst tablalar (max. 400°C).

Yüksek sıcaklığa çıkarılacak üst ve alt kalıplar için, pres içinde seri döküm yapılamayacağından pres dışında bir ısıtıcı tertibatı kurulması gerekmiş ve bu ısıtıcı tertibatı uygun bir şekilde yalıtılmıştır. Isıtma tertibatının pres işleminin yapılacağı kısma yakın olması döküm işleminden sonra fazla ısı kayetmeden sıkıştırma döküm işleminin başlatılması için oldukça önemli olduğundan Şekil 2.1'de sıkıştırma döküm işleminden önce ısıtılmış kalıplara döküm işlemi için hazırlanan pres önü tezgâh ve yapısını göstermektedir.

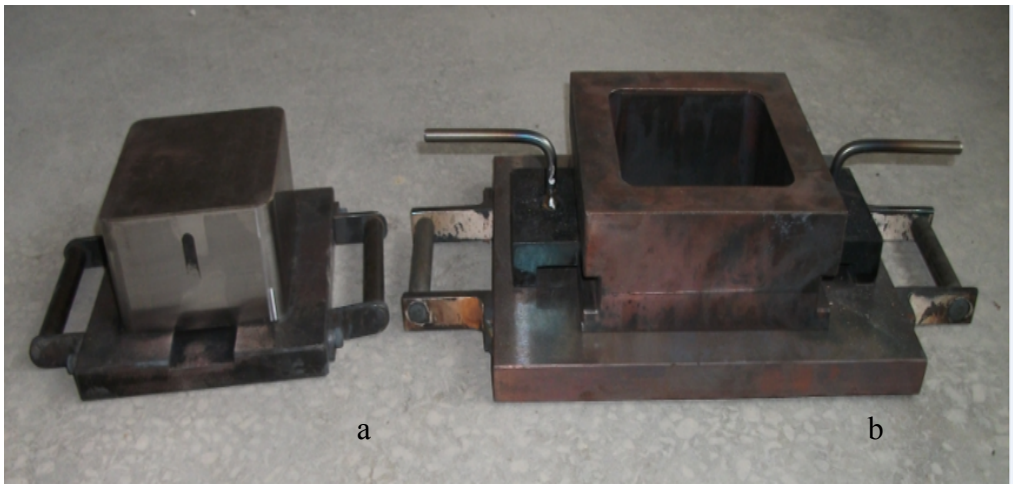


Şekil 2. 1. Pres önünde ısıtma tertibatı için hazırlanan tezgâh ve yapısı (ytong tuğlalar, cam yünü, mermer blok, rezistanslar).

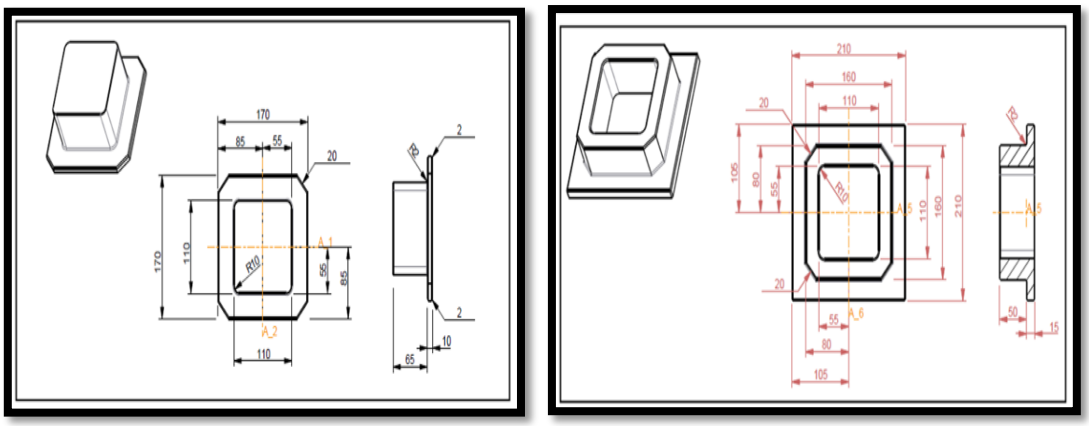
2.2.2. Kalıplar ve Kalıp Isıtıcıları

Karıştırma işlemlerinden sonra sıvı haldeki kompozit malzeme kalıp içerisinde yüksek basınç altında sıkıştırılarak katılaştırılacağından yüksek dayanıklılığa sahip kalıp

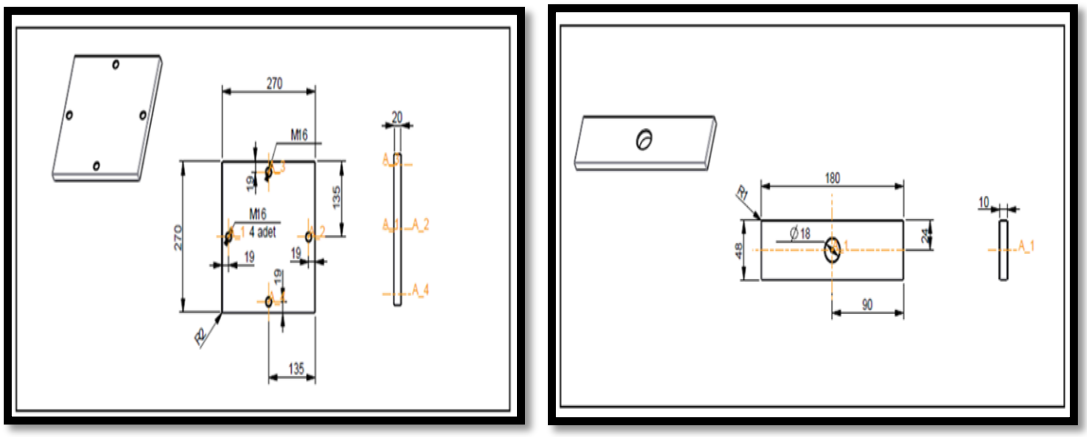
malzemesi seçilmiş ve boyutlandırma yapılmıştır. Kalıp malzemesi olarak sıcak iş takım çeliği seçilmiştir. Sıcak iş takım çelikleri, yüksek sıcaklıklar altında sertliğini yitirmeyen, çekme mukavemetleri, tokluk ve aşınma dayanımları yüksek olan çelik malzemelerdir. Alt ve üst kalıp olarak iki parça halinde tasarlanan döküm kalıpları (Şekil 2.2, 2.3, 2.4) talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak imal edilmiştir. Kalıp iç duvarları döküm sırasında oluşan gazların dışarı alınması için açılı olarak işlenmiştir.



Şekil 2. 2. Döküm kalıbı, (a) üst kalıp (b) alt kalıp.

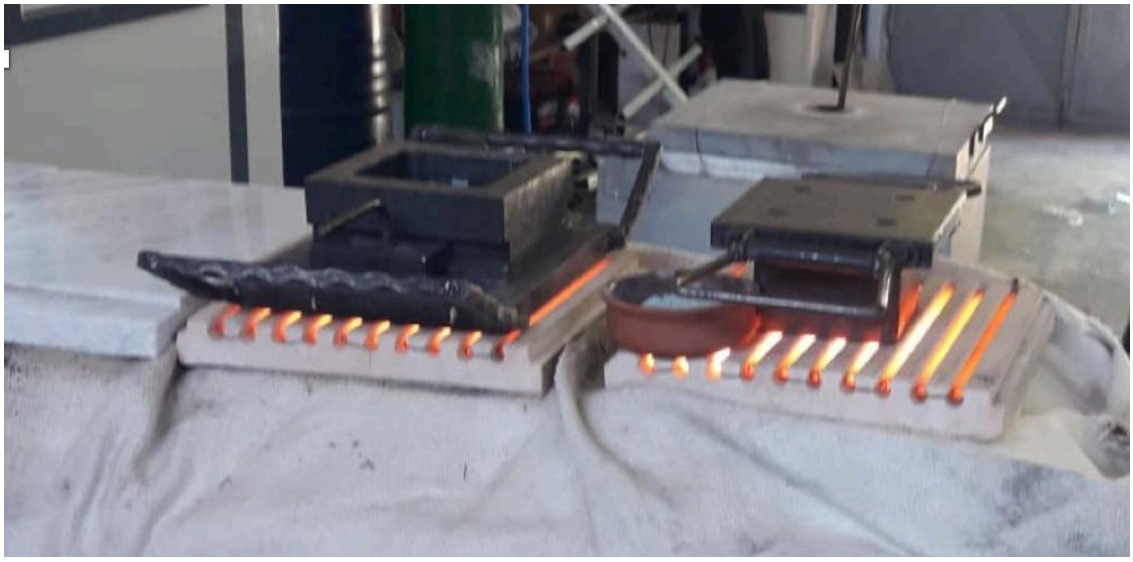


Şekil 2. 3. Üst ve alt kalıp teknik çizimleri.



Şekil 2. 4. Alt plaka ve tutucu plaka.

Ergimiş metalin kalıba dökümü esnasında katılaşmayı kontrol altında tutabilmek için alt kalıp ve üst kalıp 450 °C sıcaklıklara çıkabilecek kapasitede kalıp ısıtıcıları imal edilmiştir (Şekil 2.5). Kalıp sıcaklıkları ön çalışmalarda elde edilen tecrübelere dayanarak seçilmiştir.

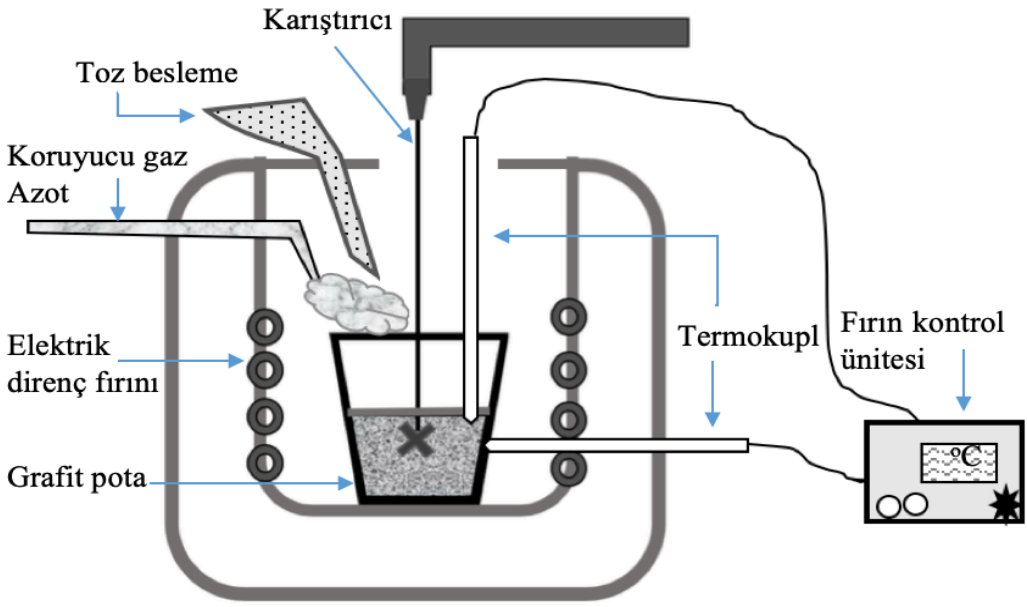


Şekil 2. 5. Üst ve alt kalıp ısıtma tertibatı.

2.2.3. Ergitme ve Karıştırma Ünitesi

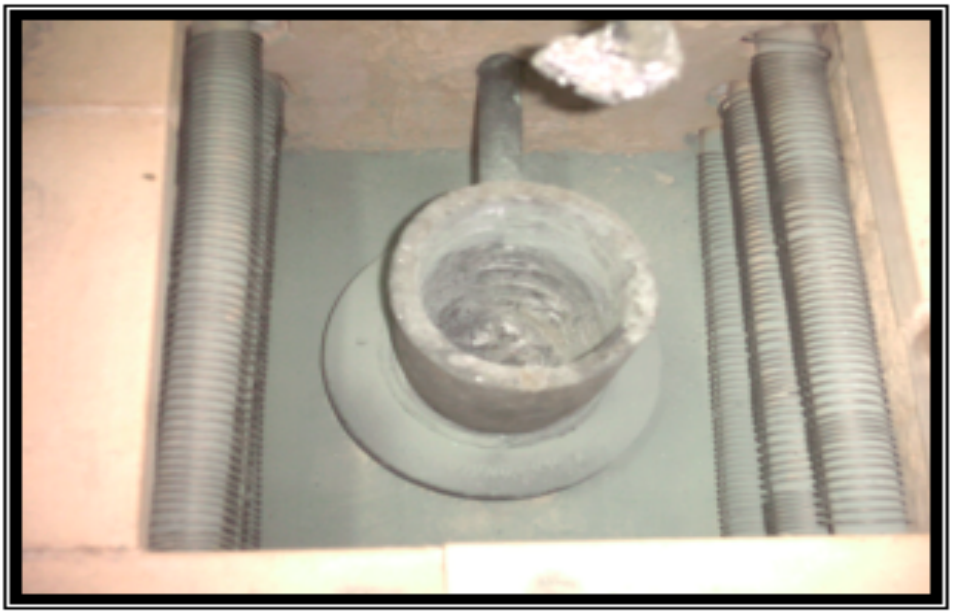
Alüminyum kompozit malzeme üretiminde karşılaşılan üretim problemleri de göz önüne alınarak koruyucu gaz atmosferi sağlayan, karıştırma işlemlerinin görülebileceği

açık penceresi olan, üstten açılan ve karıştırıcıların kolayca değişimini sağlayan tertibatı olan ve Şekil 2.6'da şematik resmi verilen bir ergitme ünitesi kullanılmıştır.

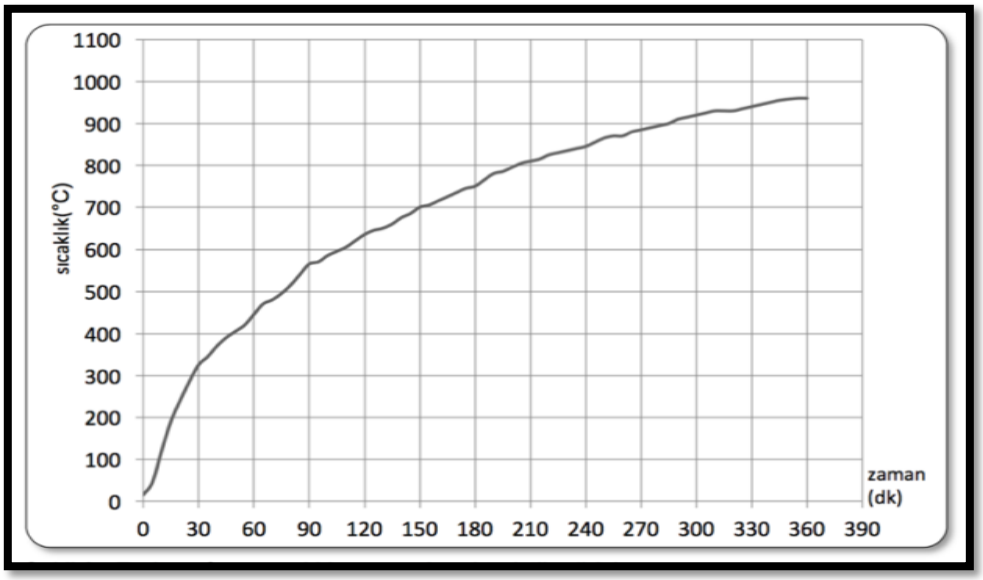


Şekil 2. 6. Kompozit malzeme hazırlama ünitesi.

Kompozit malzeme hazırlama ünitesi bir fırın, karıştırma araçları, pota, azot tüpü ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Ergitme işlemleri için imal edilen fırında, fırın atmosferinin daha kolay kontrolünü sağlamak amacı ile mümkün olan en küçük iç hacim ölçüleri seçilmiştir (300x300x400mm). Refrakter tuğla ve refrakter harç ile hazırlanan fırın iç cidarının dışı 40mm Ytong malzemesi ile çevrildikten sonra seramik battaniye ile kaplanmıştır. Ergitme ünitesinin iç kısmı, ergitme potasının oturtulabileceği ve üstten pota içindeki malzemelerin karıştırılmasına olanak verecek şekilde ve fırın kapağında bulunan karıştırma penceresinin tam altına gelecek şekilde dizayn edilmiştir. Karıştırma sırasında potanın devrilmesini önlemek ve daha stabil durmasını sağlamak için çelik bir pota yuvası hazırlanmış ve pota bu yuvanın içine oturtulmuştur. Şekil 2.7'de pota ve pota yuvasının fırın iç hacmi içindeki yerleşimi gösterilmektedir. Kullanılan fırının da sıcaklık-zaman karakteristik eğrisi grafiği Şekil 2.8' de verilmiştir.



Şekil 2. 7. Ergitme potası, yuvası ve fırın içi görünüm (Ürkmez, 2004).



Şekil 2. 8. Fırın sıcaklık-zaman karakteristik eğrisi (Ürkmez, 2004).

Kullanılan ergitme fırını aşağıda belirtilen özelliklere sahiptir;

- Sıcaklık kontrolü
- Azot gazı koruyucu atmosferi
- Ergiyik gözetleme ve karıştırma penceresi

- Karıştırma hızı kontrolü
- 1200°C Maksimum sıcaklık
- 2 KW Güç

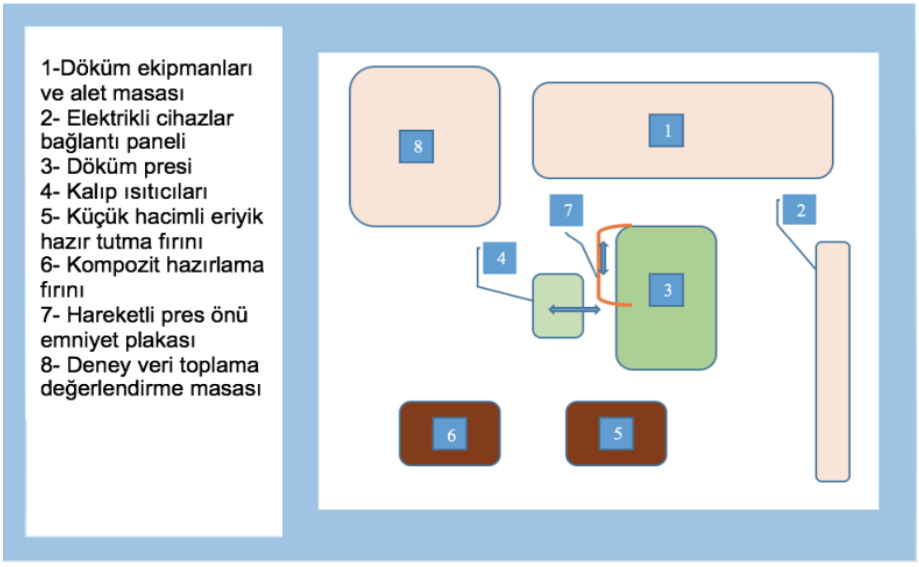
Fırın içerisindeki ergitme işlemi için, fırın sıcaklığının ve ergimiş metalin ergime sıcaklığının kontrolü termostat ve iki adet termoeleman (K-Tip) yardımıyla sağlanmıştır. Termoelemanlardan bir tanesi pota dışına temas ettirilmiş bir tanesi ise pota içindeki sıvı metal içine daldırılarak sıcaklık kontrolü sağlanmıştır.

Kompozit malzeme üretimi sırasında karıştırma işlemleri yarı-katı karıştırma uygulanması ile gerçekleştirilmiş olup, yarı-katı karıştırma döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretimi sırasında farklı sıcaklık aralıklarında ve hızlarda karıştırma işlemleri uygulanmasından dolayı karıştırma işlemi aşamalı olarak tasarlanmış ve her bir aşama için farklı karıştırıcı uçlar kullanılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2. 9. Yarı-katı metal karıştırma işlemlerinde kullanılan karıştırıcılar.

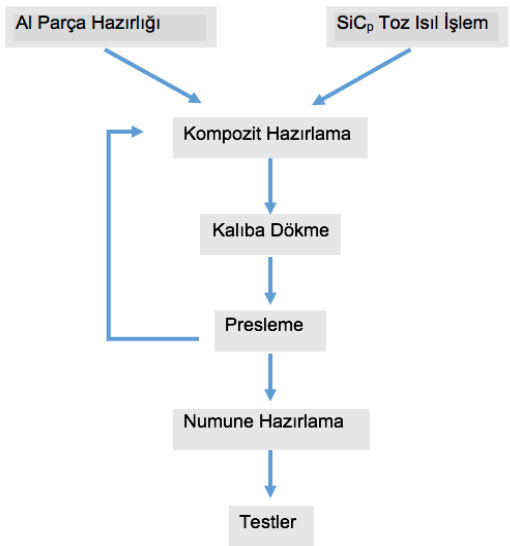
Deney düzenekleri ve kullanılacak malzemeler hazırlandıktan sonra çalışma alanı yerleşim planı şekil 2.10‘da görüldüğü gibi düzenlenmiştir.



Şekil 2. 10. Deney düzenek ve ekipmanları şematik yerleşim planı.

2.3. Üretim Prosesi

FD-Al-MMK üretim prosesi; Alüminyum parçacıklarının hazırlanması işlemi, SiC_p tozlarının ısıl işlemi, kompozit hazırlama, kalıba dökme, presleme ve tekrarı ile (ardışık döküm) gerçekleştirilen bir döngü (kademe sayısı kadar döngü tekrar ettirilir) sonucunda nihai ürün elde edilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 2.11'de işlem basamakları şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 2. 11. FD-AL-MMK üretim işlem basamakları şeması.

Matris malzemesi olarak seçilen ve büyük levhalar halinde temin edilebilen Alüminyum 7075' in pota içerisine yerleştirilebilmesi ve aynı zamanda kompozit malzeme karıştırma işlemleri sırasında matris malzemesi istenen miktarda ilavesinin yapılabilmesi için küçük parçalar halinde kesilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2. 12. Küçük parçalar halindeki Al 7075.

Genellikle metal olmayan taneciklerin sıvı metal ile ıslatılabilmesi çok zordur. Sıvı metalin takviye malzemesini ıslatma kabiliyetini arttırmak amacıyla; değişik alaşım elementlerinin ilavesi, seramik takviye malzemesinin kaplanması, seramik takviye malzemesine ısıl işlem uygulanması ve mekanik kuvvet uygulayarak ıslatılabilirliğinin arttırılması en çok kullanılan yöntemlerdir**.**

Bu yöntemlerden ısıl işlem yoluyla takviye parçacıklarının ıslatılabilirliğinin arttırılmasında, takviye parçacıkları üzerinde oksit tabakası oluşturularak, takviye ile matris malzemesi arasında ıslatmayı sağlayacak oksit kaplı bir yüzey (SiO_2 tabakası) elde edilir. Ayrıca, parçacık yüzeyi oksitlenerek hem istenmeyen reaksiyonlardan hem de karıştırma işlemleri öncesinde parçacık yüzeyinde absorbe edilmiş gazların ergiyiğin içine karışmasından kaçınılmış olunur.

Bu nedenle bu çalışmada takviye malzemesi olarak kullanılan SiC parçacıklarının alüminyum tarafından ıslatılabilme kabiliyetinin arttırılması amacıyla oksitlenmesini sağlamak için uygulanan ısıl işlem prosesinde; SiC parçacıkları ısıl işlem fırınında 1100˚C sıcaklıkta 5 saat tutulup ardından fırından çıkarılarak oda şartlarında soğumaya bırakılmıştır (Chin, 1999). Böylece takviye malzemesi olarak kullanılacak SiC

parçacıklarının oksitlendirme ısıl işlemi gerçekleştirilmiştir. Oksitlendirme işlemine tabi tutulan SiC parçacıkları ve ısıl işlem fırını şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2. 13. Seramik takviye malzemelerine uygulanan ısıl işlemde kullanılan fırın ve soğutma evreleri.

Bu aşamada FD-Al-MMK üretim işlemleri için, minimum miktarda ergiyik karışımın, kalıp tabanını tam olarak doldurmasını sağlayan sıcaklık ve basınç değerleri belirlenmiştir. Böylece mümkün olduğunca fazla kademeden oluşan bir yapı elde edilmiştir. Deneme dökümlerinde yarı-katı karıştırma sıcaklığı olarak 640°C-650°C aralığı belirlenmiştir. Bu sıcaklık kompozit malzeme hazırlamak için (SiC_p parçacıklarının Alüminyum metali içine karıştırılması safhası) yeterli olmakla birlikte pota içinden kalıp içine malzemenin dökülmesi aşamasında kalıp tabanını kaplayacak yeterli akıcılık sağlayamamıştır. Bu sebeple farklı döküm sıcaklıklarında (karışımın fırından çıkarıldığı sıcaklık) ve farklı basınçlarda denemeler yapılmış, sıvı kompozit karışımın kalıp tabanını doldurabildiği ve homojen yüksekliğin sağlanabildiği sıcaklık ve basınç değerleri tespit edilmiştir. Çizelge 2.7' de deney şartları ve elde edilen deneme döküm numuneleri görülmektedir. Bu aşamada sadece Alüminyum malzemesi kullanılmış olup takviye elemanı ilave edilmemiştir. İlk denemede minimum malzeme (kalıp tabanını dolduracak miktarda) hedeflendiğinden 100g alüminyum ile başlanmış olup malzeme miktarı istenen sonuca ulaşıncaya dek aşamalı olarak arttırılmıştır. Ergimiş

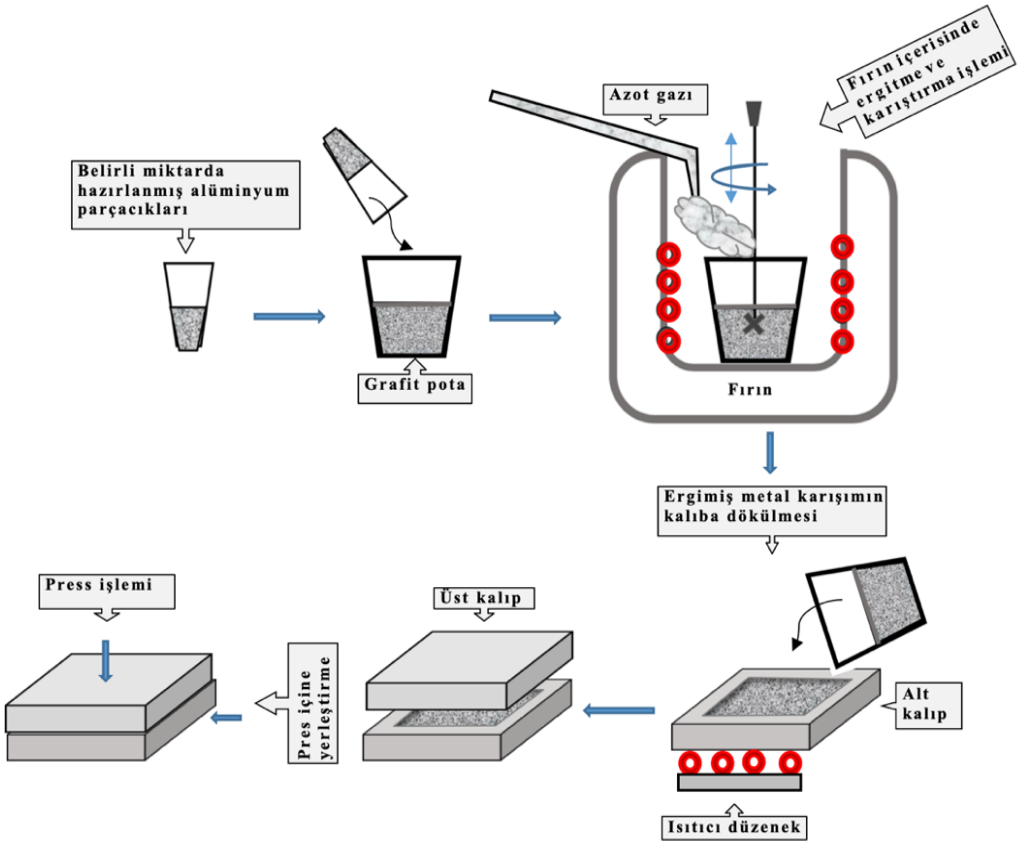
metal sıçramalarından kaçınmak maksadıyla basınç kademeli olarak arttırılırken bu denemelerde sıcaklıklar da kademeli olarak düşürülmüştür. 5 nolu dökümde optimum parametreye çok yaklaşılmış olup sadece köşelerde az miktarda kapanmayan alan kaldığından 6 nolu dökümde 10-15gr kadar malzeme takviyesi ve kalıp sıcaklıklarında 10°C artış ile ilk tabaka oluşturulmuş ve hemen üzerine ikinci tabakanın dökümü gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2. 7. Optimum basınç ve sıcklık belirleme çalışmaları.



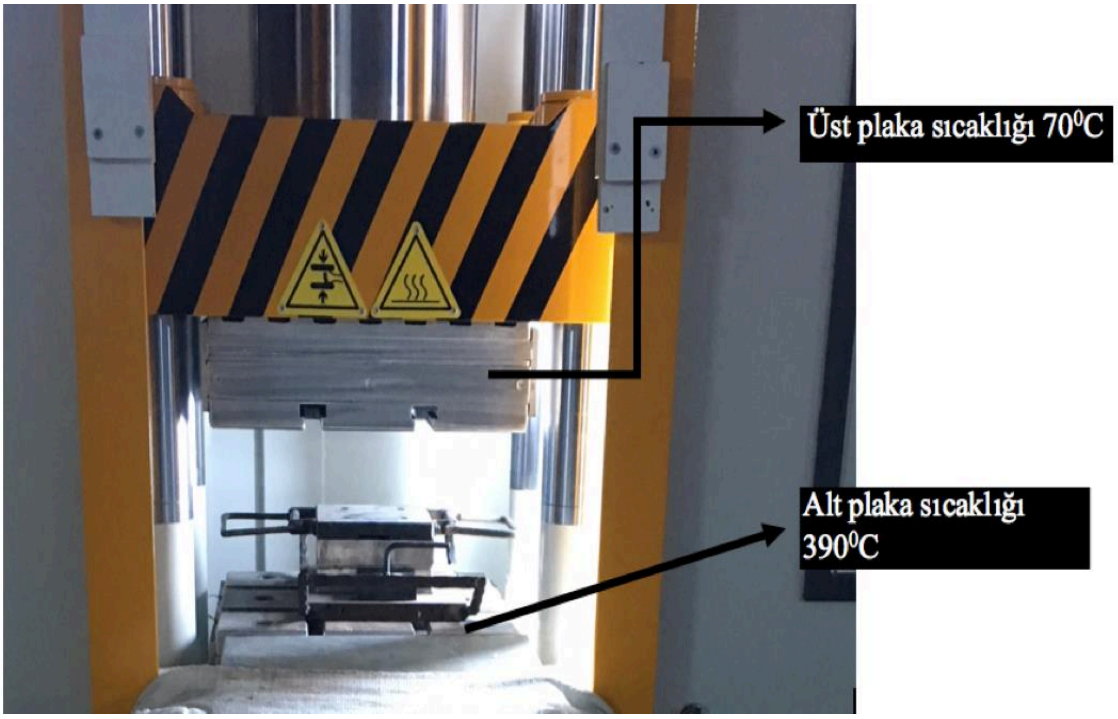
Döküm Sırası	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Alüminyum Miktarı(7075)	100 gr	280 gr	180 gr	310 gr	290 gr	611gr
Pres Hidrolik Basıncı	10 Bar	10 Bar	30 Bar	30 Bar	100 Bar	100 Bar
Basınç	6,6 MPa	6,6 MPa	19,8 MPa	19,8 MPa	66 MPa	66 MPa
Fırın Sıcaklığı	800^0 C	790^0 C	750^0 C	740^0 C	740^0 C	740^0 C
Üst Kalıp Sıcaklığı	470^0 C	430^0 C	390^0 C	340^0 C	330^0 C	340^0 C
Alt Kalıp Sıcaklığı	430^0 C	370^0 C	340^0 C	320^0 C	320^0 C	330^0 C
Döküm Tabaka Sayısı	1	1	1	1	1	2

Yapılan denemeler sonucunda elde edilen iki kademeli dökümün başarıyla sonuçlanmasıyla FD-Al-MMK malzeme üretim parametrelerimiz; alt kalıp sıcaklığı 330 °C, üst kalıp sıcaklığı 340°C ve pres basıncı 100 bar olarak seçilmiştir. Uygulama sırasında ısı transferinden doğacak kayıplar dikkate alınarak kalıbın konulacağı press alt tabla sıcaklığı 50 °C daha fazla bir sıcaklığa (390°C) ısıtılmıştır. Bu sıcaklık ve basınç değerlerinde kompozit karışımın kalıp tabanınında yayılması ve istenilen yükseklikte dökülmesi gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 2. 14. Malzemede ilk tabaka üretim işlem basamakları şeması.

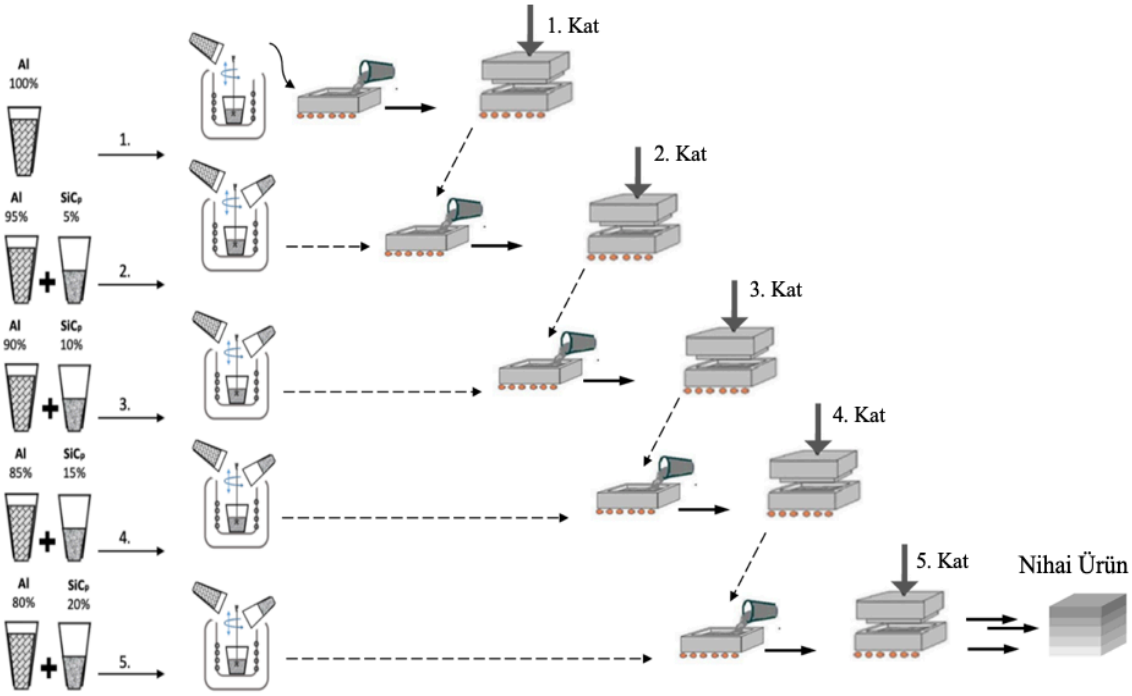
FD-Al-MMK malzemenin ilk tabakasını (Şekil 2.14) hazırlamak için ergitme fırınının sıcaklığı 750°C'ye çıkarılarak bu aralıkta sabit tutulmaya çalışılmıştır. Azot gazı ergimiş metal üzerine sıcak olarak verilmesini sağlayacak şekilde fırına yerleştirilmiştir. Ergitme ve karıştırma işlemlerinin yapıldığı potanın içine matris malzemesi konulduktan sonra, ilk katı takviyesiz olacağından; malzeme eriyik hale getirildikten sonra ergitme ünitesinden çıkarılarak önceden ısıtılmış çelik kalıba boşaltılmıştır. Üzerine üst kalıp kapanıp pres tablasının altına sürüldükten (Şekil 2.15, bu esnada pres üst plaka sıcaklığı 70 ^{o}C alt plaka sıcaklığı da 390 ^{o}C olarak ölçülmüştür) birkaç saniye içinde sıkıştırma işlemi başlatılmış, 10 saniye süre ile 66 MPa sıkıştırma basıncı uygulandıktan sonra kalıp dışarıya alınarak ilk tabaka oluşturulmuştur.



Şekil 2. 15. Döküm kalıpları ve pres görünümü.

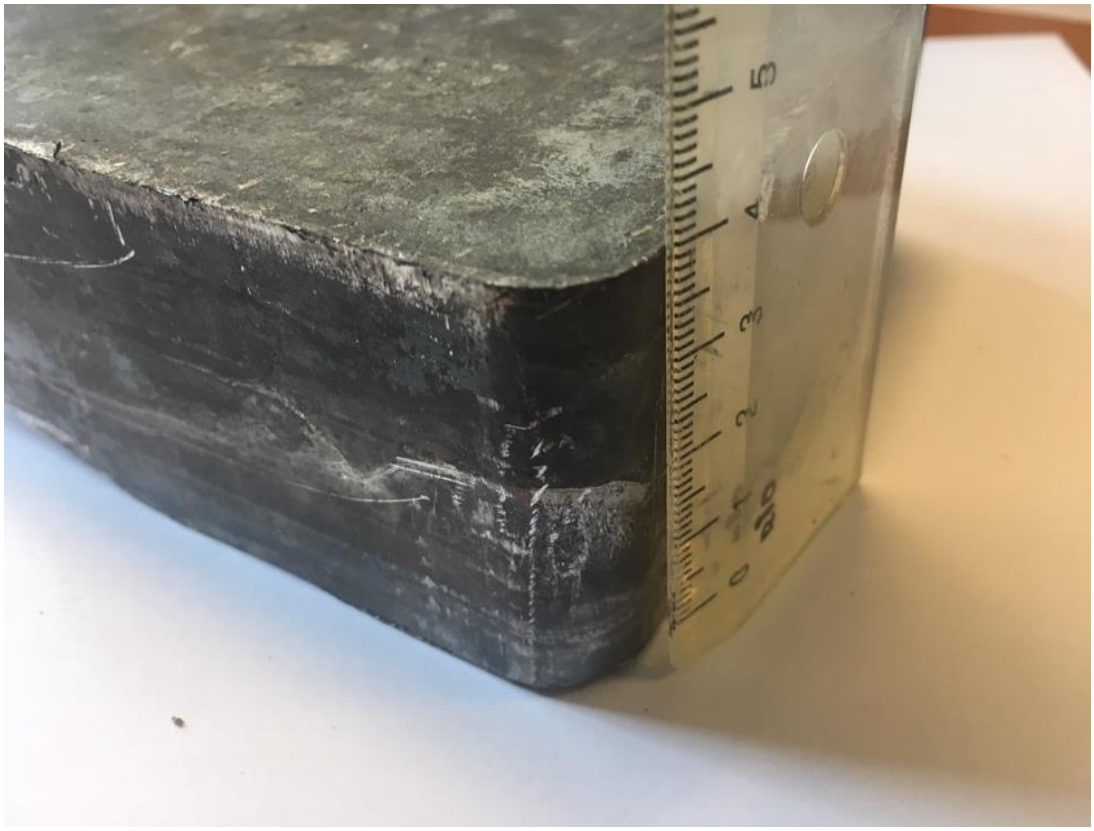
2. tabaka için; yarı-katı sıcaklık aralığına kadar ısıtılarak hazırlanmış matris malzemesi içine, ısıtılmış, toplamda ağırlıkça %5 oranında olacak şekilde hazırlanan, seramik parçacık takviye malzemesi katılmıştır. Matris malzemesi yarı-katı sıcaklıkta iken farklı uç profillerine sahip karıştırıcılar ile düşük hızlı karıştırma ve yoğurma işlemleri uygulanarak takviye parçacıklarının matris malzemesi içine karışması sağlanmıştır.

Karışımın sabit sıcaklık aralığında tutulması belirli oranlarda matris malzemesi ilavesi ile mümkün olmuştur. İçine katılan bütün takviye malzemesi bitene kadar karışım sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Daha sonra karışım ergitme ünitesinden çıkarılarak pres tablası altına yerleştirilmiş kalıp içeresinde bulunan ilk tabakanın üzerine dökülerek üzerine üst kalıp kapanıp pres tablasının altına sürüldükten birkaç saniye içinde sıkıştırma işlemi başlatılmış, 10 saniye süre ile 66 MPa sıkıştırma basıncı uygulandıktan sonra (basınç altında katılaştırılmıştır) kalıp dışarıya alınarak 2. tabakanın oluşumu sağlanmıştır. Bu süreç 5. tabaka oluşturulana kadar tekrar edilmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2. 16. FD-Al-MMK üretim işlem basamakları.

Bu üretim şeklinde; sıvı haldeki kompozit karışım, katılaşmış alüminyumun üzerine dökülerek, katı haldeki alüminyum malzemenin sıvı malzeme ile teması sebebiyle kısmi ergime oluşturması ve tabakalar arası birleşme sağlanması amaçlanmıştır. Sırası ile %5, %10, %15 ve %20 SiCp takviyeli kompozit karışımlar ardışık olarak üst üste dökülüp, basınç altında katılaştırıldıktan sonra işlem sona erdirilmiş ve FD-Al-MMK malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2. 17. FD-Al-MMK malzeme (Nihai ürün).

BÖLÜM 3

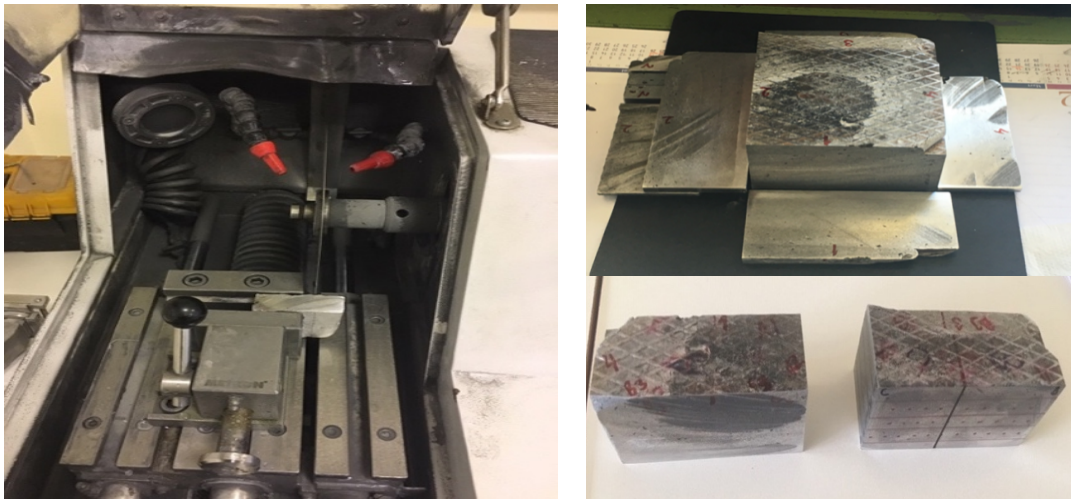
MALZEME KARAKTERİZASYONU

3.1. Numune Hazırlama

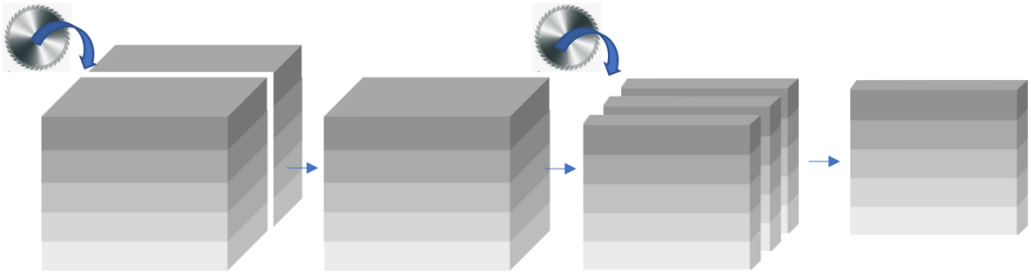
Takviye oranları %0-%5-%10-%15 ve %20 olmak üzere beştabakalı olarak elde edilen, fonksiyonel derecelendirilmiş silisyum karbür parçacık takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılacak test ve analizler için, numune hazırlama işleminde, hassas kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.1). Elde edilen FD-Al-MMK ürünün, öncelikle kalıplarla temas eden dış yüzeyler kesilerek temizlenmiş ve böylece kalıplarda kullanılan grafit tozu vb. temaslar dolayısıyla test sonuçlarının etkilenmesi olasılığının önlenmeye çalışılmıştır (Şekil 3.1).

Daha sonra ise deney numunelerinin çıkarılacağı fonksiyonel derecelendirilmiş yapıdan kesitler elde edilmiş olup (Şekil 3.2) bu kesitlerden; ısıl işlem, sertlik testleri, spektrometre analizi ve üç nokta eğme testi için standartlara uygun deney numuneleri çıkartılmıştır.

Numuneler; zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilerek incelemeler için hazırlanmıştır.



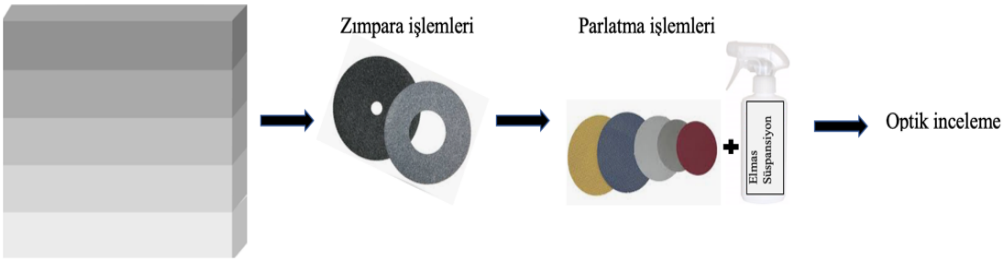
Şekil 3. 1. Hassas kesme cihazı ve FD-Al-MMK kesitleri.



Şekil 3. 2. Ana gövdeden çıkarılan kesit parçaların şematik gösterimi.

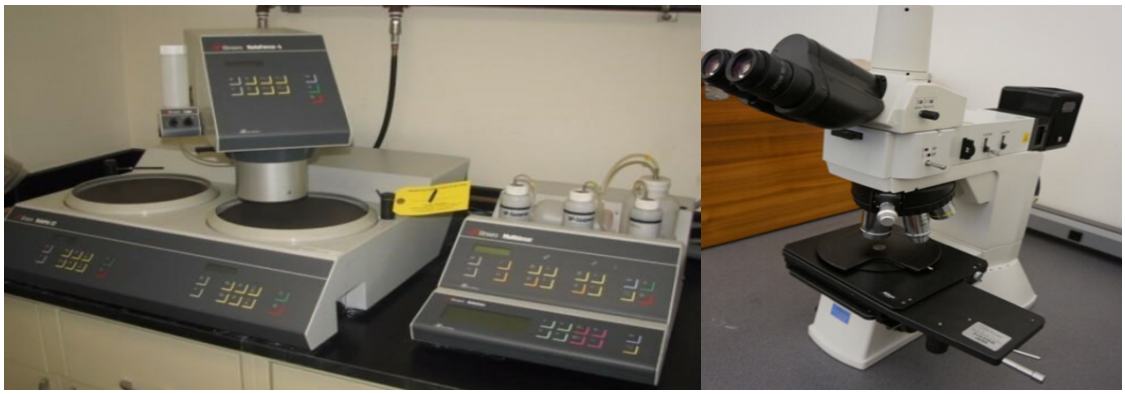
3.2. Metalografik İnceleme

Üretilen FD-Al-MMK malzemede, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme yapısını, ara geçiş bölgelerini ve SiC parçacıklarının dağılımını tespit etmek amacıyla metalografik inceleme gerçekleştirmek için, uygun numunelerin elde edilme işlemleri sırasıyla şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 3. Metalografik inceleme hazırlık işlemleri şematik gösterimi.

Optik inceleme numuneleri, TÜBİTAK MAM'da bulunan Şekil 3.4'te görülen otomatik zımpara (Struers Rotopol 25- Rotoforce 4) ve parlatma cihazı vasıtasıyla, en küçüğü 280 olmak üzere sırasıyla 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 4000 mesh SiC zımparalarıyla işlemden geçirildikten sonra yine sırası ile uygun keçeler kullanılarak; 6µm, 3 µm, 1µm diamond paste ile parlatma işlemi yapılmıştır. Son olarak da kolloidal silika ile parlatılarak mikroyapı incelemeleri için hazırlanmış ve sırasıyla takviyesiz ve %5, %10, %15, %20 SiCp takviyeli bölgelerden ve bölgelerin birleşme yerlerinden Nikon Eclipse L150 optik mikroskop (Şekil 3.4) ile 5X büyütmede görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3. 4. Struers Rotopol 25- Rotoforce 4 otomatik zımpara- parlatma cihazı ve Nikon Eclipse L150 optik mikroskop.

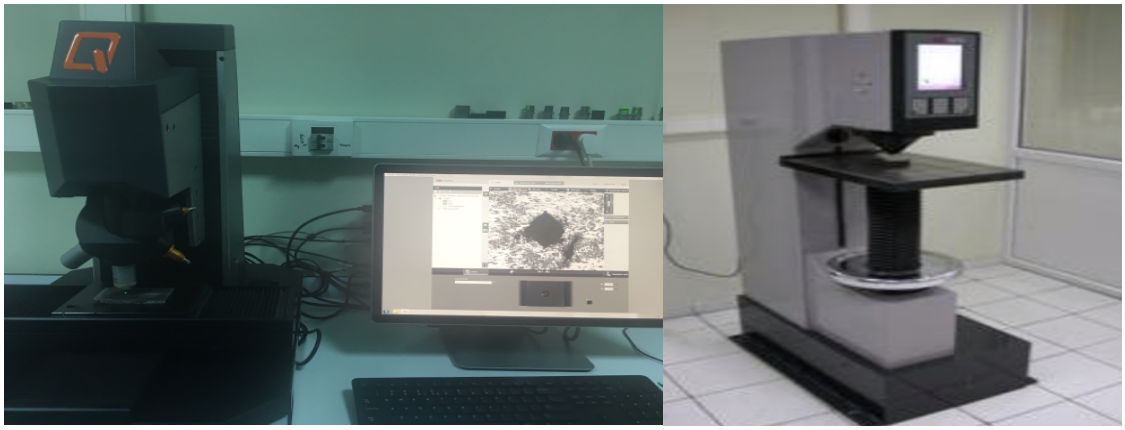
3.3. Sertlik Ölçümleri

Malzeme takviye oranlarının arttırılması ve ardışık sıkıştırma döküm işlemleri sonrasında üretilen FD-Al-MMK malzemenin kesiti boyunca oluşan sertlik dağılımını

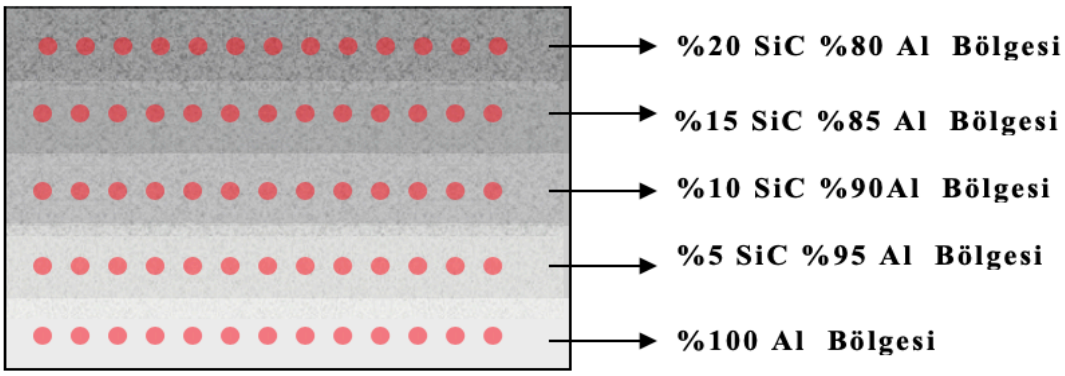
tespit etmek amacıyla Brinell ve Micro-Vickers yöntemleri ile sertlik ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Bu ölçümlerde TÜBİTAK MAM'da bulunan Şekil 3.5'te görülen, mikro sertlik için tam otomatik mikro sertlik cihazı (Qness GMBH Q10A) ve Brinell sertlik ölçümleri için de Universal sertlik test cihazı kullanılmıştır.

Sertlik testleri için hazırlanan numuneler üzerinde Şekil 3.6'da görüleceği üzere uygun noktalar belirlenerek, bu noktalar üzerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Brinell sertlik ölçümleri; 62,5 kg yük altında 2.5 mm çaplı bilya kullanarak gerçekleştirilmiş olup, mikro vickers sertlik ölçümlerinde 100 gr yük kullanılmıştır.



Şekil 3. 5. Qness GMBH Q10A+ tam otomatik mikro sertlik ölçüm cihazı ve universal sertlik ölçüm cihazı.



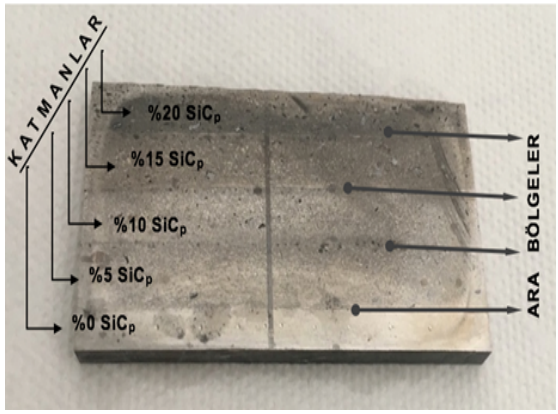
Şekil 3. 6. Hazırlanan FDM numuneler üzerinde mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar.

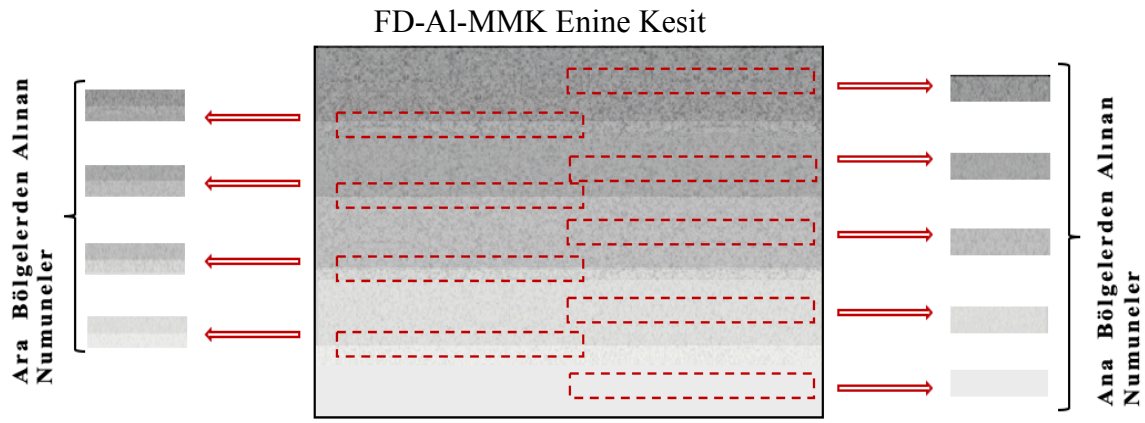
3.4. Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümü numuneleri, kesit üzerindeki farklı bölgelerden (Çizelge 3.1) ve bu bölgelerin özelliklerini temsil edecek şekilde parçalar kesilerek (Şekil 3.7) hazırlanmıştır. Kesme işlemlerinde hassas kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8). Elde edilen numunelerin yoğunlukları, Arşimet prensibine göre ölçüm yapabilen Metler Toledo marka 1/1000 gr hassasiyetli tartı kullanılarak ölçülmüştür.

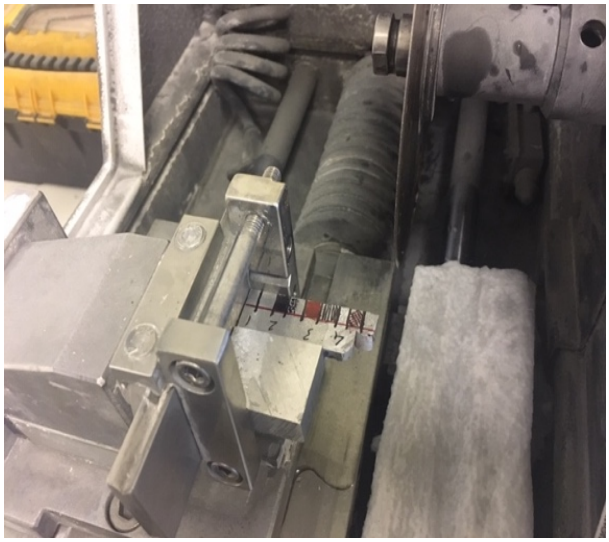
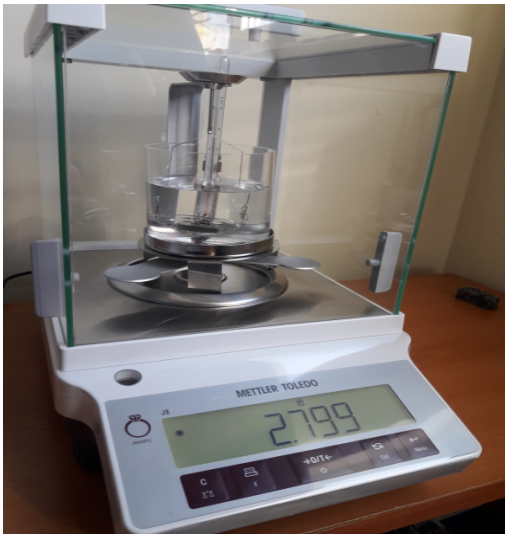
Çizelge 3. 1. Yoğunluk ölçümü bölgeleri.

Test numunesi alınan bölge SiC % oranı	Bölge No
%20	9
%15- %20 ara bölgesi	8
%15	7
%10- %15 ara bölgesi	6
%10	5
%5- %10 ara bölgesi	4
%5	3
%0-%5 ara bölgesi	2
%0	1





Şekil 3. 7. Yoğunluk ölçümü numuneleri ve numunelerin alındıkları bölgelerin şematik gösterimi.

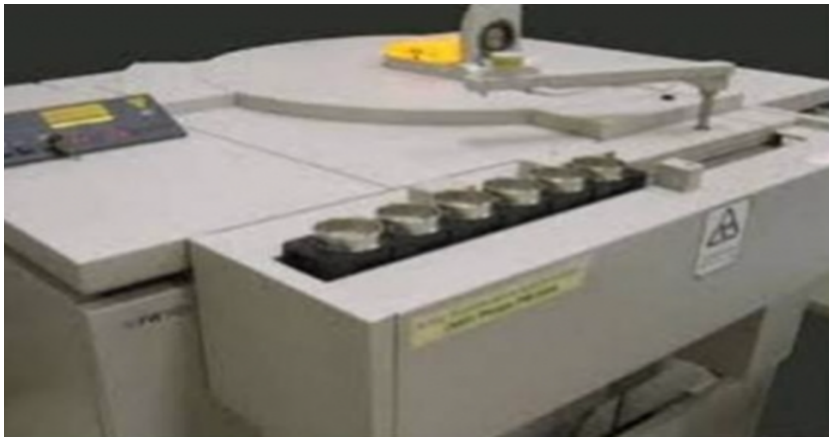
Şekil 3. 8. Hassas kesme cihazı ve yoğunluk ölçüm cihazı.

Yoğunluk ölçümü için her bölgeden 3'er adet olmak üzere toplam 27 adet numune hazırlanmıştır ve ölçümde oluşabilecek hataları azaltmak için her biri 3'er kez tartılmıştır. Sonuçlar ortalama olarak belirlenip grafikleri çizilmiştir.

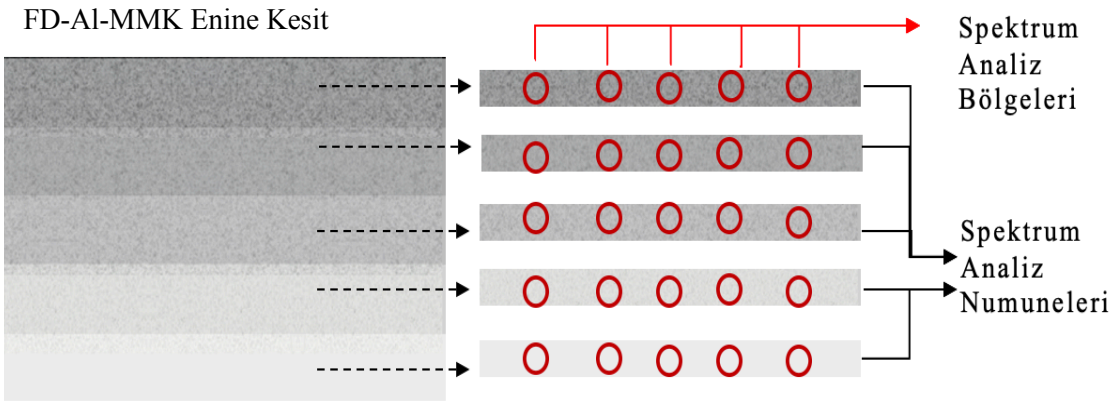
3.5. Spektrometre Analizi

Üretilen kompozit FD-Al-MMK'nın kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla, numunenin kesiti üzerinde takviye oranı değişen her bir tabakadan spektrometre analizleri yaptırılmıştır. Spektrometre analizleri TÜBİTAK MAM X-ışınları laboratuvarında bulunan Optik Emisyon Spektrometre (OES) cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).

FD-Al-MMK malzemeden, şekil 3.10'da şematik olarak görüleceği üzere, enine kesit olarak elde edilmiş parça üzerinden, her bir katmanın orta bölümlerinden alınan parçalardan 5'er adet spektrum analizi yaptırılarak ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3. 9. Optik Emisyon Spektrometre (OES) cihazı.



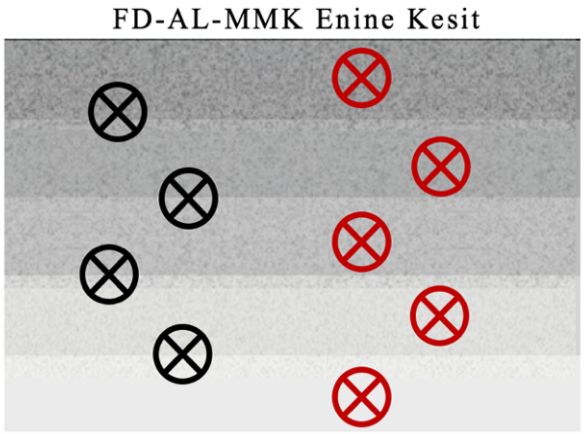
Şekil 3. 10. Spektrum analizi numuneleri ve ölçüm bölgelerinin şematik gösterimi.

3.6. SEM-EDS Analizi

Optik inceleme için hazırlanan numuneler SEM ve EDS analizleri için de kullanılmıştır. Bu numunelerde, tabakalı yapının geçiş bölgeleri ve tabakaların orta noktalarına denk gelen bölgeleri belirlenerek (Şekil 3.11), bu bölgelerde incelemeler yapılmış ve taramalı elektron mikroskobuyla yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir.

Takviye elemanı olarak kullanılan silisyum karbür parçacıkları tane görüntüleri ve matris malzemesine içinde dağılımını gösteren görüntüleri alınmıştır. Gerekli görülen yerlere elemental kimyasal analiz yaptırılmıştır.

Tüm bu işlemler TÜBİTAK MAM'da bulunan Şekil 3.12' de görülen Cambridge S4-10 Stereoscan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ve ona entegreli Ortec 6230 EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) sistemi ile gerçekleştirilmiştir



Şekil 3. 11. SEM-EDS analizi için belirlenen inceleme bölgelerinin şematik resmi.



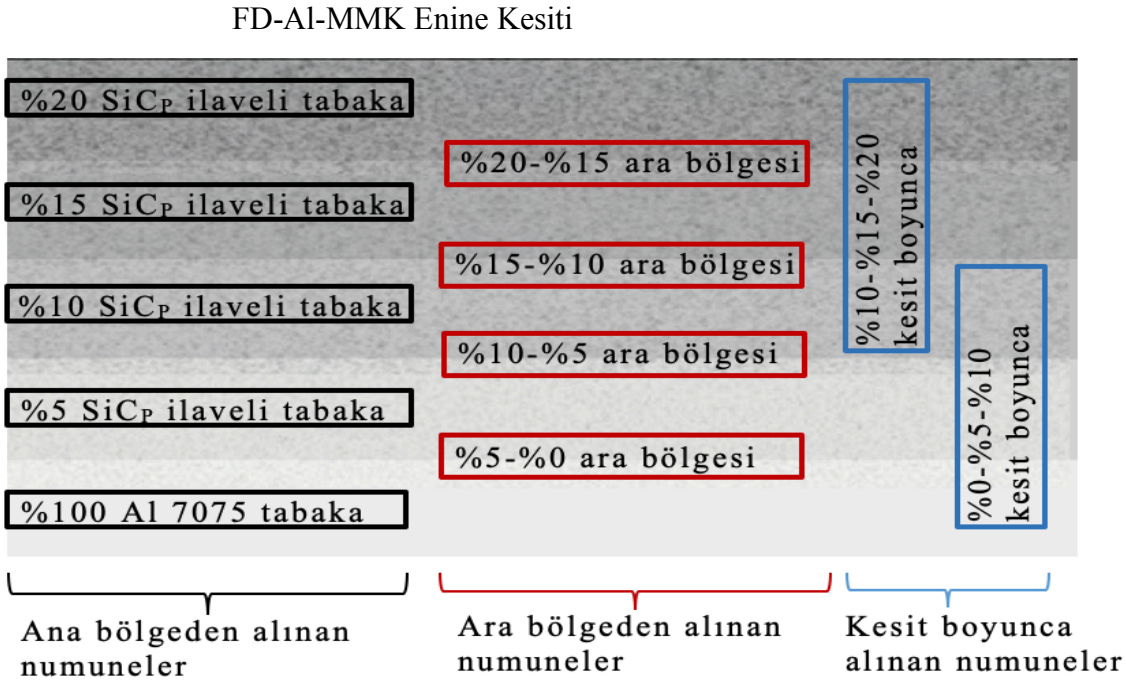
Şekil 3. 12. SEM-EDS Cihazı.

3.7. Dilatometre Testi

Fonksiyonel derecelendirilmiş yapılarda bulunan malzemelerde derece geçişi tabakalar halinde ise bu tabakalar arası ısıl genleşme katsayısının birbirine yakın olması istenir. Tabakalar arası ısıl genleşme katsayılarının farkının az olması, ısı değişimi durumlarında çatlamaya ve bağlantı kopmasına sebebiyet verecek ısıl gerilmeleri azaltır. Katmanlar arası ısıl genleşme katsayıları farkının yüksek olması halinde iyi

derecelendirilmiş fonksiyonel bir malzeme elde edilmiş olsa bile, oluşabilecek ısıl gerilmeler sebebiyle malzeme devamlılığı sağlanamayacaktır.

Elde edilen FD-Al-MMK malzemede yapılan takviye oranlarına bağlı olarak tabakalar arası bağın devamlılığının ısı tesiri altında sürdürülebilirliğini, değişimlerini ve istenen dereceli yapının sağlanıp sağlanmadığını tespit etmek amacıyla dilatometre testleri yapılmıştır. Şekil 3.13'de gösterilen bölgelerden uygun numuneler alınarak Isıl genleşme katsayısı tespitinde kullanılmıştır. Tüm dilatometre testleri TÜBİTAK-MAM' da bulunan Netzsch DIL 402 C (ASTM E831 ve D696 standartlarında) ölçüm cihazında (Şekil 3.14) 0,4x0,4mm kesitte ve 20mm uzunluğunda numunelere 5˚C/dak ısıtma hızında 20-450 ˚C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 13. Dilatometre testi için kesit boyunca numune çıkarılan bölgeler.



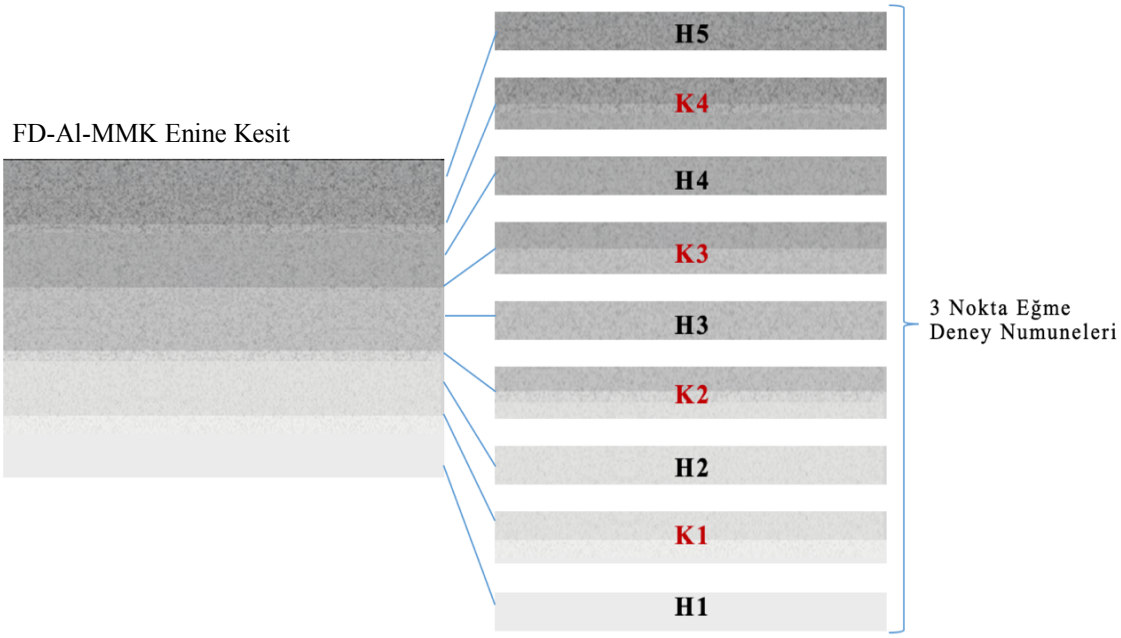
Şekil 3. 14. Netzsch DIL 402 C dilatometre test cihazı.

3.8. Üç Nokta Eğme Testleri

Literatürde, parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerde, parçacıkların test esnasında çentik etkisi göstermesinden dolayı çekme ve basma testlerine nazaran üç nokta eğme testi daha doğru bir yaklaşım kabul edildiğinden (Baradeswaran ve Perumal, 2014) dolayı malzeme özelliklerini incelemede tercih edilmiştir.

Farklı tasarım ve üretim yöntemleriyle elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş yapıların, tabakalar halinde oluşturulan proseslerinde, malzemeler bir veya daha fazla tabakanın birleştirilmesi ile oluşturulduklarından, en büyük problem bu sistemdeki malzemelerin birleşme bölgelerindeki hasar oluşumlarıdır (Altan, 2009).

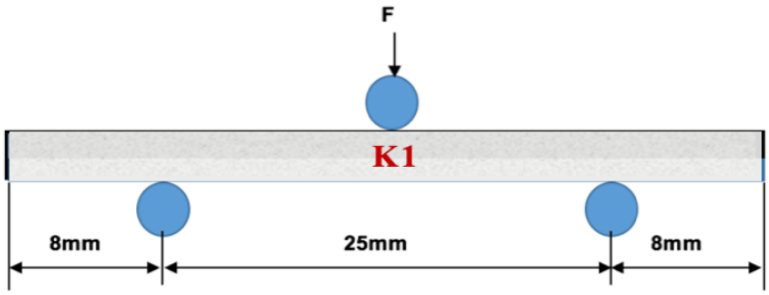
Bu sebepten ara bölgedeki birleşme durumunu görme amacıyla tabakalı yapısının birleşme bölgesi olan ara bölgelerinden (K1=%0-%5 SiCp, K2=%5-%10 SiCp, K3=%10-%15 SiCp, K4=%15-%20 SiCp) ve kompozit malzeme içerikli tabakaların homojen bölgelerinden (H1=%0 SiCp, H2=%5 SiCp, H3=%10 SiCp, H4=%15 SiCp, H5=%20 SiCp) deney numuneleri hassas kesme cihazı ile kesilerek Şekil 3.15'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Üç nokta eğme testleri TÜBİTAK'ta Zwick Roell/Allroundline test cihazıyla (Şekil 3.16) 5mm/dk test hızında gerçekleştirilmiş olup, test şematik diyagramı Şekil 3.17' de verilmiştir.



Şekil 3. 15. Üç nokta eğme testi deney numuneleri ve numune alınan bölgeler.



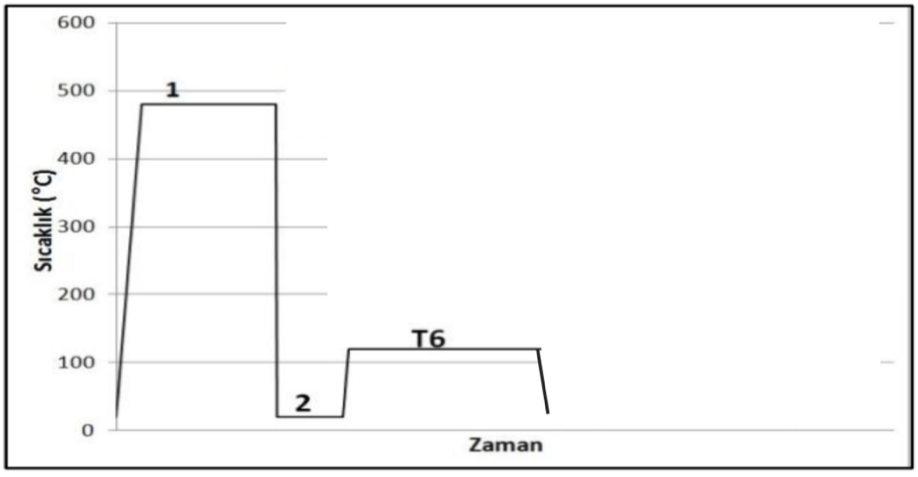
Şekil 3. 16. Üç nokta eğme test cihazı.



Şekil 3. 17. Üç nokta eğme testi (K1 numunesi).

3.9. Isıl İşlemler

Matris malzemesi olarak kullanılan Al 7075'in seramik takviyeli FDM formunda sergileyeceği davranışı tespit etmek amacıyla elde ettiğimiz FD-Al-MMK malzemenin bir kesitine T6 ısıl işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 18. T6 ısıl işlemi aşamaları.

T6 ısıl işlemi: Isıl işlem numunesi, Şekil 3.18' de şematik olarak verilen süreç takip edilmiştir. 1 nolu aşamada 480 ºC' ye ısıtılmış fırın içerisine koyularak 55-60 dk kadar bekletilmiştir. Bu süre sonunda hızlı bir şekilde oda sıcaklığına indirilmesi gerektiğinden numune fırından çıkarılır çıkarılmaz buzlu su içerisine daldırılarak (buzlu su ve numunenin sıcaklık ölçümleri termometre ve termokupl vasıtasıyla yapılmıştır) (Şekil 3.19) oda sıcaklığına soğutulduktan sonra oda sıcaklığında beklemeye alınmıştır.



Şekil 3. 19. Buzlu su ile soğutma tertibatı.

2'nolu aşamada, numune oda sıcaklığında 1 saat bekletilmiştir. Son olarak T6 ile gösterilen aşamada ise, 120 ºC' ye ısıtılmış fırın içinde 24 saat bekletilmiş ve soğutma işlemi oda sıcaklığında devam etmiştir. Isıl işlemlerde TÜBİTAK MAM'da bulunan Şekil 3.20' de görülen ısıl işlem fırını (Protherm ELV) kullanılmıştır.



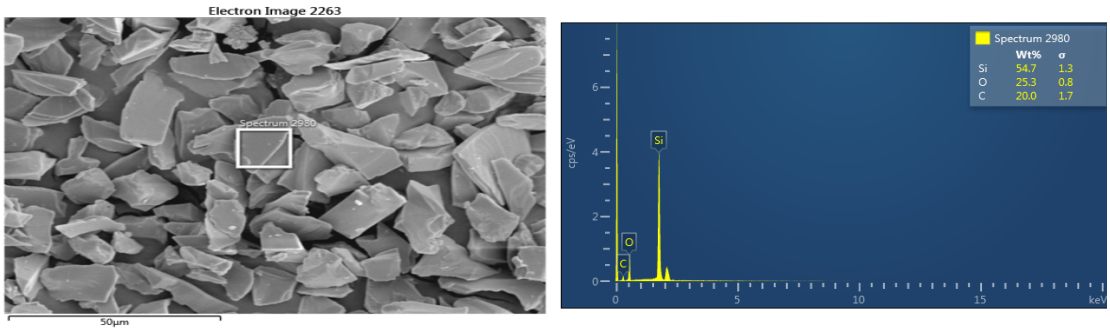
Şekil 3. 20. Isıl işlem fırını Protherm ELV.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Seramik Takviyelere Uygulanan Isıl İşlem Sonuçları

Şekil 4.1'de SiC takviye tozlarının ısıl işlem sonrası SEM ve EDS analizleri görülmektedir. EDS analizi ile SiC parçacık yüzeylerinde O, C ve Si elementlerinin var oluşu, oksit tabakasının varlığını ispatlamaktadır. Literatürde benzer çalışmalarda da ısıl işlem görmüş ve oksit tabakasıyla kaplanmış takviye parçacıklarının sıvı alüminyum tarafından daha iyi ıslatıldığı görülmüştür (Ürkmez, 2004; Ürkmez Taşkın, Taşkın, Yurci, 2010).



Şekil 4. 1. Isıl işlem sonrası takviye tozları SEM ve EDS analizleri.

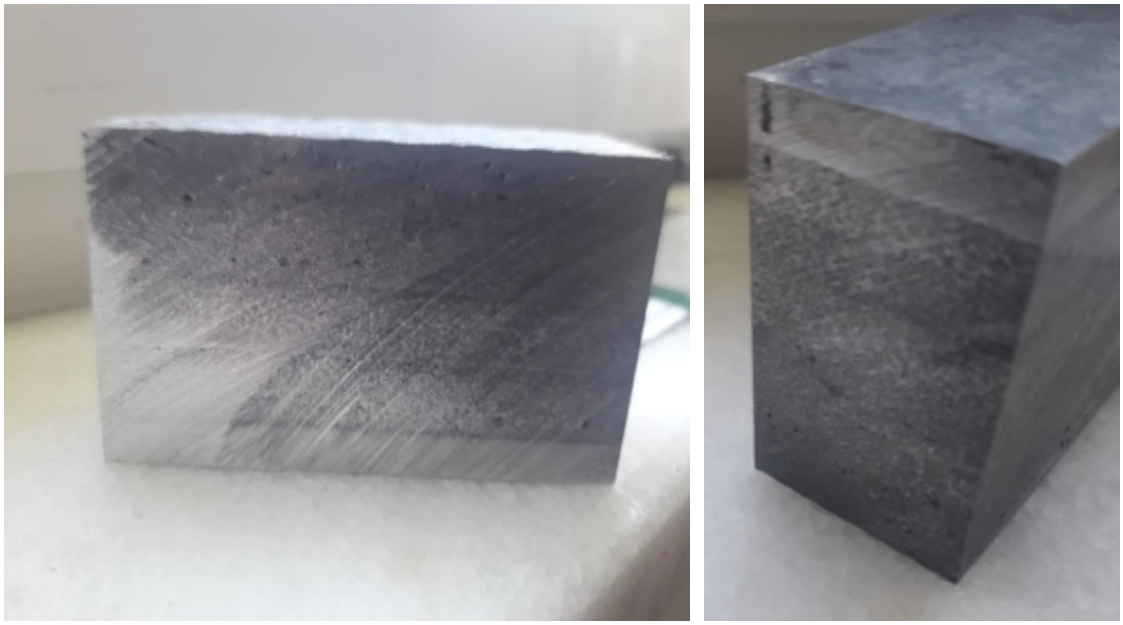
4.2. FD-Al-MMK Malzeme Üretimi

Ardışık sıkıştırma döküm ve basınç altında katılaşma yöntemi ile elde edilen numuneler Şekil 4.2'de görülmektedir. Numuneler, sıvı metalin katılaşmış tabakalar üzerine tekrarlı dökümü ile üretilmiştir. 5 tabaka olarak gerçekleştirilen döküm işleminde kompozit karışım ile kalıbın tam olarak doldurulması sağlanmış, makro inceleme

sonucunda tabakalar arasında tam birleşme gözlenmiş, çatlak ya da büyük gözenekli yapı gözlenmemiştir. Üretilen numune tam ortasından kesilerek iç yapı görünümünün makro incelemesi yapılmıştır. Her tabakanın düzgün bir şekilde ve boşluksuz birbiri üzerinde katılaşmış olduğu görülmüş, makro boyutta döküm hatalarına rastlanmamıştır. Her tabakadaki birleşme bölgesinde gözle görülen kesin ayrım çizgisi bulunmadığı ve yaklaşık 2-4 mm kalınlık aralığında geçiş bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4. 2. FD-Al-MMK malzeme örnekleri.



Şekil 4. 3. FD-Al-MMK numune kesitindeki dereceli yapı.

4.3. Spektrometre Analizi Sonuçları

Spektrometre analiz sonuçlarından numune üzerindeki farklı takviye oranlarına sahip tabakalar ve bu tabakalardaki SiC oranları Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4. 1. Farklı tabakaların spektrometre sonuçları.

	Si	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Ni**	**Zn**
1. tabaka	0,0610	0,0254	0,516	0,0287	1,57	0,257	0,00050	4,00
2. tabaka	2,42	0,639	1,21	0,0817	2,69	0,159	0,0085	4,57
3. tabaka	6,42	0,831	1,45	0,167	2,80	0,241	0,0248	4,79
4. tabaka	14,32	0,798	1,69	0,0441	2,38	0,200	0,0201	5,50
5. tabaka	20,84	1,03	1,60	0,0253	2,01	0,190	0,0271	4,94
	Ti	**Be**	**Pb**	**Sn**	**V**	**Zr**	**Al**	
1. tabaka	0,0555	0,00009	0,0079	--------	0,0092	0.0211	93,4	
2. tabaka	0,0489	0,0017	0,0129	0,0025	0,0076	0,0427	88,1	
3. tabaka	0,0343	0,0024	0,0253	0,0072	0,0117	0,0710	83,1	
4. tabaka	0,0360	0,00074	0,0253	0,0020	0,0153	0,124	74,8	
5. tabaka	0,0344	0,0011	0,0339	0,0025	0,0241	0,161	68,7	

Spektrometre analiz sonuçlarında numune üzerindeki farklı takviye oranlarına sahip tabakalar ve bu tabakalardaki SiC olarak görülmektedir. Diğer elementlerin oranları önemli ölçüde değişmezken takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'ün bileşimindeki Si elementindeki değişim, bu elementin takviye oranı ile orantılı olarak arttığını göstermiştir.

4.4. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

FD-Al-MMK malzeme tabakalarından ve geçiş bölgelerinden çıkarılan numunelerin (Şekil 4.4) yoğunluk ölçümleri yapılmıştır.

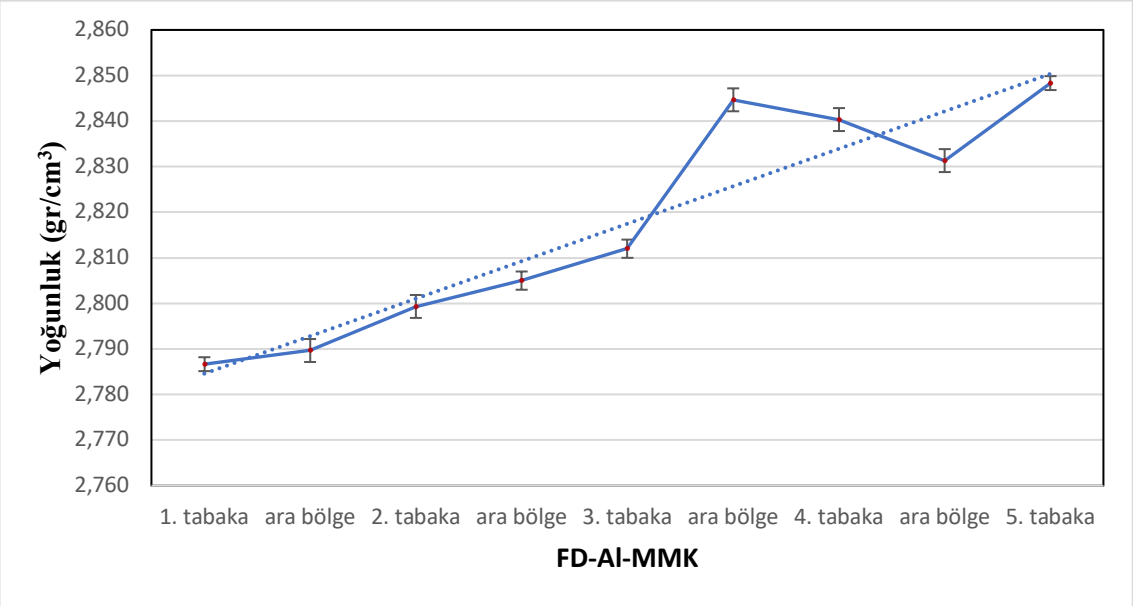


Şekil 4. 4. Yoğunluk ölçümü yapılan numuneler.

Sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.5’ te verilmiştir. Çizelge 4.2’de hem ölçülen yoğunluk değerleri hem de teorik yoğunluklar verilmiş olup ikisi arasındaki farkı gösteren porozite miktarları da ($\%porozite=(\rho_{teorik}-\rho_{deneysel}/\rho_{teorik})\times100$) hesaplanmıştır. Elde edilen değerler ana kademelerde yoğunluğun takviye oranları arttıkça arttığını göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Ara geçiş bölgelerinde yoğunluğun geçiş bölgesi öncesi ve sonrası kademelerden fazla olması üretim sırasında bu bölgede kısmi ergime meydana gelerek iki kademenin bölgesel olarak birbirine karıştığını göstermektedir. Ara geçiş bölgelerinde yoğunluğun geçiş bölgesi öncesi ve sonrası kademelerden az olması ise bu bölgede gözenek oluştuğunu veya ergime sırasında takviyenin bu bölgeyi terk ettiğini göstermektedir. Mikroskobik incelemelerde bu bölgede ayrışma gözlenmemiş olup gözenek oluşumunun baskın olduğunu göstermektedir. %15 SiCp takviyeli kademeden %20 kademeli bölgeye geçerken oluşan geçiş bölgesinde gözenek yoğunluğunun çok olması yoğunluk ölçüm sonuçlarını doğrulamaktadır.

Çizelge 4. 2. Yoğunluk ölçümü sonuçları.

%SiC	Ölçülen yoğunluk (gr/cm^3)	Teorik yoğunluk (gr/cm^3)	Porozite %
%0	2.787	2.81	1.06
%0-5	2.790	---	---
%5	2.799	2.83	1.413
%5-10	2.805	---	
%10	2.812	2.85	1.403
%10-15	2.845	---	---
%15	2.840	2.87	1.045
%15-20	2.831	---	---
%20	2.848	2.89	1.73



Şekil 4. 5. FD-Al-MMK numune kesit boyu yoğunluk dağılımı grafiği.

Prabhu (2017), santrifüj döküm yöntemi kullanarak %6 ve %9 SiC takviyeli 7075 Alüminyum alaşımından fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üretmiş ve karakteristiğini incelemiştir. SiC parçacıklarının yoğunluğu (ρ=3.21gr/cm^3) matris malzemesine oranla (ρ=2,81gr/cm^3) daha büyük olduğundan, takviye oranı arttıkça malzemenin yoğunluğunun da artacağı tespitini doğrulamıştır. Porozite oranı %9 SiCp takviyeli FDM de %3 ün üzerinde bulmuşlardır. Tablo 4.2'de görülen yoğunluk sonuçları artan takviye oranıyla literatüre uygun olarak artmaktadır. Tüm tabakalarda porozite %2'nin altında bulunmuştur. Ölçülen yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluk

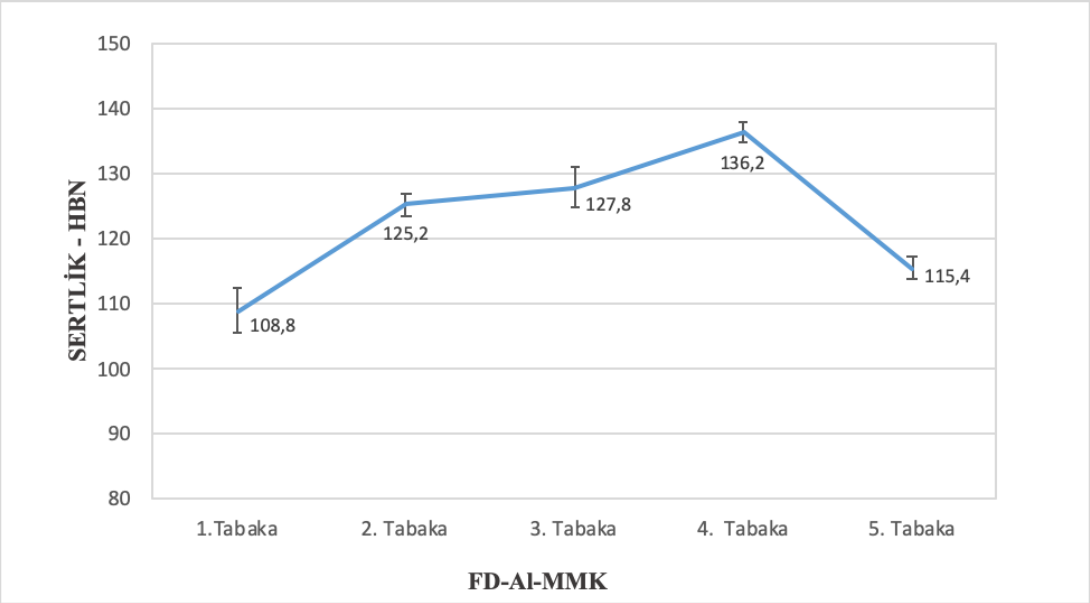
değerlerinden düşük oluşu ve porozitenin yüksek oluşunun sebebi olarak; sıvı matris malzemesi içerisinde, takviye parçacık artışı ile topaklanma ve gaz sıkışmalarının arttığı ve bu sebeple bu bölgelerde porozite değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Yarı-katı karıştırma ve basınçlı katılaştırmayı ardışık olarak uygulayarak elde edilen FD-Al-MMK malzemede ise %20 SiCp takviyeli bölgede porozite oranı yaklaşık %1,5 civarında ölçülmüş olup yöntemin daha az gözenekli yapı oluşturabildiği görülmüştür (Cornie, Moon, Flemings, Masounave ve Hamel, 1990, Lei ve Ledbetter, 1994). Ayrıca, FD-Al-MMK malzemede, artan takviye oranıyla porozitenin arttığı ancak hem bu artıştaki oranın hem de mikroyapı bakımından fonksiyonel derecelendirilmiş geçişin santrifüj döküme oranla daha iyi olduğu görülmüştür (Rajan, Pillai ve Pai, 2010, Prabhu, 2017).

4.5. Sertlik Testi Sonuçları

Şekil 4.6 ve 4.7'de kesit boyunca sertlik ve mikrosertlikteki değişimi veren grafik ve Çizelge 4.3'te ise değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere kesit boyunca takviye oranı %20 olan bölgeden takviyesiz bölgeye doğru sertliğin azaldığı fonksiyonel dereceli yapı oluştuğu belirlenmiştir (Kalkanlı ve Yılmaz, 2008, Prabhu, 2017).

Kalkanlı ve Yılmaz (2008), yaptıkları çalışmada pres basıncını 80 Mpa seçmişler ve ürettikleri malzemelerde, sırasıyla takviyesiz bölgede 126HB ve maksimum takviye olarak seçilen %20 SiCp takviyeli bölgede 151HB değerlerine ulaşmışlardır.

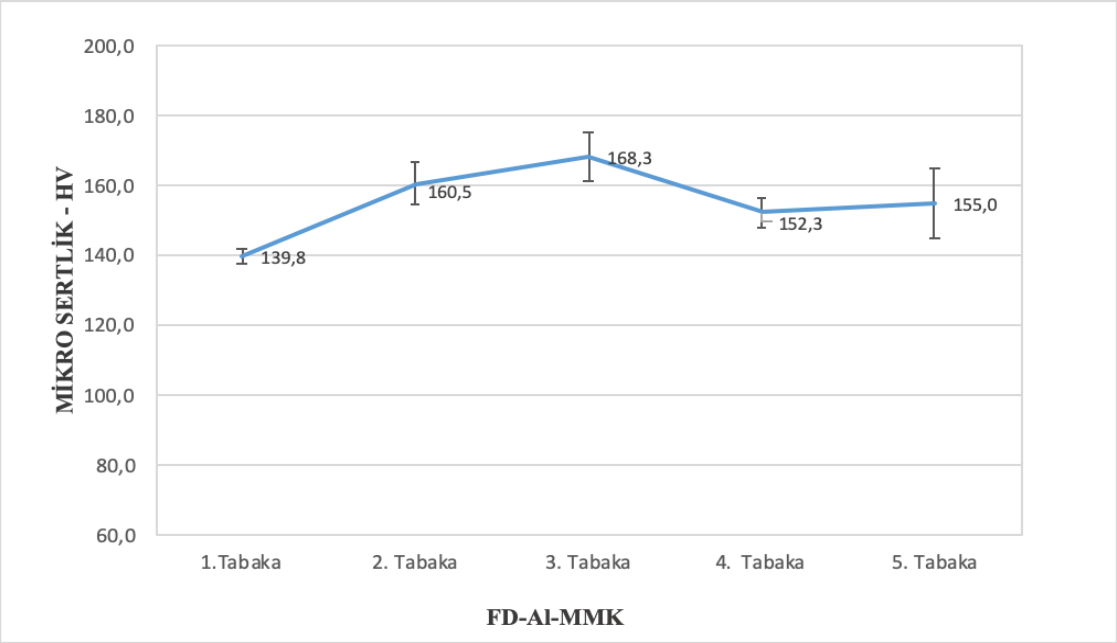
Daha düşük basınç (66 Mpa) uygulanan numunelerde ise takviyesiz bölgede 109HB, %15 SiCp ile takviye edilmiş bölgede 136HB sertlik değeri elde edilmiştir. Numune üretimi sırasında seçilen takviye ve basınç oranları ile elde edilen numunedeki kesit boyunca sertlik değişimi literatürle uyumludur.



Şekil 4. 6. FD-Al-MMK numunesi üzerindeki farklı kademelerden alınan sertlik sonuçları.

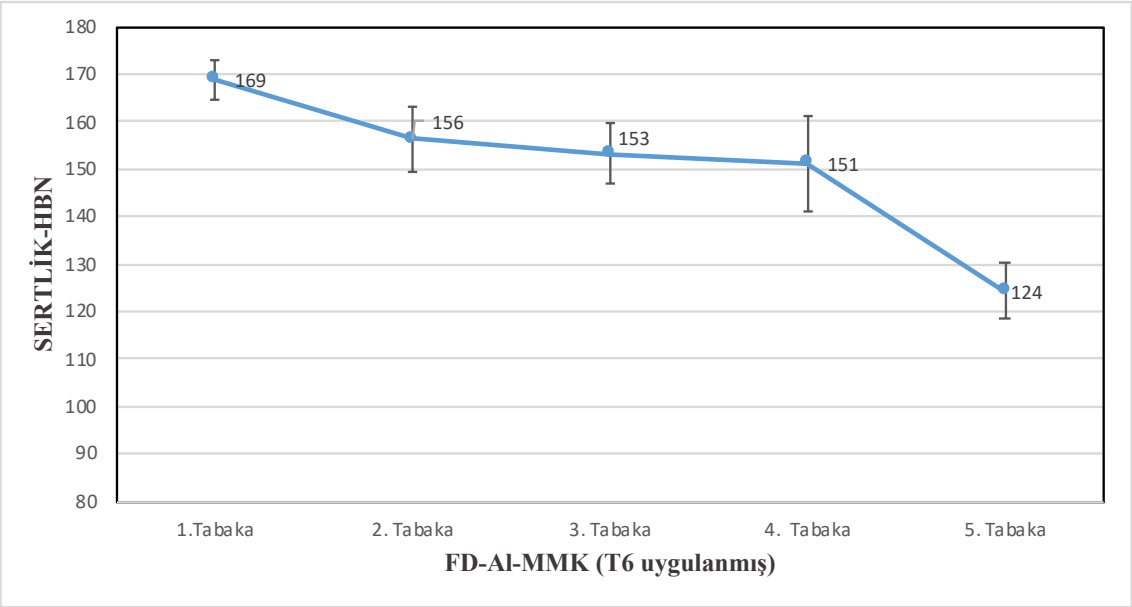
Çizelge 4. 3. Takviye oranlarına bağlı sertlik değişimi.

FD-AL-MMK YAPI	SiCp TAKVİYE ORANI	HBN	MİKRO HV
1. tabaka	%0	108.8	139.8
2. tabaka	%5	125.2	160.5
3. tabaka	%10	127.8	166.3
4. tabaka	%15	136.2	152.3
5. tabaka	%20	115.4	155.0

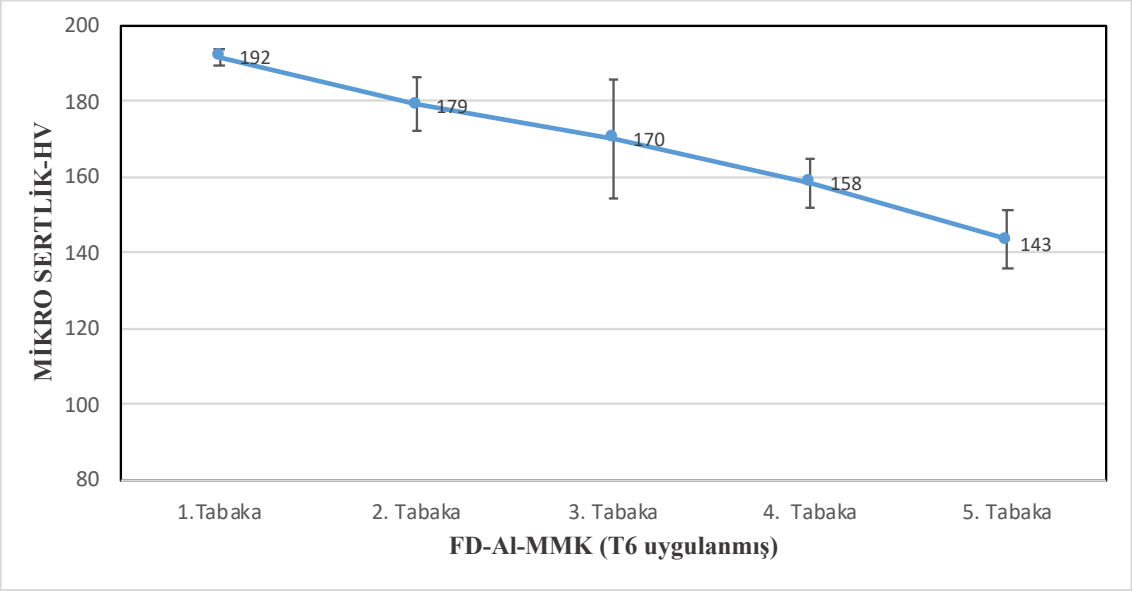


Şekil 4. 7. FD-Al-MMK numunesi üzerindeki farklı kademelerden alınan mikro sertlik sonuçları.

Sertlik sonuçlarından görüldüğü gibi takviye oranı arttıkça malzemenin farklı kademelerindeki sertlikler artma eğilimindedir. Bu da FDM yapısının numune üzerinde başarıyla oluşturulduğunu göstermektedir. %20 SiC_p ile takviye edilmiş tabakanın döküm şartları nedeniyle çok fazla gözenek içerdiği ve bu sebeple sertlik değerlerinin diğer kademelerden düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. 8. FD-Al-MMK numunesi T6 ısıl işlemi sonrası sertlik sonuçları.



Şekil 4. 9. FD-Al-MMK numunesi T6 ısıl işlemi sonrası mikro sertlik sonuçları.

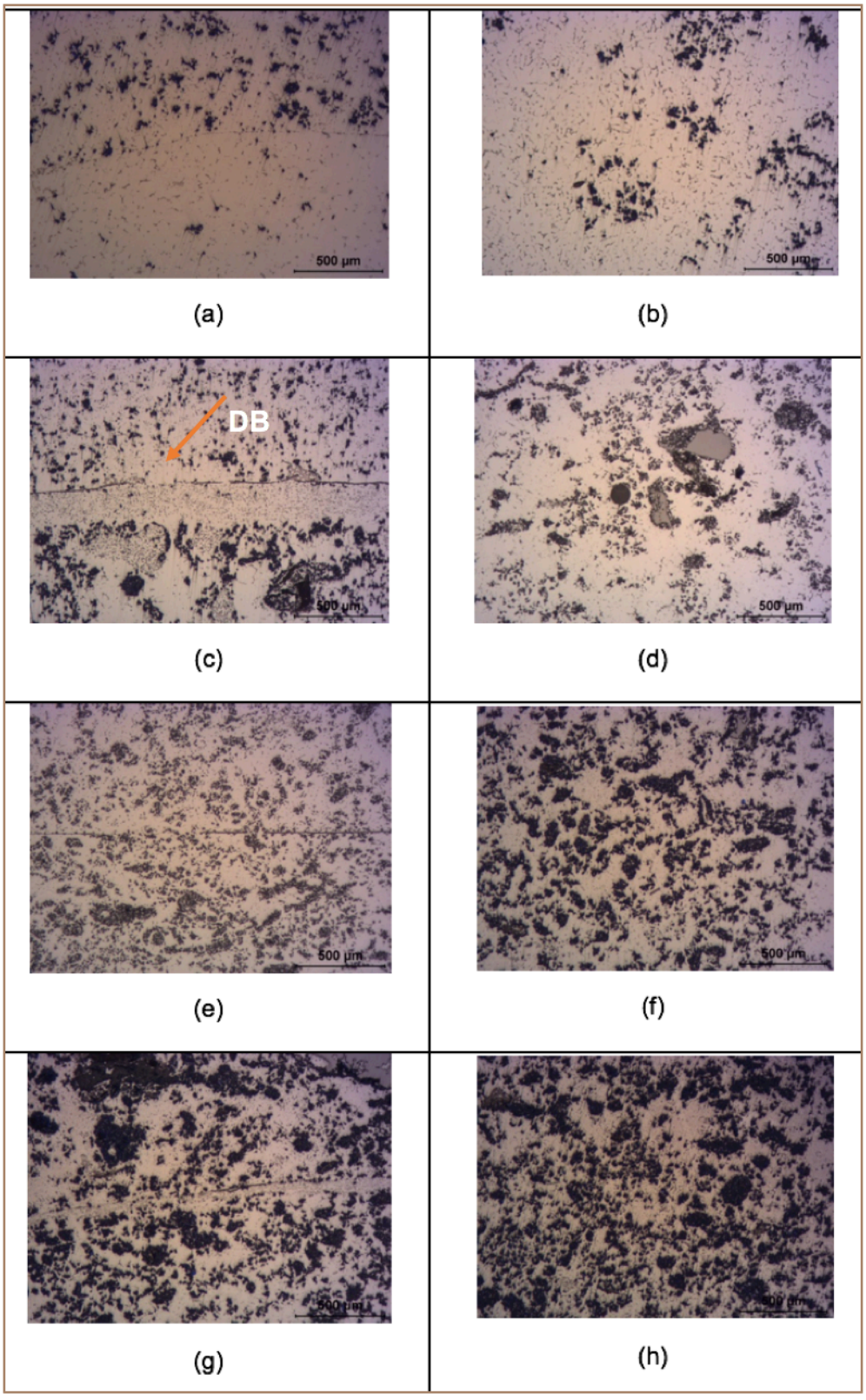
ASTM T6 standartlarına göre Al7075 HRB değeri 87 olup 171 HB'ye denk düşmektedir. T6 uygulanmış takviyesiz bölge sertlik testi sonuçlarının literatürle uyumlu oluşu T6 işleminin uygun gerçekleştirildiğini göstermektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilen sonuçlara göre uygulanan T6 ısıl işlemiyle FD-Al-MMK malzemede tabakalı

yapıya uygun sertlik artışı gözlenmiş olup bu artışın takviye oranı daha fazla olan tabakada daha az oranda olduğu görülmüştür. %20 SiCp ile takviye edilmiş 5. tabakanın döküm şartları nedeniyle çok fazla gözenek içerdiği ve bu sebeple sertlik değerlerinin diğer kademelerden düşük olduğu gözlenmiştir.Takviye oranı arttıkça T6 ısıl işlem sonucu sertlikteki artış oranının azalışı, matris malzemesinden daha düşük ısı iletim katsayısına sahip SiC parçacıklarının ve artan boşlukların ısıl işlem kalitesini negatif etkilemesiyle aşırı yaşlanma koşullarının oluştuğu düşünülmektedir.

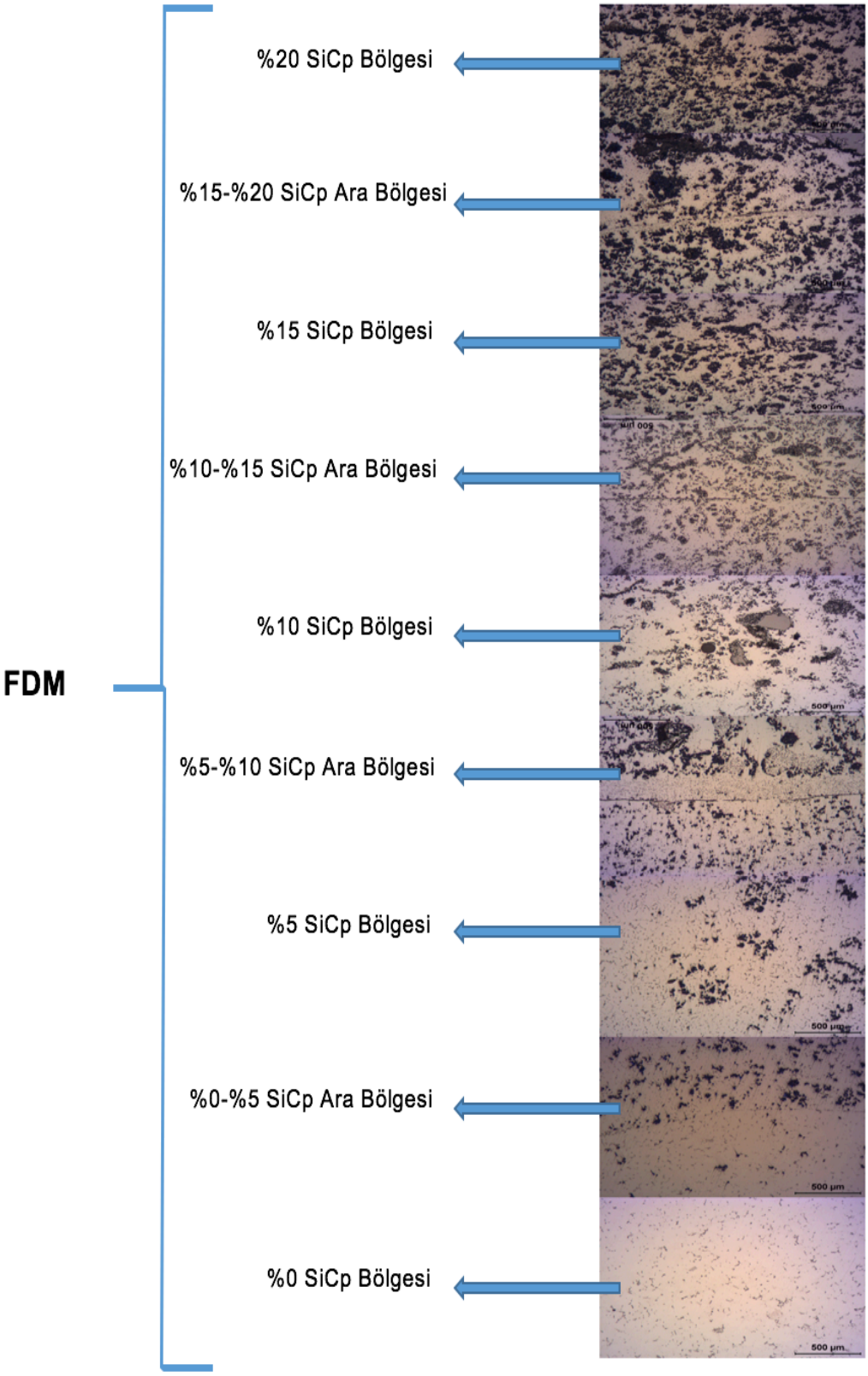
4.6. Metalografik İnceleme Sonuçları

Optik mikroskop görüntüleri sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20 SiCp takviyeli bölgelerden ve bölgelerin birleşme yerlerinden 5X büyütme ile alınmıştır. Şekil 4.10'da görülen a, c, d ve g ile gösterilen görüntüler ara bölgelere (birleşme yerlerine), b, d, f, h ise katmanların ana bölgelerine aittir. Sırasıyla a= %0-%5 ara bölgesi, b=%5 ana bölge, c= %5-%10 ara bölgesi, d=%5 ana bölge, e= %10-%15 ara bölgesi, f=%5 ana bölge, g= %15-%20 ara bölgesi, h=%20 ana bölge şeklindedir.

Şekil 4.10a'da %0 ve %5 SiC takviye bulunan bölgelerin birleşme çizgisinin neredeyse kaybolduğu, büyük boşluklar ve oksit tabakalarının bulunmadığı ve iyi bir şekilde birleşmenin sağlandığı gözlenmektedir. Şekil 4.10c'de ara bölgede çizginin olmadığı yerde kısmi difüzyon bölgesi (DB), çizginin olduğu yerlerde de yapışma gözlenmektedir. Genel olarak ana bölgelerde bir miktar topaklanma olduğu da görülmektedir. Ara ve ana bölgelerden aynı oranda büyütme ile alınan optik görüntülerin üst üste birleştirilmesiyle Şekil 4.11'de fonksiyonel derecelendirilmiş yapı (FDM) görülmektedir.



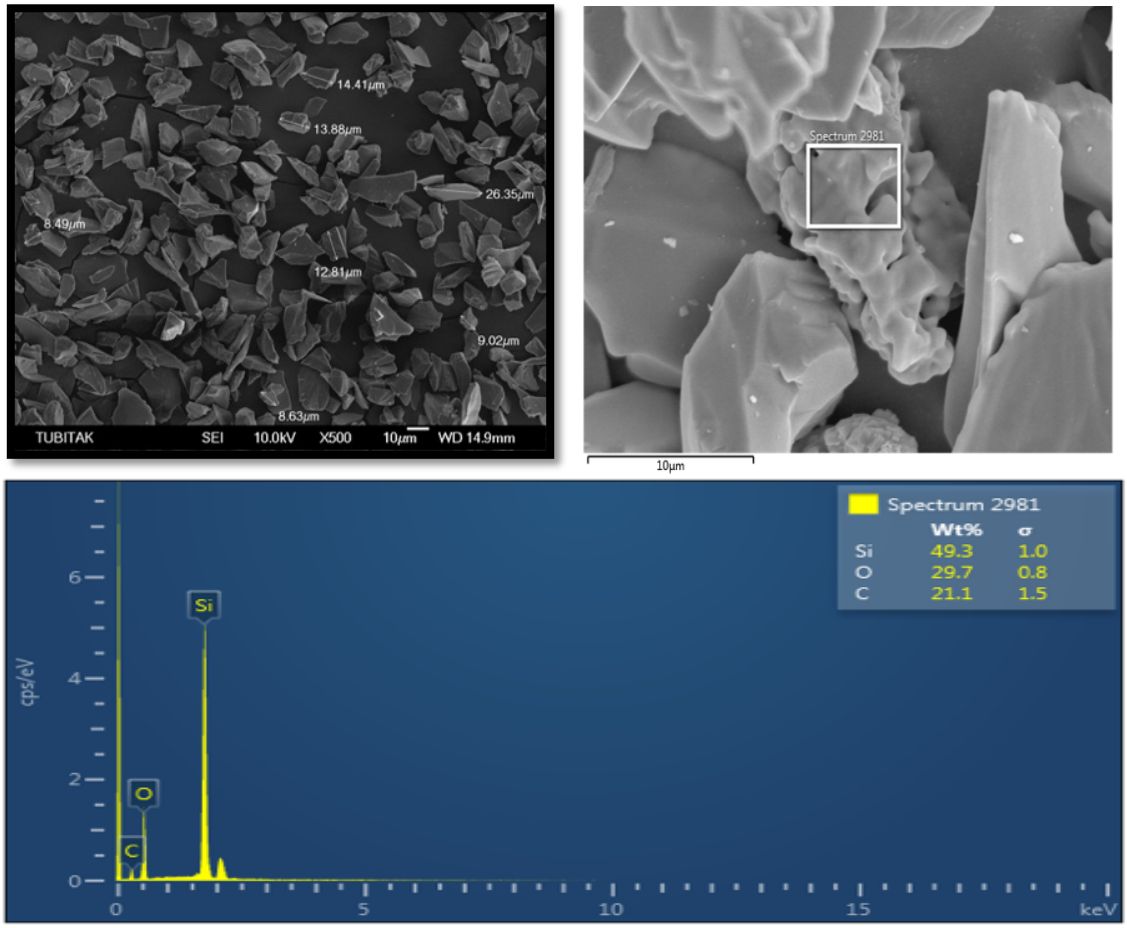
Şekil 4. 10. FD-Al-MMK malzmenin ara ve ana bölgelerinden alınan optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4. 11. FDM yapı mikroskobik görünüm.

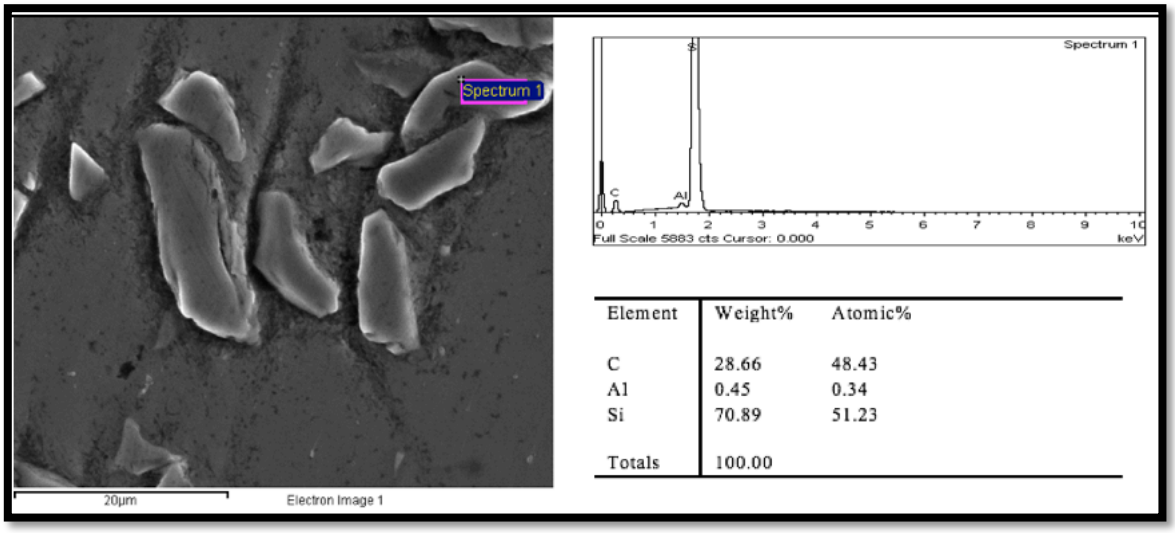
4.7. SEM-EDS Analiz Sonuçları

Şekil 4.12'de SiC takviye tozlarının ısıl işlem öncesi SEM, ısıl işlem sonrası SEM ve EDS analizleri görülmektedir. Isıl işlem öncesi SEM fotoğrafında tozların 500 mesh (12µm) aralığında ve keskin köşeli oldukları görülmektedir. SiC ısıl işlem sonrası SEM ve EDS analizi ile SiC parçacık yüzeylerinde O, C ve Si elementlerinin bulunması, oksit tabakasının varlığını göstermektedir.



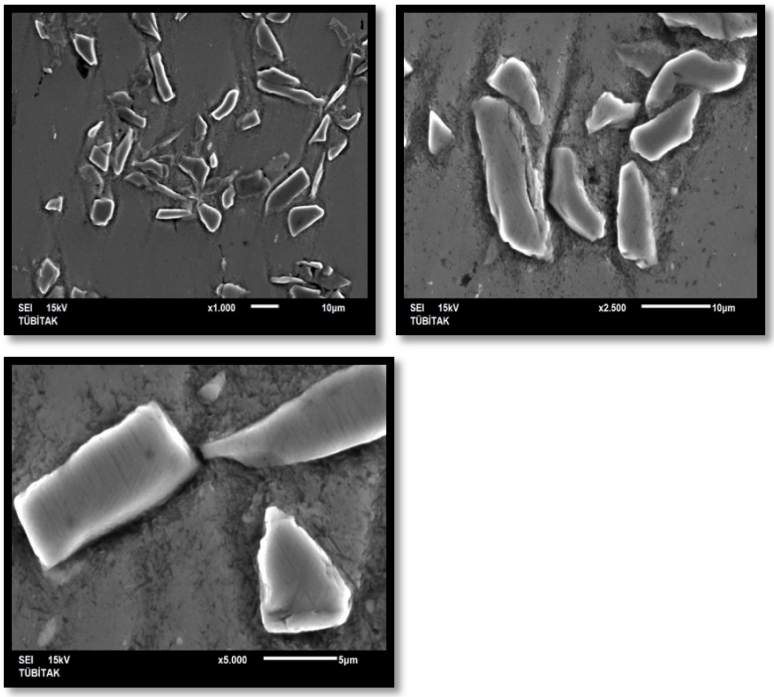
Şekil 4. 12. SiC takviye tozlarının SEM ve EDS analizleri.

Şekil 4.13'te SiC takviye parçacıklarının Al 7075 matris malzemesi tarafından ıslatıldığı gözlenmektedir. Yapılan EDS analizi sonucunda SiC tanelerinin etrafında boşluklar ve yabancı oluşumlar gözlenmemiştir.



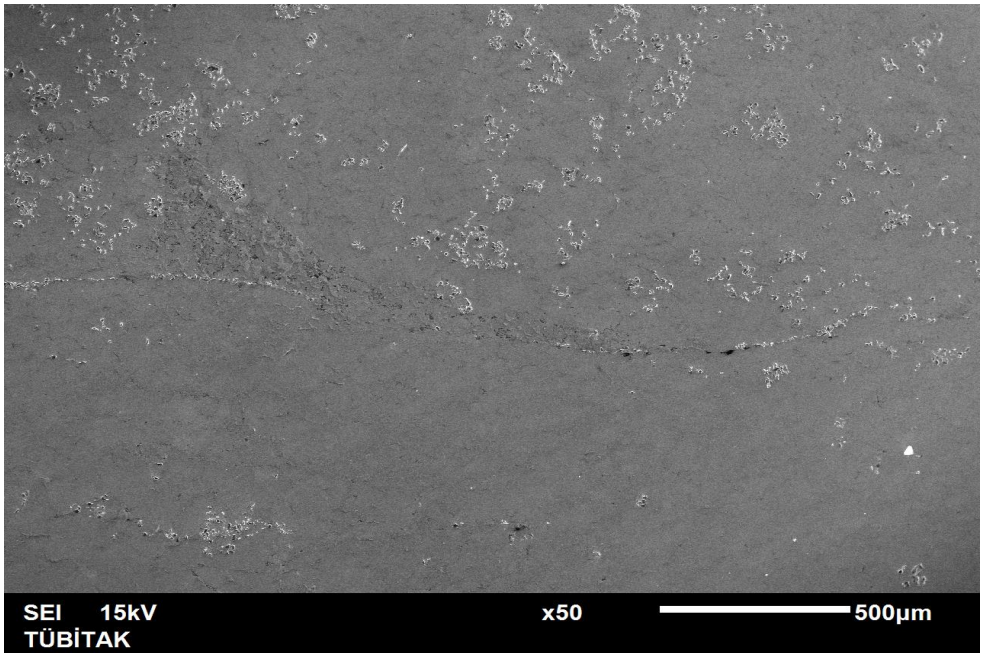
Şekil 4. 13. Alüminyum matris içinde SiC takviye parçacıklarının SEM ve EDS analizleri.

Şekil 4.14'te verilen SEM fotoğraflarında, sırasıyla x1000, x2500 ve x5000 büyütmede olan, SiC parçacıklarına yapılan ısıl işlem sonrasında yüzeyin iyi oksitlenmesi sonucu olarak parçacık ve matris arasında ıslatılmayla bağlanma gerçekleştiği görülmektedir.



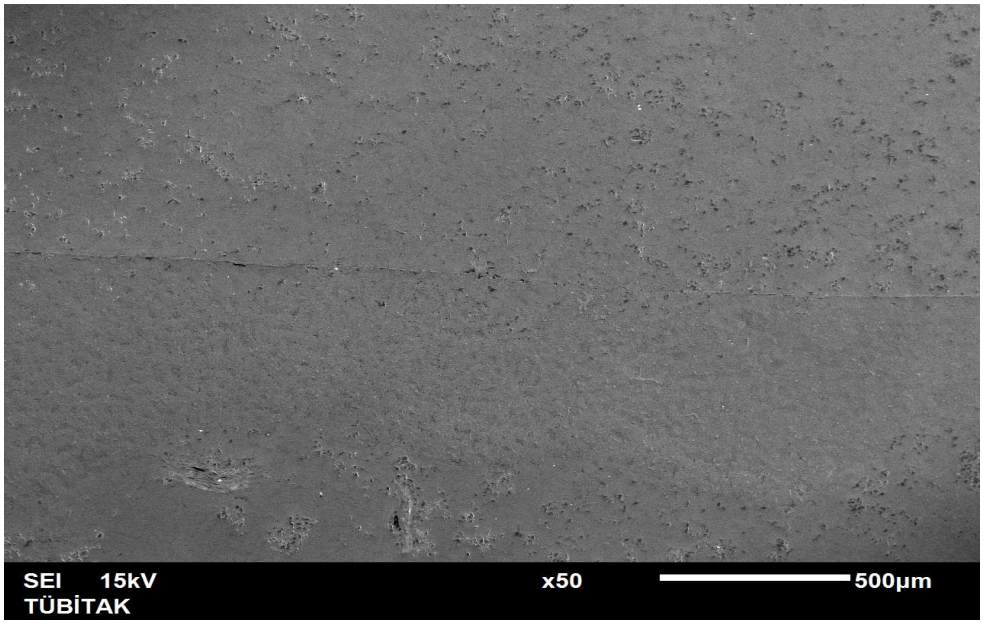
Şekil 4. 14. Sırasıyla x1000, x2500 ve x5000 büyütmede SEM görüntüleri.

Şekil 4.15'te verilen SEM fotoğrafında, %0-%5 SiCp tabakaları ara bölgesi ve bu tabakaların birleşme noktaları hafif bir çizgi halinde görülmektedir. Birleşme bölgesinde bir miktar SiC ün takviyesiz alana geçtiği görülmüştür. Birleşme bölgesindeki bu çizginin düz ve belirli bir şeklinin olmayışı ve takviyesiz tabakaya birleşme bölgesi civarında takviye geçişi, tabakalar arasında kısmi ergime yoluyla birleşme sağlandığını göstermektedir. Büyük boşluklar ve oksit tabakalarının bulunmadığı birleşmenin sağlandığı gözlenmektedir.



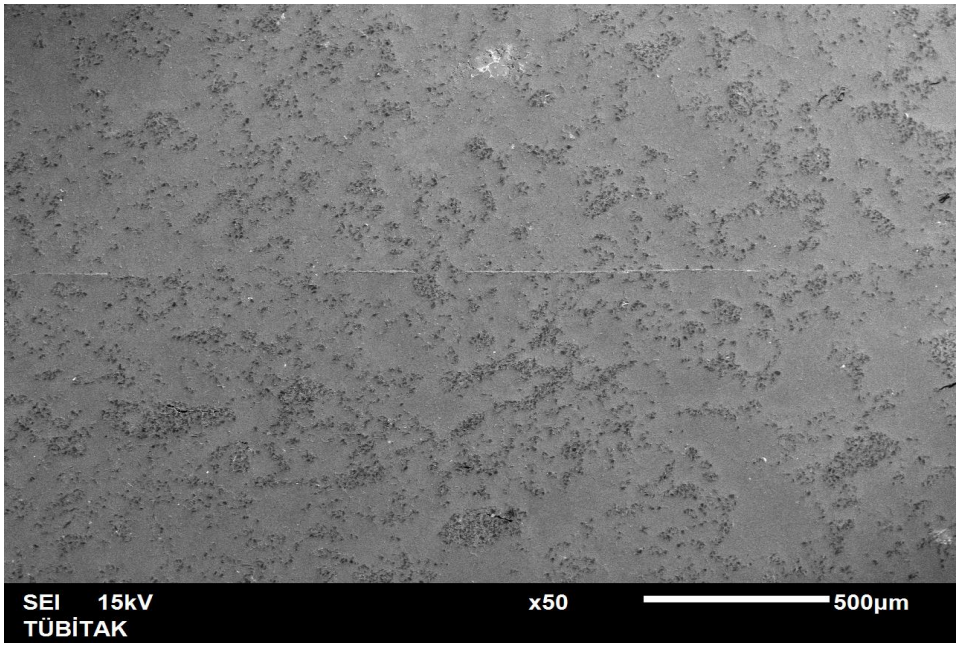
Şekil 4. 15. %0-%5 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü.

Şekil 4.16'da verilen SEM fotoğrafında, %5-%10 SiCp tabakaları ara bölgesi ve bu tabakaların birleşme noktaları belli belirsiz bir çizgi halinde görülmektedir. Çizginin belirsizleştiği kısımlarda kısmi difüzyon bölgesi görülmüştür. Büyük boşluklar ve oksit tabakalarının bulunmadığı birleşmenin sağlandığı gözlenmektedir.



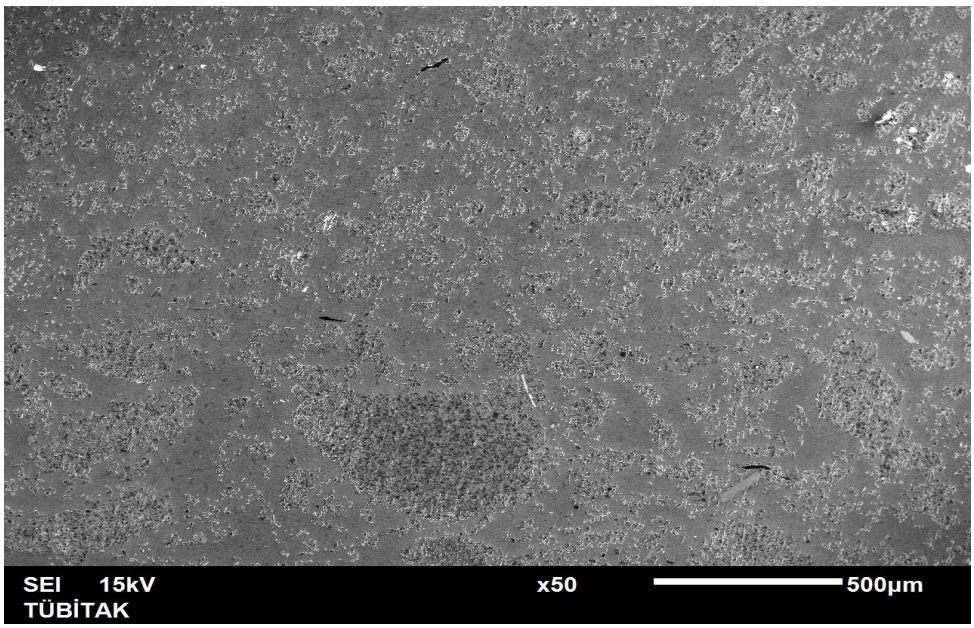
Şekil 4. 16. %5-%10 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü.

Şekil 4.17'de verilen SEM fotoğrafında, %10-%15 SiCp tabakaları ara bölgesi ve bu tabakaların birleşme noktaları hafif bir çizgi halinde görülmektedir. Birleşme bölgesinde SiC parçacıklarının homojen dağılımını koruduğu ve tabaka geçişinde oransal farkın gözlenemediği bir geçiş bölgesi oluşmuştur. Büyük boşluklar ve oksit tabakalarının bulunmadığı birleşmenin sağlandığı gözlenmektedir.

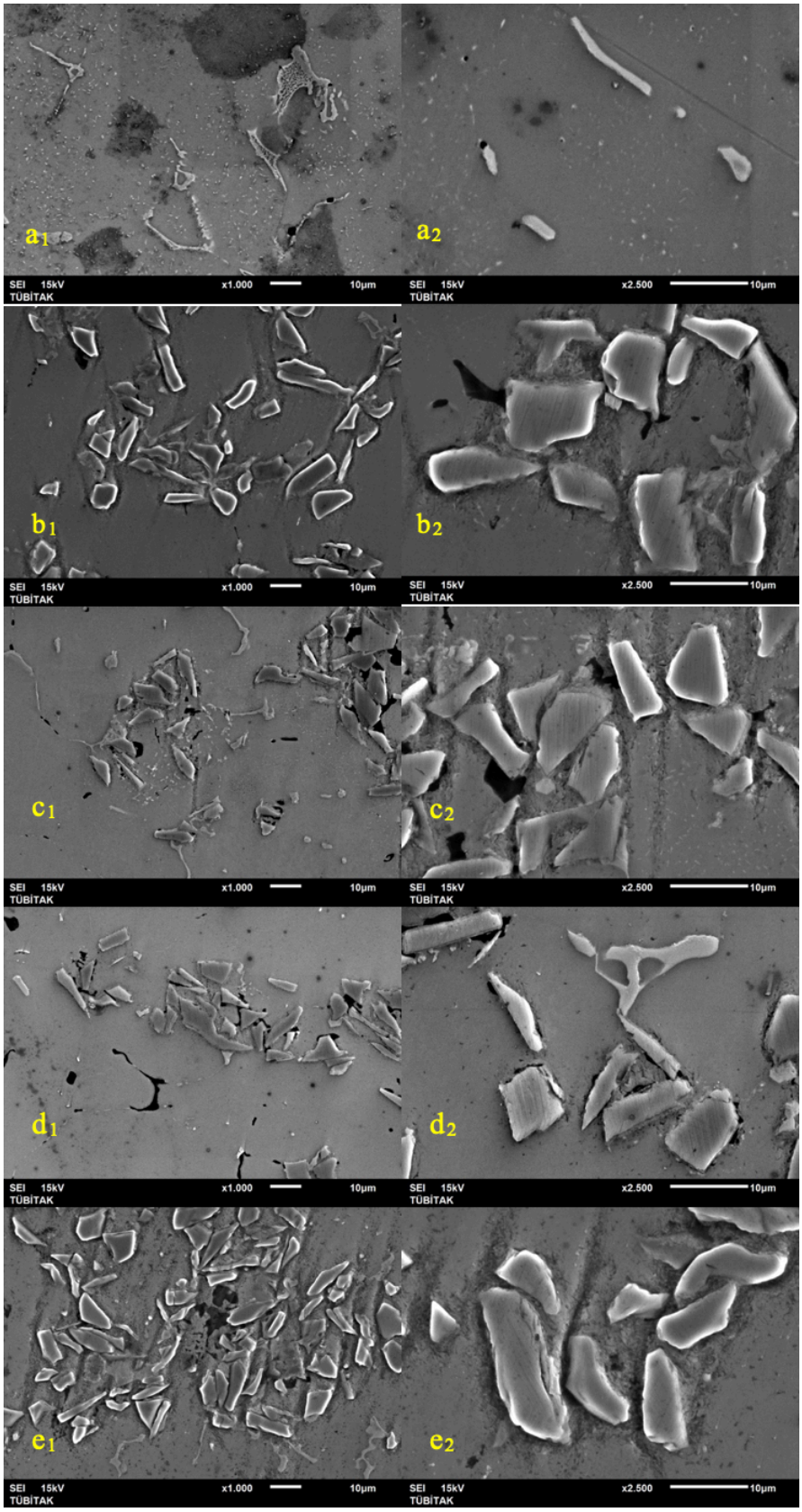


Şekil 4. 17. %10-%15 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü.

Şekil 4.18'de verilen SEM fotoğrafında, %15-%20 SiCp katmanları ara bölgesi ve bu katmanların birleşme noktaları neredeyse belirsiz olarak görülmektedir. SiC parçacıklarının homojen dağılımını koruduğu ve tabaka geçişinde oransal farkın gözlenemediği bir geçiş bölgesi oluşmuştur. Takviye miktarının arttığı bu tabakalar arasında az miktarda topaklanmaya rastlanmıştır. Büyük boşluklar ve oksit tabakalarının bulunmadığı birleşmenin sağlandığı gözlenmektedir.



Şekil 4. 18. %15-%20 SiC_p ara bölgesi SEM görüntüsü.



Şekil 4. 19. %0, %5, %10, %15,%20 SiC takviyeli bölgelerden SEM görüntüleri.

Şekil 4.19'da verilen, sırasıyla x1000, x2500 büyütmede olan %0, %5, %10, %15 ve %20 SiC takviyeli bölgelerden alınan SEM fotoğraflarında SiC parçacıklarına yapılan ısıl işlem sonrasında yüzeyin iyi oksitlenmesi sonucu olarak parçacık ve matris arasında ıslatılmayla bağlanma gerçekleştiği, bazı bölgelerde de intermetalik oluşumlar ve mikro boşlukların varlığı gözlenmektedir (a_1=%0 SiC, x1000 büyütme, a_2=%0 SiC, x2500 büyütme, b_1=%5 SiC, x1000 büyütme, b_2=%5 SiC, x2500 büyütme, c_1=%10 SiC, x1000 büyütme, c_2=%10 SiC, x2500 büyütme, d_1=%15 SiC, x1000 büyütme, d_2=%15 SiC, x2500 büyütme, e_1=%20 SiC, x1000 büyütme, e_2=%20 SiC, x2500 büyütme)

4.8. Dilatometre Test Sonuçları

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri tabakalı olarak oluştururken, her bir tabakanın ısıl genleşme katsayıları arası farkın az olması, tabakalar arası uyumu o derecede arttırmaktadır. Tabakaların birbirine bağlanması kuvvetli olsa bile, tabakalar arası ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıklar sebebiyle malzemenin maruz kalabileceği yüksek sıcaklık durumlarında tabakalar arası büyük gerilmelere sebep olmaktadır. Meydana gelen bu ısıl gerilmeler tabakalar arası bağı zayıflatmaya ve/veya çatlamalara sebep olacağından istenmeyen bir durumdur. Aşağıda verilen Çizelge 4.4' te her bir tabakadan ayrı ayrı alınan, Çizelge 4.5' te ise tabakalar arası bölgelerden ve iki farklı üç bölgeyi içeren numunelerin ısıl genleşme katsayıları sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4. 4. Dilatometre test sonuçları.

Malzeme	**% Uzama** (dL/L_0)	**Genleşme katsayısı** T. Alpha (α) 1/K
%100 Al 7075 tabakası	1,21	$28{,}4152 \times 10^{-6}$
%5 SiC_p takviyeli tabaka	1,05	$24{,}5834 \times 10^{-6}$
%10 SiC_p takviyeli tabaka	1,08	$25{,}4831 \times 10^{-6}$
%15 SiC_p takviyeli tabaka	1,05	$24{,}6136 \times 10^{-6}$
%20 SiC_p takviyeli tabaka	0,97	$22{,}9142 \times 10^{-6}$

Çizelge 4.4' te verilen dilatometre sonuçlarına göre; tabakalara göre elde edilen ısıl genleşme katsayılarına bakıldığında en yüksek ısıl genleşme katsayısının en çok basınca maruz kalması dolayısıyla gözeneklilik oranı en düşük ve seramik parçacık takviyesi içermeyen en alt tabaka olan %100 Al7075 tabakasında görülmüş olup,

tabakalarda oluşturma sırasına göre yukarı çıkıldıkça ve %SiC_p takviye oranı arttıkça ısıl genleşme katsayısının düştüğü görülmektedir.

Çizelge 4. 5. Ara bölge ve kesit boyunca yapılan dilatometre test sonuçları.

Malzeme	**% Uzama** (dL/L_0)	**Genleşme katsayısı** T. Alpha (α) 1/K
%0-%5 SiC_P / ara bölge	1,12	$26{,}6667\times10^{-6}$
%5-%10 SiC_P / ara bölge	1,11	$26{,}2458\times10^{-6}$
%10-%15 SiC_P / ara bölge	0,98	$23{,}1494\times10^{-6}$
%15-%20 SiC_P / ara bölge	0,94	$22{,}2610\times10^{-6}$
%10-15-20 SiC_P /kesit boyunca	1,01	$24{,}0126\times10^{-6}$
%0-5-10 SiC_P /kesit boyunca	1,11	$26{,}4424\times10^{-6}$

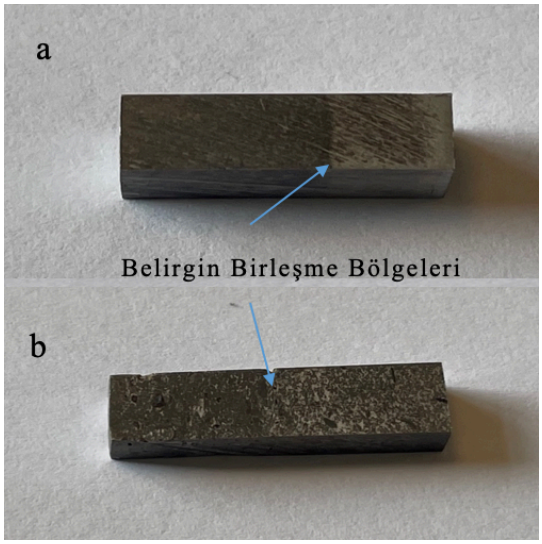
Çizelge 4.5' te verilen dilatometre sonuçlarına göre; tabakalar arası bölgelerden elde edilen ısıl genleşme katsayılarına bakıldığında yine en yüksek ısıl genleşme katsayısının en çok basınca maruz kalması dolayısıyla gözeneklilik oranı en düşük ve seramik parçacık takviyesi en az miktarda bulunan en alt ara bölgeden (%0-%5 SiC_p / ara bölge) alınan numunede görülmüştür. %SiC_p takviye oranı arttıkça ısıl genleşme katsayısının düştüğü görülmektedir.

Kesit boyunca alınan diğer numunelerden (%10-15-20 SiC_P/kesiti boyunca ve %0-5-10 SiC_P/kesiti boyunca) elde edilen ısıl genleşme katsayıları sonuçlarının da tabakalardan elde edilen sonuçlarla örtüştüğü görülmektedir. 5˚C/dak ısıtma hızında 450 ˚C ye gelen numunelerde; ara bölgelerde ve kesit boyunca birleşme bölgelerinden ayrılma ya da şekil bozukluğu görülmemiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden beklenen bütünlüğü korumuştur.

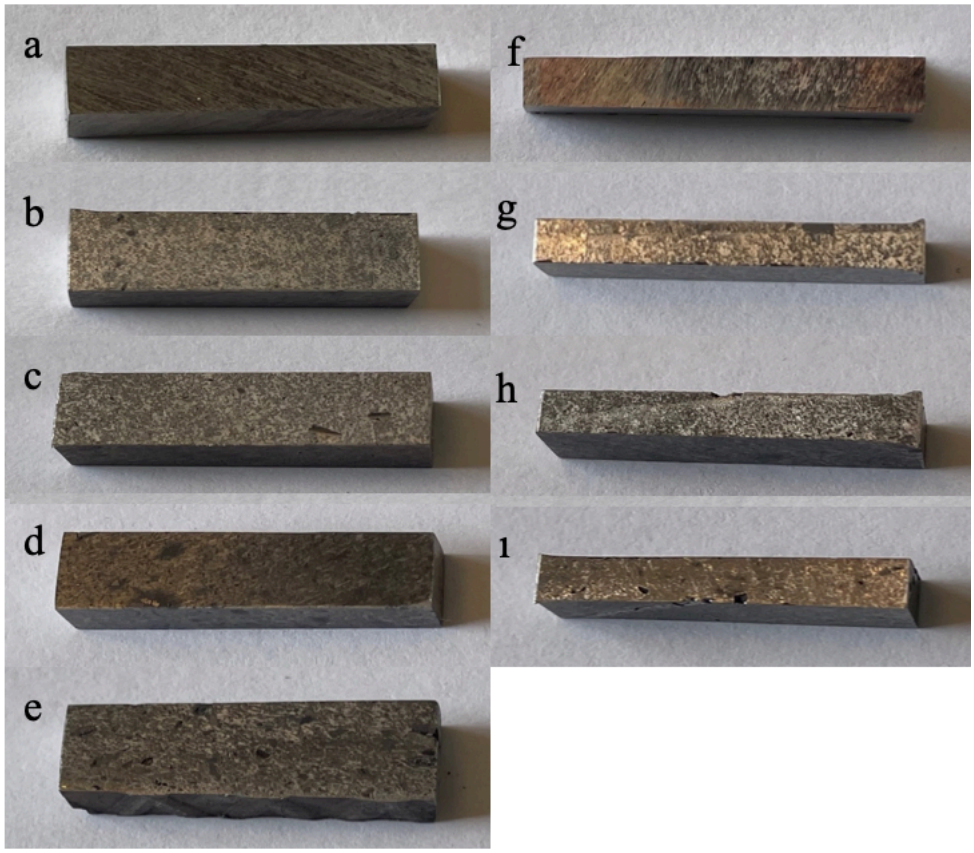
Alüminyum 7075 malzemenin 100˚C için literatürde verilen ısıl genleşme katsayısı 23,2 $\times10^{-6}$ K^{-1} ve 23,4 $\times10^{-6}$ K^{-1} (EN AW 7075) değerleri arasındadır. Seramik takviyesi olarak kullanılan SiC_p 'nin 4,7 $\times10^{-6}$ K^{-1} dır (Park, Kim ve Lee, 2001). Matris malzemesi olarak kullanılan Al 7075 içine takviye olarak ısıl genleşme katsayısı daha düşük olan SiC_p takviyesinin kullanılmasına bağlı olarak, takviye miktarıyla doğru orantılı gözenek artışı ve ısıl genleşme katsayısı düşüşü görülmüştür.

Gözenek miktarının artmasının malzemede ısıl genleşme katsayısını düşürdüğü bilinmektedir. Buna bağlı olarak gözenek miktarının azalması ile ısıl genleşme miktarı da artmaktadır (Khor, Dong ve Gu, 1999; Sarıkaya, 2003). Tabakaların üst üste basınç uygulamasıyla ilave edildiği bu proseste, en alt tabakada gözeneklilik oranı minimum olacağından ve buna bağlı olarak ısıl genleşme katsayısındaki düşüş beklentisini literatürde serbest döküm 100 ˚C de 23,2 $\times 10^{-6}$ K^{-1} olarak ölçülen değerden daha düşük bir değer olan 100 ˚C de 22,3756 $\times 10^{-6}$ K^{-1} ölçülerek sağlamıştır. %20 SiC_p ile takviye edilmiş katmanın döküm şartları nedeniyle çok daha fazla gözenek içerdiği ve daha fazla takviye malzemesi içermesi sebebiyle, diğer katmanlardan daha düşük ısıl genleşme katsayısına sahip olduğu Çizelge 4.4' te ve 4.5' te gözlenmiştir.

Elde edilen tabakalar arası ısıl genleşme katsayılarının birbirlerine yakın oluşu ve kademeli olarak değişimi; bu yöntem ile üretimi gerçekleştirilen FD-Al-MMK malzemenin fonksiyonel olarak derecelendirme işleminin başarılı olarak gerçekleştirildiğini ve 450˚C ye kadar malzeme devamlılığını koruyabildiğini göstermektedir (Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).



Şekil 4. 20. a=%10-15-20 SiC/kesiti boyunca alınan ve b=%0-5-10 SiC/kesiti boyunca alınan dilatometre test numuneleri.



Şekil 4. 21. Ana ve ara bölgelerden alınan dilatometre test numuneleri.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de görüldüğü üzere ana bölgelerden alınan (Şekil 4.21'de a=%0 SiC, b=%5 SiC, c=%10 SiC, d=%15 SiC ve e=%20 SiC numuneleri) ve ara bölgelerden alınan (Şekil 20'de a=%10-15-20 SiC_P/kesiti boyunca ve b=%0-5-10 SiC_P/kesiti boyunca ile Şekil 21'de f=%0-%5 SiC, g=%5-%10 SiC, h=%10-%15 SiC, ı=%15-%20 SiC) numunelere uygulanan dilatometre testi koşulları sonrasında, test numunelerinin bütünlüklerini koruduğu ve ara bölgelerden alınan numunelerin birleşme bölgelerinde ayrılma olmadığı gözlenmiştir.

4.9. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

FD-Al-MMK malzemeye, ara bölgedeki birleşme kalitesini görme amacıyla tabakalı yapısının birleşme bölgelerine ve katmanların homojen bölgelerinden alınan numunelere uygulanan 3 nokta eğme testi sonuçları aşağıda Çizelge 4.6 ve 4.7 'de görülmektedir.

Çizelge 4.6 ve 4.7'de görüldüğü üzere takviye oranı arttıkça malzemenin eğme gerilmesi dayanımı da o oranda azalmaktadır. Bu sebepten en yüksek eğme gerilmesi değerine takviyesiz bölgede (H1=%0 SiCp) ulaşılmış olup bunu sırasıyla H2=%5 SiCp > H3=%10 SiCp > H4=%15 SiCp > H5=%20 SiCp ve K1=%0-%5 SiCp > K2=%5-%10 SiCp > K3=%10-%15 SiCp > K4=%15-%20 SiCp bölgeleri takip etmiştir. Eğme gerilmesinin, takviye oranının artması ile azalması literatürle uyumludur. Bu durum; takviye oranının artmasıyla matris ara yüzeyinde çatlak başlatma ve yayılım oranının artmasından kaynaklanmaktadır (Baradeswaran ve Perumal, 2014; Guo ve Tsao, 2002).

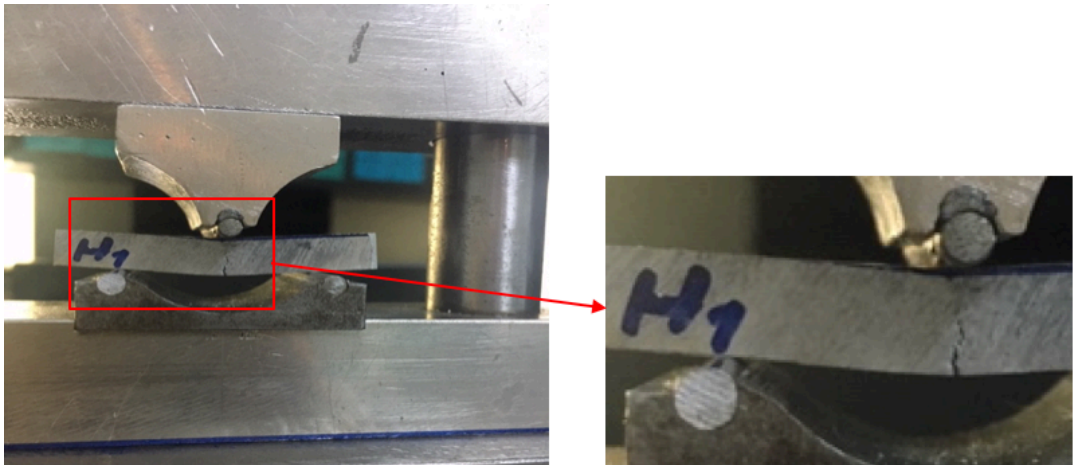
Ali kankanlı ve sencer yılmaz'ın benzer bir prosesle ürettikleri malzemelerinde en yüksek eğme gerilmesini %10 SiCp takviyesinde 450 MPa civarında bulmuşlardır (Kalkanlı ve Yılmaz, 2008). Çizelge 4.6' da görüleceği üzere bu çalışmada üretilen FD-Al-MMK malzemede aynı takviye oranına denk gelen bölümde 487 MPa' a ulaşılmıştır.

Çizelge 4. 6. FD-Al-MMK malzeme takviye oranına bağlı eğme gerilmeleri.

NUMUNE KODU	**NUMUNE BÖLGESİ**	**EĞME GERİLMESİ** (MPa)
H1	%0 SiC	597,5
H2	%5 SiC	551,1
H3	%10 SiC	487,5
H4	%15 SiC	454,5
H5	%20 SiC	360,7

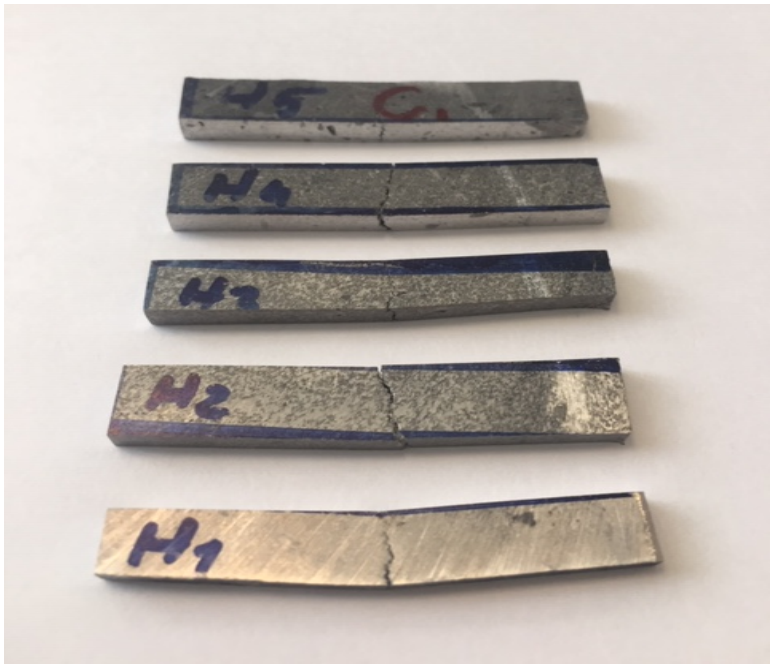
Çizelge 4. 7. FD-Al-MMK malzeme birleşme bölgeleri eğme gerilmeleri.

NUMUNE KODU	**NUMUNE BÖLGESİ**	**EĞME GERİLMESİ** (MPa)
K1	%0-%5 SİC	481,0
K2	%5- %10 SİC	369,1
K3	%10- %15 SİC	266,5
K4	%15-%20 SİC	271,8



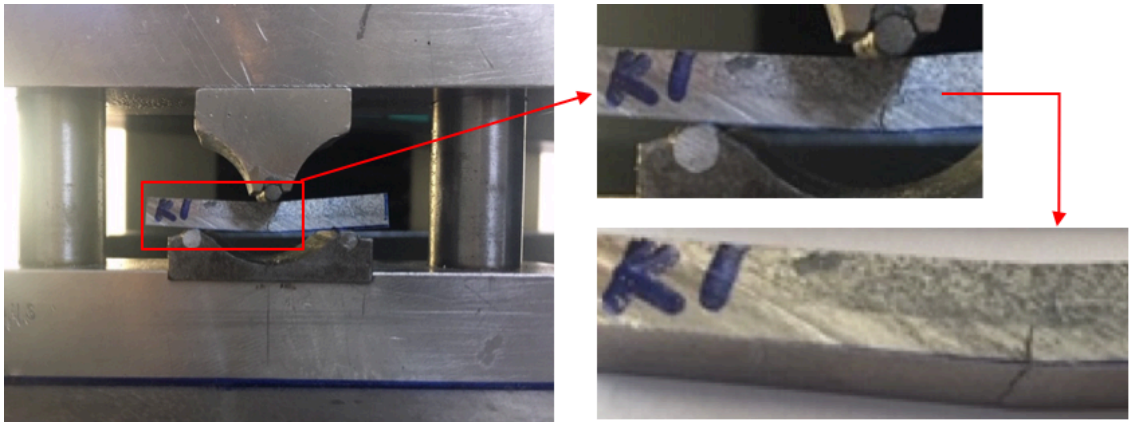
Şekil 4. 22. H1 kodlu üç nokta eğme numunesi.

Şekil 4.22'de takviye içermeyen (%0 SİC) homojen %100 Al 7075 malzeme içeren bölgeden alınan numunenin üç nokta eğme testi uygulandıktan hemen sonraki hali ve çatlak ilerleyişi görülmektedir. H1 kodlu numunede çatlak başlamış ve kesit sonuna kadar devam etmiştir.



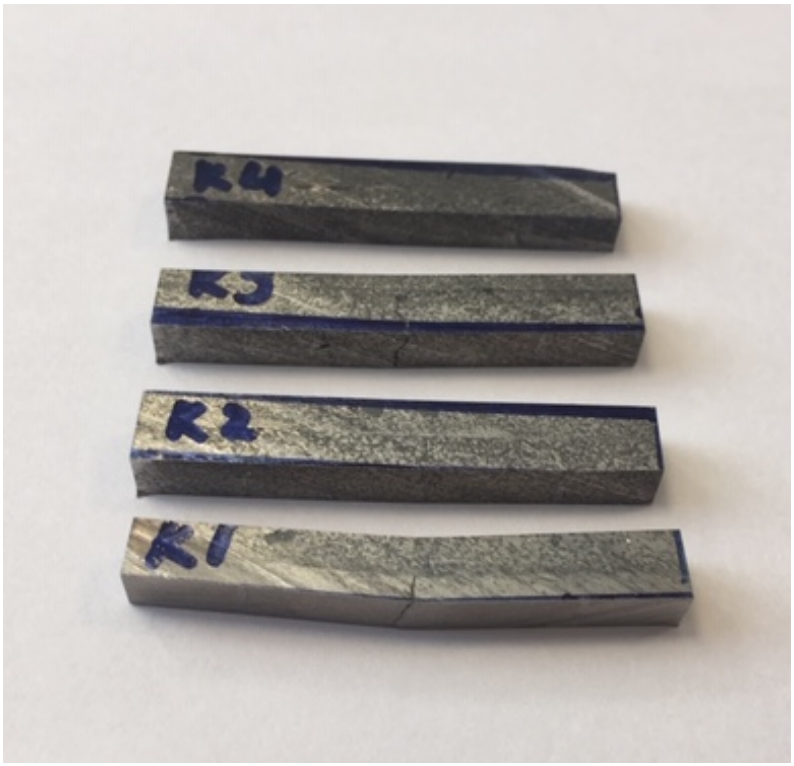
Şekil 4. 23. H1-H5 kodlu üç nokta eğme numuneleri.

Şekil 4.23'te her bir tabakanın homojen bölgelerinden alınan numunelerin üç nokta eğme testi sonrası çatlak ilerleyişleri görülmektedir. En az çatlak ilerleyişinin ve eğilmenin göreceli olarak H5 te olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. 24. H1 kodlu üç nokta eğme numunesi.

Şekil 4.24'te %0-%5 SİC ara bölgesinden (birleşme bölgesi) alınan numunenin üç nokta eğme testi uygulandıktan sonraki hali görülmektedir. Uygulanan kuvvette eğme gerilmesi hasarı başlamış olsa da çatlağın takviye içeren bölgeye geldiğinde durduğu gözlenmiştir. Bu bölgede bulunan takviye parçacıkları aynı zamanda dislokasyonlara bariyer olacağından çatlağın ilerlemesi için daha yüksek kuvvetlere çıkılması gerekmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş yapının avantajı olan bu durum elde edilen FD-Al-MMK malzemede de sağlanmıştır.



Şekil 4. 25. K1-K4 kodlu 3 nokta eğme numuneleri.

Şekil 4.25'te birleşme yerlerinden alınan numunelerin üç nokta eğme testi sonrası çatlak ilerleyişleri görülmektedir. En az çatlak ilerleyişinin K4'te olduğu gözlenmiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Malzeme kesiti boyunca takviye oranları fonksiyonel olarak dereceli değişen alüminyum kompozit malzemelerin ardışık sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilebilirliğini incelemek için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1- Ardışık döküm ve basınçlı katılaştırmanın birlikte uygulandığı döküm tekniği kullanılarak, beş farklı takviye oranına sahip kompozit karışım üst üste dökülüp basınç altında katılaştırılarak fonksiyonel derecelendirilmiş alüminyum kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

2- Yarı-katı haldeki alüminyum alaşımlarının içine SiCp takviyelerinin mekanik olarak karıştırılmasıyla farklı takviye oranlarına sahip alüminyum kompozit karışımlar homojen olarak karıştırılabilmiştir.

3- Yarı-katı karıştırma yöntemi ile kompozit karışım hazırlama yöntemi ile parçacık boyutu ortalama 12 μm olan SiCp tozlarından ağırlıkça %20'ye kadar karıştırılabilmiştir. Ancak, kompozit karışımın döküm kalıplarına akıcı bir şekilde dökülebilmesi için sıcaklığın ergime sıcaklığının 10-15 °C üzerine çıkarılması gerekmektedir.

4- Kompozit karışımın içindeki SiCp takviye oranı arttıkça malzemenin akıcılığı azalmakta ve kalıbı tam dolduramamaktadır. Ayrıca döküm kalıpları döküm sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtıcılar vasıtasıyla yükseltilmelidir.

5- Katılaşmış olan ilk tabaka üzerine sıvı halde dökülen kompozit karışım kısmi ergime meydana getirmiş ve basınç uygulaması ile birlikte altındaki tabakayla arada geçiş bölgesi oluşturmak suretiyle birleşmiştir.

6- Katılaşan her katman üzerine eklenecek diğer katman dökülünceye kadar iki tabaka arasında sıvı difüzyonu engelleyecek oksit tabakalarının oluşumunu engellemek ya da minimize etmek için işlem inert gaz ortamında yapılmalıdır.
7- Oksit tabakasıyla kaplanmış SiC takviye parçacıklarının sıvı alüminyum matris tarafından ıslatıldığı ve boşluksuz sarıldığı görülmüştür.
8- Ara geçiş bölgelerinde yoğunluğun, geçiş bölgesi öncesi ve sonrası kademelerden fazla olması üretim sırasında bu bölgede kısmi ergime meydana gelerek iki kademenin bölgesel olarak birbirine karıştığını göstermiştir.
9- Tüm tabakalarda porozite %2'nin altında bulunmuştur. Ölçülen yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluk değerlerinden düşük oluşu ve porozitenin yüksek oluşunun sebebi olarak; sıvı matris malzemesi içerisinde, takviye parçacık artışı ile topaklanma ve gaz sıkışmalarının arttığı ve bu sebeple bu bölgelerde porozite değerlerinin arttığı görülmüştür.
10- Tabakalardaki takviye oranı arttıkça malzemenin farklı tabakalarındaki sertlik değerleri de artma eğilimindedir. Bu da FDM yapısının numune üzerinde başarıyla oluşturulduğunu göstermektedir.
11- En yüksek ısıl genleşme katsayısının en çok basınca maruz kalması dolayısıyla gözeneklilik oranı en düşük ve seramik parçacık takviyesi içermeyen en alt tabaka olan %100 Al7075 tabakasında görülmüş olup, tabakalarda oluşturma sırasına göre yukarı çıkıldıkça ve $\%SiC_p$ takviye oranı arttıkça ısıl genleşme katsayısının düştüğü görülmüştür.
12- 5˚C/dak ısıtma hızında 450 ˚C ye gelen numunelerde; ara bölgelerde ve kesit boyunca birleşme bölgelerinden ayrılma ya da şekil bozukluğu görülmemiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden beklenen bütünlük korumuştur.
13- Artan SiC takviye miktarıyla doğru orantılı gözenek artışı ve ısıl genleşme katsayısı düşüşü görülmüştür.
14- Elde edilen tabakalar arası ısıl genleşme katsayılarının birbirlerine yakın oluşu ve kademeli olarak değişimi; bu yöntem ile üretimi gerçekleştirilen FD-Al-MMK malzemenin fonksiyonel olarak derecelendirme işleminin başarılı olarak gerçekleştirildiğini ve 450˚C ye kadar malzeme devamlılığını koruyabildiği görülmüştür.

15- SiC takviye malzemesi oranı arttıkça malzemenin eğme gerilmesi dayanımının da o oranda azaldığı gözlenmiştir.

Döküm sıcaklığı ve basıncı matris malzemesi türüne uygun optimize edilerek; tabaka sayısı, tabakaların kalınlığı ve takviye malzemesi cinsi ile oranları değiştirilerek farklı fonksiyonlara sahip FDM'ler bu yöntemle üretilebilirler.

KAYNAKLAR

Acikbas, N. C., Suvaci, E., & Mandal, H. (2006). Fabrication of functionally graded SiAlON ceramics by tape casting. *Journal of the American Ceramic Society*, *89*(10), 3255-3257.

Akmal, M., Khalid, F. A., & Hussain, M. A. (2015). Interfacial diffusion reaction and mechanical characterization of 316L stainless steel-hydroxyapatite functionally graded materials for joint prostheses. *Ceramics International*, *41*(10), 14458-14467.

Almasi, D., Sadeghi, M., Lau, W. J., Roozbahani, F., & Iqbal, N. (2016). Functionally graded polymeric materials: A brif review of current fabrication methods and introduction of a novel fabrication method. *Materials Science and Engineering: C*, 64, 102-107.

Altan, G. (2009). *Değişik sıcaklık ve nem etkisinde çalışan birleştirilmiş kompozit malzemelerin yorulma mukavemetlerinin incelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

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.

Azevedo, J. M., CabreraSerrenho, A., & Allwood, J. M. (2018). Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. *Powder Technology, 328,* 329-336.

Bafekrpour, E., Simon, G. P., Habsuda, J., Naebe, M., Yang, C., & Fox, B. (2012b). Fabrication and characterization of functionally graded synthetic graphite/phenolic nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A, 545*, 123-131.

Bafekrpour, E., Simon, G. P., Naebe, M., Habsuda, J., Yang, C., & Fox, B. (2013). Preparation and properties of composition-controlled carbon nanofiber/phenolic nanocomposites. *Composites Part B: Engineering, 52*, 120-126.

Bafekrpour, E., Simon, G. P., Naebe, M., Habsuda, J., Yang, C., & Fox, B. (2012c). Composition-optimized synthetic graphite/polymer nanocomposites. *In Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference*, 437-441.

Bafekrpour, E., Simon, G. P., Yang, C., Habsuda, J., Naebe, M., & Fox, B. (2012a). Effect of compositional gradient on thermal behavior of synthetic graphite–phenolic nanocomposites. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *109(3),* 1169-1176.

Bahri, A., Salehi, M., & Akhlaghi, M. (2014). Using a pseudo-functionally graded interlayer in order to improve the static and dynamic behavior of wind turbine blade T-bolt root joints. *Composite Interfaces*, *21(8*), 749-770.

Bakar, W. Z., Basri, S. N., Jamaludin, S. N., & Sajjad, A. (2018). Functionally graded materials: an overview of dental applications. *World Journal of Dentistry, 9(2*), 137-144.

Baradeswaran, A., & Perumal, A. E. (2014). Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al2O3/graphite hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, *56,* 464-471.

Baradeswaran, A., & Perumal, A. E. (2014). Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites. *Composites Part B: Engineering, 56*, 472-476.

Bever, M. B., & Duwez, P. E. (1970). On gradient composites. In Preliminary Reports, *Memoranda and Technical Notes of the ARPA Materials Summer Conference,* 117-140.

Bharti, I., Gupta, N., & Gupta, K. M. (2013). Novel applications of functionally graded nano, optoelectronic and thermoelectric materials. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1(3), 221-224.

Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., & Singh, R. K. P. (2017, September). A review on functionally gradient materials (FGMs) and their applications. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 229*, 102-121.

Birth, U., Joensson, M., & Kieback, B. (1999). Powder metallurgical processing and properties of copper/tungsten gradients. *In Materials science forum*, *308,* 766-773.

Boettinger, W. J., Coriell, S. R., Greer, A. L., Karma, A., Kurz, W., Rappaz, M., & Trivedi, R. (2000). Solidification microstructures: recent developments, future directions. *Acta materialia*, *48(1*), 43-70.

Boussinot, G., Hüter, C., Spatschek, R., & Brener, E. A. (2014). Isothermal solidification in peritectic systems. *Acta materialia*, *75,* 212-218.

Burkes, D. E., & Moore, J. J. (2007). Microstructure and kinetics of a functionally graded NiTi–TiCx composite produced by combustion synthesis. *Journal of alloys and compounds*, *430(1-2*), 274-281.

Burkes, D. E., & Moore, J. J. (2007). Microstructure and kinetics of a functionally graded NiTi–TiCx composite produced by combustion synthesis. *Journal of alloys and compounds, 430(1-2*), 274-281.

Cannillo, V., Lusvarghi, L., & Sola, A. (2008). Production and characterization of plasma-sprayed TiO2–hydroxyapatite functionally graded coatings. *Journal of the European Ceramic Society, 28(11),* 2161-2169.

Chenglin, C., Jingchuan, Z., Zhongda, Y., & Shidong, W. (1999). Hydroxyapatite–Ti functionally graded biomaterial fabricated by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A, 271(1-2*), 95-100.

Chin, E. S. (1999). Army focused research team on functionally graded armor composites. *Materials Science and Engineering: A, 259(2),* 155-161.

Cho, J. R., & Park, H. J. (2002). High strength FGM cutting tools: finite element analysis on thermoelastic characteristics. *Journal of Materials Processing Technology, 130,* 351-356.

Choi, K. H., Kim, H. S., Park, C. H., Kim, G. H., Baik, K. H., Lee, S. H., ... & Kim, H. S. (2016). High-temperature thermo-mechanical behavior of functionally graded materials produced by plasma sprayed coating: experimental and modeling results. *Metals and Materials International, 22(5),* 817-824.

Cornie, J.A., Moon, H.K., Flemings, M.C., Masounave, J., Hamel, F.G. (1990). Proceedings of The İnternational Conference On Fabrication of Particulates Reinforced *Metal Composites*, Montreal, Quebec.Canada.Asm İnternational, USA, 63-78.

Cremer, G. D. (1944). Sintering together powders metals such as bronze, brass or aluminum. US Patent, (2,355,954).

Dorfman, M. R. (2002). Thermal spray processes. *Advanced Materials & Processes, 160(8*), 47-50.

Drenchev, L., Sobczak, J., & Sobczak, N. (2002). Sedimentation phenomenon and viscosity of water–SiC suspension under gravity conditions—a water model study for composites synthesis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 197(1-3*), 203-211.

Drenchev, L., Sobczak, J., Malinov, S., & Sha, W. (2003a). Numerical simulation of macrostructure formation in centrifugal casting of particle reinforced metal matrix composites. Part 1: model description. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 11(4),* 635.

Drenchev, L., Sobczak, J., Malinov, S., & Sha, W. (2003b). Numerical simulation of macrostructure formation in centrifugal casting of particle reinforced metal matrix composites. Part 2: simulations and practical applications. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 11(4),* 651.

El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences, 1(11),* 1-23.

Eriksson, M., Radwan, M., & Shen, Z. (2013). Spark plasma sintering of WC, cemented carbide and functional graded materials. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *36*, 31-37.

Farnoush, H., Aldıç, G., & Çimenoğlu, H. (2015). Functionally graded HA–TiO2 nanostructured composite coating on Ti–6Al–4V substrate via electrophoretic deposition. *Surface and Coatings Technology, 265*, 7-15.

Farnoush, H., Mohandesi, J. A., & Çimenoğlu, H. (2015). Micro-scratch and corrosion behavior of functionally graded HA-TiO2 nanostructured composite coatings fabricated by electrophoretic deposition. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 46*, 31-40.

Fishman, S. G. (1988). Cast reinforced metal composites. In Proc. Int.Symp. on Advances Cast Reinforced Metal Composites. *ASM International*.

Fukui, Y., Takashima, K., & Ponton, C. B. (1994). Measurement of Young's modulus and internal friction of an in situ Al-Al 3 Ni functionally gradient material. *Journal of materials science*, *29*(9), 2281-2288.

Gao, J. W., & Wang, C. Y. (2000). Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting. *Materials Science and Engineering: A*, 292(2), 207-215.

García-Gancedo, L., Olhero, S. M., Alves, F. J., Ferreira, J. M. F., Demoré, C. E. M., Cochran, S., & Button, T. W. (2012). Application of gel-casting to the fabrication of 1–3 piezoelectric ceramic–polymer composites for high-frequency ultrasound devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22(12), 125001.

Gessinger, G. H. (1970). Volume diffusion as densification rate-controlling step in sintering. *Scripta Metallurgica*, *4(9*), 673-675.

Ghosh, K. B., Mukhopadhyay, J., & Basu, R. N. (2016). Functionally graded doped lanthanum cobalt ferrite and ceria-based composite interlayers for advancing the performance stability in solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, *328*, 15-27.

Gibson, L. J. (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the royal society interface*, *9(76*), 2749-2766.

Gooch, W. A., Chen, B. H. C., Burkins, M. S., Palicka, R., Rubin, J. J., & Ravichandran, R. (1999). Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique. *In Materials science forum*, *308*, 614-621.

Gottron, J., Harries, K. A., & Xu, Q. (2014). Creep behaviour of bamboo. *Construction and Building Materials*, *66*, 79-88.

Guo, M. T., & Tsao, C. Y. (2002). Tribological behavior of aluminum/SiC/nickel-coated graphite hybrid composites. *Materials Science and Engineering: A, 333(1-2*), 134-145.

Gupta, B. (2017). Few Studies on Biomedical Applications of Functionally Graded Material. *Barkha Gupta International Journal of Engineering Technology Science and Research, 4 (3),* 39–43.

Gupta, N., Prasad, V. V., Madhu, V., & Basu, B. (2012). Ballistic Studies on TiB 2-Ti Functionally Graded Armor Ceramics. *Defence Science Journal*, *62(6*).113-118.

Habibi, M. K., Samaei, A. T., Gheshlaghi, B., Lu, J., & Lu, Y. (2015). Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: underlying mechanisms. *Acta biomaterialia*, *16,* 178-186.

He, G., Zhang, Y., Peng, C., & Li, X. (2013). Surface morphology and ferroelectric properties of compositional gradient PZT thin films prepared by chemical solution deposition process. *Applied surface science*, *283*, 532-536.

Heimann, R. B. (2008). Plasma-spray coating: principles and applications. *John Wiley & Sons.*

Heo, T. W., & Chen, L. Q. (2014). Phase-field modeling of displacive phase transformations in elastically anisotropic and inhomogeneous polycrystals. *Acta Materialia, 76*, 68-81.

Hirai, T. (1995). CVD processing. *MRS Bulletin*, *20(1),* 45-47.

Hong, C. Q., Zhang, X. H., Li, W. J., Han, J. C., & Meng, S. H. (2008). A novel functionally graded material in the ZrB2–SiC and ZrO2 system by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, *498(1-2*), 437-441.

Hotza, D., & Greil, P. (1995). Aqueous tape casting of ceramic powders. *Materials Science and Engineering: A*, *202(1-2),* 206-217.

https://www.metalurjik.com/toz-metalurjisi-nedir

https://www.gurayaluminyum.com.tr https

Hu, C. (1997). Technical Handbook for Surface Treatment. Beijing Industrial University Press. 364-368.

Huang, C. Y., & Chen, Y. L. (2016). Design and impact resistant analysis of functionally graded Al2O3–ZrO2 ceramic composite. *Materials & Design, 91,* 294-305.

Inaguma, Y., Sato, H., & Watanabe, Y. (2010). Fabrication of Al-based FGM containing TiO2 nano-particles by a centrifugal mixed-powder method. *In Materials Science Forum, 631*, 441-447.

Jedamzik, R., Neubrand, A., & Rödel, J. (2000). Functionally graded materials by electrochemical processing and infiltration: application to tungsten/copper composites. *Journal of materials science, 35(2*), 477-486.

Jin, G., Takeuchi, M., Honda, S., Nishikawa, T., & Awaji, H. (2005). Properties of multilayered mullite/Mo functionally graded materials fabricated by powder metallurgy processing. *Materials Chemistry and Physics, 89(2-3*), 238-243.

Joshi, R. K., Alwarappan, S., Yoshimura, M., Sahajwalla, V., & Nishina, Y. (2015). Graphene oxide: the new membrane material. *Applied Materials Today, 1(1),* 1-12.

Jun, Z., Xing, A., Jianxin, D., & Jinghai, W. (2004). Thermal shock behaviors of functionally graded ceramic tool materials. *Journal of the European Ceramic Society*, *24(5*), 847-854.

Jung, Y. G., Park, S. W., & Choi, S. C. (1997). Effect of CH4 and H2 on CVD of SiC and TiC for possible fabrication of SiC/TiC/C FGM. *Materials Letters*, *30(5-6),* 339-345.

K.L. Choy, Chemical vapour deposition of coatings, Prog. Mater. Sci. 48 (2)

Kalkanlı, A., & Yılmaz, S. (2008). Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates. *Materials & Design, 29(4*), 775-780.

Kasapi, M. A., & Gosline, J. M. (1997). Design complexity and fracture control in the equine hoof wall. *The Journal of experimental* biology, *200(11),* 1639-1659.

Kawasaki, A., & Watanabe, R. (1990). Microstructural designing and fabrication of disk shaped functionally gradient material by powder metallurgy. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 37(2),* 253-258.

Kawasaki, A., & Watanabe, R. (1997a). Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials. *Ceramics international*, *23(1),* 73-83.

Kawasaki, A., & Watanabe, R. (1997b). Evaluation of thermomechanical performance for thermal barrier type of sintered functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering, 28(1-2),* 29-35.

Kawasaki, A., & Watanabe, R. (2002). Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials. *Engineering Fracture Mechanics*, *69(14-16*), 1713-1728.

Kawase, M., Tago, T., Kurosawa, M., Utsumi, H., & Hashimoto, K. (1999). Chemical vapor infiltration and deposition to produce a silicon carbide–carbon functionally gradient material. *Chemical engineering science*, *54(15-16*), 3327-3334.

Khor, K. A., & Gu, Y. W. (2000). Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO2/NiCoCrAlY coatings. *Materials Science and Engineering: A, 277(1-2),* 64-76.

Khor, K. A., & Gu, Y. W. (2000). Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings. *Thin Solid Films*, *372(1-2),* 104-113.

Khor, K. A., Dong, Z. L., & Gu, Y. W. (1999). Plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings. *Materials letters*, *38(6*), 437-444.

Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, *362(1-2),* 81-106.

Kim, J. H., Kim, M. C., & Park, C. G. (2003). Evaluation of functionally graded thermal barrier coatings fabricated by detonation gun spray technique. *Surface and Coatings Technology, 168(2-3),* 275-280.

Kim, J. I., Kim, W. J., Choi, D. J., Park, J. Y., & Ryu, W. S. (2005). Design of a C/SiC functionally graded coating for the oxidation protection of C/C composites. *Carbon, 43(8)*, 1749-1757.

Koide, S., Yazawa, K., Asakawa, N., & Inoue, Y. (2007). Fabrication of functionally graded bulk materials of organic polymer blends by uniaxial thermal gradient. *Journal of Materials Chemistry, 17(6*), 582-590.

Koizumi, M. F. G. M. (1997). FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, *28(1*-2), 1-4.

Lee, P. H. (2013). Fabrication, characterization and modeling of functionally graded materials. Columbia University.

Lee, S. H., Tanaka, H., & Kagawa, Y. (2009). Spark plasma sintering and pressureless sintering of SiC using aluminum borocarbide additives. *Journal of the European Ceramic Society, 29(10),* 2087-2095.

Lei, M., & Ledbetter, H. (1994). Elastic constants of SiC p/Al: Measurements and modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A, 25(12*), 2832-2835.

Li, L., Cheng, L., Fan, S., Gao, X., Xie, Y., & Zhang, L. (2015). Fabrication and dynamic compressive response of laminated ZrO–Zr2CN/Si3N4 ceramics. *Ceramics International, 41(7),* 8584-8591.

Li, S. B., & Xie, J. X. (2006). Processing and microstructure of functionally graded W/Cu composites fabricated by multi-billet extrusion using mechanically alloyed powders. *Composites science and technology, 66(13),* 2329-2336.

Li, Y., Jian, S., & Min, Z. (2005). Application of ceramics metal functionally graded materials on green automobiles*. In Key Engineering Materials, 280,* 1925-1935.

Limarga, A. M., Widjaja, S., & Yip, T. H. (2005). Mechanical properties and oxidation resistance of plasma-sprayed multilayered Al2O3/ZrO2 thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, *197(1*), 93-102.

Liu W, Wei H (2019) Energy efficiency evaluation of metal laser direct deposition based on process characteristics and empiri- cal modeling. *International Journal Advanced Manufacturing Technol*ogy, *102*, 901–913.

Liu, Z. Y., Li, C., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Energy consumption in additive manufacturing of metal parts. *Procedia Manufacturing*, *26*, 834-845.

Liu, Z., Meyers, M. A., Zhang, Z., & Ritchie, R. O. (2017). Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications. *Progress in Materials Science*, *88,* 467-498.

Lucignano, C., & Quadrini, F. (2009). Indentation of functionally graded polyester composites. *Measurement*, *42(6),* 894-902.

Ma, J., & Tan, G. E. B. (2001). Processing and characterization of metal–ceramics functionally gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology, 113(1-3*), 446-449.

Madeira, S., Souza, J. C., Fredel, M. C., Henriques, B., Silva, F. S., & Zhang, Y. (2018). Functionally graded nanostructured biomaterials (FGNB). *In Nanostructured Biomaterials for Cranio-Maxillofacial and Oral Applications*, 159-180.

Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. L. (2012). Functionally graded material: an overview. *World Congress on Engineering 2012*, *3*,103-117.

Mahmoodian, R., Hassan, M. A., Hamdi, M., Yahya, R., & Rahbari, R. G. (2014). In situ TiC–Fe–Al2O3–TiAl/Ti3Al composite coating processing using centrifugal assisted combustion synthesis. *Composites Part B: Engineering*, 59, 279-284.

Malinina, M., Sammi, T., & Gasik, M. M. (2005). Corrosion resistance of homogeneous and FGM coatings. *In Materials Science Forum*, *492,* 305-310.

Marin, L. (2005). Numerical solution of the Cauchy problem for steady-state heat transfer in two-dimensional functionally graded materials. *International Journal of Solids and Structures, 42(15),* 4338-4351.

Matson, D. M., & Munir, Z. A. (1992). Combustion synthesis of intermetallic compounds using titanium, nickel and copper wires. *In High Temperature Aluminides and Intermetallics*, 700-705.

Matsuo, S., Watarı, F., & Ohata, N. (2001). Fabrication of a functionally graded dental composite resin post and core by laser lithography and finite element analysis of its stress relaxation effect on tooth root. *Dental materials journal*, *20(4),* 257-274.

Mehrali, M., Shirazi, F. S., Mehrali, M., Metselaar, H. S. C., Kadri, N. A. B., & Osman, N. A. A. (2013). Dental implants from functionally graded materials. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 101(10*), 3046-3057.

Miao, X., & Sun, D. (2010). Graded/gradient porous biomaterials. *Materials, 3(1),* 26-47.

Miller, R. A., & Lowell, C. E. (1982). Failure mechanisms of thermal barrier coatings exposed to elevated temperatures. *Thin solid films, 95(3),* 265-273.
Mishina, H., Inumaru, Y., & Kaitoku, K. (2008). Fabrication of ZrO2/AISI316L functionally graded materials for joint prostheses. *Materials Science and Engineering: A, 475(1-2),* 141-147.

Mueller, E., Drašar, Č., Schilz, J., & Kaysser, W. A. (2003). Functionally graded materials for sensor and energy applications. *Materials Science and Engineering: A, 362(1-2),* 17-39.

Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied materials today, 5,* 223-245.

Negahdari, Z., Willert-Porada, M., & Scherm, F. (2010). Development of novel functionally graded Al2O3-lanthanum hexaaluminate ceramics for thermal barrier coatings. *In Materials Science Forum, 631,* 97-102.

Nemat-Alla, M. M., Ata, M. H., Bayoumi, M. R., & Khair-Eldeen, W. (2011). Powder metallurgical fabrication and microstructural investigations of aluminum/steel functionally graded material. *Materials Sciences and Applications, 2(12),* 1708–1718.

Neubrand, A., 2001. Functionally graded materials. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* Oxford: Elsevier*,2,* 3407,3413.

Niino, M., Kisara, K., & Mori, M. (2005). Feasibility study of FGM technology in space solar power systems (SSPS). *In Materials Science Forum*, *492*, 163-170.

Oshkour, A. A., Talebi, H., Seyed Shirazi, S. F., Yau, Y. H., Tarlochan, F., & Abu Osman, N. A. (2015). Effect of geometrical parameters on the performance of longitudinal functionally graded femoral prostheses. *Artificial organs*, 39(2), 156-164.

Pakseresht, A. H., Ghasali, E., Nejati, M., Shirvanimoghaddam, K., Javadi, A. H., & Teimouri, R. (2015). Development empirical-intelligent relationship between plasma spray parameters and coating performance of Yttria-Stabilized Zirconia. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *76(5*), 1031-1045.

Pakseresht, A. H., Javadi, A. H., Nejati, M., Shirvanimoghaddam, K., Ghasali, E., & Teimouri, R. (2014). Statistical analysis and multiobjective optimization of process parameters in plasma spraying of partially stabilized zirconia. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75(5),* 739-753.

Pan, C., & Chen, B. (1995). Formation of the deformation twinning in austenitic stainless steel weld metal. *Journal of materials science letters*, 14(24), 1798-1800.

Pan, C., & Xu, X. (2003). Microstructural characteristics in plasma sprayed functionally graded ZrO2/NiCrAl coatings. *Surface and Coatings Technology*, *162(2-3*), 194-201.

Park, C. S., Kim, M. H., & Lee, C. (2001). A theoretical approach for the thermal expansion behavior of the particulate reinforced aluminum matrix composite Part IA thermal expansion model for composites with mono-dispersed spherical particles. *Journal of materials science, 36(14),* 3579-3587.

Park, S. H., Kang, J. H., Jung, Y. G., & Paik, U. (2008, February). Fabrication and Mechanical Characterization of Al 2 O 3/ZrO 2 Layered Composites with Graded Microstructure. *In AIP Conference Proceedings, 973*, 273-278.

Petit, C., Montanaro, L., & Palmero, P. (2018). Functionally graded ceramics for biomedical application: Concept, manufacturing, and properties. *International Journal of Applied Ceramic Technology, 15(4),* 820-840.

Pompe, W., Worch, H., Epple, M., Friess, W., Gelinsky, M., Greil, P., ... & Schulte, K. J. M. S. (2003). Functionally graded materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A, 362(1-2),* 40-60.

Prabhu, T. R. (2017). Processing and properties evaluation of functionally continuous graded 7075 Al alloy/SiC composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *17(1),* 20-31.

Previtali, B., Demir, A. G., Bucconi, M., Crosato, A., & Penasa, M. (2017). Comparative costs of additive manufacturing vs. machining: the case study of the production of forming dies for tube bending. *In 2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium,* 33-38.

Put, S., Vleugels, J., Anné, G., & Van der Biest, O. (2003). Functionally graded ceramic and ceramic–metal composites shaped by electrophoretic deposition. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *222(1-3*), 223-232.

Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., & Pai, B. C. (2010). Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites. *Materials characterization, 61(10),* 923-928.

Ram, S. C., Chattopadhyay, K., & 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.

Ramírez-Gil, F. J., Murillo-Cardoso, J. E., Silva, E. C. N., & Montealegre-Rubio, W. (2016). Optimization of Functionally Graded Materials Considering Dynamical Analysis. *In Computational Modeling, Optimization and Manufacturing Simulation of Advanced Engineering Materials*, 205-237.

Reinhold, E., Richter, J., Seyfert, U., & Steuer, C. (2004). Metal strip coating by electron beam PVD—industrial requirements and customized solutions. *Surface and Coatings Technology, 188,* 708-713.

Rockland, J. G. (1967). The determination of the mechanism of sintering. *Acta Metallurgica, 15(2),* 277-286.

Rodrıguez-Castro, R., Wetherhold, R. C., & Kelestemur, M. H. (2002). High-temperature thermo-mechanical behavior of functionally graded materials produced by plasma sprayed coating: experimental and modeling results. *Metals and Materials International*, *323(1-2),* 445-456.

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.

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,* 108376.

Sarıkaya, Ö. (2003). Al-% 12Si malzemesi üzerine plazma püskürtme tekniği ile Al-Si+ B4C kaplama, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Sasaki, M., & Hirai, T. (1994). Thermal fatigue resistance of CVD SiC/C functionally gradient material. *Journal of the European Ceramic Society*, *14(3),* 257-260.

Scaffaro, R., Lopresti, F., Botta, L., & Maio, A. (2016). Mechanical behavior of polylactic acid/polycaprolactone porous layered functional composites. *Composites Part B: Engineering, 98,* 70-77.

Scaffaro, R., Lopresti, F., Botta, L., Rigogliuso, S., & Ghersi, G. (2016a). Preparation of three-layered porous PLA/PEG scaffold: relationship between morphology, mechanical behavior and cell permeability. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, *54,* 8-20.

Scaffaro, R., Lopresti, F., Botta, L., Rigogliuso, S., & Ghersi, G. (2016b). Integration of PCL and PLA in a monolithic porous scaffold for interface tissue engineering. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 63,* 303-313.

Scaffaro, R., Lopresti, F., Botta, L., Rigogliuso, S., & Ghersi, G. (2016c). Melt processed PCL/PEG scaffold with discrete pore size gradient for selective cellular infiltration. *Macromolecular Materials and Engineering*, 301(2), 182-190.

Schwartz, R. W., Schneller, T., & Waser, R. (2004). Chemical solution deposition of electronic oxide films. *Comptes Rendus Chimie*, 7(5), 433-461.

Shen, M., & Bever, M. B. (1972). Gradients in polymeric materials. *Journal of Materials science, 7(7),* 741-746.

Shi, J. (2016). Development of functionally graded implant materials in commercial use.

Shishkovsky, I., Missemer, F., & Smurov, I. (2012). Direct metal deposition of functional graded structures in Ti-Al system. *Physics Procedia*, *39,* 382-391.

Shon, I. J., & Munir, Z. A. (1998). Synthesis of TiC, TiC-Cu Composites, and TiC-Cu Functionally Graded Materials by Electrothermal Combustion. *Journal of the American Ceramic Society, 81(12),* 3243-3248.

Silva, E. C. N., Walters, M. C., & Paulino, G. H. (2006). Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. *Journal of Materials Science*, *41(21),* 6991-7004.

Slowak, R., Hoffmann, S., Liedtke, R., & Waser, R. (1999). Functional graded high-K (Ba1− xSrx) TiO3 thin films for capacitor structures with low temperature coefficient. *Integrated Ferroelectrics*, *24(1-4),* 169-179.

Sobczak, J. J., & Drenchev, L. (2013). Metallic functionally graded materials: a specific class of advanced composites. *Journal of Materials Science & Technology*, *29(4), 297-316.*

Stewart, S., Ahmed, R., & Itsukaichi, T. (2004). Contact fatigue failure evaluation of post-treated WC–NiCrBSi functionally graded thermal spray coatings. *Wear, 257(9-10), 962-983.*

Stoner, B., Bartolai, J., Kaweesa, D. V., Meisel, N. A., & Simpson, T. W. (2018). Achieving functionally graded material composition through bicontinuous mesostructural geometry in material extrusion additive manufacturing. *JOM, 70(3),* 413-418.

Strojny-Nędza, A., Pietrzak, K., & Węglewski, W. (2016). The influence of Al 2 O 3 powder morphology on the properties of Cu-Al 2 O 3 composites designed for functionally graded materials (FGM). *Journal of Materials Engineering and Performance*, *25(8),* 3173-3184.

Sudbury, Z., Duty, C., Kunc, V., Kishore, V., Ajinjeru, C., Failla, J., & Lindahl, J. (2016, January). Characterizing material transition for functionally graded material using big area additive manufacturing. *In Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*, 8-10.

Tallon, C., & Franks, G. V. (2011). Recent trends in shape forming from colloidal processing: A review. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, *119(1387),* 147-160.

Taskin, N.U., Taskin, V., (2017). Continuous composite metal foam production and method and device for stirring particle reinforced composite metal, (European Patent No. 3083105). European Patent Office.

Taylor, G. F. (1933). *U.S. Patent No. 1,896,854*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Tharaknath, S., Ramkumar, R., & Lokesh, B. (2016). Design and analysis of hip prosthesis using functionally graded material. *Middle East J Sci Res, 24,* 124-132.

Tokita, M. (2013). Spark plasma sintering (SPS) method, systems, and applications, Handbook of advanced ceramics, Second ed. Academic Press, Oxford.

Torres, Y., Trueba, P., Pavón, J. J., Chicardi, E., Kamm, P., García-Moreno, F., & Rodríguez-Ortiz, J. A. (2016). Design, processing and characterization of titanium with radial graded porosity for bone implants. *Materials & Design*, *110,* 179-187.

Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). A review of carbon nanotube reinforced aluminium composite and functionally graded composites as a future material for aerospace. *Int J Mod Eng Res, 4(7),* 13-22.

Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014a). Functionally graded composite materials: an overview. *Procedia Materials Science*, *5,* 1291-1299.

Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O., & Keleş, Ö. (2014). The ballistic performance of SiC–AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials & Design* (1980-2015), *56*, 31-36.

Ürkmez Taşkın N., Taşkın V., Yurci M.E. (2010). Alüminyum Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi İçin Doğrudan Yarı Katı Karıştırma Yöntemi. *13. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Pamukkale Üniversitesi*, 453-461.

Ürkmez, N. (2004). AlMg3/SiCp kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi, (Doktora Tezi), Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Vaidya, R. U., Castro, R. G., Peters, M. I., Gallegos, D. E., & Petrovic, J. J. (2002). Use of plasma spraying in the manufacture of continuously graded and layered/graded molybdenum disilicide/alumina composites. *Journal of thermal spray technology*, 11(3), 409-414.

Varma, A., Rogachev, A. S., Mukasyan, A. S., & Hwang, S. (1998). Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. *In advances in chemical engineering*, *24,* 179-226.

Wang, X., Chu, X., Zhao, H., Lu, S., Fang, F., Li, J., ... & Wang, X. (2014). Controllable growth of functional gradient ZnO material using chemical vapor deposition. *Integrated Ferroelectrics, 151(1),* 1-6.

Watanabe, Y., Inaguma, Y., & Sato, H. (2011). Cold model for process of a Ni-aluminide/steel clad pipe by a reactive centrifugal casting method. *Materials letters, 65(3),* 467-470.

Watanabe, Y., Kurahashi, M., Kim, I. S., Miyazaki, S., Kumai, S., Sato, A., & Tanaka, S. I. (2006). Fabrication of fiber-reinforced functionally graded materials by a centrifugal in situ method from Al–Cu–Fe ternary alloy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(12*), 2186-2193.

Watanabe, Y., Yamanaka, N., & Fukui, Y. (1998). Control of composition gradient in a metal-ceramic functionally graded material manufactured by the centrifugal method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 29(5-6),* 595-601

Watari, F. (2001). Fabrication of functionally graded implant and its biocompatibility. *Functionally graded materials in the 21st century*, 187-190.

Watari, F., Yokoyama, A., Omori, M., Hirai, T., Kondo, H., Uo, M., & Kawasaki, T. (2004). Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application. *Composites Science and Technology*, *64(6),* 893-908.

Wilson, J. M., & Shin, Y. C. (2012). Microstructure and wear properties of laser-deposited functionally graded Inconel 690 reinforced with TiC. *Surface and Coatings Technology, 207*, 517-522.

Woodward, B., & Kashtalyan, M. (2012). Performance of functionally graded plates under localised transverse loading. *Composite Structures*, *94(7),* 2254-2262.

Woolley, R. J., & Skinner, S. J. (2014). Functionally graded composite La2NiO4+ δ and La4Ni3O10− δ solid oxide fuel cell cathodes. *Solid State Ionics*, *255*, 1-5.

Wośko, M., Paszkiewicz, B., Piasecki, T., Szyszka, A., Paszkiewicz, R., & Tłaczała, M. (2005). Applications of functionally graded materials in optoelectronic devices. *Optica Applicata,* 35(3).

Xing, A., Jun, Z., Chuanzhen, H., & Jianhua, Z. (1998). Development of an advanced ceramic tool material—functionally gradient cutting ceramics. *Materials Science and Engineering: A, 248(1-2),* 125-131.

Xu, F., Zhang, X., & Zhang, H. (2018). A review on functionally graded structures and materials for energy absorption. *Engineering Structures, 171,* 309-325.

Yang, J., Yu, J., & Huang, Y. (2011). Recent developments in gelcasting of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, *31(14),* 2569-2591.

Yeo, J. G., Jung, Y. G., & Choi, S. C. (1998). Design and microstructure of ZrO2/SUS316 functionally graded materials by tape casting. *Materials Letters, 37(6),* 304-311.

Yu, J. H., Wang, C. B., Shen, Q., & Zhang, L. M. (2012). Preparation and properties of Sip/Al composites by spark plasma sintering. *Materials & Design*, *41,* 198-202.

Yuan, H., Li, J., Shen, Q., & Zhang, L. (2012). In situ synthesis and sintering of ZrB2 porous ceramics by the spark plasma sintering–reactive synthesis (SPS–RS) method. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *34,* 3-7.

Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., ... & Lavernia, E. J. (2019). Additive manufacturing of functionally graded materials: *A review. Materials Science and Engineering: A, 764,* 138-209.

Zhang, L. X., Zhang, B., Sun, Z., Pan, X. Y., Shi, J. M., & Feng, J. C. (2020). Preparation of graded double-layer materials for brazing C/C composite and TC4. *Journal of Alloys and Compounds, 823,* 153-169.

Zhang, X. H., Han, J. C., Du, S. Y., & Wood, J. V. (2000). Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni functionally graded materials by simultaneous combustion synthesis and compaction. *Journal of materials science*, *35(8),* 1925-1930.

Zhu, X., Wang, Q., & Meng, Z. (1995). A functionally gradient piezoelectric actuator prepared by powder metallurgical process in PNN-PZ-PT system. *Journal of Materials Science Letters, 14(7)*, 516-518.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokulu; 50. Yıl Ahmet Merter İlkokulu'nda, ortaokul ve liseyi; Bayrampaşa Anadolu Lisesi'nde okudu. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2009 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen devam etmekte.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Taskın, N. U., & Genç, S. K. (2020). Productıon Of FG-Al-MMC By Semi-Solid Stirring And Sequential Squeeze Casting Methods. *29th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic,1098-1104.