



**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KAREKTERİZASYONU**

**2022
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

İsmail KAYABAŞI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Gökhan SUR**

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ
VE KAREKTERİZASYONU**

İsmail KAYABAŞI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Gökhan SUR**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Aralık 2022**

İsmail KAYABAŞI tarafından hazırlanan “FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Gökhan SUR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 16/12/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Serkan ISLAK (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI (KÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

İsmail KAYABAŞI

ÖZET

Doktora Tezi

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU

İsmail KAYABAŞI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Gökhan SUR

Aralık 2022, sayfa 169

Bu çalışmada, toz metalürji yöntemiyle kalınlığı boyunca tabaka sayısı, tabaka içeriği ve tabakalar arası geçiş formu farklı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretimine yönelik yeni bir üretim metodolojisi geliştirilmiştir. Bu üretim metodolojisi FDM üretiminde iki aşamalı kalıplama sürecini kullanır. Bunlardan ilki FDM'nin tabaka sayısı ve tabaka geçiş formuna uygun, ayırıcılar ve yardımcı ekipmanlarla kalıp gözleri modüler yapıda isteğe uyarlanabilen toz dolum ve pellet üretim kalıbıdır. Bu kalıp, FDM'nin her bir tabakasının toz dolum sürecini ayırıcılarla kusursuz geçiş yüzey geometrisinde elde etmeyi sağlar. Diğer kalıp ise pellet haldeki FDM'nin ısıtma ünitesi ve hidrolik presle birlikte, sabit sıcaklık ve basınç altında sinterlenmesinde kullanılır. Çalışmada, düz ve trapez (30°, 45° ve 60°) geçişli 3 ve 4 tabakalı, her bir katmanı farklı takviye oranlı FDM'ler üretilmiştir. FDM'lerin üretiminde matris malzemesi olarak ortalama tane boyutu 60 µm olan AA7075 alaşım tozu ve takviye elemanı olarak ortalama tane boyutu 40 µm B₄C tozları kullanılmıştır. FDM'lerde tabakaların ağırlıkça B₄C takviye oranı üç tabakalılarda sırasıyla % 0-30-60, dört tabakalılarda ise sırasıyla % 0-20-40-60 oranındadır. FDM'lerin üretim sürecinde ilk aşama, toz tartım ve homojen dağılım elde etme sonrası dikey ayırıcılı kalıp

hücrelerine tozun doldurulması ve bu kalıp içerisinde oda sıcaklığında 10 MPa ön sıkıştırma işlemi uygulanarak pellet FDM elde edilmesidir. İkinci aşamada pellet haldeki FDM'ye mukavemet kazandırmak için 30 dk süre boyunca, 560°C sabit sıcaklıkta, 325 MPa sıkıştırma kuvveti uygulanarak FDM üretim süreci tamamlanmıştır. Üretilen FDM'lerin karakterizasyon süreçlerinde mikroyapı incelemeleri, sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımları incelenmiştir.

Üretilen FDM'lerin mikroyapı incelemelerinde tabaka geçişlerinde ayrılma veya çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca ağırlıkça düşük takviye elemanı oranlı tabakalarda (ağırlıkça % 20 ve % 30) nispeten homojen B₄C takviye elemanı dağılımı gözlenmiştir. FDM'de B₄C takviye oranı arttıkça topaklanma ve gözenek miktarında artış eğilimi gözlenmiştir. Üretilen numunelerde en yüksek yoğunluk değeri 2,7057 g/cm³ ile üç tabakalı 30° trapez geçişli FDM'de ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri de 170 HBN ile dört tabakalı düz geçişli FDM'nin ağırlıkça % 40 B₄C takviyeli tabakasında ölçülmüştür. FDM'lerin çapraz kırılma dayanımı üç nokta eğme testiyle belirlenmiştir. Bu testler FDM'nin takviye elemanı yoğun ve takviye elemanı içermeyen yüzeylerinden yapılmış olup tüm FDM'lerde takviye elemanı yoğun yüzeyin kırılma dayanımı daha yüksek çıkmıştır. FDM'ler arasında en yüksek çapraz kırılma dayanımı 629 MPa ile dört tabakalı 30° trapez geçişli FDM'de takviye elemanı yoğun yüzeyden ölçümde elde edilmiştir. Takviye miktarı yüksek tabakların kırılma yüzeyinde görülen çukurların belirginliği ve derinliğinin azaldığı, kırılmanın gevrek kırılmaya uyduğu saptanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, mikroyapı, sertlik, yoğunluk, çapraz kırılma dayanımı, AA7075, B₄C

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF FUNCTIONALLY GRADED COMPOSITES

İsmail KAYABAŞI

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Machine Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Gökhan SUR

December 2022, 169 pages

In this study, the powder metallurgy method has developed a new production methodology for producing functionally graded materials (FGM) with different layer numbers, layer content and interlayer transition form. This manufacturing methodology uses a two-stage moulding process in FGM production. The first of these is the powder filling and pellet production mould, which can be customized in a modular structure with separators and auxiliary equipment, suitable for the number of layers and layer transition form of FGM. This mould allows the powder-filling process of each layer of FGM with separators in perfect transition surface geometry. The other mould is used for sintering FGM in pellet form with the heating unit and hydraulic press under constant temperature and pressure. The study produced FGMs with 3 and 4 layers, with flat and trapezoidal (30°, 45° and 60°) transitions, with different reinforcement ratios for each layer. In producing FGMs, AA7075 alloy powder with an average grain size of 60 µm was used as matrix material and B₄C powder with an average grain size of 40 µm as a reinforcement element. The B₄C reinforcement ratio of the layers in FGMs is 0-30-60 %, respectively, in three layers and 0-20-40-60 % in four layers, respectively. The first step in the production process of FGMs is to fill the

powder into the mould cells with vertical separators after powder weighing and obtaining homogeneous distribution and to obtain green compact FGM by applying a 10 MPa pre-compression process at room temperature in this mould. In the second stage, the FGM production process was completed by applying a pressure of 325 MPa at a constant temperature of 560°C for 30 minutes to strengthen the green compact FGM. In the characterization processes of the produced FGMs, microstructure investigations, hardness, density and cross-fracture strength were investigated.

No separation or crack formation was observed at the layer transitions in the microstructure examinations of the produced FGMs. In addition, relatively homogeneous B₄C reinforcing element distribution was observed in layers with low reinforcing element ratios (20 % and 30 % by weight). As the B₄C reinforcement ratio increased in FGM, agglomeration and porosity tended to increase. The highest density value of 2.7057 g/cm³ in the produced samples was measured in three-layer FGM with a 30° trapezoidal transition. The highest hardness value was measured in the 40 wt % B₄C reinforced layer of the four-layer straight-through FGM with 170 HBN. The three-point bending test determined the diagonal fracture strength of the FGMs. These tests were carried out on the FGM's reinforcing dense and non-reinforcing surfaces, and the fracture strength of the dense reinforcing surface was higher in all FGMs. Among the FGMs, the highest transverse fracture strength of 629 MPa was obtained in the four-layer 30° trapezoidal FGM with the reinforcement element measured from the dense surface. It was determined that the clarity and depth of the pits seen on the fracture surface of the plates with high reinforcement amounts decreased, and the fracture conformed to the brittle fracture.

Key Word : Functionally graded material, microstructure, hardness, density, transverse rupture strength, fracture surfaces, AA7075, B₄C

Science Code: 91417

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Gökhan SUR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. FDM'LERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRMESİ	31
BÖLÜM 3	32
KOMPOZİT MALZEMELER.....	32
3.1. GENEL BİLGİLER.....	32
3.2. FDM'LER	35
3.2.1. FDM'lerin Sınıflandırılması	36
3.2.2. FDM'lerin Kullanım Alanları.....	39
3.2.3. FDM'lerin Üretim Metotları.....	41
BÖLÜM 4	43
TOZ METALÜRJİSİ	43
4.1. TOZ METALÜRJİSİNİN ÖZELLİKLERİ.....	43

4.1.1. Toz Metalürjisinin Avantajları	46
4.2. TOZ ÜRETİMİ.....	46
4.3. TOZ MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ VE KARAKTERİZASYONU	47
4.3.1. Kimyasal Özellikler	47
4.3.2. Fiziksel Özellikler.....	49
4.3.2.1. Toz Partikülünün Özgül Yüzey Alanı.....	49
4.3.2.2. Toz Partikülünün Boyutu ve Dağılımı.....	49
4.3.2.3. Toz Partikülünün Şekli	51
4.3.2.4. Toz Partikülünün Sıkıştırılabilirliği	52
4.3.2.5. Görünür Yoğunluk ve Sıkıştırma Yoğunluğu.....	53
4.3.2.6. Tozların Akış Hızı.....	54
4.4. TOZLARIN HARMANLANMASI VE KARIŞTIRILMASI	54
4.5. TOZLARIN SIKIŞTIRILMASI.....	57
4.5.1. Sıkıştırma Metodları	60
4.5.1.1. Metal Kalıplarda Presleme Yöntemi.....	60
Tek Yönlü Sıkıştırma	61
İki Yönlü Sıkıştırma.....	62
4.5.1.2. Titreşimle Sıkıştırma Yöntemi.....	64
4.5.1.3. Yüksek Enerjili Sıkıştırma Yöntemi.....	65
4.5.1.4. Ekstrüzyonla sıkıştırma yöntemi.....	66
4.5.1.5. Haddelme ile Sıkıştırma Yöntemi	66
4.5.1.6. İzostatik Sıkıştırma Yöntemi	67
CIP Yöntemi	68
HIP Yöntemi	69
4.6. SINTERLEME	70
4.6.1. Katı Faz Sinterleme	71
4.6.2. Sıvı Faz Sinterlemesi	73
BÖLÜM 5	76

METERYAL VE METOD	76
5.1. FDM'LERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MAKİNE VE EKİPMANLAR	76
5.2. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAM MADDELER	77
5.3. FDM ÜRETİMİ	80
5.4. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN KALIP ve YARDIMCI ELEMANLAR	82
5.5. TOZLARIN HAZIRLANMASI	84
5.6. TOZLARIN PRESLENMESİ	85
5.7. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	91
5.8. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ	93
5.9. SERTLİK TESTİ	94
5.10. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ	95
BÖLÜM 6	97
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	97
6.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER İLE İLGİLİ SONUÇLAR ...	97
6.1.1. FDM'lerin Mikroyapı İncelemeleri	97
6.1.2 EDS Sonuçları	114
6.1.3 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	119
6.1.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları	121
6.1.5. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	129
BÖLÜM 7	155
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	155
KAYNAKLAR	158
EK AÇIKLAMALAR A.	167
NUMUNE SONUÇLARI	167
EK AÇIKLAMALAR B.	168

ALFABETİK KAYNAK GÖSTERİMİ	168
ÖZGEÇMİŞ	169



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Farklı presleme sıcaklıkları ve basınçlara göre üretilen FDM'lerin sertlik çapraz kırılma dayanımları.	7
Şekil 2.2.	FDM üretiminde tozların istiflenme düzeni ve titreşim sürecini gösteren şematik diyagram.	9
Şekil 2.3.	Ürettikleri FDM'lerin ağırlıkça takviye oranlarına göre tabaka yerleşiminin şematik olarak gösterimi.	13
Şekil 2.4.	Ürettikleri FDM'lerin tabakalarının bağıl yoğunluk ve Vickers sertlikleri.	13
Şekil 2.5.	Ürettikleri FDM'lerin SEM görüntüleri a) FDM-1 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü b) FDM-2 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü c) FDM-3 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü d) FDM-4 üst, orta ve alt tabaka SEM görüntüsü	17
Şekil 2.6.	İmal edilen $ZrO_2/NiCr$ FDM'nin hacimce yüzde oranı.	22
Şekil 2.7.	Ürettikleri FDM'nin iki katman (a ve b), AA 7075/ B_4C katmanı (c ve d) ve AA 7075 katmanı (e ve f) arasındaki ara yüzeyde çökeltilerin dağılımını ve dislokasyonu gösteren farklı büyütme parlak alan görüntüleri, (dislokasyonlar beyaz oklarla, çita benzeri h çökeltileri kırmızı oklarla işaretlenmiştir). 25	
Şekil 2.8.	Ürettikleri numunelerin kalınlığı boyunca SiC ve sertlik dağılımı a) A356, b) AA 2124.	28
Şekil 3.1.	Parçacık takviyeli kompozit malzemeyi oluşturan unsurlar.	33
Şekil 3.2.	Takviye elemanına göre MMK çeşitleri a) partikül takviyeli b) kısa fiber takviyeli c) sürekli fiber takviyeli d) tabaka takviyeli.	35
Şekil 3.3.	FDM'lerin şematik görünümü a) Sürekli derecelendirilmiş b) Kademeli derecelendirilmiş.	36
Şekil 3.4.	Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM.	38
Şekil 3.5.	Gözenekli derecelendirilmiş FDM'ye ait şematik resim.	38
Şekil 3.6.	Mikro yapısı derecelendirilmiş FDM.	39
Şekil 3.7.	Çeşitli FDM türleri ve onlara ait uygulama alanları gösterilmektedir.	40
Şekil 4.1.	Toz metalürjisi işlem basamakları.	45
Şekil 4.2.	Farklı Toz boyutlarının görünür yoğunluğa etkisi.	51
Şekil 4.3.	Karıştırmada faydalanılan bazı karıştırıcı tipleri a) Silindirik b) Kübik c) Çift taraflı konik d) V şekilli.	56
Şekil 4.4.	Kalıp sıkıştırma döngüsü.	58
Şekil 4.5.	Presleme sırasında yoğunluk dağılımı: a) Tek etkili pres, b) Çift etkili pres.	60
Şekil 4.6.	Tek yönlü sıkıştırma; a) Yoğunluk dağılımı, b) Kalıbın şematik görünümü	62
Şekil 4.7.	İki Yönlü sıkıştırma.	63

Şekil 4.8.	İki yönlü sıkıştırma; a) Yoğunluk dağılımı, b) Kalıp şematik görünümü	64
Şekil 4.9.	Bakır için değişen frekans değerlerinde basıncın yoğunluğa etkisi	65
Şekil 4.10.	Toz partiküllerinin haddelenmesi.	67
Şekil 4.11.	CIP Yöntemi	68
Şekil 4.12.	İnce duvarlı bir kap kullanılan HIP şeması	70
Şekil 4.13.	Katı faz sinterleme kademeleri	71
Şekil 4.14.	İki küresel toz partikülünün sinterleme kademeleri	72
Şekil 4.15.	Katı taneler üzerinde sıvı fazın yayılımı.	74
Şekil 4.16.	Sıvı faz sinterlenmesinde meydana gelen mikroyapı değişimleri.....	75
Şekil 5.1.	DeneySEL çalışmaya ait akış şeması	77
Şekil 5.2	Kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri a) Matris malzemesi AA 7075 tozu b) Takviye elemanı B ₄ C tozu	79
Şekil 5.3.	AA 7075 tozunun seçili alandaki EDS sonuçları.....	79
Şekil 5.4.	B ₄ C tozunun seçili alandaki EDS sonuçları.....	80
Şekil 5.5.	İmalatı gerçekleştirilen FDM'lerin şematik görüntüsü a) 0A, b) 30A, c) 45A, d) 60A, e) 0B, f) 30B, g) 45B, h) 60B	82
Şekil 5.6.	Tasarımı yapılan dikey ayırıcılı kalıbın ve sıcak iş takım çeliği kalıbın birleştirilmiş modeli.....	83
Şekil 5.7.	Dört tabakalı yardımcı plastik elemanlar a) 0B için b) 30B için c) 45B için d) 60B için.....	84
Şekil 5.8.	Kullanılan a) RADWAG marka terazi b) WAB marka turbula cihazı	84
Şekil 5.9.	FDM üretim ünitesi ve yardımcı ekipmanlar.....	85
Şekil 5.10.	FDM'lerin imalat süreçlerinin şematik gösterimi.....	86
Şekil 5.11.	Yağlama işlemi gerçekleşmiş a) Dikey ayırıcılı kalıp b) Sıcak iş takım çeliği kalıp	86
Şekil 5.12.	Dikey ayırıcılı kalıba ayırıcıların yerleşimi	87
Şekil 5.13.	Dikey ayırıcılı kalıba tozların doldurulması	87
Şekil 5.14.	a) Dikey ayırıcılı kalıptan ayırıcıların çıkarılması b) Dikey ayırıcılı kalıptan ayırıcılar çıkarılınca tozun görüntüsü.....	88
Şekil 5.15.	Kapağı kapatılmış dikey ayırıcılı kalıp	88
Şekil 5.16.	Dikey ayırıcılı kalıba ön basınç uygulanması.....	89
Şekil 5.17.	FDM numunesinin sıcak iş takım çeliğine aktarılması.....	89
Şekil 5.18.	FDM numunesine sıcak iş takım çeliğinde ön basınç uygulanması	90
Şekil 5.19.	FDM numunesinin basınç altında sinterlenmesi.....	90
Şekil 5.20.	FDM numunesinin oda sıcaklığında soğutulması.....	91
Şekil 5.21.	İmalatı gerçekleştirilen FDM numunelerinin bir kısmı	91
Şekil 5.22.	METKON METACUT 251 abrasiv kesme cihazı.....	92
Şekil 5.23.	Uygun boyutlarda kesilen örnek numune	93
Şekil 5.24.	QNESS Q250M sertlik ölçüm cihazı.....	95

Şekil 5.25.	Üç nokta eğme testi; a) Test cihazı görseli, b) FDM'nin takviyeli yüzeyinin üç nokta eğme cihazına yerleşimi, c) FDM'nin takviyesiz yüzeyinin üç nokta eğme cihazına yerleşimi.....	96
Şekil 6.1.	0A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	97
Şekil 6.2.	0A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) Büyütülmüş "M5" bölgesi, f) "M5" bölgesi	98
Şekil 6.3.	30A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	99
Şekil 6.4.	30A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) Büyütülmüş "M5" bölgesi, f) "M5" bölgesi	100
Şekil 6.5.	45A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	101
Şekil 6.6.	45A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) Büyütülmüş "M5" bölgesi, f) "M5" bölgesi	102
Şekil 6.7.	60A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	103
Şekil 6.8.	60A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) Büyütülmüş "M5" bölgesi, f) "M5" bölgesi	104
Şekil 6.9.	0B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	105
Şekil 6.10.	0B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) "M6" bölgesi, f) "M5" bölgesi g) Büyütülmüş "M7" bölgesi, h) "M7" bölgesi.....	106
Şekil 6.11.	30B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	107
Şekil 6.12.	30B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) "M6" bölgesi, f) "M5" bölgesi g) Büyütülmüş "M7" bölgesi, h) "M7" bölgesi.....	108
Şekil 6.13.	45B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf.....	109
Şekil 6.14.	45B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e) "M6" bölgesi, f) "M5" bölgesi g) Büyütülmüş "M7" bölgesi, h) "M7" bölgesi.....	110
Şekil 6.15.	60B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf	111
Şekil 6.16.	60B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) "M2" bölgesi, b) "M1" bölgesi, c) "M4" bölgesi, d) "M3" bölgesi, e)	

	“M6” bölgesi, f) “M5” bölgesi g) Büyütülmüş “M7” bölgesi, h) “M7” bölgesi.....	112
Şekil 6.17.	30B numunesinin birinci tabakasının EDS analizi	115
Şekil 6.18.	30B numunesinin ikinci tabakasının EDS analizi.....	116
Şekil 6.19.	30A numunesinin ikinci tabakasının a) Spot 1 noktasının EDS analizi b) Spot 2 noktasının EDS analizi c) Selected area 1 bölgesinin EDS analizi.....	117
Şekil 6.20.	30B numunesinin üçüncü tabakasının EDS analizi	118
Şekil 6.21.	30B numunesinin dördüncü tabakasının EDS analizi.....	119
Şekil 6.22.	Üç ve dört tabakalı FDM’lerin yoğunluk ve gözenekliliği.....	120
Şekil 6.23.	Brinell sertlik değerinin grafiksel gösterimi a) 0A b) 30A c) 45A d) 60A	122
Şekil 6.24.	Brinell sertlik değerinin grafiksel gösterimi a) 0B b) 30B c) 45B d) 60B.	124
Şekil 6.25.	Üç tabakalı ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre FDM’lerin Brinell sertlik grafikleri	126
Şekil 6.26.	Dört tabakalı ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre FDM’lerin Brinell sertlik grafikleri	127
Şekil 6.27.	0A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi 129	
Şekil 6.28.	30A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi	130
Şekil 6.29.	45A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi	131
Şekil 6.30.	60A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi.	131
Şekil 6.31.	0B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi.	132
Şekil 6.32.	30B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi	133
Şekil 6.33.	45B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi	133
Şekil 6.34.	60B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi	134
Şekil 6.35.	Üç tabakalı FDM’lerin çapraz kırılma dayanımlarının grafik gösterimi	135
Şekil 6.36.	Dört tabakalı FDM’lerin çapraz kırılma dayanımları grafik gösterimi	136
Şekil 6.37.	Üç ve dört tabakalı FDM’lerin çapraz kırılma dayanımları grafik gösterimi	137
Şekil 6.38.	Yük takviyeli (% 60 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. Tabaka.....	139

Şekil 6.39.	Yük takviyeli (% 60 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 60A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka	141
Şekil 6.40.	Yük takviyesiz (% 0 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka	143
Şekil 6.41.	Yük takviyesiz (% 0 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 45A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka	145
Şekil 6.42.	Yük takviyeli (% 60 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka	147
Şekil 6.43.	Yük takviyeli (% 60 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 60B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka	149
Şekil 6.44.	Yük takviyesiz (% 0 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 0B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka	151
Şekil 6.45.	Yük takviyesiz (% 0 B ₄ C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 45B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görürüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka	153

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Üretilen FDM numunelerinin tabaka sayıları, mikrosertlikleri, ortalama mikrosertlik değerleri, poroziteleri ve eğilme dayanımları.	5
Çizelge 2.2. İmal edilen FDM'lerin bileşimi ve türü.	8
Çizelge 2.3. İmalatını gerçekleştirdikleri FDM'lerin tabakalarının ağırlıkça yüzdeleri.	15
Çizelge 2.4. Ürettikleri FDM'lerin teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve poroziteleri.	16
Çizelge 2.5. Ürettikleri FDM'lerin tabakalarının ortalama Rockwell Sertlikleri [26].	19
Çizelge 2.6. Üretilen FDM'lerin çarpma dayanımları [26].	20
Çizelge 2.7. İmalatını gerçekleştirdikleri kompozit ve FDM'lerin ağırlıkça tabaka yüzdeleri.	21
Çizelge 4.1. Toz partiküllerinin şekilleri [63].	52
Çizelge 5.1. AA 7075 alaşım tozlarının kimyasal bileşimi.	78
Çizelge 5.2. FDM imalatında kullanılan tozların özellikleri[90–92].	78
Çizelge 5.3. Trapez geçişli numunelerin geometrik unsurlarına ait açı detayları	81
Çizelge 5.4. İmalatı gerçekleştirilen numunelerin kodlama sistemi	82
Çizelge 6.1. FDM'lerin Brinell sertlik değerleri.	121

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

AA	: alüminyum alaşımı
B ₄ C	: bor karbür
µm	: mikrometre
%	: yüzde oran
MPa	: mega paskal
°C	: santigrat derece
°	: derece
g	: gram
cm ³	: santimetreküp
HBN	: brinell sertlik değeri
Ni	: nikel
Fe	: demir
SiC	: silisyum karbür
Al ₂ O ₃	: alüminyum oksit
≤	: küçük eşittir
Al	: alüminyum
HV	: vickers sertliği
mm	: milimetre
kg	: kilogram
m	: metre
s	: saniye
GPa	: gigapascal
Kpa	: kilopascal
dk.	: dakika
dev.	: devir

N : newton
kN : kilo newton
HRB : rockwell sertlik değeri
J : joule
mm² : milimetrekare
Cu : bakır
cc : santimetreküp
ZrO₂ : zirkonyum dioksit
TiO₂ : titanium dioksit
Rpm : dakikadaki devir sayısı
SiC : silisyum karbür
WC : tungsten Karbür
TiC : titanyum karbür
BN : bor nitrür
SiO₂ : silicon dioksit
C : karbon
B : bor
W : tungsten
NbTi : niyobyum-titanyum.
Nb₃Sn: niyobyum-kalay
O₂ : oksijen
CH₄ : metan
CO : karbon monoksit
CO₂ : karbon dioksit
H₂O : su
H₂ : Dihidrojen
N₂ : azot
NH₃ : amonyak
Ti : titanyum
Zr : zirkonyum

Hf : hidrojen florür

V : vanadyum

Th : toryum

U : uranium

mg : miligram



KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

FDM : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

MMK : Metal Matrisli kompozitler

SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopi)

AP : Armor Piercing (Zırh Delici)

XRD : X-Işınları Difraktometresi)

MPIF : Metal Toz Endüstrileri Federasyonu

CIP : Soğuk İzostatik Sıkıştırma

HIP : Sıcak İzostatik Sıkıştırma

EDS : Enerji Dağılımlı Spektrometre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geleneksel olarak kullanılan malzemelerin kullanım alanı sınırlı olup modern teknolojik uygulamalarda yeni malzemelerin kullanılması gereklidir. Kullanılacak yeni malzemeler yüksek güvenlik ve verime sahip olması gereklidir. Aynı zamanda yeni malzemeler özelliklerinin bileşimini göstermeli, hafif olmalı, düşük sıcaklık, düşük basınç, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve çok aşındırıcı gibi olağanüstü ortamlarda kullanılabilir olması gereklidir. Yıllar geçtikçe teknolojik ihtiyaçları giderebilmek için çok sayıda yeni malzeme geliştirilmiştir. Bazı koşullarda tek tip özelliğe sahip malzemeden yararlanarak zorlayıcı ihtiyaçları gidermek mümkün olmayabilir. Bu sebeple malzemelerin bir araya getirilmesiyle birlikte kompozit malzemeler gelişti. Kompozit malzemelerden onu oluşturan bileşenlerin en iyi özellikleri elde edilebilir. Gelecekte kompozit malzemelere duyulan talebin istikrarlı bir şekilde artacağını yapılan tahminler göstermektedir [1].

Kompozit malzemeler kendisini meydana getiren malzemelerden üstün özellik gösteren iki veya daha fazla malzemenin birleşimi şeklinde ifade edilebilir. Kompozit malzemeler metalik alaşımların tersine onu oluşturan her bir malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini muhafaza eder [2]. Kompozit malzeme matris, takviye elemanı ve ara yüzey bağı olmak üzere üç unsurdan meydana gelir. Matris malzemesi kompoziti meydana getiren başka malzemelerin bir arada kalmasını ve istenilen şeklin elde edilmesini sağlar. Ayrıca matris malzemesi özelliklerine göre kompozitin yapısını fiziksel ve kimyasal etmenlere karşı korur ve kendisine uygulanan kuvveti takviye elemanına iletir. Takviye elemanının görevi matrise destek olmak, üzerine uygulanan yükü taşımak ve malzemenin hacminde artış sağlamaktır [3]. Ara yüzey bağının görevi ise takviye elemanını matrise bağlamak ve matrisin takviye elemanına iletmek istediği yük karşısında bozulma veya kırılma meydana gelmeden yükü aktarmaktır[4].

Kompozit malzemeler takviye elemanı şekline ve matris malzemelerine göre iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Kompozit malzemeler takviye elemanı şekline göre partikül takviyeli, kılcal kristal takviyeli, fiber takviyeli, plaka takviyeli ve karma takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılır. Matris malzemesine göre organik matrisli kompozitler (polimer matrisli kompozitler ve karbon matrisli kompozitler), seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler (MMK) biçiminde sınıflandırılabilir [4,5].

MMK'ler bilimsel, teknolojik ve ticari açıdan önemlidir. Özellikle MMK'ler son yıllarda üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı birden fazla mühendislik alanında yeni mühendislik malzemesi olarak sunulmuştur [6,7]. MMK'lerin önemli özellikleri maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir [8]:

- MMK'ler metal malzemelere göre yüksek mukavemet ve elastiklik modülüne sahiptirler.
- MMK'ler yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. MMK'ler diğer kompozitlere kıyasla büyük darbe kırılma enerjisini yüksek sünekliğe sahip matris sayesinde soğururlar.
- Genel olarak MMK'ler diğer kompozitlere kıyasla daha yüksek termal iletkenliğe sahiptirler.
- MMK'ler yüksek elektrik iletkenliğine sahiptirler
- MMK'ler düşük ısı genleşme katsayısına sahiptirler
- Yumuşak matrise sahip MMK'ler sert seramik partikülü ile takviye edilirse iyi aşınma direncine sahip olurlar.
- Parçacık veya kısa fiber ile takviye edilmiş MMK'lerde plastik deformasyon olur. Bu durum MMK'leri daha da güçlendirir.

MMK'lerde matris malzemesi olarak alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel ve süper alaşımlar kullanılmaktadır [9]. Yüksek mukavemet, yüksek tokluk, düşük yoğunluk, korozyona karşı direnç ve işlenebilirliklerinin kolay olması gibi özelliklerden dolayı MMK'lerde en çok tercih edilen matris malzemesi alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyum matrisli kompozitlerde bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) en çok tercih edilen takviye elemanıdır [10].

FDM'ler başta yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere uzay araçları, elektronik sanayi ve son zamanlarda özellikle medikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. FDM'ler malzemenin boyu üzerinden özelliklerinin denetlendiği yeni nesil malzeme çeşididir. FDM'ler kompozitlerin zayıflıklarını bertaraf eder ve güçlü taraflarını korur. İsteğe bağlı olarak değişen mikroyapı ve bileşende FDM'ler özel olarak imal edilebilir. Bu özellikler, FDM'lere ihtiyaç duyulan her alanda en iyi malzeme özelliklerinin elde edilmesine müsaade eder. FDM'lerin üretim yöntemleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir[12].

- Gaz tabanlı yöntemler
- Sıvı tabanlı yöntemler,
- Katı tabanlı yöntemler ve
- Biyo polimerik tabanlı FDM yapılar

FDM'lerin üretiminde katı tabanlı yöntemlerden olan toz metalürjisi en geçerli ve en uygun yöntemdir [12]. Mühendislik malzeme imalatında gün geçtikçe toz metalürjisi yönteminin kullanımı artmaktadır. Toz teknolojisinde meydana gelen ilerlemeler, çeşitli presleme yöntemlerinden faydalanılarak karmaşık şekilli makine parçalarının yüksek imalat hızında, yüksek kalitede, hassas boyutsal toleransta ve ekonomik olarak imal edilmesine olanak sağlar[6].

Bu çalışmada düz ve trapez (30° , 45° ve 60°) geçişli farklı takviye oranlarında üç ve dört tabakalı FDM'ler toz metalürjisi yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen FDM'lerin mikroyapı sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımları araştırılmıştır. Üç tabaklı FDM'lerde tabakaların ağırlıkça B_4C oranı sırası ile % 0-30-60 ve dört tabakalı FDM'lerde tabakaların ağırlıkça B_4C oranı sırası ile % 0-20-40-60'dır. Düz ve trapez geçişli FDM'lerin imalatını gerçekleştirmek amacı ile dikey ayırıcılı kalıp ve sıcak iş takım çeliği kalıp üç boyutlu tasarım programları ile tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımları arasında en yüksek dayanıma sahip olan, ısıtılma işlemi ile mukavemet değeri yükseltilebilen, uçak ve havacılık araçları imalatında yaygın olarak kullanılan, AA7xxx serisi alaşımlarından AA7075 FDM üretiminde matris malzemesi olarak tercih edilmiştir[13,14]. Seramikler arasında yüksek sertlik,

iyi kimyasal inertlik, yüksek elastiklik modülü ve yüksek erime noktasına sahip olan B₄C FDM’de takviye elemanı olarak tercih edilmiştir [15]. Ortalama toz boyutu ≤ 60 μm olan AA7075 matris malzemesi ve ortalama toz boyutu ≤ 40 μm olan B₄C takviye malzemesi belirlenen ağırlıkça oranlara göre üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışımlar dikey ayırıcılı kalıbın içine belirlenen ağırlıkça oranlara göre yerleştirilmiş ve ayırıcılar kaldırılmıştır. Kapağı kapatılan dikey ayırıcılı kalıba ön basınç uygulanmıştır. Presten yararlanarak FDM numuneleri dikey ayırıcılı kalıptan sıcak iş takım çeliği kalıbına aktarılmıştır. Sıcak iş takım çeliği kalıbında ön basınç uygulandıktan sonra basınç altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen FDM numunelerinin mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Modern teknolojinin üç temel unsuru malzeme, enerji ve modern bilimdir. 21. yüzyılda yüksek teknoloji alanının temeli, yeni malzeme araştırma ve geliştirmeleridir. Son yıllarda malzeme bilimi hızla gelişme göstermektedir. Bunun sebebi bir taraftan disiplinler arası etkileşimin artması ve diğer taraftan yeni teorilerin, yeni yöntemlerin ve yeni deneysel tekniklerin çapraz nüfuziyetinin başlamasıdır. Ayrıca malzemenin pratik uygulamalardaki acil gereksinim ihtiyacı yeni isteklerin oluşmasına neden olmuştur. FDM'ler yeni tip kompozit malzemenin imalatı ve uygulanmasından kaynaklanan problemleri pratik olarak çözebilir [16]. Son 20 yılda FDM'ler havacılık, elektronik, makine, nükleer, optik, kimya, inşaat ve biyomedikal endüstrilerinde başlıca uygulama malzemesi olarak kullanılmıştır. Yapı ve kompozisyonu kademeli olarak değişen ve bu değişime bağlı olarak özellikleri de belirli bir doğrultuda farklılık gösteren malzemelere FDM denir [17]. Araştırmacılar istenen özellikleri karşılamak için FDM üretiminde farklı üretim metodları geliştirmişlerdir. Yine araştırmacılar FDM'lerin üretimlerinde kullanılan matris ve takviye elemanı malzemesinin tür, boyut ve miktarına göre, üretim parametrelerine göre ve FDM'lerin metalürjik ve mekanik özelliklerine göre değerlendirmede bulunmuşlardır.

2.1. FDM'LERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Erdemir vd. "Toz metalürjisi yöntemi ile imal edilmiş Al₂O₃/SiC fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi" adlı çalışmalarında, sıcak presleme ve toz metalürjisi tekniği ile AA2024/SiC kompozit ve FDM'lerin artan takviye elemanı miktarı ve tabaka sayısının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla ortalama partikül boyutu 10 µm olan SiC takviye elemanı ve ortalama partikül boyutu

54 µm olan AA 2024 matris malzemesini belirlenen ağırlıkça yüzde oranlarına göre gezegen tipi bilyeli öğütücüde argon koruyucu atmosferde 2 saat süre ile karıştırmışlardır. Kompozitlerin üretiminde karıştırılan tozlar tabakalarına göre kalıbın içine yerleştirilmiş ve 250 MPa ön basınç uygulamışlar ve 560 °C sıcaklıkta 500 MPa basınç altında sıcak presleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. FDM'lerin imalatında ise ilk tabaka için karışımı kalıbın içine yerleştirmişler 250 MPa ön basınç uygulamışlar daha sonra üst zımbayı çıkartmışlardır. Geri kalan tabakalara karışımların yerleşimi de ilk tabaka gibi yapmışlardır. Tabaka yerleşimi bittikten sonra 560 °C sıcaklıkta 500 MPa basınç altında sıcak presleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. İmalatı gerçekleştirilen numunelere ait tabaka sayıları, mikrosertlikleri, ortalama mikrosertlik değerleri, poroziteleri ve eğilme dayanımları Çizelge 2.1'de verilmiştir [18].

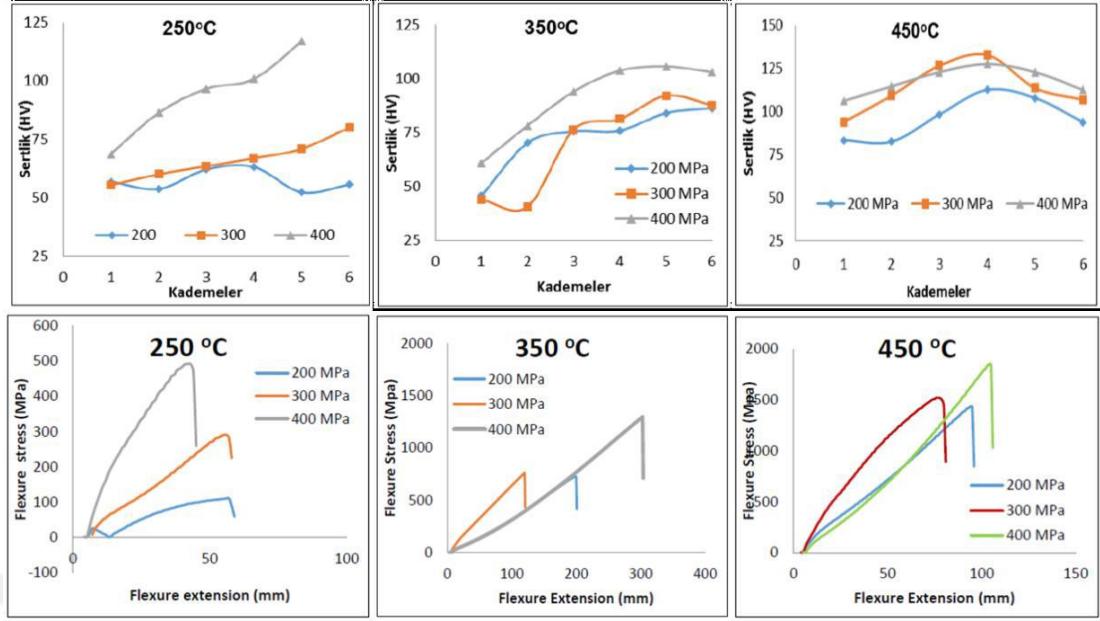
Çizelge 2.1. Üretilen FDM numunelerinin tabaka sayıları, mikrosertlikleri, ortalama mikrosertlik değerleri, poroziteleri ve eğilme dayanımları.

Numune	Tabaka sayısı	Metal/Seramik Al2024/SiC	Mikrosertlik (HV)	Ort. Mikrosertlik (HV)	Porozite (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)
A3	-	70/30	170	170	0.5674	845
A4	-	60/40	225	225	0.5978	1052
A5	-	50/50	205	205	1.3811	940
A6	-	40/60	180	180	2.0272	914
AS3	2	100-70/30	90-174	132	0.061	860
AS4	2	100-60/40	96-230	163	0.1925	1400
AS5	2	100-50/50	100-210	155	0.2445	1342
AS6	2	100-40/60	105-185	145	0.2015	1169
AS34	3	100-70/30-60/40	108-180-238	175	0.5907	800
AS45	3	100-60/40-50/50	112-240-215	190	0.63	1185
AS56	3	100-50/50-40/60	115-217-190	174	0.6612	780
AS345	4	100-70/30-60/40-50/50	120-185-242-195	185	0.3059	723
AS456	4	100-60/40-50/50-40/60	125-245-195-192	190	1.4134	1000

Erdemir vd. yapmış olduğu çalışmada ağırlıkça % 40 SiC takviye oranının mikrosertlik değerlerinde kritik nokta olduğunu tespit etmişlerdir. Mikrosertliğin ağırlıkça % 40 SiC takviye oranına kadar arttığı bu değerden sonra ise mikrosertliğin azaldığını tespit

etmişlerdir. Bunun sebebini ise takviye oranı miktarının artması ile beraber porozite miktarında görülen artış ile ilişkilendirmişlerdir. Maksimum mikrosertlik değeri 4 tabakalı AS456 numunesinin ağırlıkça %40 SiC içeren tabakasında tespit etmişlerdir. Ayrıca FDM’de tabaka sayısı arttıkça mikrosertlik değerinin arttığını bulmuşlardır. Eğilme dayanımı araştırmalarında ağırlıkça % 40 SiC takviye oranına kadar eğilme dayanımının arttığı bu değerden sonra ise eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebini ise matris ile takviye elemanı ara yüzeyindeki zayıf bağlanmanın, daha az intermetalik oluşumun ve düşük mikrosertlik değerlerinin olduğunu bulmuşlardır. Maksimum eğilme dayanımı ise iki tabakalı AS4 numunesinde 1400 MPa olarak elde etmişlerdir. Erdemir vd. bu çalışmalarında takviye elemanı oranının ağırlıkça % 40 değerine kadar artması ile mikro sertlik ve eğilme dayanımının arttığını bu değerden sonra ise azaldığını tespit etmişlerdir [18].

Çinici vd. “Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmiş B₄C Takviyeli AA 7xxx matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımının Belirlenmesi” isimli çalışmalarında, farklı presleme sıcaklıklarında (250, 350, 450 °C) ve farklı presleme basınçlarında (200, 300, 400 MPa) toz metalürjisi yöntemi ile altı tabakalı B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM üretmişlerdir. Üretilen FDM’lerin en alt tabakası ağırlıkça % 10 B₄C takviye elemanı içermekte olup her bir tabaka ağırlıkça % 10 artacak şekilde ara kademeleri oluşturmuşlar ve en üst tabaka da ağırlıkça % 60 B₄C takviye elemanı içerecek şekilde belirlemişlerdir. Ürettikleri FDM’lerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini, sertliklerini ve ASTM B528-05 standardına göre çapraz kırılma dayanımlarını incelemişlerdir. Ürettikleri FDM’nin altıncı tabakasına ait SEM görüntüleri incelemelerinde; presleme esnasındaki sıcaklığın artması ile partikül-matris arayüzeyinde oluşan mikro boşluklarda azalma gözlemlenmiştir. Vickers sertlik ve çapraz kırılma dayanımı (Şekil 2.1) incelemelerinde ise presleme sıcaklığının ve basıncının artması ile FDM’lerin sertliği ve çapraz kırılma dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir [11].



Şekil 2.1. Farklı presleme sıcaklıkları ve basınçlara göre üretilen FDM'lerin sertlik çapraz kırılma dayanımları.

Maksimum çapraz kırılma dayanımı 400 MPa basınç altında 450 °C presleme sıcaklığında 1800 MPa olarak elde etmişlerdir. Çinici vd. presleme basıncı ve sıcaklığının artması ile FDM'lerin sertlik ve çapraz kırılma dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir [11].

Übeyli vd. yaptıkları çalışmada iki farklı malzeme bileşimine sahip ve üç değişik kalınlıkta (15, 20 ve 25 mm) SiC takviyeli AA7075 matrisli FDM'leri toz metalürjisi yöntemi kullanarak imal etmişlerdir. Tozları karıştırmışlar ve tabakaları ayrı ayrı sıkıştırıp üç tabakalı pellet elde etmişlerdir. Elde Edilen pelletleri sıcak presleme kalıbına almışlar ve 580 °C sıcaklıkta 40 dakika porozite azalana kadar sinterlemişlerdir. Çizelge 2.2'de imal ettikleri FDM'lerin bileşimi ve türü verilmiştir [19].

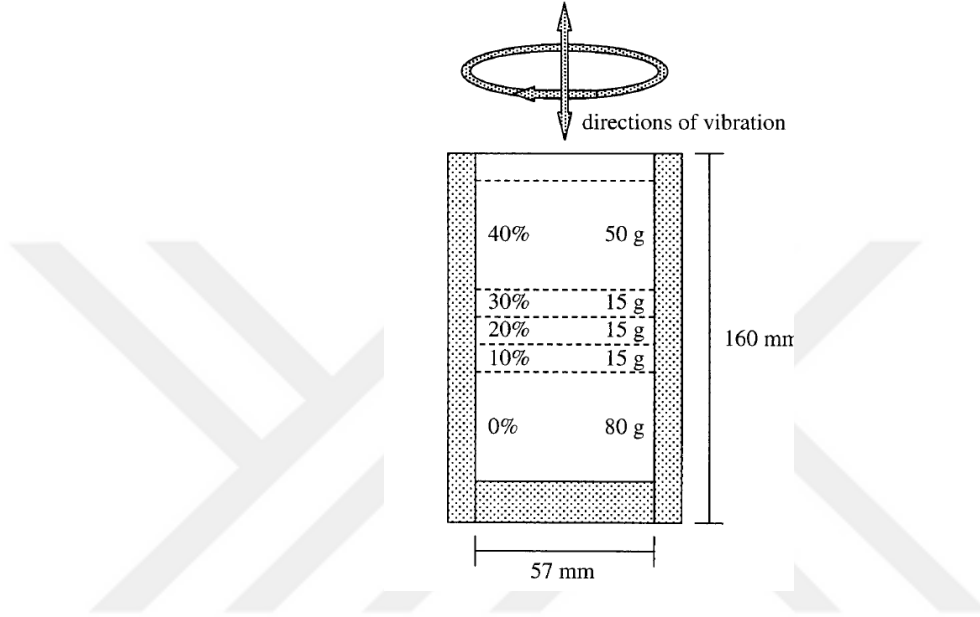
Çizelge 2.2. İmal edilen FDM'lerin bileşimi ve türü.

	FDM türü	
	1	2
Üst tabaka	20 % SiC-80 % AA 7075	40 % SiC-60 % AA 7075
Orta tabaka	10 % SiC-90 % AA7075	20 % SiC-80 % AA 7075
Alt tabaka	AA 7075	AA 7075

İmal ettikleri FDM'lerin SEM görüntülerini ve porozite derecelerini bilgisayar destekli görüntüleme programından faydalanılarak tespit etmişlerdir. FDM'lerin SEM ve porozite derecelerini incelemeleri sonucunda seramik takviye oranı arttıkça porozite miktarında artma görmüşlerdir. Balistik test öncesi 100 °C ve 150 °C sıcaklıkta yaşlandırma işlemi yapmışlardır. Yaşlandırma işleminden sonra 2,5 mm çapındaki çelik bilyeden faydalanarak 187,5 kg yük uygulayarak her 30 dakikada bir sertlik değerlerini ölçmüşler ve beş kez tekrarlamışlardır. Yaşlandırma işlemi sonucunda en yüksek sertlik değerine 20 saat sonra ulaşmışlardır. Yaşlandırma işlemlerinin yapılmasıyla nano boyutlu çökeltilerin matrisin sertlik ve mukavemetini büyük ölçüde artırdığını görmüşlerdir. FDM'lerin eğilme mukavemetini belirlemek amacıyla kompozit bakımından yoğun olan bölgeden FDM'ye üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Üç nokta eğme testinde numunelerin kalınlığını 15 mm olarak kabul etmişlerdir. Üç nokta eğme deneyi sonucunda yaşlandırma işleminin eğilme mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir. FDM'lerin balistik testinde ordularda yaygın olarak kullanılan 7,62 mm zırh delici (AP) mermi kullanmışlardır. Aynı kimyasal kompozisyona sahip ve kalınlıktaki her numuneye hızı 775 m/s ve 800 m/s arasında değişen mermi ile beş balistik atış gerçekleştirmişlerdir. Balistik test sonucunda tüm kompozisyon ve kalınlıklardaki FDM'lerin başarı göstermediğini tespit etmişlerdir. Balistik koruma için 25 mm kalınlığındaki numunelerin üretimi tavsiye etmişlerdir. Übeyli vd. yaptıkları çalışmada takviye oranı arttıkça porozite ve gözenekliliğin arttığını, yirmi saat yaşlandırma işlemi yapılan FDM'de en yüksek sertliğin elde edildiğini, yine yaşlandırma işleminin eğilme mukavemetini artırdığını tespit etmişlerdir [19].

Lin vd. FDM üretimini geliştirmek için toz metalürjisi yöntemine soğuk ve sıcak sıkıştırma aşamasını dahil etmişlerdir. Titreşim uygulayarak ve titreşim uygulamadan beş tabakalı FDM üretimi gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri

FDM’de takviye elemanı SiC ve matris malzemesi AA 2124 kullanmışlardır. İmal ettikleri FDM’lerin tabakalarının takviye oranını birinci tabakadan itibaren sırası ile hacimce yüzde 0, 10, 20 ,30, 40 şeklinde belirlemişlerdir. Hacimce yüzde oranlarına göre takviye elemanı ve matris malzemesini turbula cihazında 1,5 saat karıştırmışlardır. Karıştırılan karışımları tabakalarına göre yağlamışlar ve 57 mm çaplı silindirik kalıp içine Şekil 2.2’deki gibi yerleştirmişlerdir [20].



Şekil 2.2. FDM üretiminde tozların istiflenme düzeni ve titreşim sürecini gösteren şematik diyagram.

Kalıbı mekanik bir titreşim cihazının üzerine yerleştirip farklı sürelerde (0,75 ve 2 saat) titreşim uygulamışlardır. Kalıbı titreşim işleminden sonra hidrolik prese yerleştirmişler ve kalıp içindeki toz karışıma 300 MPa soğuk sıkıştırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kalıp içinden çıkardıkları pelleti, hava sirkülasyonlu fırında 500 °C sıcaklığa ısıtmışlar ve 60 mm çaplı duvarları koloidal grafit ile yağlanmış bir kap içine hidrolik pres vasıtası ile aktarmışlardır. Kap fırın içinde 500 °C sıcaklıkta tutulmuş olup, ısıtılmış pelleti 1,5 GPa basınç ile preslemişlerdir. Ürettikleri FDM’lerin mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop kullanmışlardır. FDM’lerin sertlik ölçümlerinde 30 kg yük altında Vickers sertlik ölçme yönteminden yararlanmışlardır. Kırılma davranışlarını belirlemek için çentik açılmış numunelere tek taraflı eğme testi uygulamışlardır [20].

Lin vd. yapmış olduğu çalışmada titreşimsiz imal edilen FDM’lerin tabakaları arasındaki geçişin titreşimle üretilen FDM’lere göre daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca titreşimin takviye oranı yüksek olan bölgelerde topaklanmaları parçalayarak bölgelerde kısmi homojenliği sağladığını tespit etmişlerdir. FDM’lerde SiC takviye oranı arttıkça topaklanmanın arttığını bununla poroziteyi artırdığını tespit etmişlerdir. FDM’lerde SiC takviye oranı arttıkça sertliğin arttığını gözlemlemişlerdir. FDM’lerin muadil MMK’lere kıyasla daha üstün tokluk sergilediğini tespit etmişlerdir. Lin vd. yaptıkları çalışmada titreşimden faydalanarak üretilen FDM’lerde tabakalar arası geçişin daha belirgin olduğunu, titreşimin takviye oranı yüksek olan bölgelerde topaklanmayı dağıttığını, titreşimin FDM’lerde tokluğu artırdığına dair kanıtların olduğunu ve takviye oranı arttıkça sertliğin arttığını tespit etmişlerdir [20].

Aydın ve Apalak çalışmalarında SiC takviyeli AA 6061 matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç plakaların balistik performansını deneysel olarak incelemişlerdir. İmal ettikleri FDM’lerde ortalama partikül boyutu 50 µm olan SiC takviye elemanı ve ortalama partikül boyutu 10 µm olan AA 6061 matris malzemesi kullanmışlardır. İmal ettikleri FDM’lerin en alt ve üst tabakalarını % 100 AA 6061 malzemesi olarak belirlemişlerdir. Arada kalan tabakaları metalce zengin, lineer ve seramikçe zengin olarak üç tipte imal etmişlerdir. Matris ve takviye elemanını hacimce takviye oranlarına göre ayrı ayrı kaplarda 5 saat süre ile karıştırmışlardır. Homojen olarak karıştırdıkları tozları ısıtma işlemi ile sertleştirilmiş sıcak iş takım çeliği içinde (AISI 2344) düşük basınç uygulanarak lamine etmişler ve argon koruyucu atmosferde 100 MPa basınç altında 600 °C sıcaklıkta 90 dakika süre ile sıcak preste sinterlemişlerdir. Daha sonra oda sıcaklığında soğutma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Balistik test sonuçlarına göre imal ettikleri numunelerin hiçbirinde tam bir penetrasyon yaşanmadığını ve lineer bileşime sahip FDM’lerin en iyi balistik performansı sergilediğini tespit etmişlerdir. Aydın ve apalak çalışmalarında tüm numunelerin hasar ve deformasyon incelemelerinde; kalınlık boyunca kompozisyon değişiminin balistik performansı büyük ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir [21].

Surya ve Prasanthi “Al-SiC fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin üretimi ve mikroyapı çalışması” isimli çalışmalarında toz metalürjisi yöntemi kullanarak farklı takviye oranlarına sahip dört adet üç tabakalı FDM üretmişlerdir. İmalatını

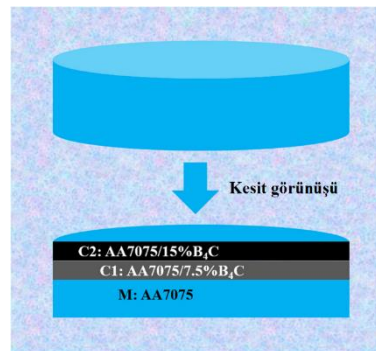
gerçekleştirdikleri FDM'lerin mikroyapılarını incelemişlerdir. Düzgün bir dağılım elde etmek için ağırlıkça farklı oranlarda SiC takviye elemanını ve alüminyum matris malzemesini karıştırmışlardır. Karıştırılan tozları oranlarına göre ayrı olarak tabakalar halinde kalıbın içine yerleştirmişlerdir. Bağlayıcı olarak stearik asit kullanmışlardır. Kalıbın içindeki tozu 1 KPa ön basınç ile soğuk olarak preslemişlerdir. Ardından muflalı elektrik fırını kullanarak 580 °C sıcaklıkta 1,5 saat sinterleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Surya ve prasanthi çalışmalarında SiC içeriğinin %15'in üzerine çıktığında numune üretiminin başarısız olduğunu ve nedeninin ise yüksek kırılgenlik ve alüminyum partiküllerinin birbiri ile daha az bağlanmasının olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca Surya ve prasanthi içerik olarak % 10 SiC takviye elemanına sahip numuneleri başarı ile üretmişlerdir [22].

Yıldız ve Sur "AA7075/Al₂O₃ fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin delme özelliklerinin gri ilişkisel analiz kullanılarak incelenmesi" adlı çalışmalarında üç tabakalı, beş adet, tabakalar ağırlıkça yüzde 20, 40, 60 Al₂O₃ takviye elemanı içeren FDM'leri yüksek sıcaklıkta izostatik presleme ve toz metalürjisi yöntemi ile imal etmişlerdir. İmal ettikleri FDM'lerin SEM görüntülerini, sertliklerini, delme işlemi ile işlenebilirliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça yüzde oranlarına göre ortalama partikül boyutu 10 µm olan Al₂O₃ takviye elemanını ve ortalama partikül boyutu 150 µm olan AA 7075 matris malzemesini turbula cihazında 45 dakika süre ile karıştırmışlardır. Karıştırılan tozları en alt tabaka ağırlıkça % 20, ara tabaka ağırlıkça % 40 ve üst tabaka ağırlıkça % 60 olacak şekilde yağlama işlemi yapılmış AISI 2344 sıcak iş takım çeliğinin içine yerleştirmişlerdir. Kalıp içindeki tozlara oda sıcaklığında 10 MPa basınç altında ön basınç uygulamışlar ve 450°C sıcaklıkta 30 dakika ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sonra ısıtılmış tozları 325 MPa basınç altında 450 °C sıcaklıkta 30 dakika süresince sinterlemişlerdir. Numuneleri oda sıcaklığında soğutmuşlardır. Numunelerin üç adedini mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemek için iki adedini ise delme deneylerinde kullanmışlardır [23].

Yıldız ve Sur imalatını gerçekleştirdikleri FDM'nin SEM incelemeleri sonucunda tabakalarda Al₂O₃ takviye elemanının düzgün dağılmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca FDM'lerde takviye elemanı arttıkça gözeneklilik ve topaklanmanın arttığını tespit etmişlerdir. FDM'lerin sertlik ölçümlerinde 15 saniye süresince 1 kg yük uygulayan

Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanmışlardır. Mikrosertlik ölçümlerinde üç farklı FDM numunesinin her bir tabakasının farklı bölümlerinden beş ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sertlik sonuçlarının ortalamasını almışlardır. FDM'lerin mikrosertlik ölçüm sonuçlarında ağırlıkça % 40 Al_2O_3 takviye elemanı oranının dönüm noktası olduğunu tespit etmişler ve en yüksek sertlik değerinin 126,4 HV olarak ölçmüşlerdir. Ağırlıkça % 40 Al_2O_3 takviye elemanı oranına kadar sertliğin arttığı bu değerden sonra azaldığını bulmuşlardır. Ağırlıkça % 60 Al_2O_3 takviye elemanı oranında sertliğin azaldığını bunun nedeni ise gözenekliliğin ve topaklanmanın artmış olmasından kaynaklandığını bulmuşlardır. İmalatını gerçekleştirdikleri FDM'leri kuru kesme koşullarında 6 mm çaplı kaplamasız sementit karbür matkap ucu ile işlemişlerdir. Delme deneylerini 25 m/dk sabit kesme hızında, uç açısı, helis açısı ve ilerleme hızı gibi farklı şartlar altında gerçekleştirmişlerdir. Tam faktöriyel deneysel tasarımda varyans analizi ve gri ilişkisel analizden yararlanılarak faktörlerin itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini değerlendirmişlerdir. Uç açısı 140° , helis açısı 15° ve 0.075 mm/ dev ilerleme hızında en düşük itme kuvveti 221 N olarak ölçmüşlerdir. Yıldız ve Sur çalışmalarında ilerleme hızının ortalama yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvvetinde en baskın faktör olduğunu gri ilişki analizi sonuçları ile göstermişlerdir. Ayrıca sertlik değeri ağırlıkça %40 takviye oranına kadar arttığı daha sonra ise azaldığını tespit etmişlerdir. [23].

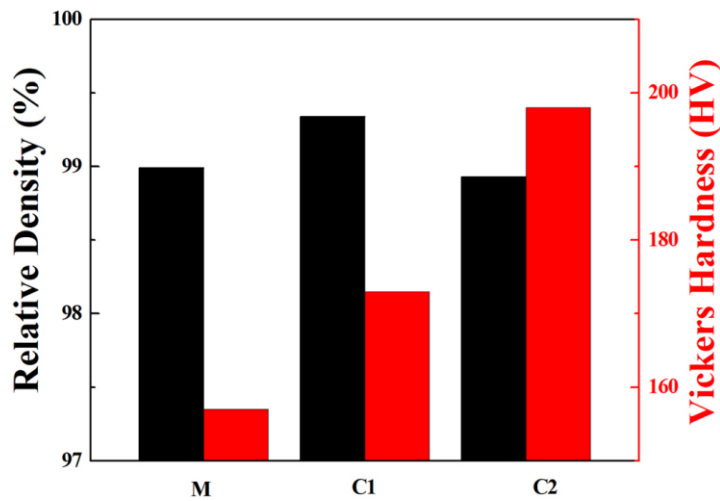
Wu vd. B_4C (partikül boyutu 2.03 μm) takviyeli AA 7075 (partikül boyutu 29.3 μm) matrisli üç tabakalı FDM'lerin üretimini plazma aktif sinterleme yöntemi ile başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri FDM'lerin ağırlıkça takviye oranlarına göre tabaka yerleşiminin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir [24].



Şekil 2.3. Ürettikleri FDM'lerin ağırlıkça takviye oranlarına göre tabaka yerleşiminin şematik olarak gösterimi.

Ağırlıkça takviye oranlarına göre hazırladıkları karışımları çalkalayıcı mikserde 24 saat boyunca harmanlamışlardır. Sırasıyla 150 MPa basınç altında soğuk presleme yöntemi ile AA 7075 ve AA 7075/B₄C kompozit pelletleri elde etmişlerdir. Şekil 2.3'e göre tabakalarını tasarladıkları FDM'leri vakumlu ortamda 20 MPa ile 530 °C sıcaklığa ısıtmışlar ve ardından 3 dakika tutarak plazma aktif sinterleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. İmalatını gerçekleştirdikleri FDM'leri 466 °C sıcaklıkta 2 saat ısıtılma işlemi tabi tutmuşlardır. Bir saatte 480 °C sıcaklığa ısıtmışlar ve ortam sıcaklığında su vermişlerdir. Ardından 120°C sıcaklıkta 24 saat yapay yaşlandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir [24].

Wu vd. ürettikleri FDM'lerin tabakalar halinde bağıl yoğunluklarını Arşimet prensibine göre ölçmüşlerdir. Yine yüzeyleri cilalanmış FDM'lerin Vickers sertliklerini tabakalar halinde 15 saniye süresince 1 kg yük altında ölçmüşlerdir. Ölçtükleri bağıl yoğunluk ve Vickers sertliklerine ait grafik Şekil 2.4'te sunulmuştur. Ürettikleri FDM'nin bağıl yoğunlukları ağırlıkça % 7,5 B₄C takviye oranına kadar arttığını daha sonra ise azaldığını tespit etmişlerdir. FDM'de takviye oranı arttıkça Vickers sertliklerinin arttığını bulmuşlardır [24].



Şekil 2.4. Ürettikleri FDM'lerin tabakalarının bağıl yoğunluk ve Vickers sertlikleri.

FDM'lerin mikroyapı incelemelerinde alan emisyon taramalı elektron mikroskobu kullanmışlardır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda B₄C takviye elemanının AA7075 matris malzemesinin tane sınırında biriktiğini gözlemlemişlerdir. FDM'nin kesit ara yüzey görünüşünde mikro çatlaklar, gözenekler veya delaminasyon gibi belirgin kusurlar görmemişler bunun sebebini plazma aktif sinterleme yöntemi ile daha yoğun yapı elde edilmesinden kaynakladığını tespit etmişlerdir. FDM'lerin çökelti ve dislokasyonları transmisyon elektron mikroskobu ile incelemişlerdir. Oda sıcaklığında FDM'lerin eğme mukavemetini belirlemek için takviyece zengin ve zengin olmayan bölgeye üç nokta eğme testi yapmışlardır. Takviyece zengin olan bölgede eğilme mukavemetini 129 MPa olarak elde etmişlerdir. Eğilme testi sonucunda FDM'de önemli bir ara katman çatlağı veya katmanlı yapıda bir bozulma tespit etmemişlerdir. Wu vd. yaptıkları çalışmada önemli ölçüde yüksek eğilme mukavemetinin çok seviyeli kademeli yapının yanı sıra farklı kademeler arasındaki mükemmel bağ yapısına atfedilebilir olduğunu tespit etmişlerdir [24].

Surya ve Nilesh "Toz metalürjisi tekniği kullanılarak (Al/SiC) fonksiyonel dereceli malzemenin sentezi ve mekanik davranışı" adlı çalışmalarında dört tabakalı, tabakalar sırası ile SiC takviye oranı ağırlıkça yüzde 0, 3, 7, 10 olan, saf alüminyum matris malzemeli FDM üretmişlerdir. İmal ettikleri FDM'nin SEM görüntü incelemesinde bulunmuşlar ayrıca hem FDM'ye hemde saf alüminyum numunesine sertlik testi, çentik darbe testi ve çekme deneylerini yapmışlardır. FDM üretiminde kullandıkları alüminyum ve SiC elek numarası sırası ile 200 ve 220'dir. Alüminyum ve SiC tozlarını 150 °C sıcaklıkta mufla fırınında kurutmuşlardır. Kurutulan tozları ağırlıkça yüzde oranlarına göre oda sıcaklığında tungsten toplu bilyeli değirmende 100 rpm hızda 1 saat öğütmüşlerdir. Her bir toz karışımını duvarları çinko stearat ile yağlanmış 120 x12 mm boyutlarındaki kalıba yerleştirmiler ve 150 kN yük uygulayarak soğuk preslemişlerdir. Soğuk preslenen FDM'yi 580 °C sıcaklıkta bir saat süre ile sinterlemişlerdir [25].

Surya ve Nilesh yaptıkları SEM görüntü incelemeleri sonucunda SiC takviye elemanının matris içinde homojen dağıldığını tespit etmişlerdir. Ürettikleri FDM'nin her bir tabakasına ve saf alüminyumun yüzeyine 1/16 inç paslanmaz çelik elmas uç ile 20 saniye boyunca 100 kg sabit yük altında Rockwell testi uygulamışlardır. FDM'nin

her bir tabakasından ve saf alüminyumdan üç adet ölçüm gerçekleştirmişlerdir. En yüksek ortalama sertliği 75 HRB ile ağırlıkça %10 SiC içeren dördüncü tabakadan elde etmişlerdir. Ayrıca FDM’de SiC takviye oranı arttıkça sertliğin arttığını tespit etmişlerdir. Çentik darbe deneyi için FDM’leri ve saf alüminyum numuneleri ASTM A370 standardına göre hazırlamışlardır. Gerçekleştirdikleri çentik darbe deneyinde sarkaç düşme açısı 140°, sarkaç çarpma hızı 5,346 m/sn ve sarkaç darbe oranı 300 J’dür. Çentik darbe deneyi sonucunda en yüksek ortalama tokluk 8,5 J ile FDM’den elde etmişlerdir. Ürettikleri FDM’de SiC takviye oranı arttıkça tokluğun arttığını tespit etmişlerdir. FDM’nin ve saf alüminyumun çekme testini oda sıcaklığında ASTM E8 standardına göre gerçekleştirmişlerdir. Çekme testi sonucunda en yüksek çekme dayanımı 49,6 N/mm² ile FDM’den elde etmişlerdir. FDM’de SiC takviye oranı arttıkça çekme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Surya ve Nilesht yaptıkları çalışmada takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin arttığını, çentik darbe deneyinde en yüksek tokluğun FDM’den elde edildiğini ve en yüksek çekme dayanımının FDM’den elde edildiğini tespit etmişlerdir [25].

Surya ve Prasanthi çalışmalarında dört farklı tip Al 7075 / SiC FDM’leri geleneksel toz metalürjisi yöntemi ile üretmiş olup mikro yapı ve mekaniksel özellikleri incelemişlerdir. FDM’de matris malzemesi olarak 40 µm boyutunda Al 7075 ve takviye elemanı olarak 20 µm boyutunda SiC kullanmışlardır. Seçilen tozlarda sıkışan gaz ve nemin atılması için 110 °C sıcaklığa kadar ön ısıtma işlemi yapmışlardır. Ağırlıkça belirlenen yüzdelere göre ayarlanan toz karışımlarını bilyeli değirmen vasıtası ile öğütmüşlerdir. Bilyeli değirmende homojen toz dağılımı elde etmek için bilye toz oranı 10:1 tungsten karbür toplar kullanmışlardır. İmalatını gerçekleştirdikleri FDM’lerin tabakalarının ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 2.3’te verilmiştir [26].

Çizelge 2.3 İmalatını gerçekleştirdikleri FDM’lerin tabakalarının ağırlıkça yüzdeleri.

Numuneler	Üst tabaka	Orta Tabaka	Alt tabaka
FDM-1	90 % Al + 10 % SiC	-	85 % Al + 15 % SiC
FDM-2	85 % Al + 15 % SiC	-	80 % Al + 20 % SiC
FDM-3	80 % Al + 20 % SiC	-	90 % Al + 10 % SiC
FDM-4	90 % Al + 10 % SiC	85 % Al + 15 % SiC	80 % Al + 20 % SiC

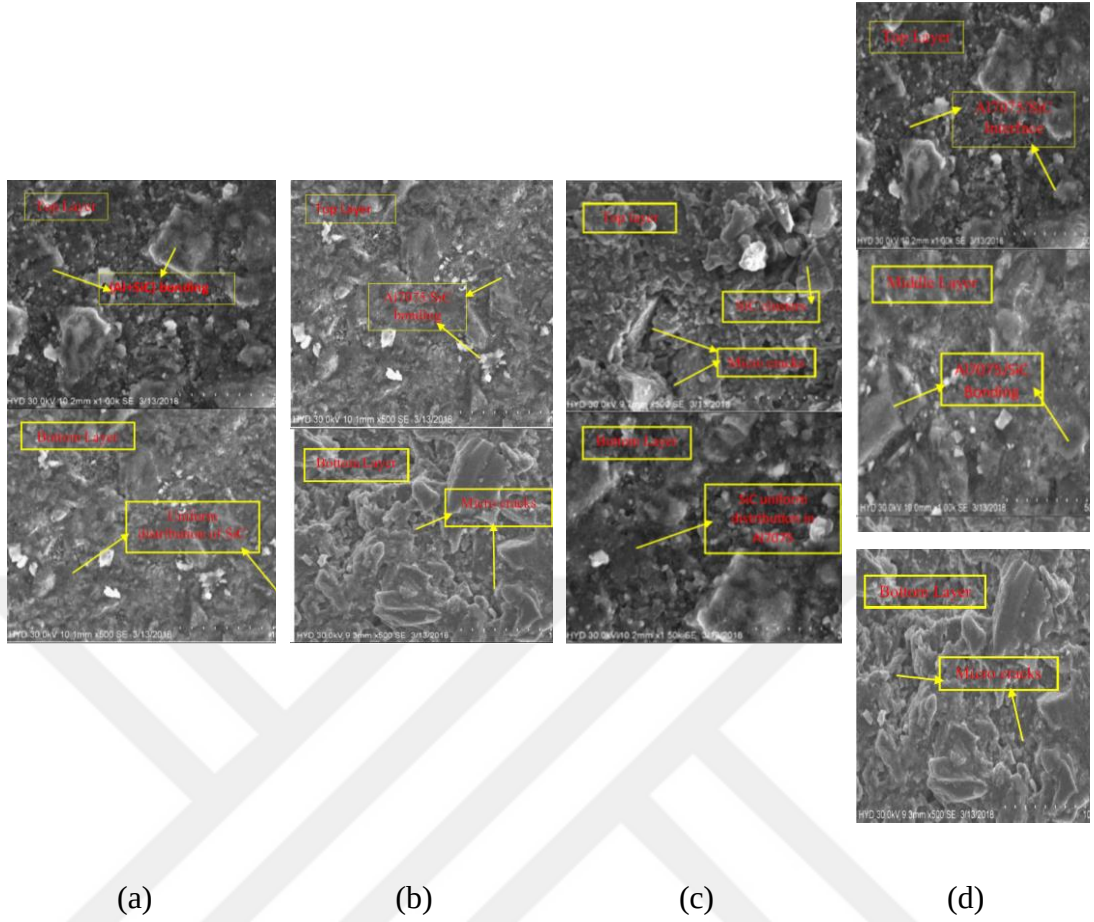
Çizelge 2.3'te belirlenen ağırlıkça yüzde oranlarına göre her bir FDM numunesinin toz karışımlarını (55x10x10 mm boyutlarında) kalıbın içine yerleştirmişler ve tek eksenli kalıpla 450 MPa ön basınç uygulamışlardır. Kalıbın içini ve zımbaları çinko stearat ile yağlamışlardır. Pellet FDM'leri argon koruyucu atmosfer altında 530 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile fırında sinterlemişlerdir [26].

Surya ve Prasanthi çalışmalarında imal edilen FDM'lerin yoğunluk ve porozite ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri FDM'lerin teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve poroziteleri Çizelge 2.4'te verilmiştir [26].

Çizelge 2.4. Ürettikleri FDM'lerin teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve poroziteleri.

Numuneler	Teorik yoğunluk (g/cc)	Deneysel yoğunluk (g/cc)	Porozite (%)
FDM-1	2.86	2.85	0.35
FDM-2	2.88	2.84	1.38
FDM-3	2.87	2.84	1.04
FDM-4	2.87	2.85	0.69

FDM'lerin teorik ve deneysel yoğunluklarının birbirleriyle benzer şekilde olduğunu ve neredeyse birbirleriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. FDM'lerde SiC takviye oranı arttıkça teorik yoğunluğun arttığını bulmuşlardır. FDM-1, FDM-2 ve FDM-3'ün porozitelerinin FDM-1'den daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Ağırlıkça % 20 SiC takviye elemanının Al 7075 matrisine eklenmesi sonucunda poroziteye artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. FDM'nin yoğunluk ve porozitesini üretim yolu, topaklanma ve takviye elemanı boyutunun etkilediğini tespit etmişlerdir[26].



Şekil 2.5. Ürettikleri FDM'lerin SEM görüntüleri a) FDM-1 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü b) FDM-2 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü c) FDM-3 üst ve alt tabaka SEM görüntüsü d) FDM-4 üst, orta ve alt tabaka SEM görüntüsü [26].

Ürettikleri FDM'lerin SEM görüntüleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekil 2.5 (a)'daki FDM-1'in üst ve alt tabaka SEM görüntüsü incelemelerinde SiC parçacıklarının var olduğunu tespit etmişlerdir. SiC takviye elemanının matrisin içinde düzgün dağıldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Al 7075 matris içinde SiC parçacıklarının topaklanmasının tam olarak önlenemediğini gözlemlemişlerdir. Fazla sayıda SiC takviye elemanı kümelenmesinin homojen dağılımı olumsuz etkilediği ve FDM'lerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini kötüleştirdiğini fark etmişlerdir. FDM'de takviye oranının % 10'dan % 20'ye arttığında kümelenmenin arttığını tespit etmişlerdir. FDM-1'in üst ve alt tabaka SEM görüntüleri incelemelerinde üst ve alt tabaka arasında takviye ve matris ara yüzey bağlanmasının mükemmel olduğunu ve katmanlar arasında çatlama olmayıp iyi bir yapışmanın olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durum FDM-1'in diğer FDM'lere

kıyasla daha iyi fiziksel ve mekaniksel özellikler göstermesinin sebebi olduğunu bulmuşlardır. Şekil 2.5 (b)'deki FDM-2'nin üst tabaka SEM görüntüleri incelemelerinde gözeneklilik, mikro çatlak gibi kusurların bulunmadığı SiC takviye elemanının düzgün dağıldığı ve matris takviye ara yüzey bağlanmasının başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. FDM-2'nin alt tabaka SEM görüntülerinde ise bazı mikro çatlak ve gözeneklerin olduğunu gözlemlemişlerdir. SiC takviye elemanı yüzdesi arttıkça SiC parçacıklarının kümelenmesinin arttığını bulmuşlardır. Bu durumun ise fiziksel ve mekaniksel özelliklerin bozulmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.5 (c)'deki FDM-3'ün üst tabaka SEM görüntülerinin incelemelerinde yüksek oranlardaki SiC takviye elemanının kümelenme ve gözenekliliği artırdığını gözlemlemişlerdir. Zayıf matris ve ara yüzey takviye bağının başlıca nedeninin SiC takviye elemanının aşırı varlığı olduğunu bulmuşlardır. Üst tabaka sınırına kadar devam eden mikro çatlakların mekanik özelliklerin kötüleştiren başlıca neden olduğunu fark etmişlerdir. Alt tabakanın SEM görüntülerinin incelemelerinde SiC parçacıklarının düzgün dağılım gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Matris içindeki SiC takviye elemanının optimum ağırlık yüzdesinin metalürjik bağı ve ara yüzey bağıni geliştiren birinci neden olduğunu bulmuşlardır. Şekil 2.5 (d)'deki FDM-4'ün üst ve alt tabaka SEM görüntülerinin incelemelerinde SiC takviye elemanının düzgün dağılım gösterdiğini gözlemlemişlerdir. FDM-4'ün orta ve alt tabakası arasında yüksek gözeneklilik ve küçük çatlakları tespit etmişlerdir. Bu mikro çatlakların orta ve alt tabaka sınırı hattınca paralel olarak yayıldığını gözlemlemişlerdir. Ürettikleri FDM'lerin ortalama Rockwell sertlik değerleri Çizelge 2.5'de verilmiştir. FDM'nin yüksek sertlik değerinin dislokasyon hareketine engel olan SiC parçacıklarının rol oynadığını fark etmişlerdir. FDM-1'in üst ve alt tabaka Rockwell sertliği incelemelerinde takviye elemanı oranı ağırlıkça % 10'dan % 15'e çıktığında dispersiyon sertleşmesi sebebi ile sertliğin arttığını tespit etmişlerdir. FDM-2'nin üst tabakasındaki SiC takviye elemanının matris içinde düzgün dağılması, matris ve takviye elemanı ara yüzeyinde dislokasyon yoğunluğunu artırdığını ayrıca matris takviye elemanı arasındaki termal genleşme katsayısı farkı da dislokasyon yoğunluğunu artırdığını fark etmişlerdir. Bu durumun sertlik artışına neden olduğunu tespit etmişlerdir. FDM-2'nin alt tabakasındaki sertlik farkının nedeni SiC takviye elemanı kümelenmesi ve mikro çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. FDM-3'ün üst ve alt tabakasının sertliğinin incelemelerinde SiC takviye oranının ağırlıkça % 10'dan %

15'e artmasının sertliği artırdığını bulmuşlardır. FDM-4'ün üst ve orta tabakalarında SiC partiküllerinin düzgün dağılmasının gözeneklilik, mikro çatlaklar ve topaklanma gibi kusurların daha az olmasını sağladığını ve daha yüksek sertliğin başlıca nedenlerinden olduğunu fark etmişlerdir. FDM-4'ün orta tabakadaki yüksek sertlik değerinin SiC takviye elemanının ağırlıkça dağılımının optimum olmasından ve bu durumun da kayma düzlemindeki dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklandığını fark etmişlerdir. FDM-4'ün alt tabakasının sertlik değerinin azalmasının nedeni matris içinde SiC takviye oranının ağırlıkça yüzdesinin artması ve bu durum da daha fazla topaklanma, gözenek ve mikro çatlaklara neden olduğunu tespit etmişlerdir [26].

Çizelge 2.5. Ürettikleri FDM'lerin tabakalarının ortalama Rockwell Sertlikleri [26].

Numuneler	Üst Tabaka (Ort. HRB)	Alt Tabaka (Ort. HRB)	Orta Tabaka (Ort. HRB)
FDM-1	67	70	-
FDM-2	72	63	-
FDM-3	63	67	-
FDM-4	67	62	71

Ürettikleri FDM'lere çentik darbe testi yapmışlar ve emilen enerji ve çarpma tokluğu değerleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir. FDM-1'in diğer numunelere göre çarpma dayanımının yüksek olmasının nedeni olarak SiC parçacıklarının düzgün dağılımı ve bu durumun iyi ara yüzey bağına yol açması olduğunu tespit etmişlerdir. FDM-1 haricindeki numunelerde SiC takviye oranının ağırlıkça % 20 olmasının kırılabilirliği artırdığını bulmuşlardır. FDM'lerde SiC içeriği arttıkça matris içinde takviye dağılımının düzgün olma ihtimalini azalttığını, bu durumun takviye matris ara yüzey bağının kopmasına, parçacık kırılmasına ve ara yüzey çatlamaına neden olacak arızalara yol açtığını bulmuşlardır [26].

Çizelge 2.6. Üretilen FDM’lerin çarpma dayanımları [26].

Numuneler	Emilen Enerji (J)	Çarpma dayanımı(KJ/m ²)
FDM-1	6	60
FDM-2	5.8	58
FDM-3	5.5	55
FDM-4	5.2	52

Surya ve Prasanthi yaptıkları çalışmalarında FDM’lerde takviye oranı arttıkça teorik yoğunluğun arttığını, FDM’lerin SEM görüntüleri incelemelerinde takviye oranı arttıkça takviye elemanı kümelenmesi ve gözenekliliğin arttığını, sertliğin takviye oranı ile arttığı fakat gözenek, mikro çatlak ve topaklanmanın sertliği azalttığını, FDM çarpma dayanımında SiC takviye elemanının düzgün dağılımı ve iyi arayüzey bağının etkili olduğunu tespit etmişlerdir [26].

Chauhan ve Khan “Toz metalürjisi yöntemi ile geliştirilen alüminyum-bakır fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin mikroyapısal incelemesi” adlı çalışmada onbir tabakalı ağırlıkça yüzde bakır oranı 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 ,0 olan metal-metal Al-Cu FDM’leri toz metalürjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Ürettikleri FDM’lerin optik mikroskop ve SEM görüntülerini incelemişlerdir. İmalatı gerçekleştirilen FDM’lerde Al (saflık %99.9, 200 mesh) ve Cu (saflık %99.9, 300 mesh) tozu kullanmışlardır. Ağırlıkça oranlarına göre tozları paslanmaz çelik bir kabın içine yerleştirip 10 adet 8 mm paslanmaz çelik bilye ile 10 dakika boyunca karıştırmışlardır. Karıştırılan tozları kalıbın içine ağırlıkça oranlarına göre kademeli bir şekilde yerleştirmişlerdir. Toz karışımının istiflenmesinde kademeli yükü (1KN/s) çelik zımba vasıtası ile uygulamışlardır. Daha sonra argon koruyucu atmosfer altında sıvı sıcaklığının %90’ında sinterleme işlemini gerçekleştirmişlerdir [27].

Chauhan ve Khan ürettikleri FDM’lerin optik mikroskop incelemeleri sonucunda küçük ölçekli çatlaklar, ezik ve üfleme delikleri gibi yüzey kusurları içermediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca FDM’lerin tabakalarının homojen olduğu ve tabakalar arasında bağ yapısının iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Chauhan ve Khan yaptıkları çalışmada sonuç olarak Al-Cu FDM’leri tabaka bazında dereceli olarak başarı ile

üretmişlerdir. FDM'lerin SEM incelemeleri sonucunda katmanlar arasında bağ yapısının iyi olduğunu bulmuşlar fakat FDM numunelerinin iç yüzeylerinde mikro çatlak, mikro gözenek ve bir miktar topaklanma fark etmişlerdir [27].

Rajasekhar vd. “Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri” isimli çalışmalarında dört farklı tip kompozit malzemenin ve üç farklı tip iki tabakalı FDM'nin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin ve FDM'lerin mikroyapı görüntülerini optik mikroskop ve geri saçılmış elektron modu ile SEM'de incelemişlerdir. FDM'lerin faz yapısını X-Ray difraktometresi ile analiz etmişlerdir. FDM ve kompozitlerin sertlik ve yoğunluklarını ölçmüşlerdir. Üretimde takviye elemanı olarak Cu ve matris malzemesi olarak Al kullanmışlardır. Üretimde kullandıkları takviye elemanı ve matrisin saflık derecesi %99,9, şekilleri düzensiz ve boyutu da 325 mesh'dir. İmalatını gerçekleştirdikleri kompozit ve FDM'lere ait tabaka sayıları ve ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 2.7'de verilmiştir [28].

Çizelge 2.7. İmalatını gerçekleştirdikleri kompozit ve FDM'lerin ağırlıkça tabaka yüzdeleri.

Tabaka Sayısı	Numuneler	Üst tabaka	Alt tabaka
Tek Tabakalı	Kompozit	-	100%Al
Tek Tabakalı	Kompozit	-	95%Al + 5%Cu
Tek Tabakalı	Kompozit	-	90%Al + 10%Cu
Tek Tabakalı	Kompozit	-	85%Al + 15%Cu
İki Tabakalı	FDM	95%Al + 5%Cu	100%Al
İki Tabakalı	FDM	90%Al + 10%Cu	100%Al
İki Tabakalı	FDM	85%Al + 15%Cu	100%Al

Ağırlıkça oranlarına göre ayarladıkları tozları karıştırıcıda bir saat karıştırmışlardır. Karıştırılan tozları çelik kap içine tabakalarına göre tabaka tabaka doldurmuşlar, tek eksenli pres ile 400 MPa basınç altında sıcak preslemişler ve 550 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile sinterlemişlerdir [28].

Rajasekhar vd. ürettikleri FDM'lerin optik mikroskop incelemeleri sonucunda FDM'lerin kompozisyon değişiminin çok iyi kademeli artış gösterdiğini ve Cu içeriğinin artması ile dereceli yapının giderek koyulaştığını tespit etmişlerdir. Geri saçılmış elektron modu ile SEM incelemeleri sonucunda hem ara yüzeyde hem de tek tek tabakalarda çatlak olmadığını bulmuşlardır. Ayrıca matristeki bakır içeriğine ek olarak mikro yapıdaki Cu artışının makroskobik olarak görüldüğünü fark etmişlerdir. FDM'lerin X-ışınları difraktometresi (XRD) incelemeleri sonucunda bireysel numunelerde artan Cu içeriği ile dağılmış Al_2Cu fazının arttığını bulmuşlardır. Rajasekhar vd. yaptıkları çalışmada kompozit ve FDM'lerin Vickers sertlikleri Cu içeriği arttıkça sertliğin arttığını, yoğunluğun Cu içeriği arttıkça arttığını, optik mikroskop incelemelerinde Cu içeriği arttıkça dereceli yapının koyulaştığını SEM incelemelerinde ara yüzeyde ve tabakalarda çatlak bulunmadığını tespit etmişlerdir [28].

Jin vd. on bir tabakalı ZrO_2 (boyutu $1.5\mu m$ ve saflığı > 99.9)/ NiCr (boyutu $< 45\mu m$ ve saflığı > 98) FDM ve on bir adet FDM olmayan kompozit malzeme üretmişlerdir. İmal edilen ZrO_2 /NiCr FDM'nin hacimce yüzde oranı Şekil 2.6'da verilmiştir [29].

100% ZrO_2
90% ZrO_2 +10%NiCr
80% ZrO_2 +20%NiCr
70% ZrO_2 +30%NiCr
60% ZrO_2 +40%NiCr
50% ZrO_2 +50%NiCr
40% ZrO_2 +60%NiCr
30% ZrO_2 +70%NiCr
20% ZrO_2 +80%NiCr
10% ZrO_2 +90%NiCr
100%NiCr

Şekil 2.6. İmal edilen ZrO_2 /NiCr FDM'nin hacimce yüzde oranı.

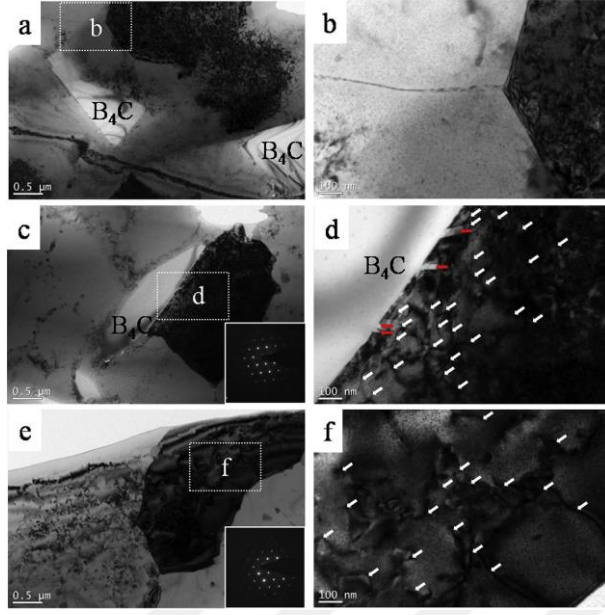
Hacimce oranlarına göre belirlenen ZrO_2 ve NiCr tozlarını karıştırmışlar, tabaka tabaka çelik kalıp içine istiflemişler ve soğuk preste ~ 30 MPa basınç ile sıkıştırarak disk şeklinde pellet haline getirmişlerdir. FDM'nin bir tabakası istiflendikten sonra

düşük bir basınç uygulanıp yeni bir tabaka istiflemişlerdir. Daha sonra pelleti 1300°C sıcaklıkta 5 MPa basınç altında 1.5 saat sinterlemişlerdir. Aynı işlemle, farklı hacim oranlarında FDM olmayan kompozitleride üretmişlerdir.

Jin vd. üretilen FDM'lerin mikroyapı incelemelerinde optik mikroskoptan faydalanmışlardır. İmal edilen numunelerin yoğunluklarını ölçmüşlerdir. FDM'lerin Vickers sertliğini ölçmüşlerdir. FDM'nin eğilme mukavemeti ve elastik modülü dağılımı için FDM olmayan numuneler üzerinde üç nokta eğme testi gerçekleştirmişlerdir. Kırılma yüzeylerinin incelemelerinde SEM'den yararlanmışlardır. FDM'lerin optik mikroskop ile mikroyapı incelemeleri sonucunda malzeme bileşim ve mikro yapısı dereceli olarak değişim sergilediğini tespit etmişlerdir. İmal edilen numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçlarında sıcak preslemenin yoğun numuneler üretilmesinde etkili olduğunu, FDM numunelerinde gözeneklilik seviyesinin düşük olup nispi yoğunluğun % 97,2 olduğunu, FDM olmayan numunelerde ise nispi yoğunluğun % 94,5'ten fazla olduğunu belirlemişlerdir. Vickers sertlik ölçüm sonuçlarına göre ZrO₂ seramik partikülün artması ile sertliğin arttığını ve sünekliğin azaldığını, ZrO₂/NiCr FDM'deki sertlik ve sünekliğin matris fazının metalden seramiğe değişimin etkilediğini fark etmişlerdir. Üç nokta eğme deneyi sonucunda ZrO₂ hacimce oranının % 0'dan % 40'a artması ile eğilme mukavemeti ve elastiklik modülünün azaldığını fakat hacimce oranının % 50'den % 100'e arttıkça arttığını bu duruma zayıf bağ yapısına sahip seramik/metal ara yüzeyin sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Jin vd. yaptıkları çalışmada mikroyapı incelemeleri sonucunda malzeme bileşimi ve yapısının dereceli değiştiğini, sıcak presleme sayesinde daha yoğun numuneler elde edildiğini, ZrO₂ seramik takviye elemanının artması ile sertliğin arttığını, eğilme mukavemeti ve elastiklik modülünün ZrO₂ seramik takviye oranının hacimce % 0'dan % 40'a kadar azaldığını, hacimce oranının % 50'den % 100'e arttıkça arttığını bu duruma seramik metal ara yüzey bağının zayıf olmasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir [29].

Wu vd. iki tabakalı, tabakaların ağırlıkça oranları sırası ile yüzde 0, 7,5, B₄C takviyeli AA7075 matrisli FDM'yi plazma aktif sinterleme metodu ile imal edip mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. AA 7075 tozunu ve ağırlıkça %7,5 B₄C takviye elemanını çalkalayıcı karıştırıcı mikserde 24 saat boyunca karıştırmışlardır. Karıştırma

işleminde sonra AA 7075 tozunu ve AA 7075/B₄C tozunu ayrı ayrı 150 MPa basınç altında soğuk presleme yolu ile yağlayıcı olmadan 32 mm çaplı kalıpta pellet haline getirmişlerdir. Grafit kalıbın altına takviyesiz AA 7075 pelletini onun üstüne de AA 7075/B₄C pelletini yerleştirmişlerdir. Pelletlerin üzerine 20 MPa tek eksenli pres ile basınç uygulamışlar ve 100 °C/dak ısıtma oranında ısıtılarak 530 °C sıcaklıkta 3 dakika boyunca plazma aktif sinterleme metodu ile sinterlemişlerdir. Soğutma işlemini hızı 50 °C/dak olacak şekilde gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelere iki aşamalı ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. İlk önce 2 saat boyunca 466 °C sıcaklıkta tutmuşlar, ardından sıcaklık artırılarak 480 °C sıcaklıkta 1 saat tutmuşlar, daha sonra oda sıcaklığındaki suda söndürmüşler ve 120 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca suni yaşlandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. İmal edilen numunelerin mikro yapıları ve kırılma yüzeyleri alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu ile incelemişlerdir. Mikro yapıyı daha iyi karakterize etmek için transmisyon elektron mikroskobu kullanmışlardır. FDM numunelerine üç nokta eğme testi hem FDM'nin takviye elemanı yüzeyine hem de takviye elemanı bulunan yüzeyine ayrı ayrı uygulamışlardır [30].



Şekil 2.7. Ürettikleri FDM'nin iki katman (a ve b), AA 7075/B₄C katmanı (c ve d) ve AA 7075 katmanı (e ve f) arasındaki ara yüzeyde çökeltilerin dağılımını ve dislokasyonu gösteren farklı büyütme parlak alan görüntüleri, (dislokasyonlar beyaz oklarla, çita benzeri h çökeltileri kırmızı oklarla işaretlenmiştir) [30].

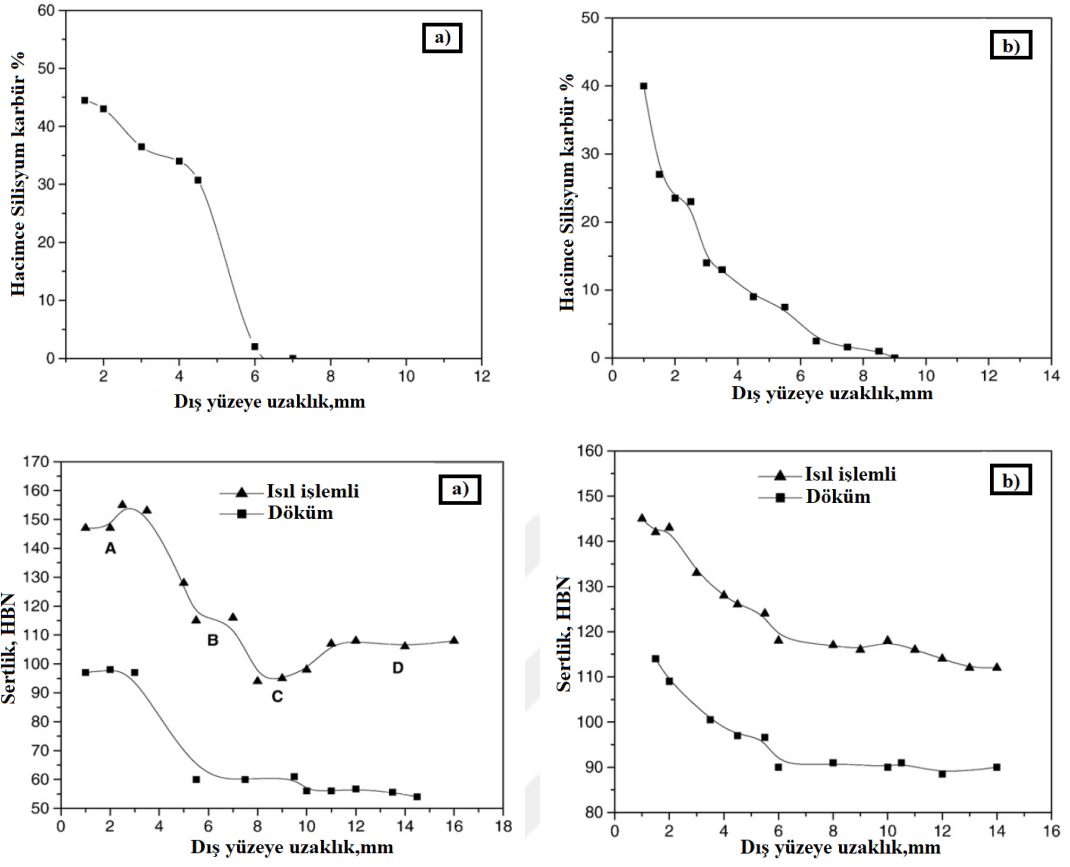
Wu vd. yaptıkları mikro yapı incelemeleri sonucunda gözenek, çatlak ve delemantasyon gibi kusurların FDM'de gözlenmediğini ifade etmişlerdir. Transmisyon elektron mikroskobu sonuçlarına göre B₄C partiküllerinin çevresindeki dislokasyon yoğunluğunun [011] bölge eksenindeki (Şekil 2.7 (b) ve (d)'de beyaz okla işaretlenmiş) görüntülerinde güçlendirilmemiş tabakaninkine göre daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Özdeş işlem koşullarına rağmen iki katmanda çökeltme davranışlarının farklı olduğunu ve dahası iki tabaka arasındaki ara yüzey alanında belirgin şekilde gözükken çökeltisiz bir bölge gözlemlemişlerdir. Kırılma yüzeyi incelemeleri sonucunda kırılma ara yüzey bölgesinde mikro çatlak veya boşluk gözlemlememişlerdir. Bu duruma iki tabakanın iyi bir şekilde karışması ve güçlü metalürjik bağ ile bağlanmasının neden olduğunu bulmuşlardır. Takviyesiz tabakalı malzemede görülen çukurların yükleme sırasında sünek deformasyondan meydana geldiğini belirlemişlerdir. Wu vd. yaptıkları çalışmada üç nokta eğme testi sonuçlarına göre yükü taşıyan yüzeyin önemli olduğunu ve en yüksek eğilme mukavemeti değerine yük B₄C takviyeli yüzeyden uygulandığında elde edildiğini ve bu değer 1234±72 MPa olduğunu bulmuşlardır [30].

Radhika “Fonksiyonel dereceli Al-Si12Cu/Al₂O₃ metal matris kompozitin mekanik özellikleri ve abrasif aşınma davranışı” adlı çalışmasında santrifüj döküm yöntemi ile 30-50 µm boyutunda, ağırlıkça % 10 Al₂O₃ takviyeli Al-Si12Cu matrisli delikli ölçüsü 150 x150 x 16 mm olan FDM’yi 1200 rpm santrifüj hızında üretmiştir. Ayrıca Al-Si12Cu alaşımı santrifüj dökümle üretilen FDM ile kıyaslamak için üretmiştir. FDM’nin dış çevreden 1, 7, 13 mm uzakta dış, orta ve iç olarak alınan numuneleri optik mikroskopta mikro yapılarını incelemiştir. FDM’den ve Al-Si12Cu alaşımından alınan numunelerin sertliklerini ve aşınma davranışlarını incelemiştir. FDM’nin dış çevresinden radyal yönde 6 mm kalınlıkta dış (1-7 mm) ve iç (7-13 mm) olmak üzere iki farklı bölgeden ve AlSi12Cu alaşımından numuneler almış ve çekme testi yapmıştır. Çekme sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeylerini SEM’de analiz etmiştir. Optik mikroskop ile incelemeler sonucunda parçacık miktarının dış alanda daha fazla olduğu iç ve orta alanlarda ise daha az olduğunu tespit etmiştir. Çekme testi sonucunda parçacık miktarı fazla olan bölgede çekme mukavemeti yüksek parçacık miktarı az olan bölgede çekme mukavemeti daha düşük olduğunu belirtmiştir. Kırılma analizinde FDM’nin dış bölgesinin birleşik olarak gevrek-sünek kırılma davranışı gösterdiğini gözlemlemiştir. FDM’de sertliğin takviyesiz alaşımdan yüksek olduğunu ve dış bölgeden uzaklaştıkça lineer olarak azaldığını tespit etmiştir. Aşınma deneyi sonuçları göstermiştir ki daha fazla yük hız ve dış çevreden uzaklaştıkça aşınma oranının arttığını bulmuştur. FDM’nin dış bölgesi aşınmaya karşı direnç konusunda en iyi performansı gösterdiğini tespit etmiştir. Radhika yaptığı çalışmada ürettiği FDM’nin dış kısmında parçacık miktarının iç kısma göre fazla olduğunu, çekme mukavemetinin, sertliğin ve aşınmanın dış kısımda daha iyi olduğunu tespit etmiştir [31].

Rajan vd. “Santrifüj döküm yöntemi ile üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin metalürjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” adlı çalışmalarında matris malzemesi olarak döküm A356 ve dövme AA 2124, takviye malzemesi olarak da 23µm boyutlarında SiC partikülünden faydalanarak önce sıvı metal karıştırma dökümü ve ardından yatay santrifüj döküm yöntemi ile FDM üretmişler ve metalürjik ve mekanik özelliklerinin incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada başlangıçta metal karıştırma döküm yöntemiyle % 15 SiC / A356 ve %15 SiC / AA 2124 kompoziti eriyik haline getirmişlerdir. Sıcaklığı 750-760 °C olan kompozit eriyiği

250±10 °C sıcaklığa kadar ön ısıtma işlemi yapılan kaplanmış kalıp içine dökmüşler ve 1100 rpm'de döndürülerek yatay santrifüj tekniği ile numunelerin imalatını gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numunelerin boyutları 120 mm çapında 380 mm uzunluğunda ve et kalınlığı 15 ila 17 mm boyutlarındadır [32].

Rajan vd.'nin ürettikleri numuneleri yüzük şeklinde kesmişler ve daha sonra 20 mm yüksekliğinde ve 40 mm uzunluğunda dilimleyip mikro yapı, ısıtma işlemi ve sertlik testini yapmışlardır. A356 numunesinin ısıtma işlemi için 535 °C sıcaklıkta 10 saat çözündürme işlemi yapmışlar ve ılık suda söndürülerek 165 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırmışlardır. AA 2124 numunesinin ısıtma işlemi için 495 °C sıcaklıkta 4 saat çözündürme işlemi yapmışlar ve ılık suda söndürülerek 190 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırmışlardır. Numunelerin mikro yapı incelemelerini optik mikroskopta gerçekleştirmişlerdir. Mikro yapı incelemeleri sonucunda numunelerin dış çevresinin iç çevresine göre daha yüksek miktarda takviye elemanı içerdiğini belirlemişlerdir. A356 numunesinin dış çevresinde maksimum konsantrasyon hacimce oranı % 45 SiC takviye elemanı olarak belirlemişlerdir. AA 2124 numunesinin dış çevresinde maksimum konsantrasyon hacimce oranı % 40 SiC takviye elemanı olarak belirlemişlerdir. FDM numunelerinin Brinell sertliklerini ısıtma işleminden önce ve sonra ölçmüşlerdir. Ürettikleri FDM numunelerinin kalınlığı boyunca SiC takviye elemanı ve Brinell sertlik dağılımı Şekil 2.8'de verilmiştir [32].



Şekil 2.8. Ürettikleri numunelerin kalınlığı boyunca SiC ve sertlik dağılımı a) A356, b) AA 2124.

Isıl işlem yaptıktan sonra A356-SiC ve AA 2124-SiC FDM’lerin dış çevresinden en yüksek Brinell sertlik değerlerini sırası ile 155 BHN ve 145 BHN olarak ölçmüşlerdir. Rajan vd. yaptıkları çalışmada santrifüj döküm yöntemi ile üretilen FDM’lerde takviye elemanının en fazla dış kısımda bulunduğunu, yaşlandırılan FDM’lerin dış kısmında en yüksek sertlik değerinin elde edildiğini tespit etmişlerdir[32].

Kumar vd. “Santrifüj döküm işleme parametrelerinin Al alaşımı/ Al_2O_3 fonksiyonel derecelendirilmiş malzemesi üzerindeki aşınma davranışına etkisi” isimli çalışmada matris malzemesi olarak ticari olmayan AA 6061-O malzemesi ve takviye elemanı olarak ortalama tane boyutu $85\mu m$ olan Al_2O_3 malzemesi ve bağlayıcı olarak magnezyum alaşımı kullanmışlardır. Hacimce takviye oranına (%3, 4,5, 6 ve %7,5) göre ayarlanan kompozitleri ayrı ayrı karıştırılmalı döküm yöntemi ile ergitmişlerdir.

Ergitilmiş kompozitleri ayrı ayrı önceden ısıtılmış kalıbın içine dökmüşler ve 800 rpm ve 1200 rpm hızlarında santrifüj döküm tekniği ile FDM üretimini gerçekleştirmişlerdir. Üretilen FDM'lerin mikroyapı tribolojik ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Nihai olarak üretilen döküm FDM'nin yarıçapı 40 mm ve kalınlığı 18 mm'dir. Dökülen yüzüğün partikül dağılımını değerlendirmek için iç kısmı ve dış kısmı 8 mm olan iki bölgeye ayırmışlardır. Santrifüj döküm tekniği ile 800 ve 1200 rpm'de ürettikleri FDM'leri iç kısma ve dış kısma ayrılarak Vickers sertliğini ölçmüşlerdir. Santrifüj döküm tekniği ile 800 ve 1200 rpm'de üretilmiş FDM'lerden aşınma testi için 6 mm çaplı 30 mm uzunluğunda 10-10 silindirik numuneler hazırlamışlardır [33].

Kumar vd.'nin yaptıkları mikro yapı incelemeleri sonucunda dış bölgede bulunan seramik partikülünün diğer bölgelere göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Vickers sertlik incelemelerinde FDM'de sertliğin dış kısımdan iç kısma doğru kademeli olarak azaldığını tespit etmişlerdir. Santrifüj döküm tekniği ile 800 rpm'de ürettikleri FDM'lerin hacimce % 7,5 gibi daha büyük bir takviye partikül yüzdesinde sertlik ve aşınma hacim katsayısı farklılıkları döküm yüzüğün iç kısmının dış kısmına göre daha az kompozit görüldüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca %7,5 üzerinde seramik partikülün eklenmesi aşınma hacim değişiminde önemsiz olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumda FDM, FDM olmayan bir malzeme gibi davranış gösterdiğini bulmuşlardır. Santrifüj döküm tekniğinde dönüş hızı 1200 rpm çıkarıldığında döküm yüzüğün dış kısmına doğru partikül nüfuzunun keskin olduğu bulmuşlardır. Böylece Kumar vd. yaptıkları çalışmada aşınma hacim farklılıkları, sertlik ve aşınma katsayısı % 7,5 alümina partiküllü dökme halkanın dış kısmında iç kısmına göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [33].

El Galy vd. ağırlıkça oranı yüzde 0, 2,5, 5, 7,5, 10 ve 15 olan SiC takviyeli ve ticari olarak saflığı % 99.97 Al olan matris malzemeli FDM'yi santrifüj döküm tekniği ile üretmişlerdir. Ürettikleri FDM'lerin mikro yapı incelemelerini, çekme, sertlik ve aşınma oranı ölçümlerini yapmışlardır. Matris malzemesini grafit kalıpta 670 °C sıcaklıkta ergitmişler ve dökmek için ergimiş malzemenin sıcaklığını 725 °C sıcaklığa çıkarmışlardır. Üç farklı boyutta (16 µm, 23 µm, 500 µm) SiC takviye elemanı tozlarını ağırlıkça farklı oralarda (%0, %2,5, %5, %7,5, %10 ve %15) ergimiş metalin

ağırlığına göre ilave etmişler ve 100 rpm’de karıştırıcı ile karıştırmışlardır. Karışımı farklı devir hızları ile dönen (800, 900, 1000 rpm) santrifüj döküm makinesinin içine dökmüşlerdir. Metali boru eksenı boyunca beslemek için iki kontrollü doğrusal hız (16 ve 28 mm/s) kullanmışlardır. Üretilen FDM’nin dış çapı 230 mm uzunluğu 180 mm ve et kalınlığı 12 mm’dir [34].

El Galy vd. yaptıkları mikro yapı incelemeleri sonucunda SiC partikül konsantrasyonunun dış bölgede maksimum değere ulaştığını iç kısma doğru dereceli olarak azaldığını bulmuşlardır. Yüksek devir hızlarında daha yüksek merkezkaç kuvveti sebebi ile dış bölgede daha fazla konsantrasyonda partikül miktarı varlığını tespit etmişlerdir. SiC partikül boyutlarının 16 μm veya 23 μm olmasıyla merkezkaç kuvveti azaldığından dolayı dış bölgede daha az miktarda SiC takviye elemanı konsantrasyonuna rastlamışlardır. Boru eksenı boyunca besleme hızı arttıkça dış bölgelerdeki SiC partikül konsantrasyonu düşük hızlardaki besleme hızından daha fazla elde ettiklerini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte boru eksenı boyunca besleme hızı daha düşük koşullarda, dereceli konsantrasyon daha yüksek besleme hızlarından daha düşüktür ve kalınlık boyunca özelliklerin daha yumuşak değişimi söz konusu olduğunu fark etmişlerdir. Brinell sertlik ölçüm sonuçlarında FDM’lerin dış kısımlarının daha yüksek sertlik değeri elde edildiğini ortaya koymuşlardır. En düşük parçacık boyutunda daha yüksek sertlik elde etmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça SiC oranı arttıkça sertliğin orantılı olarak arttığını belirlemişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre SiC ağırlıkça oranı arttıkça süneklik azalmış ve tüm boru kalınlığı boyunca kesilen FDM numunelerinin çekme mukavemeti artış göstermiştir. Nihai çekme mukavemetinin ağırlıkça SiC takviye elemanı yüzdesi ile orantılı olup parçacık boyutu ile ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ağırlıkça % 10 SiC takviye oranına kadar çekme mukavemetinde lineer artış olurken, ağırlıkça % 15 SiC takviye oranında artış daha düşük olduğunu fark etmişlerdir. 23 μm partikül boyutuna sahip FDM’de yaptıkları aşınma direnci araştırmalarında en iyi aşınma direncinin dış bölgeler tarafından gösterildiğini tespit etmişlerdir. El Galy vd. yaptıkları çalışmada devir hızı ve besleme hızı arttıkça dış kısımda daha fazla SiC partikülünün bulunduğunu, sertliğin, çekme mukavemetinin takviye elemanı oranı ile arttığını tespit etmişlerdir [34].

2.2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRMESİ

Araştırmacılar FDM üretimi ile ilgili yaptıkları çalışmalarda yaygın olarak matris malzemesi alüminyum alaşımı, takviye elemanı olarak da B_4C , Al_2O_3 ve SiC kullanmışlardır. B_4C seramik takviye elemanı olarak yüksek sertlik ve düşük yoğunlukları ile ön plana çıkmakla birlikte son zamanlarda balistik uygulamalarda kullanılmaya başlamıştır.

Araştırmacılar FDM'lerin üretiminde yaygın olarak toz metalürjisi ve sanrifüj döküm tekniği kullanmışlardır. Toz metalürjisi tekniği, maliyetin düşük olması, düşük sıcaklıklarda üretimin yapılabilmesi nedeni ile istenmeyen faz oluşumunun önüne geçilebilmesi, takviye elemanının matris içinde homojen olarak dağılabilmesi gibi nedenlerden diğer üretim tekniklerine göre tercih nedenidir.

Genelde üretilen FDM'lerin tabakaları arasındaki geçişler üretim tekniğine bağlı olarak (örneğin toz metalurji ve santrifüj döküm tekniği) düz ve daireseldir. FDM'lerde tabakalar arası geçiş bölgelerinde arzu edilen özelliklerin elde edilmesi için, tabaklar arasındaki geçiş bölgesi yüzey alanı ve geçiş yüzeylerinde bağ sayısı artırılarak, delemantasyonun önüne geçmek amaçlanmıştır. Daha önceki çalışmalarda tabakalar arsında trapez geçiş bölgesine sahip çalışma olmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile tabakalar arası düz ve trapez (30° , 45° ve 60°) geçişli, üç (ağırlıkça % 0, 30, 60) ve dört tabakalı (ağırlıkça % 0, 20, 40, 60) B_4C takviyeli AA 7075 matrisli FDM'lerin üretimi için dikey ayırıcılı kalıp ve sıcak iş takım çaliği kalıbı tasarlanmış, imal edilmiş ve FDM'lerin üretimi gerçekleştirilerek mikroyapı, sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımı özellikleri araştırılmıştır.

BÖLÜM 3

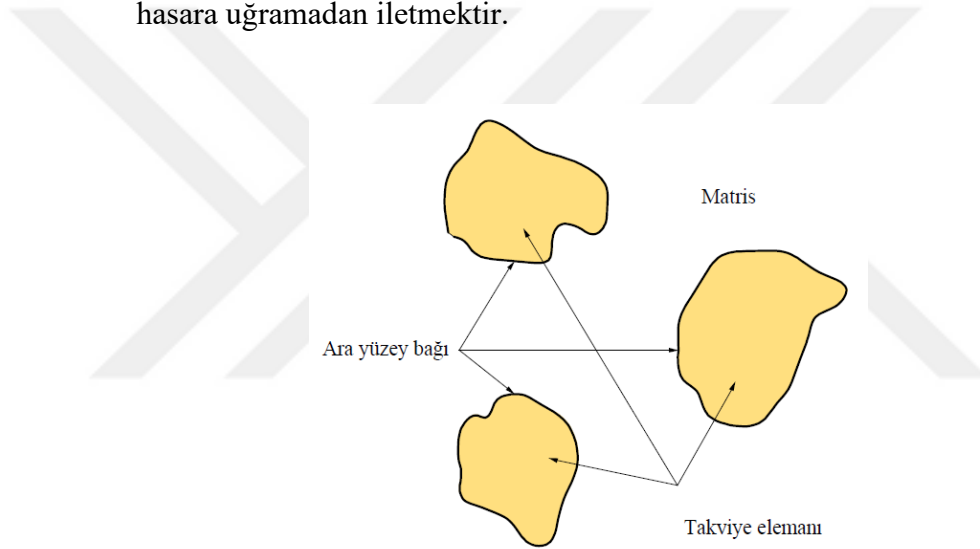
KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. GENEL BİLGİLER

Teknolojide meydana gelen gelişmeler malzemedeki gelişmelerle ilişkilidir. Bu bakımdan kompozit malzemeler, malzemelerin sürekli geliştirilmesini sağlamak için gerçekleştirilmiş önemli bir unsurdur [35]. Kompozit malzemeler için genel kabul görmüş bir tanım yoktur. Literatürde yapılan tanımlarda birbiri arasında büyük farklılık arz etmesine rağmen, kompozit malzemeler birbirinden fiziksel ve kimyasal özellik bakımından farklı olan en az iki malzemenin belirli özelliklerini iyileştirmek için veya arzulanan özellikleri sağlamak için makro seviyede birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır [1,4].

Genellikle kompozit malzemeyi meydana getiren unsurlardan biri matris diğer unsur ise birleştirici madde olarak isimlendirilen matris aracılığı ile bağlanan dolgu maddesidir. Örnek olarak hafif yapılarda önemli bir şekilde kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozitler de matris malzemesi polimer, dolgu maddesi ise elyafıdır. Yapısal kompozit malzemesi olması halinde dolgu maddesi genellikle takviye elemanı olarak işlev görür [36]. Farklı metotlarla birleştirilen takviye elemanı ve matris malzemesi kendi özelliklerinin bir kısmını koruyarak aralarında ara yüzey bağı olarak adlandırılan bağ oluşumunu sağlayıp, tasarlanan şekillerini muhafaza etmelidirler. Parçacık takviyeli kompozit malzemeyi oluşturan unsurlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Kompozit malzeme matris, takviye elemanı ve ara yüzey bağı olarak adlandırılan üç unsurdan oluşmaktadır. Bu üç unsurun üstlendiği görev aşağıda maddeler halinde verilmiştir [4].

- Matrisin görevi, üzerine etkiyen herhangi bir kuvvet karşısında hasara uğramadan ara yüzey sayesinde kuvveti takviye elemanına aktararak yayılmasını sağlamak, takviye elemanını ve istenilen malzeme şeklini muhafaza ederek bir arada olmasını sağlamak.
- Takviye elemanının görevi, imalat sırasında matrisin tane büyüklüğünü denetlemek, tane sınırında oluşan hareket oluşumuna engel olmak, matris tarafından aktarılan kuvvetleri paylaşarak, bu kuvvetlere karşı direnmektir.
- Ara yüzeyin görevi, takviye elemanı ile matris arasında bağlayıcılık sağlar, bu bağ seramik gibi genellikle kırılgan özellik göstermektedir fakat matrisin takviye elemanına aktarmayı arzu ettiği kuvveti, herhangi bir kırılma ya da hasara uğramadan iletmeştir.



Şekil 3.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeyi oluşturan unsurlar [37].

Kompozit malzemeler türlü yöntemlerle sınıflara ayrılabilir. Kompozit malzemeleri muhtemel olarak yapılabilecek sınıflandırmalardan biride, alışılmış ve sentetik kompozitler olmak üzere ikiye ayırmaktır. Alışılmış kompozit malzemeler, eski medeniyetler tarafından uzun zaman periyotlarında üretilen veya doğada bulunan malzemelerdir. Asfalt, beton gibi malzemeler alışılmış kompozit malzemelere örnek olarak verilebilir. Sentetik kompozit malzemeler ise kendini oluşturan unsurlar ayrı ayrı imalatı gerçekleştirildikten sonra arzu edilen özellik, bölüm geometrisi ve yapıyı sağlayabilmek için denetimli halde birleştirilen, imalat endüstrisi ile ilişkili, çağdaş malzeme sistemleridir [38].

Sentetik kompozit malzemelerde takviye elemanı ve matrise göre iki türlü sınıflandırma işlemi yapılmaktadır. Takviye elemanına göre kompozitler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Kılcal kristal takviye elemanlı kompozit malzemeler,
- Karma takviye elemanlı kompozit malzemeler,
- Elyaf takviye elemanlı kompozit malzemeler
- Plaka takviye elemanlı kompozit malzemeler,
- Partikül takviye elemanlı kompozit malzemeler.

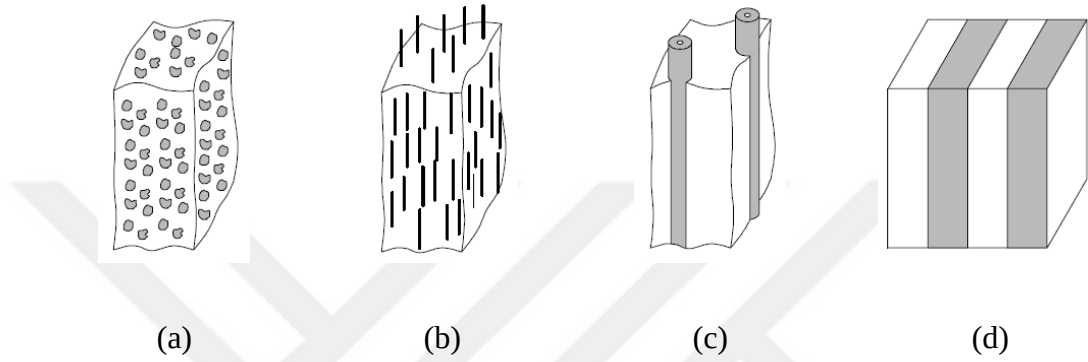
Matrise göre kompozitler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Seramik matrisli kompozit malzemeler,
- Cam matrisli kompozit malzemeler,
- Refraktör malzeme matrisli kompozit malzemeler,
- Karbon matrisli kompozit malzemeler
- Polimer matrisli kompozit malzemeler,
- MMK malzemeler [37].

MMK'ler uzun zamandan beri bulunmaktadır, fakat yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren mühendislik kompozit malzemeler olarak meşru kabul edilmiştir [39]. MMK'lerin başka tür kompozitlere karşı çeşitli avantajları vardır. Bu avantajlar; mukavemetin yüksek olması, darbe özelliklerinin ve tokluğun yüksek olması, termal şok ve sıcaklık değişikliklerine karşı hassasiyetin az olması, yüzey dayanımının yüksek olması ve yüzey kusurlarına karşı hassasiyetin az olması, elektrik iletkenliği yüksek olmasıdır [40]. MMK'ler bütün kompozitlere benzer olarak, fiziksel ve kimyasal bakımdan birbirinden başka en az iki fazdan meydana gelen ve her iki fazda da bireysel olarak sağlanamayan özellikleri elde etmek için kullanılır. MMK'lerde matris malzemesi olarak çok farklı metal malzeme ve alaşımlarından faydalanılabilir. MMK'lerde kullanılan matris malzemesi alüminyum ve onun alaşımları, titanyum alaşımları, magnezyum ve onun alaşımları, kobalt, bakır, gümüş, nikel, niyobyum ve intermetalikler'dir [39]. Yaygın olarak yararlanılan matris malzemeleri alüminyum, titanyum ve magnezyum'dur [37]. Bu matris malzemeleri içinde hafif olmaları,

korozyona karşı dayanıklı olmaları, kolayca şekillendirilebilmesi, ve ucuz olması açısından alüminyum ve onun alaşımları cazip hale gelmiştir [41].

Takviye elemanına göre MMK'ler çok farklı çeşitleri vardır. Bunlar partikül takviyeli, kısa fiber takviyeli, sürekli fiber takviyeli ve tabakalı kompozitlerdir ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir [40].



Şekil 3.2. Takviye elemanına göre MMK çeşitleri a) partikül takviyeli b) kısa fiber takviyeli c) sürekli fiber takviyeli d) tabaka takviyeli.

MMK'lerde kullanılan bazı önemli takviye elemanı tipi ve örnekleri aşağıda belirtilmiştir [35].

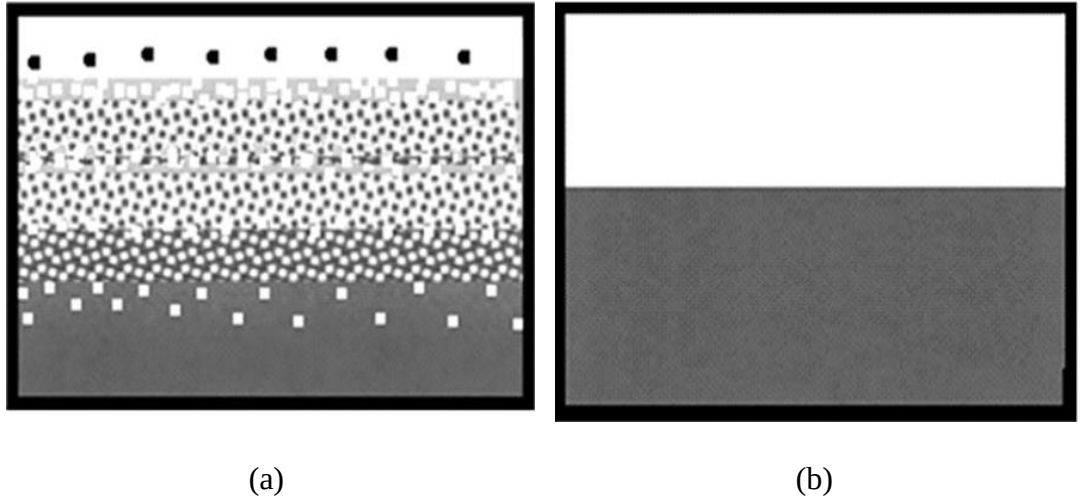
- Partikül takviyeli: SiC, Al₂O₃, WC, TiC, BN, B₄C
- Kısa fiber veya kılcal kristal: SiC, Al₂O₃, Al₂O₃ + SiO₂, C
- Sürekli fiber: SiC, Al₂O₃, Al₂O₃ + SiO₂, C, B, W, NbTi, Nb₃Sn

Seramik takviyeler yüksek sıcaklık kabiliyetini yüksek mukavemet ve elastikiyet modülü ile birleştirirler [39]. SiC, Al₂O₃, WC, TiC ve B₄C gibi seramik parçacıklar takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Bor karbür yüksek sertlik, düşük yoğunluk, iyi kimyasal kararlık, yüksek dayanım, yüksek ısıl dayanım gibi özelliklerinden dolayı MMK'larda partikül takviyesi olarak tercih edilir [41].

3.2. FDM'LER

FDM fikri 1980'lerin ortalarına bir grup bilim adamı tarafından Japonya'da ortaya çıkmıştır. FDM'lerden faydalanılarak yüksek dirençli malzeme geliştirilmesi 1980'lerin ortalarından itibaren sürmektedir. FDM'ler ilk önceleri füzyon reaktörlerinde ve havacılık yapılarında ısı bariyer olarak kullanmak için tasarlanmıştır. Günümüzde FDM'ler yüksek sıcaklık ortamlarında yapısal bileşenlerin genel kullanımı için geliştirilmektedir [42].

FDM'ler zorlu çalışma koşulları altında özelliklerini kaybetmeyen ve çalışma ömrü boyunca bozulmadan işlevini yerine getirebilen ileri düzey mühendislik malzemelerdir [43]. FDM'lerin yapı ve bileşimleri dereceli olarak değişmekte ve bu dereceli değişim sonucunda malzemenin özellikleri de farklılaşmaktadır [44]. FDM'ler yüksek performanslı, yapısı tercih edilen doğrultuda belirli özelliklere sahip, mikroskobik açıdan homojen olmayan bileşimleri dereceli mühendislik malzemelerdir [45]. Sürekli FDM'lerde malzemenin her bir kısmının özelliklerinin ayırt edilmesi için net bir bölge veya çizgi gözlenmez. Kademeli FDM'lerde ise malzemenin bileşenleri katmanlı veya ayrıktır [46]. Sürekli ve kademeli değişim gösteren FDM'lerin şematik gösterimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir



Şekil 3.3. FDM'lerin şematik görünümü a) Sürekli derecelendirilmiş b) Kademeli derecelendirilmiş [43].

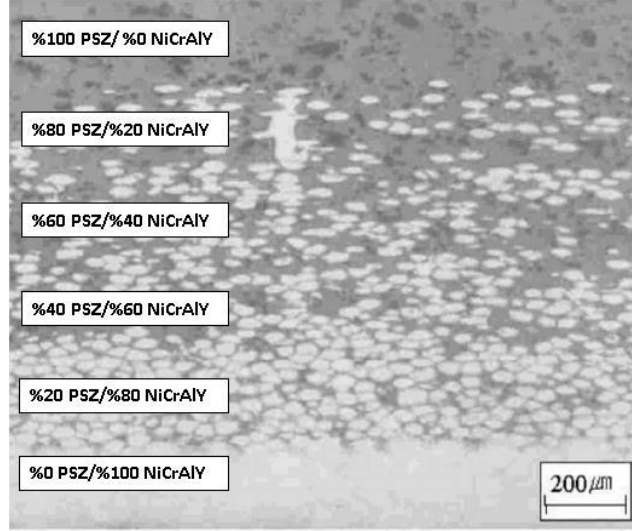
3.2.1. FDM'lerin Sınıflandırılması

FDM'lerin en önemli tipik özelliği bileşim ve yapısının hacme göre dereceli değişimidir [25]. FDM kendisini meydana getiren bileşenlerden farklı, genel olarak özellik bakımından eşsiz özellikler göstermektedir. FDM'de takviye oranı bir taraftan diğer tarafa değişim göstermektedir. FDM'lerin bir yüzünün özelliği diğer yüze göre farklıdır. Bu nedenle davranış bakımından esneklik göstermektedir. Yine FDM'nin bir yüzeyi daha üstün termal direnç ve mekanik mukavemet gösterirken diğer yüzeyi özellik bakımından farklı değer gösterebilir [22].

Genel olarak FDM'ler üç gruba ayrılır. Bu gruplar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [43].

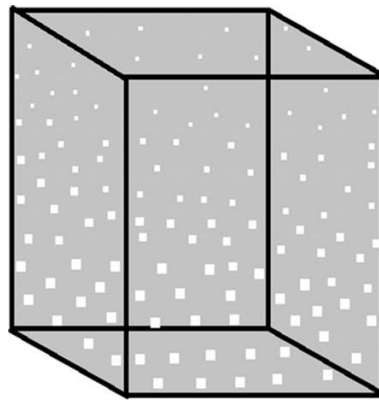
- Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM'ler
- Gözenekli derecelendirilmiş FDM'ler
- Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM'ler

Malzemenin kimyasal bileşimi mekânsal konumuna göre dereceli farklılaşan malzemelere kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM'ler denir. Şekil 3.4'te kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM'e ait örnek görülmektedir. Bu tek fazlı veya çok fazlı malzeme şeklinde olabilir. Tek faz içinde kimyasal elementlerin dağılımının dereceli değişimi FDM'nin oluşumuna sebep olur. Termodinamik sınırlamalar ve faz diyagramına göre bazı malzemeler diğer bir malzemeye ilave edildiğinde, diğer malzemeye ilave edilen malzeme, türlü bileşim ve karıştırma şartları altında bu malzeme içinde çözünür olacaktır. Bu tip malzeme az yaygın olup çözünürlüğünden dolayı tek fazlı malzeme olarak isimlendirilir fakat çeşitli kimyasal bileşime sahiptir. Çok fazlı bileşime sahip olan FDM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal bileşim ve fazlar malzemenin yığın hacmine göre farklılık gösterecek biçimde imal edilmiştir. Malzemenin bileşimi bir malzemedan bir başka malzemeye göre farklılaşıp, tasarlanan FDM'nin hedeflenen uygulamada başarılı olmasına yardımcı olmak için çeşitli kimyasal bileşime haiz çeşitli fazlar ile sonuçlanacaktır [43,47].



Şekil 3.4. Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM [47].

Malzemedeki porozitenin yığın malzemenin mekânsal konumundaki değişikliklerle değiştiği FDM'ye gözenekli derecelendirilmiş FDM denir. FDM'de istenen özelliğe göre gözenegin boyutu ve şekli tasarlanıp ve değiştirilir. Gözenekli derecelendirilmiş FDM'ler biyomedikal uygulamalarda çok önemlidir. Dereceli gözeneklilik implant ve çevre dokuların birleşmesine yardımcı olur. Ayrıca dereceli gözeneklilik implantın ağırlığını hafifletir ve implanta ait malzemenin elastikiyet modülünü insan dokusu ile aynı olacak biçimde geliştirilmesini sağlar. Şekil 3.5'te gözenekli derecelendirilmiş FDM'e ait şematik resim görülmektedir [43].



Şekil 3.5. Gözenekli derecelendirilmiş FDM'ye ait şematik resim.

Bir başka FDM türü de mikro yapısını gerekli özellikleri elde etmek için dereceli olarak değiştirir. Bu FDM'ler mikroyapısı derecelendirilmiş FDM'ler olarak

isimlendirilir. Mikroyapı derecelendirme katılaşma esnasında örneğin yüzeyi çok sert özellikli malzeme imal edilirken malzemenin yüzeyi ısıtılarak yapılarak elde edilebilir. Benzer malzemenin çekirdeğinin ağır ağır soğumasına müsaade ederek malzemenin yüzeyinden iç kısmına doğru çeşitli mikro yapı oluşumu görülür. Ayrıca kontrollü ısıtma işlemi ile de mikro yapısı derecelendirilmiş FDM'ler üretilir [43]. Şekil 3.6'da mikro yapısı derecelendirilmiş FDM'e ait örnek görülmektedir.

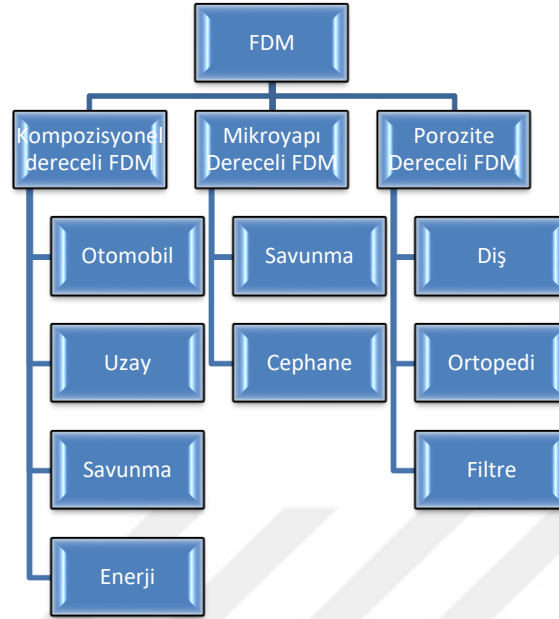


Şekil 3.6. Mikro yapısı derecelendirilmiş FDM [46].

3.2.2. FDM'lerin Kullanım Alanları

İlk önce FDM'nin mühim bir malzeme olduğu termal uygulama alanında keşfedilmiştir. 1980'li yıllarda Japonya'da uzay araçlarının yüksek derecelerdeki yüzey sıcaklığından korumak ve karşı koymak amacı ile termal bir bariyer oluşturması için tasarlanmıştır [48].

İnsanoğlunun hemen hemen tüm çalışma alanlarında FDM'ler önemli özellikleri nedeniyle tercih sebebi olmuştur. FDM'lerin gelecekte başka uygulamalarda yararlanmak üzere ciddi bir potansiyeli olmakla birlikte şu anda bir dizi endüstride faydalanılmaktadır. FDM'nin kullanıldığı uygulama alanları içinde; otomobil, havacılık, savunma, biyomedikal, denizcilik, enerji, opto-elektronik, termoelektronik, elektrik ve elektronik yer almaktadır. Şekil 3.7'de çeşitli FDM türleri ve onlara ait uygulama alanları gösterilmektedir [43].



Şekil 3.7. Çeşitli FDM türleri ve onlara ait uygulama alanları gösterilmektedir [43].

FDM'ler zorlu çalışma şartları altındaki uygulamalarda büyük umut vaat etmektedir. Örneğin FDM'ler roketlerde ısı kalkanı olarak, nükleer reaktör santralinde füzyon reaktörlerinin plazma kaplaması olarak, ısı motoru parçaları olarak, ısı eşanjörü boruları olarak, medencilik sektöründe iri ve ağır olan aşındırıcı özelliğe haiz cevher parçacıkların nakliyesi için aşınmaya dayanıklı kaplama malzemesi olarak, ve elektrik uygulamalarında yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir [43].

FDM'ler metal-seramik bağlarda termo-mekanik uyumsuzluklarını en aza indirmede kusursuzdur ve bu durum sayesinde bağ ayrışmasının önüne geçmede fayda sağlar. FDM'lerin gelecekte talepte bulunacak çalışma koşulları arasında sıradışı termal, kimyasal ve mekanik özelliklerin zorunlu olduğu ve sert iş ortamı şartlarında çalışmasını sürdürecektir uygulamalar olacaktır. FDM'nin sahip olduğu bu potansiyel gelecekte tokluk ve sertlik gibi birbirine zıt görevlerin bir arada kullanılacağı mühendislik ve yapısal uygulamaları kapsar. Üretim maliyetlerinin azalması ile birlikte mühendislik alanında önemli bir malzeme olan FDM'lerin gelecekte faydalanılacak uygulama alanı genişleyecektir [43].

3.2.3. FDM'lerin Üretim Metotları

Havacılık, otomotiv, imalat, biyomedikal ve madencilik sanayisi gibi mühendislik bilim dalında FDM'lerin çok fazla uygulama alanı bulunmaktadır. Farklı uygulamalar, FDM'lerin ilerlemesi için yapılan çok farklı projeler üzerinde gerçekleştirilen derinlemesine araştırmalara önemli derecede katkı sağlamıştır. Fakat dereceli malzeme yapılarından etkili olarak yararlanmak için FDM üretimi kritik derecede önem içermektedir. Bu sebeple türlü mühendislik uygulamalarında, üstün özelliklere sahip bu malzemelere olan ihtiyacın giderilmesi için seneler içinde sayısız FDM üretim yöntemi geliştirilmiştir. FDM üretim metotları arasında toz metalürjisi, kimyasal buhar biriktirme, santrifüj döküm, ve fiziksel buhar biriktirme gibi bir sürü yöntem vardır [49]. Bu üretim metotları aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

- Gaz tabanlı yöntemler
 - Kimyasal buhar biriktirme/infiltrasyon yöntemi (CVD/CVI)
 - Isıl püskürtme yöntemi
 - Yüzey reaksiyon yöntemi
- Sıvı tabanlı yöntemler
 - Santrifüj döküm yöntemi
 - Yanma tepkimeleri yöntemi
 - Şerit döküm yöntemi
 - Slip döküm yöntemi
 - Jel döküm yöntemi
 - Elektroforetik bırakıntı yöntemi
 - Yönlü katılaşma yöntemi
 - Sedimentasyon yöntemi
- Katı tabanlı yöntemler
 - Kıvılcım plazma sinterleme yöntemi

- Toz metalürjisi yöntemi
- Biyo polimerik tabanlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar
 - Dondurarak kurutma yöntemi
 - Sıkıştırma kalıplama yöntemi
 - Elektro-eğirme yöntemi

FDM'lerin üretiminde en uygun ve geçerli yöntem toz metalürjisi yöntemidir. Seramik, metal ve kristal flaman gibi toz malzemeler bilyeli değirmen gibi farklı karıştırıcılardan faydalanılarak karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Kalıp içine tabakalar halinde yerleştirilen karışımlar soğuk izostatik olarak preslenerek ardından sinterlenir [12].

BÖLÜM 4

TOZ METALÜRJİSİ

4.1. TOZ METALÜRJİSİNİN ÖZELLİKLERİ

Geleneksel imalat yöntemi ile imal edilen malzemelerden talep edilen tüm özellikleri elde etmek güç olduğu için, bilim adamları günlük yaşantımızı basitleştirecek yüksek özellikli ve daha az maliyetli malzeme imalatı için araştırmalarda bulunmuşlardır. Geleneksel imalat yöntemlerine göre toz metalürjisi yöntemiyle imalat yüksek esneklik sunar. Bu yüzden diğer imalat yöntemleri ile imal edilen sayısız malzeme ve bitmiş parça için toz metalürjisi yöntemi daha rekabetçidir. Toz metalürjisi geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek malzemelerin üretimi için olanak sağlar [50,51].

Toz metalürjisi, tozlara çeşitli işlemler uygulanarak nihai ürün şekline yakın yararlı mühendislik ürünleri elde etmeyi amaçlayan bir imalat tekniğidir [52,53]. Bir başka ifade ile toz metalürjisi yöntemi; tozların imal edilmesi, imal edilen tozların bir karıştırıcı vasıtası ile homojen karıştırılması, karıştırılan tozların bir kalıp içine yerleştirilerek bir pres vasıtası ile sıkıştırılması, sıkıştırılan ürünün belirli bir sıcaklık ve zamanda sinterlenerek parçacıklar arasında bağ oluşturup nihai ürünün elde edilmesi işlemidir [54–56].

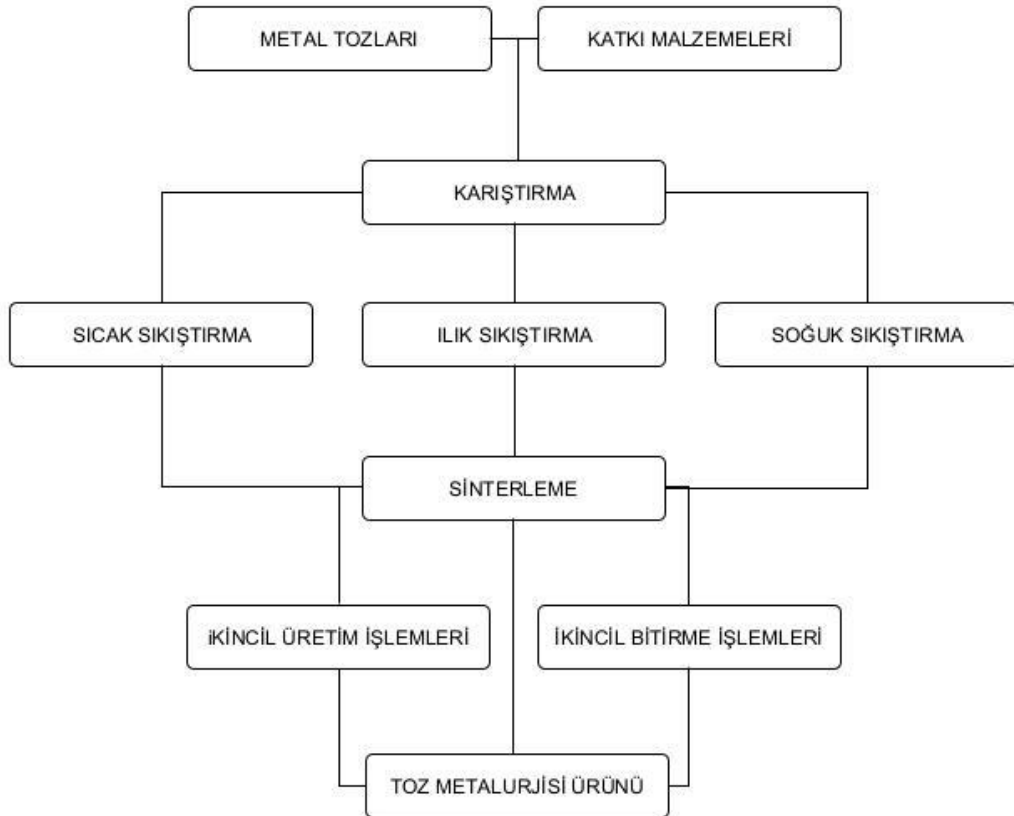
Toz metalürjisi, malzeme ve enerjiden iktisat sağlayarak yarış içinde olduğu farklı seri imalat metotlarına üstünlük sağlar. Bu üstünlüğe ilave olarak geleneksel malzemeleri ikame edebilecek sinterleme özellikleri makbul olan malzemelerin elde edilmesinde ciddi rol üstlenmektedir [57]. Toz metalürjisi Mısır'daki piramitler kadar eski bir tarihe sahiptir. M.Ö. 3000'li yıllarda Mısır firavunu mezarında altın tozu ile süslenmiş hançerler bulunmuştur. İnkalar değerli metalleri kullanarak toz metalürjisi yöntemi ile eşyalar yapmışlardır. M.S 4. yüzyılda Delhi'de 5-6 ton ağırlığındaki süslenmiş sütunlar demir parçalarının sıcak dövülmesiyle imal edilmiştir. 1800 yılların sonunda

akkor lamba filamanın imalatı ile ilk modern toz metalürjisi ürünü üretilmiştir. Bu proses 1915-1930 yıllarda Almanya'da karbür kesici takımların imal edilmesi, Amerika'da 1950-1960'larda toz metalürjisi yöntemi ile dövme ve dispersiyonu güçlendirilmiş ürünler imal edilmesi, Amerika'da ve İngiltere'de 1990'larda intermetalikler ve MMK malzemelerin üretimi ile devam etmiştir [52,58,59].

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen ürünler üç kategoriye ayrılabilir. Birinci kategoride, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen düşük maliyetli ürünler yer almaktadır. Düşük maliyetli ürünler sofistike bir geometriye sahiptir. Birinci kategoriye ait örnekler arasında otomotiv sanayisindeki ürünler verilebilir. Bu ürünler; bujiler emisyon algılayıcıları, piston kolları, katalitik konvektörler, zincir dişlisi, supap yuvaları, darbe emiciler, motor zamanlama parçaları ve yataklardır. İkinci kategoride, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen uygun maliyetli ve yüksek performanslı ürünler yer almaktadır. Bu kategoriye; sermetler, fonksiyonel derecelendirilmiş suni kemikler, tungsten karbür kesici takımlar, elmas kesici takımlar ve gözenekli filtreler misal olarak verilebilir. Üçüncü kategoride ise, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen gelişmiş mekanik özelliklere sahip ürünler yer almaktadır. Bu kategoride; havacılık ve savunma sanayinde kullanılan ürünler misal olarak verilebilir [52,58].

Kompozit malzemelerin sıvı hal yöntemi ile üretilmesi sırasında ortaya çıkan takviye elemanının matris içinde homojen dağılmaması ve matrisin takviye elemanını ıslatabilme problemleri toz metalürjisi tekniği ile giderilmiştir. Yine kompozit malzemelerin üretiminde sıvı hal üretim yöntemine göre toz metalürjisi yönteminin tercih edilmesi sayesinde üretilen parçaların üstün mekanik özelliklere sahip olması sağlanmaktadır. Toz metalürjisi yönteminde üretimin düşük sıcaklarda gerçekleşmesi, takviye elemanının matrisin içinde homojen dağılması, kompozit yapının denetiminin olası olması gibi sebeplerden parçacık takviyeli MMK'lerin üretiminde tercih nedeni olmaktadır [60]. Toz metalürjisi işlem basamakları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Toz metalürjisi üretim yöntemine ilk önce istenilen boyut ve dağılıma sahip metal veya alaşım tozlarının imalatı ile başlanmaktadır. İmal edilen metal veya alaşım tozlarına uygun katkı maddeleri ve kayganlaştırıcılar eklenerek karıştırma işlemine tabi tutulmaktadır. Karıştırılan malzemelerin homojen bir şekilde harmanlanması sıkıştırma işlemi esnasında kolaylık sağlar. Harmanlanmış toz bir kalıbın içine

yerleştirilir ve daha sonra kalıp üzerine zımba yerleştirilerek pres vasıtası ile sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Sıkıştırma yöntemi olarak birkaç metot vardır. Bu yöntemler genel olarak sıcak, ılık ve soğuk sıkıştırma metotları olarak sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerin her birinde kalıp sıkıştırma, basınçsız sinterleme, izostatik ekstrüzyon, enjeksiyonlu kalıplama, haddeleme, soğuk şekillendirme, vs. gibi daha fazla işlem vardır. Sıkıştırma işlemine tabi tutulan malzemeye pellet adı verilmektedir. Pellet malzeme istenilen parçanın şekline sahiptir, fakat tozlar arasında bağ oluşmadığından istenilen mukavemete sahip değildir. Tozlar arasında bağ oluşturarak istenilen mukavemeti sağlamak amacı ile pellet koruyucu atmosfere sahip bir fırında sınırlı bir süre tutularak ısıtılır. Bu işlem sırasında pellet içindeki yağlayıcılar buharlaştırılır. Bu işlem sinterleme olarak adlandırılır. Sinterleme işlemi sonrasında toz metalürjisi yöntemi ile imal edilen parçaya ikincil imalat işlemleri olarak tekrar presleme, damgalama, boyutlandırma, tekrar sinterleme, dövme, yeniden haddeleme yapılabilir veya ikincil bitirme işlemleri olarak ısıl işlemler, kaplama, buharla kaplama, yuvarlama, bilyeli dövme, yağ emdirme gibi işlemler yapılabilir [61].



Şekil 4.1. Toz metalürjisi işlem basamakları [61].

4.1.1. Toz Metalürjisinin Avantajları

Toz metalürjisi yönteminin birçok avantajı aşağıda özetlenmiştir [38,62]:

- Toz metalürjisi imalat yöntemi işleme zamanını en aza indirir veya ortadan kaldırır.
- Toz metalürjisi imalat yöntemi malzeme kaybını en aza indirir veya ortadan kaldırır.
- Toz metalürjisi imalat yöntemi yakın boyutlu toleransa sahip malzemelerin üretilmesini sağlar.
- Toz metalürjisi imalat yöntemi ile çok çeşitli alaşımlara sahip malzeme imal edilebilir.
- Toz metalürjisi imalat yöntemi ile iyi yüzey kalitesine sahip parça imal edilebilir.
- Toz metalürjisi imalat yöntemi ile diğer metal işleme prosesleriyle pratik olmayan veya imkânsız olacak karmaşık veya benzersiz şekilli malzeme üretilmesi mümkündür.
- Toz metalürjisi yöntemi ile kendi kendine yağ emen yataklar ve filtreler vb. gibi gözenekli parçalar belirli gözenek derecesinde imalatı gerçekleştirilebilir.
- Toz metalürjisi yöntemi orta ve yüksek hacimli parçaların üretim gereksinimlerine uygundur.
- Toz metalürjisi yöntemi ile kritik uygulamalarda uzun vadeli performans ve güvenilirlik sağlayan uygun maliyetli parçalar üretilir.

4.2. TOZ ÜRETİMİ

Toz metalürjisi ile üretilen parçaların hammaddesi tozlardır. Toz metalürjisinde kullanılan tozlar saf elementler ve elemental karışımlar önceden hazırlanmış tozlar olabilir. Başlangıç malzemesinin seçimi, ürün tipinden ve çok az bir miktar kullanılacak imalat işleminden etkilenir. Toz yapmak için çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur [63]. Bu üretim yöntemleri aşağıda sıralanmıştır [64].

- Mekanik yöntemle üretim
- Elektrokimyasal yöntemle üretim
- Termokimyasal reaksiyon ile üretim
- Faz değişimi ve atomizasyon

4.3. TOZ MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ VE KARAKTERİZASYONU

Tozun nitelikleri imal edilen son ürünün özelliklerini etkiler. Toz metalürjisinde faydalanılan tozlar birçok özellikte ayırt edilir ve her bir ayırt edici özellik mikro yapısı, ürünün bileşimi ve son özellikleri üzerinde kendi etkisine haizdir. Tozların önemli ayırt edici özellikleri tozun şekli, tozun mikro yapısı, tozun boyutu, ve spesifik yüzey alanıdır. Bu ayırt edici özellikler tozların görünür yoğunları, sıkıştırılabilirlik ve akışkanlık gibi yığın özelliklerini tayin eder, buda pelletin niteliklerini ve ayrıca sinterleme yöntemi ile imal edilmiş malzemenin sertlik ve mukavemet gibi özelliklerini tayin eder. Bu yüzden toz metalürjisi yöntemi ile başarılı bir imalat yapılabilmesi için detaylı bir toz karakterizasyonu yapılmalıdır. Metal tozların karakteristik özellikleri aşağıdaki ifadelerin birini veya daha fazlasını kapsar [63]. Bunlar;

- Kimyasal özellikler; saflık ve bileşim
- Fiziksel özellikler; toz partikülünün özgül yüzey alanı, toz partikülünün boyutu ve dağılımı, toz partikülünün şekli, toz partikülünün sıkıştırılabilirliği, görünür yoğunluğu, sıkıştırma yoğunluğu ve tozların akış hızı

şeklindedir.

4.3.1. Kimyasal Özellikler

Kimyasal özellik denildiğinde akla tozu oluşturan bileşenler ve saflığı gelmektedir. Belli kimyasal analiz yöntemleriyle tozların bileşimleri ve içerisinde yer alan istenmeyen maddeler saptanabilir [65].

Bir tozun kimyasal bileşimi sıkıştırma, tahliye kolaylığı ve yoğunlaştırma derecesi gibi ileriki işlemleri etkileyen önemli bir faktördür. Bir de sinterleme boyunca pelletin iç

kısmı ile birlikte pellet ve sinterleme atmosferi arasında birçok kimyasal reaksiyon mümkündür. Bu reaksiyonların tipi ve kapsamı, tozun kimyasal bileşimine bağlıdır. Tozun kimyasal bileşimi sinterleme sıcaklığını, kullanılacak sinteleme atmosferinin türünü ve son olarak sinterlenmiş malzemenin özelliklerini belirler. Kimyasal analiz, mevcut elementlere ek olarak, metalik ve metalik olmayan kirliliklerin miktarını da vermelidir [63].

Saflık, tozların temel özelliklerindendir. Tozlardaki safsızlıklar, kullanıcıya kolayca çözölemeyen problemler ortaya çıkarır. Ayrıca bazı metal tozlar ile nihai üründe süneklik, çekme ve kayma mukavemeti elde etmek için partikül yüzeyinin temiz olması mutlak bir zorunluluktur [66]. Metal tozlarındaki safsızlıkların elementel formda veya kimyasal bir bileşik formunda olup olmadığını bilmek önemlidir. Örneğin indirgenmiş demir tozundaki silikon silika formunda safsızlık olarak bulunur. Diğer seramiklerde ve oldukça atıl bileşiklerde olabilir; bunlar asitte çözünmeyen bir şekilde rapor edilebilir [67].

Hidrojen kaybı, hidrojen tarafından oksitleri kolayca indirgenebilen demir, tungsten, bakır, nikel, vb. gibi metal tozlarındaki oksijen katışıklığının seviyesini bilmek için yaygın bir parametredir. Ancak, bu değer bitmemiş oksit indirgenmesinden dolayı hatalı olabilir ve bazı oksitler hiç indirgenmeyebilir. Tozun oksijen içeriğini azaltmanın etkili bir yolu indirgeyici bir atmosferde tavlama olmasıdır. Bu parametreleri belirlemeye yönelik prosedürlerin detayları, Metal Toz Endüstrileri Federasyonu (MPIF) ve Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) standartlarından elde edilebilir [67].

Pratik olarak metal tozun saklanması esnasında atmosferden önemli miktarda su buharı ve gaz emer. Bu tür emilim, sıkıştırma, sinterleme ve muhtemelen sinterlenmiş malzemede metaller üzerinde yüzey oksitlerinin oluşumuna yol açabilir. Bu kirlilik miktarı parçacık boyutunun azalması ve yüzeyin artan kimyasal aktivitesi ile artar [67].

Tozların kimyasal bileşimi kimyasal yöntemlerle analiz edilebilir. Bileşim analizi oksijen, hidrojen, sülfür, karbon gibi safsızlıklar ve silikatlar gibi diğer çözünmeyen maddelerin gaz halindeki safsızlıklarının tahminini içerir. Farklı kirlilik biçimlerini

analiz etme teknikleri farklıdır. Eleman katı çözültide mevcutsa, bazen sinterleme sırasında kimyasal reaksiyonlara maruz kalabilir. Genel olarak, kirlilik derecesi artan saflıkla, ince partikül boyutları ve yüksek yüzey alanına sahip şekillerle (düzensiz şekil) artar [63].

4.3.2. Fiziksel Özellikler

Tozların; tane boyutu, tane şekli, tane yapısı, özgül yüzey alanı, görünür yoğunluk ve akış hızı gibi özellikleri fiziksel özelliklerin belirlenmesini sağlar. Tozların preslenmesinde ve sinterlenmesinde bu özellikler yakından ilgilidir [68].

4.3.2.1. Toz Partikülünün Özgül Yüzey Alanı

Birden fazla toz partikülünün dış yüzeyinin ortalama ölçüsü olan yüzey alanının birden fazla toz partikülünün ağırlığına bölünmesi ile özgül yüzey alanı bulunur. Özgül yüzey alanının birimi m^2/g 'dır [69]. Toz partiküllerinin birbiriyle veya bulundukları çevre ile gerçekleştirdikleri tüm reaksiyonlar onların yüzeyinden başlar. Spesifik yüzey alanı parçanın sinterlenebilirliğini etkiler. Çok büyük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip amorf bir toz partikülünün özgül yüzey alanı da çok büyük olabilir [67]. Toz partiküllerinin yüzey alanı ölçümünde iki yöntemden faydalanır. Bu yöntemler gazların soğurulması ile yüzey alanı ölçme ve gaz geçirgenliği ile toz partiküllerinin yüzey alanını ölçmedir. Gazların soğurulması ile yüzey alanı ölçme yönteminde temiz toz elde edilmesi için ilk önce toz vakum altında ısıtılır. Elde edilen temiz toz değişen kısmi basınçlarda yüzeye tutunabilen buharlara tutulur. Tozun yüzeyine gaz tutunma miktarına bağlı olarak kısmi basınç ölçümleri yapılır. Gaz moleküllerinin tozun yüzeyinde belirli bir alanı içine aldığı düşünülerek, tozun yüzey alanı; gazların toz yüzeyine tutunma davranışına göre hesaplanır. Gaz geçirgenliği ile toz partiküllerinin yüzey alanının ölçme yönteminde toz partikülleri paketlenir. Bu paketlenen tozların içinden giriş basıncı bilinen bir gaz geçirilir. Paketin çıkış basıncıda belirlendikten sonra gaz akış hızı ölçülerek toz yüzey alanı belirlenir [69].

4.3.2.2. Toz Partikülünün Boyutu ve Dağılımı

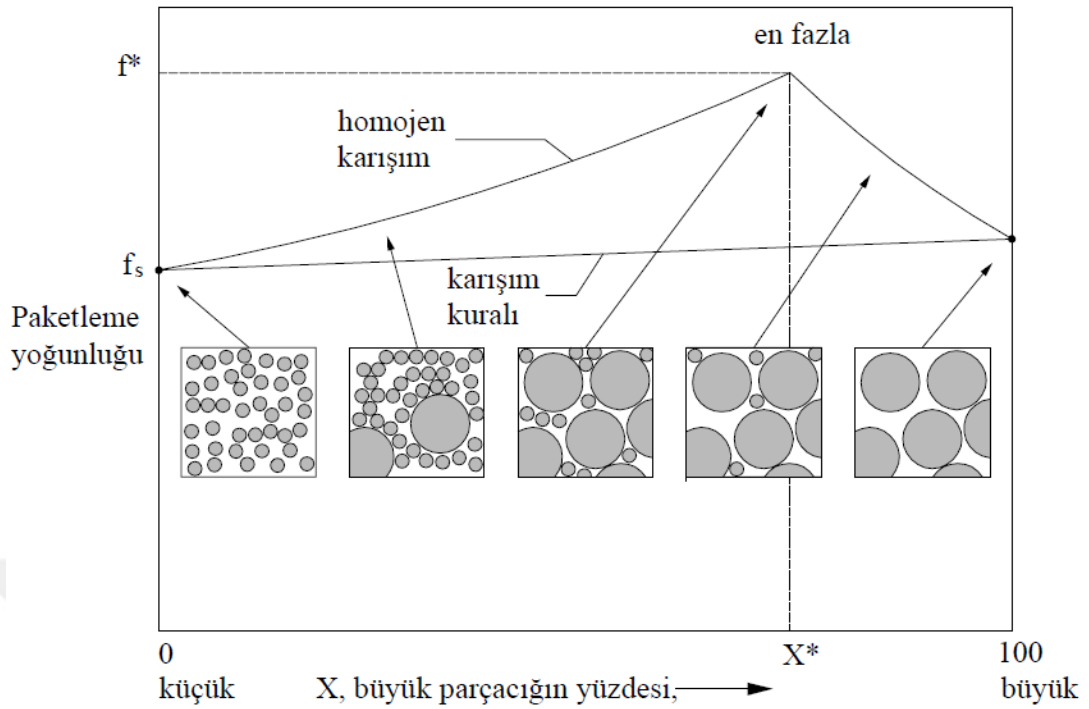
Bir toz partikülünün kapladığı toplam alana toz partikülün boyutu denir. Toz metalürjisinde toz boyutu büyük bir öneme sahiptir. Toz boyutu pelletin mukavemetini, topaklanmanın yanı sıra pelletin yoğunluğunu, pelletteki sıkışmış gazların dışarı atılmasını, boyutsal kararlılık, akış ve karışım özellikleri gibi karakteristiklerini etkiler. Toz metalürjisinde ince metal tozları zayıf görünür yoğunluk, zayıf akış oranları ve iyi sinterlenebilirlik özelliklerine sahip iken kaba metal tozları iyi görünür yoğunluk, iyi akış oranları ve zayıf sinterlenebilirlik özelliklerine sahiptir [63].

Tozlarda boyut küçüldükçe yüzey alanı artar böylece tozlar arasındaki sürtünme miktarı da artıracaktır. Bu nedenle ince tozların görünür yoğunluğu kaba tozlara göre daha düşük olacaktır. Metal ve seramik esaslı kompozitlerde metal olan matris malzemesinin partikül miktarı seramik takviye malzemesi miktarına göre daha fazla olacaktır. Bu durumda metal-metal temasının olasılık oranı metal-seramik teması ve seramik-seramik temasının olasılığına göre daha fazladır [70].

Tozlarda boyut küçüldükçe toz parçacıkları arasında Van der Waals kuvvetleri artar. Bu kuvvetler tozların akıcılığını azaltır, görünür yoğunluğun düşmesine neden olarak topaklanma oluşumuna neden olur [71].

Boyutu tek düze tozlardan meydana gelen sistemlerin yoğunluğu boyutu iki veya daha fazla çeşitten oluşan sistemlerin yoğunluğuna göre daha düşük olur. Boyutu iki çeşitten oluşan sistemlerde küçük boyutlu tozlar büyük boyutlu tozların arasına girerek büyük boyutlu tozlar arasındaki boşlukları doldurur. Bu durum yoğunluğun daha yüksek olmasını sağlar [72].

Toz metalürjisinde kullanılan tozların boyutları 0,1 ila 1000 mikron arasındaki ebatlarda değişir. Çeşitli yöntemlerle üretilen tozların boyutları bir milimetreden birkaç mikron aralığında olabilir. İşlem parametrelerinin sıkı kontrolü ile dar boyut dağılımını sağlamak mümkün olabilir, fakat, bir toz partisinde tek bir partikül boyutuna sahip toz elde edebilmek mümkün değildir [63]. Farklı toz boyutlarının görünür yoğunluğa etkisi Şekil 4.2’de görülmektedir [69].



Şekil 4.2. Farklı Toz boyutlarının görünür yoğunluğa etkisi [69].

4.3.2.3. Toz Partikülünün Şekli

Toz partikülünün şekli, "toz partikülünün harici yüzeyini meydana getiren noktalar arasındaki tanınmış ilgi örüntüsü" olarak tanımlanabilir. Toz partikülünün şekli tozun paketlenabilirliğine, akış kabiliyetine ve sıkıştırılabilirliğine tesir eder [63,69].

Toz partikülünün şekli bileşenin nihai özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin düzensiz şekilli toz partiküllerinin görünür yoğunluk ve akış hızı düşük fakat presleme ve sinterlenme özellikleri iyidir. Diğer taraftan küresel şekilli toz partiküllerinin görünür yoğunluk ve akış hızı en fazla fakat preslenme ve sinterlenebilirlik özellikleri düşüktür. Farklı toz partikül şekilleri arasında en ideal olanı küresel şekle sahip olan toz partikülleridir [63].

Toz partiküllerinin şekli birkaç metotla belirlenebilir. Optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, transmisyon elektron mikroskobu ve görüntü tahlil cihazı kullanılarak toz partikülünün şekli değerlendirilir. Toz metalürjisinde karşılaşılan toz

partiküllerinin şekli tabloda gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de toz partiküllerinin şekilleri verilmiştir [63].

Çizelge 4.1. Toz partiküllerinin şekilleri [63].

İğnemsî		Yuvarlatılmış	
Çubuk gibi (Düzensiz)		Açılı	
Dendritik		Düzensiz	
Yapraksı		Gözenekli	
Yuvarlak			

4.3.2.4. Toz Partikülünün Sıkıştırılabilirliği

Sıkıştırılabilirlik; tozlara form kazandırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Tozun basınca karşı verdiği tepki tozun önemli bir özelliğidir. Bir toz grubuna tatbik edilen yük altında tozlarda meydana gelen yoğunlaşmayı ölçer [69]. Bu durum Eşitlik 4.1 ile yoğunlaştırma parametresi olarak hesaplanır.

$$\text{Yoğunlaştırma parametresi} = \frac{\rho_h - \rho_g}{\rho_t - \rho_g} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de “ ρ_h ; Ham yoğunluğu”, “ ρ_g ; Görünür yoğunluğu”, “ ρ_t ; Teorik yoğunluğu” ifade eder.

Sıkıştırılabilirlik özelliği yüksek olan tozlardan imal edilen ürünlerin ham yoğunlukları da yüksek olur. Sıkıştırılabilirliği etkileyen etmenler;

- Metal tozlarının sertliği yükseldikçe sıkıştırma sırasında toz partiküllerinin deformasyon kabiliyeti düşeceği için sıkıştırılabilirliği olumsuz yönde etkiler,
- Düzensiz şekilli toz partikülleri sıkıştırılabilirliği düşürür,
- İç gözenekliliğe sahip tozlar sıkıştırma sırasında bünyesinde havanın tutulmasına sebep olur. Gözeneğe sahip olmayan tozların sıkıştırılabilirlik özellikleri yüksektir,
- Boyut dağılımı geniş olan toz partiküllerinin sıkıştırılabilirliği yüksektir.
- Yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özelliğine sahip metalik özellik göstermeyen örneğin indirgenmiş oksitler gibi takviye elemanları eklenmesi sıkıştırılabilirliği azaltır,
- Katı yağlayıcı kullanılması sıkıştırılabilirliği pozitif yönde etkiler,

şeklinde sıralanır.

Metal tozlarına, grafit ve sülfür gibi elementlerin tozlarının eklenmesi sıkıştırılabilirliği olumsuz etkidiği rapor edilmiştir [63,73].

4.3.2.5. Görünür Yoğunluk ve Sıkıştırma Yoğunluğu

Tozların görünür yoğunluğu birim hacimdeki gevşek tozun kütlesi şeklinde ifade edilir, birimi ise g/cm^3 'tür. Görünür yoğunluk aşağıda belirtilen sebeplerden dolayı bir tozun en önemli karakteristiklerinden biridir:

- Sıkıştırma takımlarının boyutunu ve gevşek halde olan tozu sıkıştırmak ve yoğunluğunu artırmak için gerekli pres hareketinin büyüklüğünü belirler,
- Başlangıç tozunun işlenmesi ve taşınmasında faydalanan ekipman seçimini belirler,
- Sinterleme esnasında tozun davranışını etkiler,
- Görünür yoğunluğa direkt olarak etki eden diğer özellikler, parçacık boyutu, parçacık şekli, yüzey alanı, katı malzemenin yoğunluğudur.

Görünür yoğunluk, hal akış ölçer ile belirlenir. Bilinen hacme (25 ml) sahip olan huni metal tozu ile tamamen doldurulur. Huniden akan toz huninin altındaki kabı doldurur. Toz akışı bitince kap tartılarak görünür yoğunluk belirlenir.

Genelde gevşek yapıya sahip olan toz titreştirilir veya tepilir. Bu işlem sayesinde gevşek halde bulunan tozun yoğunluğu artar ve her zaman görünür yoğunluktan büyük olur. Gevşek tozun yoğunluğundaki en büyük artış ilk tepme anında meydana gelir ve sonunda yoğunluk sabitlenir. En son oluşan kararlı yoğunluğa sıkıştırma yoğunluğu denir ve parçacıklar arasındaki sürtünme kuvvetine bağlıdır. Parçacıklar arasındaki sürtünme kuvveti ne kadar büyükse tepme sırasındaki yoğunluk artışı o kadar büyük olur [67].

4.3.2.6. Tozların Akış Hızı

Toz metalürjisi yöntemi ile imalat yapan firmalarda, üretim esnasında tozun kolay akması önem arz eder. Parça üretiminin hızlı olabilmesi, parça üretimi yapılan kalıplara tozun kolay bir şekilde akmasıyla gerçekleşebilir. Tozun akış hızı arttıkça tozun kalıba dolma zamanı kısalır. Tozun akış hızı ile görünür yoğunluk birbiri ile ilişkilidir. Yüksek görünür yoğunluğa sahip olan tozların akış süreleri kısadır [50].

Toz akış hızı “Hall” akış ölçerden yararlanılarak bulunabilir. Hall akış ölçerde akış hızını ölçmeden önce 50 gr toz 100 °C sıcaklıkta bir saat süre ile kurutulur. Kurutma işlemi bittikten sonra tozlar hall akış ölçere doldurulur ve tozun akış süresi belirlenir. Tozun akış hızı; toz kütlesinin (gr), zamana (sn) bölümü ile bulunur. Akış özelliği iyi olmayan tozların akış hızını belirlemek için şev açısından faydalanılır. Şev açısı; belirli koşullar altında tozun yatay bir zemine serbest olarak dökülmesiyle meydana gelen yığının taban açısıdır [50].

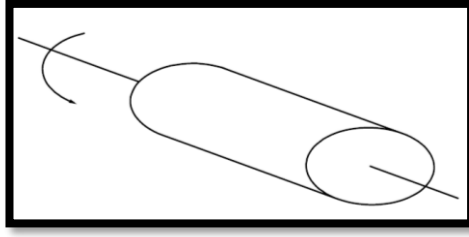
4.4. TOZLARIN HARMANLANMASI VE KARIŞTIRILMASI

Kimyasal bileşimleri aynı olan tozların birbirleri içinde karıştırılmasına tozların harmanlanması denir. Harmanlama işlemi ile hedeflenen taşıma ve sonrasındaki işlemlerle heterojen hale gelen farklı ebatlardaki parçacıkların dağılımını tekrar

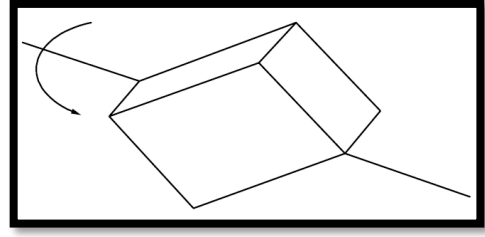
homojen hale getirmektir. Farklı kimyasal kompozisyonlara sahip tozların birbiri içinde homojen dağıtılması işlemine de tozların karıştırılması denir [74]. Yapısal uygulamalar için alüminyum esaslı malzemelerin toz metalürjisi kullanılarak tozların karıştırılması ve harmanlanmasını etkileyen bazı faktörler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur [75]. Tozlara ait fiziksel karakteristikler:

- Atmosfer koşulları ve nemlilik,
- Karıştırıcının içinde bulunan toz hacmi,
- Karıştırma hızı,
- Karıştırma yapılan süre,
- Karıştırıcı ebatı,
- Dönme hızı.

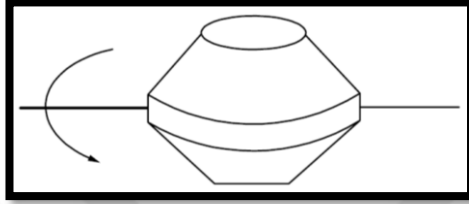
Toz metalürjisi yönteminde toz üretiminden sonraki önemli bir kademesi de, tozların homojen bir şekilde karıştırılmasıdır. Metalik tozlar homojen bir karışım sağlamak için yağlayıcılar ve ihtiyari alaşım elementleri ile karıştırılır. Karışım içerisinde yağlayıcı oranı genellikle % 0.5-1.5 arasındadır. Karışım da yağlayıcı olarak genellikle stearik asit, metalik stearatlar, çinko stearat, ve parafin kullanılmaktadır. Karışım da yağlayıcı kullanarak; toz partiküllerinin zımba yüzeyleri ile kalıp duvarları arasında meydana gelen sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma esnasında zahmetsiz bir biçimde kaymasını sağlamak amaçlanmıştır. Karıştırmada faydalanılan bazı karıştırıcı tipleri Şekil 4.3’de verilmiştir [53].



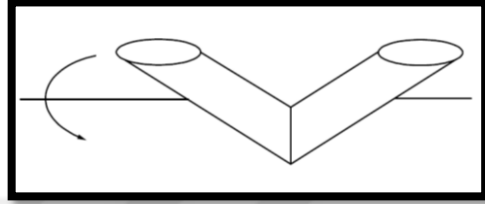
(a)



(b)



(c)



(d)

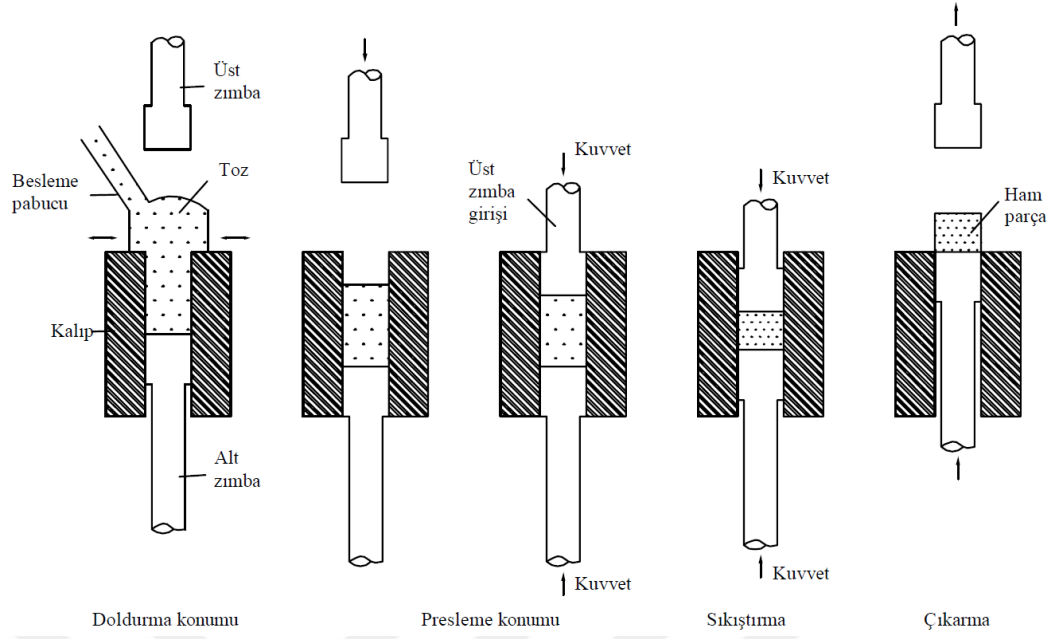
Şekil 4.3. Karıştırmada kullanılan bazı karıştırıcı tipleri a) Silindirik b) Kübik c) Çift taraflı konik d) V şekilli [53].

Tozların taşınması esnasında meydana gelen titreşimler sonucunda büyük ebatlı partiküller yüzeyde, küçük ebattaki tozlar ise tabanda birikir. Böylece büyük partiküller ve küçük partiküller ayrı ayrı yerlerde yoğunlaşır. Partiküllerdeki boyutsal segregasyonlardan dolayı görünür yoğunlukta azalma oluşur ayrıca sıkıştırma ve sinterleme gibi sonraki aşamalarda farklı sorunlar meydana gelebilir. Partikül boyutu $100\ \mu\text{m}$ 'dan daha küçük tozlarda sürtünme kuvveti daha fazla olduğu için boyutsal segregasyon daha az görülür. Tozların harmanlanması yapılarak partiküllerin boyutsal segregasyonunun önüne geçilir [74].

Toz karıştırma yönteminde oluşturulacak yeni karışımın her bölgesinde aynı özelliği göstermesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple karışımda kullanılacak ön alaşımlanmış tozların veya ham tozların her bölgesinde eşit miktarda olması zorunludur. Yeni karışımın homojenliği ise karışımın çeşitli bölgelerinden alınan numunelerin ısı kapasitesi, yoğunluk ve elektriksel iletkenlik testleri vasıtası ile ölçülebilir. Aynı zamanda karışımın homojenliğinin tespiti için mikroyapı incelemelerinden faydalanılabilir [74].

4.5. TOZLARIN SIKIŞTIRILMASI

Serbest formda bulunan toz partiküllerinin bir basınç altında istenen şekli alabilmesi için yapılan yoğunluk kazandırma metodu sıkıştırma olarak ifade edilebilir [76]. Toz partiküllerine basınç etki ettiğinde ilk önce toz partikülleri birbiri üzerinde kayar ve sonrasında ise yüksek basınç altında şekil değiştirip yoğunlaşır. Düşük basınçlarda toz partiküllerinde meydana gelen yoğunluk artışı hızlı olup toz içinde bulunan gözenekler azaldıkça toz partiküllerinin yoğunlaşmaya karşı direnci artar. Toz partikülleri kalıp içerisine doldurulduğunda her bir toz parçacığı 4-6 komşusu ile temas halindedir. Bu durumda toz partiküllerinin birbiri arasında bağ mukavemeti yoktur. Toz partiküllerine uygulanan basınç arttıkça toz partikülleri şekil değiştirip birbirleri arasında bağ oluşturur. Şekil değişikliğine uğrayan toz partiküllerinin sertliğinde meydana gelen artma sonucunda sıkıştırmayı sürdürmek için daha fazla basınç uygulamak gerekir. Böylece sıkıştırma işlemi sonucunda toz partikülleri geri dönüşü olmayan bir şekilde sertleşir. Kalıp sıkıştırma döngüsünde; kalıbın alt zımbası doldurma konumuna alınıp kalıbın içine toz partikülleri doldurulur. Besleme pabucu kalıptan kaldırılıp kalıp belirlenen toz miktarına göre presleme pozisyonuna getirilir. Kalıba üst zimba yerleştirilir. Kalıbın üst ve altında bulunan zımbalar merkezine doğru hareket eder. Üst zimba kalıptan çıkarılıp alt zimba ile sıkışan parça çıkartılır ve döngü sona erer. Bu sıkıştırma döngüsü şematik olarak Şekil 4.4’de gösterilmiştir [69].



Şekil 4.4. Kalıp sıkıştırma döngüsü [69].

Tozun kalıp içinde sıkıştırılması ile elde edilen parçaya ham parça, tozun presleme sonrası elde edilen yoğunluğa ham yoğunluk yine presleme sonrasında elde edilen mukavemete ham mukavemet olarak isimlendirilir. Ham parça presleme işlemi bittikten sonra kalıbın içinde mekanik olarak kilitlenmiş vaziyettedir. Mekanik olarak kilitlenmiş parçanın kalıp içinden çıkartılması için uygulanacak kuvvete çıkartma kuvveti denir. Kalıptan rahat çıkmasını sağlamak için kalıp içinde yağlayıcı kullanmak çok önemlidir. Yağlayıcının; yağlama derecesi arttıkça ham parçanın kalıptan çıkarılması için gerekli olan çıkarma kuvveti ve kalıpta meydana gelen aşınmalar azalır [69].

Toz partiküllerine presleme esnasında uygulanan basınç üç tane bileşenin toplamı olarak ifade edilebilir.

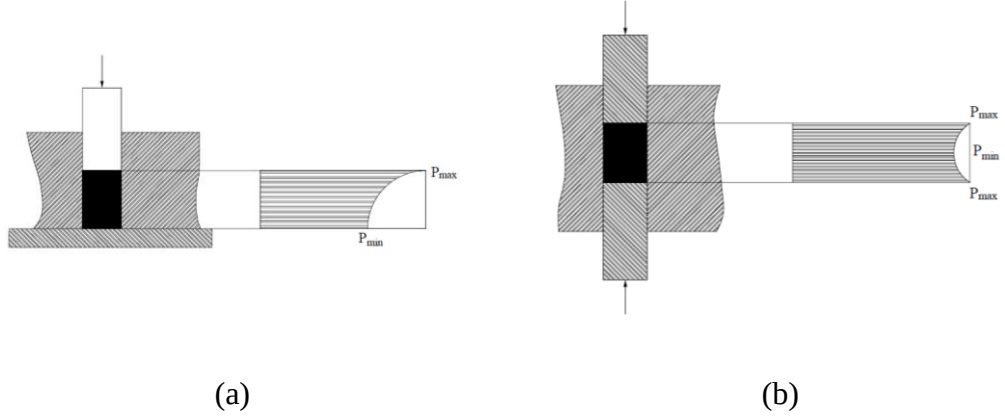
- Toz partiküllerinin sıkıştırılması için direkt kullanılan basınç
- Toz partiküllerinin kalıp duvarına sürtünmesi ile meydana gelen basınç kaybı
- Presin farklı bölümlerinde düzensiz yoğunluk dağılım nedeni ile oluşan basınç

Toz partiküllerinin sıkıştırılması için zorunlu olan en yüksek özgül basınç, tozların fiziksel özelliklerine direct olarak tesir etmez. En yüksek sıkıştırma basıncı daima

akma gerilimine eşittir. En yüksek sıkıştırma basıncı sadece malzemenin durum ve kompozisyonuna bağlıdır. Dolaylı olarak başlangıç tozundaki safsızlıklar fiziksel özelliklerle ilişkili olabilir. Kompozisyondaki safsızlık en çok dağılımıyla en büyüktür ve buda görünen yoğunluğun azalmasına sebep olur. Bu sebeple toz partiküllerin daha büyük dağılımı için çoğu durumda daha yüksek sıkıştırma basıncı gereklidir. Bununla birlikte aynı kompozisyon ve dağılıma sahip olan metalin ince ve kaba toz partiküllerinin en yüksek sıkıştırma basıncıda aynıdır. Sıkıştırma basıncı üzerinde parçacık şeklinin etkisi direkt olarak dağılımla ilişkilidir. Düzgün toz partikülleri düzensiz toz partiküllerine göre daha fazla görünür yoğunluğa sahip olup uygulanacak sıkıştırma basıncı daha düşük değerlerde elde edilir [59].

Sıkıştırılan toz malzemenin basınç dağılımı eşit olmayan bir şekilde gerçekleşir. Ağırlığı belli olan toz partikülleri kalıbın içine yerleştirilip kalıbın üst zımbası aşağıya indirildiğinde toz partikülleri çok yönlü olarak sıkıştırılmaya maruz kalır. Hareketli üst zımba toz partiküllerini üstten sıkıştırdığında kalıbın yan duvarı ve alt bölümü bu sıkıştırma kuvvetine karşı koyar. Ham toz partiküllerinin kendi aralarındaki sürtünmeden ve kalıbın duvarları üzerinde meydana gelen sürtünmeden dolayı preslemenin hem yatay, hem düşey bölümleri boyunca basınç düşüşü meydana gelir [59].

Şekil 4.5’de tek etkili ve çift etkili kalıbın presleme esnasında yoğunluk dağılımının diyagramı görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda yoğunlukta meydana gelen azalmanın zımbalara olan uzaklığın bir fonksiyonu olarak görülmekte ve bu durumun bir yasaya tabi olduğu anlaşılmaktadır. Sürtünme katsayısı azaldıkça yoğunluktaki düşüş azalır. Yanal basınç katsayısı ile yükseklik boyunca yoğunluktaki düşüş artar [59].



Şekil 4.5. Presleme sırasında yoğunluk dağılımı: a) Tek etkili pres, b) Çift etkili pres [59].

4.5.1. Sıkıştırma Metodları

Makine parçalarının toz metalurjisi yöntemi ile imalatında boy ve şekil yönünden kısıtlamalar sıkıştırma işleminden kaynaklanmaktadır. Metal toz partiküllerinin preslenmesinde kullanılan birçok kullanışlı yöntem mevcuttur. Ama bu kullanışlı yöntemlerden çok az kısmı toz partiküllerinin homojen dağılımını sağlayabilir. Karmaşık yapıya sahip parçalarda homojen dağılım elde etmek oldukça zordur [52].

Toz partiküllerinin şekillendirilmesinde; imal edilecek parçanın büyüklüğü, formu, imalatın hesaplı olması ve istenen özellikleri sağlaması gibi şartlar göz önüne alınıp farklı üretim yöntemleri kullanmak mümkündür. Bu üretim yöntemleri aşağıda maddeler halinde ifade edilmiştir [77].

- Kalıpta sıkıştırma yöntemi
- Titreşimle sıkıştırma yöntemi
- Yüksek enerjili sıkıştırma yöntemi
- Ekstrüzyonla sıkıştırma yöntemi
- Haddeleme sıkıştırma yöntemi
- İzostatik sıkıştırma yöntemi

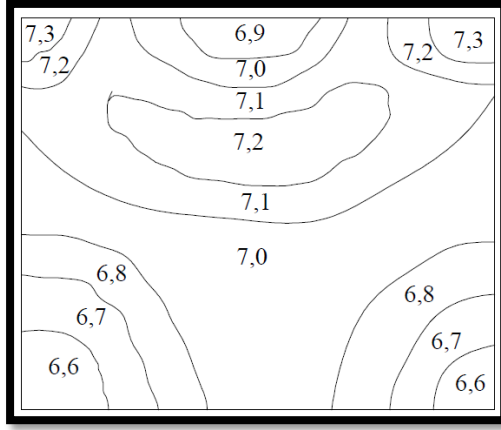
4.5.1.1. Metal Kalıplarda Presleme Yöntemi

Metal kalıpla presleme yönteminde kullanılacak çelik kalıplar özel yöntemlerle oda sıcaklığında imalatı gerçekleştirilir. Bu kalıba yerleştirilen toz partiküllerinin plastik özellikleri göz önüne alınarak 1-10 ton/cm² aralığında değişen basınç uygulanabilir. Sinterlenmiş parçaların fiziksel özellikleri hakkında yapılan çalışmalarda tatbik edilen basınç değeri bazen 30 ton/cm² kadar ulaşmıştır. Metal kalıpla presleme tekniğinde iki farklı presleme yöntemi kullanılabilir. Bunlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [77].

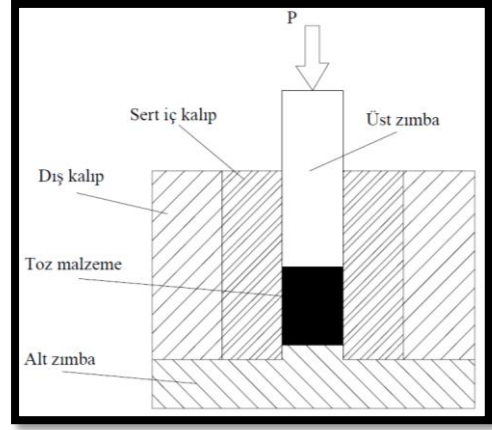
- Tek yönlü sıkıştırma
- Çift yönlü sıkıştırma

Tek Yönlü Sıkıştırma

Toz presleme yöntemlerinden olan tek yönlü sıkıştırma (Şekil 4.6) en basit presleme yöntemlerindendir. Bu yöntemde tozlar rijit bir kalıp içine doldurulur ve zımba vasıtası ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir [74]. Toz partikülleri tek yönlü kalıpta sıkıştırılma işlemi uygulanmaya başladığında toz partikülleri ile kalıp duvarı arasında ve toz partikülleri arasında meydana gelen sürtünmeden basınç dağılımında düzensizlikler görülür. Bu düzensizlik iş parçasına uygulanan yükün dağılımına da tesir etmektedir. Hareketli zımbaya yakın kısımlarda yoğunluk daha fazla olmakla birlikte sabit zımbanın olduğu kısımlara doğru gittikçe azalmaktadır. Yoğunlukta meydana gelen bu azalma imal edilen iş parçasının boy/çap oranı ile ilişkilidir. Toz partiküllerinin kalıp duvarını aşındırmaması ve çizmemesi için ve kalıbın uzun süreli kullanılabilmesi için kalıp duvarı sert olmak zorundadır. Bu sebepten dolayı kalıp malzemesi seçiminde sert malzemelerden faydalanılması gerekir. Kalıbın içine doldurulan toz kütlesinin yüksekliğinin çapa oranı (Y/Ç) tek yönlü preslerde doğrudan yoğunluk dağılımına tesir etmektedir. Bu sebepten bu sınırın $Y/Ç \leq 4$ olması tavsiye edilmektedir [78].



(a)

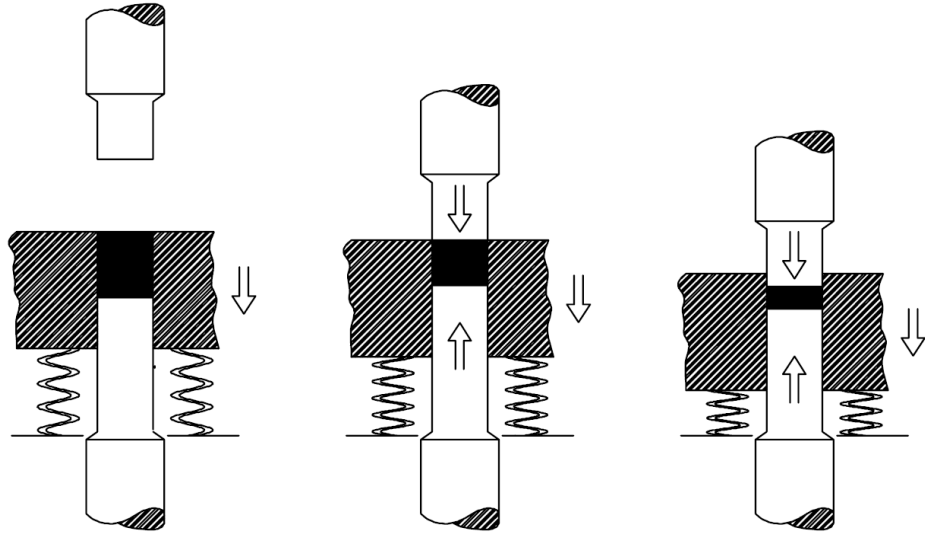


(b)

Şekil 4.6. Tek yönlü sıkıştırma; a) Yoğunluk dağılımı, b) Kalıbın şematik görünümü

İki Yönlü Sıkıştırma

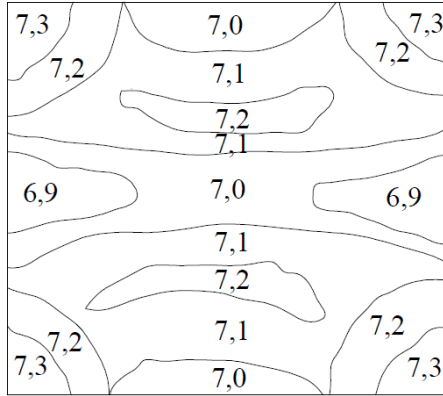
İki yönlü sıkıştırmada toz partikülleri birbirine ters hareket eden alt ve üst zimba vasıtası ile sıkıştırılır. İki yönlü sıkıştırma ile her bir istikametten eşit veya farklı seviyede hareket veya basınç tatbik edilebilir. İki yönlü sıkıştırmanın sağladığı avantajlardan biride kalıbın içinde baştan sona sıkıştırma işlemi dengeli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Kalıbın alt kısmını bir yay ile besleyerek iki yönlü sıkıştırma işlemi gerçekleştirilebilir. İki yönlü sıkıştırma işleminde üst zimba kalıp içindeki toz partiküllerine basınç uyguladığında, tozların birbiri arasındaki sürtünme kuvvetini, kalıbın sürtünme kuvvetini ve kalıbı destekleyen kuvveti (yay vb.) yendiğinde kalıp aşağı yönde ilerleyerek alt zimba yukarı yönde ilerliyormuş gibi gözükür. Toz partikülü sıkıştırma işlemi sona erdikten sonra alt zimba yukarı yönde hareket ettirilerek iş parçası kalıptan dışarı çıkarılır. Şekil 4.7’de iki yönlü sıkıştırma işlemi gösterilmektedir [50,65,76].



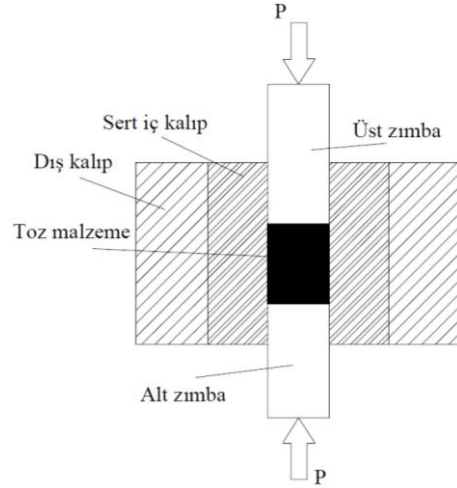
Şekil 4.7. İki Yönlü sıkıştırma [50].

Sıkıştırma işlemini güçleştiren etmenlerden biride parçaların dik kesitlerinin kademeli bir yapıda olmasıdır. Parçanın şekli parçanın kalıptan kolay çıkartılmasında etkilidir. İki yönlü sıkıştırmanın en önemli üstünlüklerinden biride sıkıştırılan parçanın kesitinin her bir yüksekliği için kalıp hareketinin pres kontrollü bir şekilde yapılabilmesidir [65,76].

İki yönlü sıkıştırma işleminde basınç alt ve üst zımba tarafından birlikte uygulanır. İki yönlü sıkıştırma işlemini gerçekleştirebilmek için çift taraflı hareket eden özel preslere ihtiyaç vardır. Tozları istenilen miktarda hassas bir şekilde doldurulması sonrasında preslenmesi ve preslenen parçanın kalıptan kolay çıkarılması preslemede kullanılacak kalıplardan beklenen özelliklerdir. Şekil 4.8’de iki yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve kalıbın şematik görünümü görülmektedir [65,76,78].



(a)



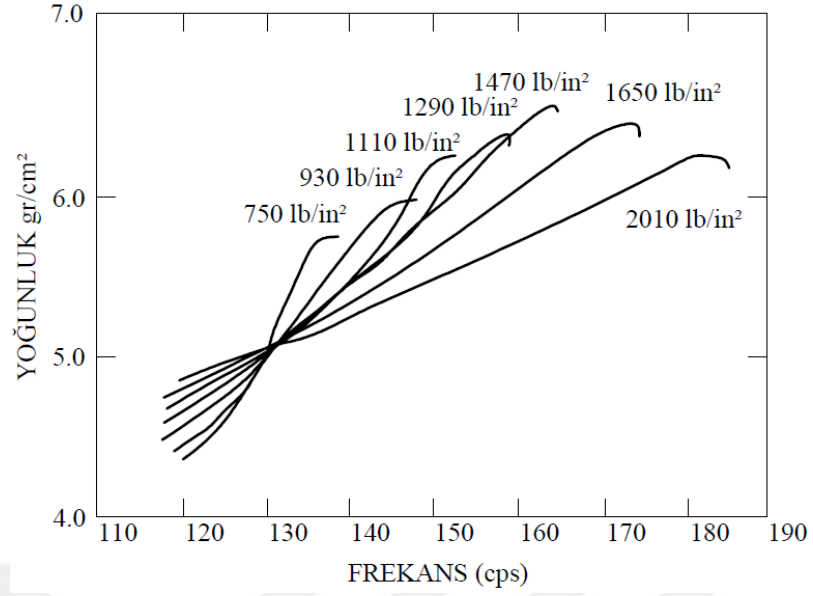
(b)

Şekil 4.8. İki yönlü sıkıştırma; a) Yoğunluk dağılımı, b) Kalıp şematik görünümü [78]

4.5.1.2. Titreşimle Sıkıştırma Yöntemi

Kalıp içindeki toz partiküllerine basınçla birlikte titreşim uygulanarak gerçekleştirilen sıkıştırma işlemi titreşimle sıkıştırma yöntemidir. Kalıba uygulanan titreşim sayesinde daha düşük basınç uygulanarak kalıpta şekillendirmeyle aynı yoğunluk sağlanabilir [50].

Titreşimle sıkıştırma yönteminde iki önemli değişken vardır. Bunlar frekans ve genliktir. Titreşimle sıkıştırma yönteminde kullanılacak herhangi bir basınca ait uygun bir frekans ve genlik vardır. Şekil 4.9'da bakır için değişen frekans değerlerinde basıncın yoğunluğa etkisi görülmektedir [50].



Şekil 4.9. Bakır için değişen frekans değerlerinde basıncın yoğunluğa etkisi [50].

4.5.1.3. Yüksek Enerjili Sıkıştırma Yöntemi

Yüksek enerjili sıkıştırma yönteminde kısa bir zaman zarfında çok fazla bir basınç uygulanır. Yüksek enerjili sıkıştırma yönteminde kullanılan basınç 10^5 - 10^6 atm ve basıncın uygulama zamanı ise 50 milisaniye ile 50 mikro saniye aralığındadır. Yüksek enerjili sıkıştırma yöntemiyle şekillendirmenin avantajları şunlardır:

- Büyük ebatla parça üretimi gerçekleştirilebilir
- Yoğunluk düzeyi ve homojenliği yükseltilebilir.
- Erişilen yüksek mukavemetten dolayı sinterleme işlemine gerek duyulmayabilir.

Yüksek enerjili sıkıştırma yönteminin yukarıdaki üstünlükleri ile birlikte bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Kalıpta meydana gelen aşınma yüksektir
- Hassas ölçüde parça imal edilemez
- Seri imalat için kullanıldığından, az sayıda parça imal etmek için kullanışsızdır.

- Kalıp ve takımın yüksek mukavemetli olması gerekir [77].

4.5.1.4. Ekstrüzyonla sıkıştırma yöntemi

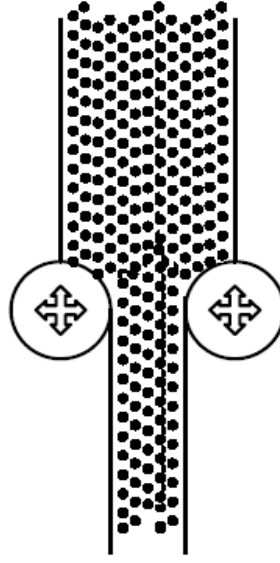
Ekstrüzyonla sıkıştırma yöntemiyle metal toz partiküllerini şekillendirme işlemi kısıtlıdır. Bu yöntemde kapalı bir kabın içine toz partikülleri yerleştirilip ardından kapalı kabın havası vakumlama yöntemi ile alınır. Kapalı kabın içinde ısıtılan toz partiküllerinden parça ekstrüzyon işlemi ile imal edilir. Sıcak ve soğuk olmak üzere ekstrüzyon işlemi iki yöntemle gerçekleştirilir [79].

Oda sıcaklığında toz partiküllerine basınç altında ekstrüze işlemi yapılarak toz partiküllerinin birbirleriyle mekanik bağ oluşturmaya soğuk ekstrüzyon denir. Soğuk ekstrüze işleminin ardından parçalar sinterlenir. Sinterleme işleminde büyük boyutta büzülme meydana geleceğinden dolayı imalatı gerçekleştirilen parçanın boyut kontrolü sorun teşkil eder [79].

Yüksek sıcaklıkta metal toz partiküllerinin tam yoğunluğa ulaşmasını sıcak ekstrüzyon metodu başarı ile sağlar. Sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş parçaların sinterlemeye ihtiyacı yoktur. Sert metaller için sıcak ekstrüzyon yönteminin yumuşak metaller için ise soğuk ekstrüzyon yönteminin kullanılması gereklidir [79].

4.5.1.5. Haddeleme ile Sıkıştırma Yöntemi

Toz partikülleri bir besleyiciye yerleştirilip merdaneler arasından akıtılıp sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Haddeleyerek sıkıştırma yöntemi ile sürekli olarak şekillendirme yapılabilir. Gerektiğinde bu yöntemde iki ya da üç katmanlı haddeleme yapılabilir. Haddeleme (Şekil 4.10) işleminden sonra sinterleme gerçekleştirilir. Haddeleyerek sıkıştırma yönteminde en büyük sorunlardan biride merdanelerin kenarında ortaya çıkan toz kaçağıdır [65,76,79,80].



Şekil 4.10. Toz partiküllerinin haddelenmesi [79].

Merdaneler arasından geçen toz partiküllerinin yoğunluk ve hacimlerinde farklılıklar meydana gelir. Merdanenin toz partiküllerine uyguladığı basınç ile toz partiküllerinin yoğunluk ve mukavemeti yükselir. Bu esnada meydana gelen plastik deformasyonla belirlenen form elde edilir. Şerit ve sac formunda imalat haddeleyerek sıkıştırma yönteminde kullanılabilir. Demir, bakır, alüminyum, nikel ve kobalt toz partikülleri haddeleme ile sıkıştırma yapılabilir [65].

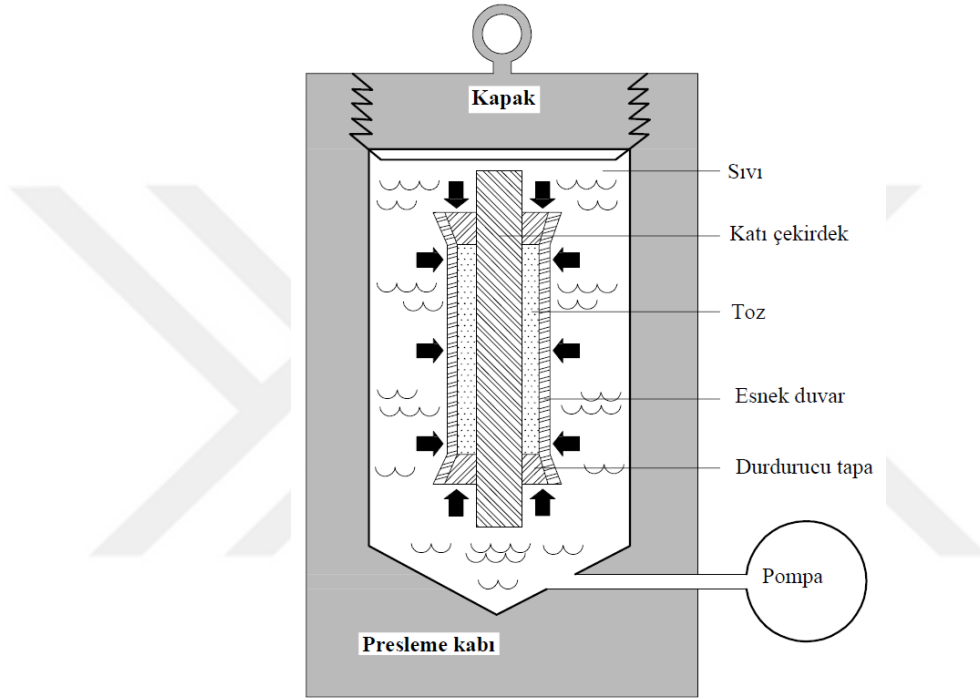
4.5.1.6. İzostatik Sıkıştırma Yöntemi

İzostatik sıkıştırma yöntemi uzun yıllardır malzeme şekillendirmede kullanılmaktadır. Yüksek basınç toz metal ve seramiklerin yeni ve yüksek özelliklerin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu alanda son yıllarda çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır [81].

Sıkı şekilde kapatılmış esnek bir kalıp içinde toz partiküllerinin aynı anda ve her yönde eşit basınç uygulanması işlemine izostatik sıkıştırma denilir. İzostatik presleme yöntemi ikiye ayrılır. Bunlar soğuk izostatik sıkıştırma (CIP) yöntemi ve sıcak izostatik sıkıştırma (HIP) yöntemidir [81].

CIP Yöntemi

CIP yönteminde (Şekil 4.11) toz partikülleri deforme olabilen kap içine konulur, ardından deforme olabilen kap presleme kabının içine yerleştirilir ve izostatik üç eksenli sıkıştırma yöntemi ile sıkıştırılır [82].



Şekil 4.11. CIP Yöntemi [64].

Basınç her taraftan eşit olarak etki eder. Bu yöntem kompleks ve kademeli, boy-çap oranı fazla olan parçaların imalatında kullanılır. Toz partikülleri sızdırmaz yapıya sahip elastik kap içine yerleştirilip kapatılır. Bu kap kalıp görevini görür. Elastik kalıp içindeki hava sıkıştırma esnasında çıkacağına dolayı önceden alınır. Toz partiküllerini içinde barındıran elastik kalıp sıvı (yağ veya su gibi) banyosundaki basınç kabının içine yerleştirilir. Akışkana çok fazla basınç etki ettirilerek elastik kalıba hidrostatik basınç uygulanır. Elastik kalıp basınç kabının içinden alınır ve ardından parçadan çıkarılarak kullanım dışı kalır [52,78]. Geleneksel olarak kullanılan tek yönlü sıkıştırmaya göre CIP yönteminin belli avantajları vardır. Bu avantajlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

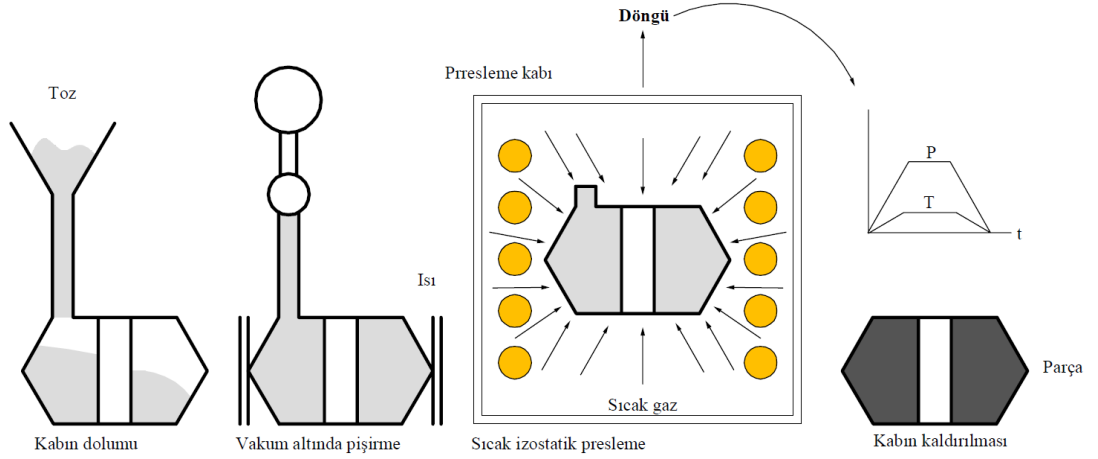
- Üretim süresini kısaltır.
- Nihai ürün şeklinde üretim yapılabilir.
- Düşük takım maliyetlerine sahiptir (Daha ucuz elastomer kalıp kullanılması).
- Uzun ve ince parçaların preslenmesi mümkündür.
- Büyük ve karmaşık parçaların ekonomik üretimi gerçekleştirilir.
- Soğuk izostatik sıkıştırma sayesinde tozun homojen ve kontrollü yoğunlaştırılması söz konusudur.
- Farklı şekillerin aynı anda sıkıştırılması mümkündür ve işlem esnekliğine sahiptir.
- Artık gerilmelerin sebep olduğu çatlaklar, gerinimler ve laminasyonlardan uzak, homojen yoğunlukta sıkıştırır.
- Sıkıştırmada daha az bağlayıcı miktarı kullanılır.

Yukardaki avantajların yanı sıra bazı dezavantajlarda mevcuttur Bu dezavantajalar:

- Geleneksel kalıplara göre yüksek ekipman maliyeti
- Geleneksel kalıplara göre daha az üretkenlik [63].

HIP Yöntemi

HIP yöntemi, ısıtılmış asal gaz kullanılarak sıcaklık ve basınç aynı anda uygulanan bir varyanttır. Genellikle yoğunlaşma işlemi yayınımlı sürünme şartları altında gerçekleşir. Tek bir yaklaşımda toz partikülleri istenen son boyuta küçültmek için tasarlanmış büyük bir kabın içine dökülür. Yaygın olarak bu kaplar titanyum paslanmaz çelik, demir ve camdır. Eğer bu kaplar basınçlandırılmadan önce ısıtılırsa yüksek sıcaklıkta yumuşar ve deforme olur. Kap içine toz yüklendikten sonra kirleticilerin buharlaşması için fırınlama işlemi gerçekleştirilir ardından vakumlanıp kapatılır. HIP bölmesi içinde ısı ve basınç etkisi ile toz katılaşır. Şekil 4.12’de ince duvarlı bir kap kullanan HIP şeması gösterilmektedir. Bu örnekte tozlar HIP yönteminde katılaştırılmadan önce kapsüllenir ve vakumlanır. HIP yönteminden sonra kap içinden çıkartılır ve HIP döngüsü bu şekilde devam eder [64].



Şekil 4.12. İnce duvarlı bir kap kullanılan HIP şeması [64].

4.6. SINTERLEME

Sinterleme işlemi temas halinde olan toz partiküllerinin büyük sıcaklıklarda birbirleri arasında birleştirilmelerine denir. Bu birleştirme işlemi ergime sıcaklığının aşağısında katı durumda atom hareketi ile gerçekleşebileceği gibi sıvı fazda meydana gelebilir. Temas halinde olan toz partiküllerinin birleştirilmeleri birbirleri arasında meydana gelen boyunlaşma ile gerçekleşir [69].

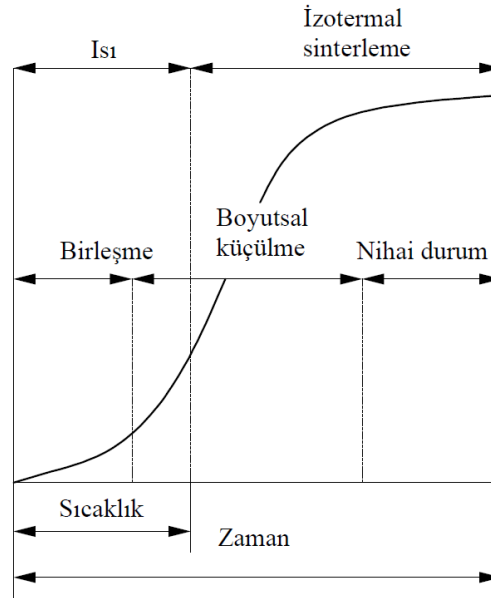
İnsanlık tarihi süresince kullanılan en eski teknolojilerden olan sinterleme çanak, çömlek fırınlanması ile başlamıştır. Sinterlemeden yararlanarak sünger demirden yapılan aletler imal edilebilmiştir. Sinterlemenin esas ve bilimsel alanda araştırma yapılması 1940' tan itibaren başlamıştır. Bu tarihten sonra sinterleme konusunda kayda değer ilerleme gerçekleşmiştir. Çağdaş sanayide sinterlemenin mühim ve faydalı olduğu alanlar toz metalürjisi veya seramik içeriğe sahip sinterlenmiş parça imalatında kullanılabilmektedir [83].

Sinterleme işlemi büyük sıcaklıklarda toz partiküllerinin yüzey enerjisinde meydana gelen düşme ve atom yayınımları ile oluşur. Toz partiküllerinin ısıtılması ile birlikte atom hareketi başlar ve böylece sinterlemeden kaynaklanan geometrik değişimler meydana gelir. Büyük sıcaklık değerlerinde çok sayıda atom komşuları arasında bağlarını keserek yeni konuma geçecek seviyededir veya çok fazla büyük enerjiye sahiptir. Atomun bulunduğu konumdan başka bir konuma geçmesini, sağlayan en az enerjiye

aktivasyon enerjisi denir. Sinterleme hızı toz partiküllerin ergime sıcaklığına ulaşmaya başladıkça atom hareketleri çoğalacağından artar. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı belirlenirken metal ergime sıcaklığının $2/3$ 'ü veya $4/5$ 'i esas alınır. Birden fazla bileşenli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı belirlenirken ergime sıcaklığı düşük olan metalin ergime noktasının altında seçilir [52,69]. Sinterleme katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterleme olmak üzere basit şekilde ikiye ayrılır [83].

4.6.1. Katı Faz Sinterleme

Katı faz sinterleme mekanizması sıcaklık ve zamana göre genellikle üç kademedен meydana gelmektedir. Katı faz sinterleme mekanizması kademeleri Şekil 4.13'de gösterilmiştir [84].



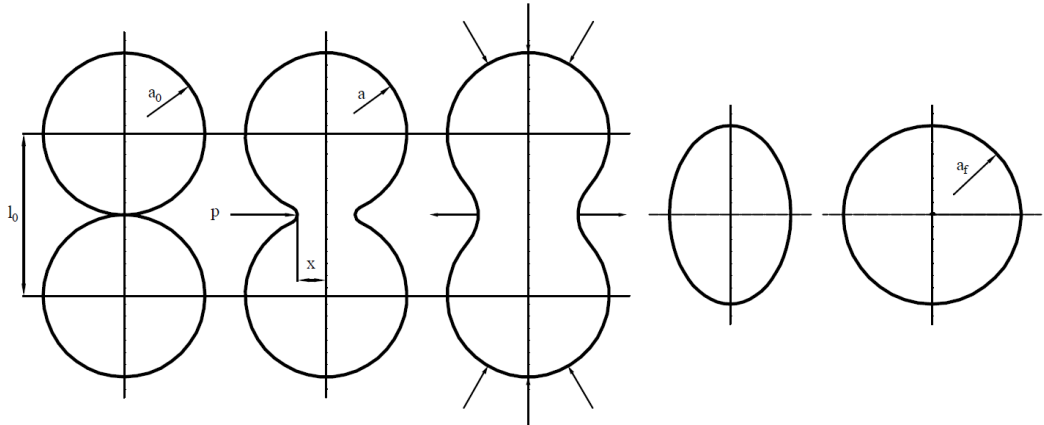
Şekil 4.13. Katı faz sinterleme kademeleri [84].

Birinci kademede toz dağılımına bağlı olarak serbest temas veya presleme tarafından toz partikülleri arasında oluşan temas, tozların ergime noktasının % 20 ila % 40'ında başlar. Bu temas sayısı ve alanı yavaşça artar ve bunlar metalik boyuna dönüşür. Bu aşamada sistem kuvveti düşüktür. İndirgeyici bir atmosfer sıcaklığının daha da artmasıyla belirli yüzey oksitleri azalır ve sonuç olarak toz partikülleri arasındaki metalik olmayan temas, daha verimli bir şekilde metalik bir boyuna dönüşür [84].

İkinci kademe tüm yayılım biçimleriyle (yüzey, hacim, tane sınırı) metal atomlarında meydana gelen daha yüksek hareketliliğin bir sonucu olarak boyunun büyümesi ile ayırt edilir. Bu durum hızlı büzülme ve tam yoğunluğa yaklaşma olarak aksettirir. Dış kuvvetlerin veya sıvı faz formundaki ilavelerin etkinleştirici etkisi olmadan, aşırı uzun sürelerde bile tam yoğunluk elde edilemez. Toz partiküllerinin başlangıçtaki şekli, yapıları ve gözeneklerin şekilleri değişmeye başlar. Gözenekler küresel hale gelir ve kısmen kapanır [84].

Üçüncü kademede bu işlemler büzülmeye sebep olmayan fakat geç sinterleme kademesi için karakteristik yapı durumunu temsil eden diğer yapısal değişiklikler eşlik eder. Bu işlemler tane irileşmesini, küreselleşmeyi ve gözenek kapanmasını içerir. Gerçek sinterleme koşulları altında bireysel aşamalar birbirinden ayrılamaz çünkü hacimdeki yoğunluğu farklı olan ve farklı özelliklere sahip toz partiküllerinden oluşan sinterlenmiş bir toz gövdesinde bu işlemler paralel olarak farklı oranlarda gerçekleşir [84].

Toz partiküllerinin sinterlemenin ilk kademesindeki temasına sinter köprüleri denir. Sinter köprülerinin diğer bir adı da boyundur. Sinterleme işlemi yapılırken toz partikülleri arasında meydana gelen metalik boyunun büyüklüğü ve formu kütle transfer mekaniği ile tanımlanabilir. İki küresel toz partikülünün sinterleme işlemi yapılırken kademeleri Şekil 4.14’de gösterilmektedir [76].



Şekil 4.14. İki küresel toz partikülünün sinterleme kademeleri

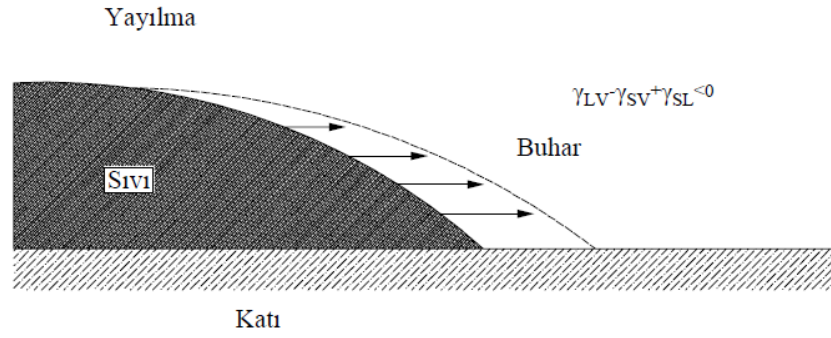
Şekil 4.14'te görülen ifadeler; “ a_0 =Kürenin ilk yarıçapı”, “ p =Boynun dış yarıçapı”, “ a_f =Yeni meydana gelen küre yarı çapı”, “ x =Boyuna ait eğrilik yarıçapı”, “ $a_f = a_0 2^{1/3}$ ” anlamındadır.

Boyun meydana gelirken bünye içinde bulunan gözeneklerde küreselleşir. Toz partiküllerinin merkezleri arasında bulunan uzaklık azalır. Böylece parçada büzülme oluşur ve yoğunlukta artış görülür. Bir sonraki kademede partikül tanecikleri birbirlerine katılır ve işlem sonuçlanır. Böylece izole olmuş gözenekler oluşur. Bünye içinde meydana gelen malzeme transferi sonucunda gözenek boyutlarında azalma tane irileşmesi oluşur. Sinterleme işleminde bazen parçalarda genleşme meydana gelebilir. Genleşme olarak karşımıza çıkan durum sinterleme sırasında sıcaklığın artmasıyla parçada bulunan gözeneklerin içindeki gazların basıncında görülen yükselmedir. Bünye içindeki gazın genleşmeye sebep olabilmesi için sinterleme esnasında parçada yayınmaması veya metal ile kimyasal tepkime oluşturmaması gerekir [76].

4.6.2. Sıvı Faz Sinterlemesi

Sinterleme işlemi esnasında sıvı fazın meydana gelmesi sinterleme hızını önemli ölçüde artmasına neden olur. Toz partiküllerinin birbirlerine bağlanmasında kullanılan sıvı faz, içinde hızlı bir yayınının oluşturan lehim meydana getirir. Sıvı fazın esas ihtiyacı ıslatmadır. Katı taneler üzerinde sıvı fazın yayınımlı Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Bir sıvı ıslatıyorsa temas açısı küçüktür (θ). Temas açısı tanımında yüzey enerjisi dengesi kullanılır [69].

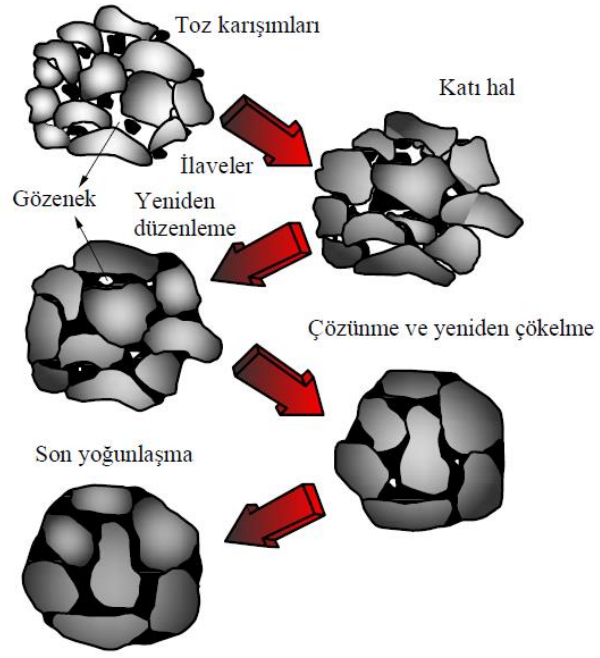
$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (4.3)$$



Şekil 4.15. Kati taneler üzerinde sıvı fazın yayılımı [69].

Eşitlik 4.3'de γ_{SV} katı buhar yüzey enerjisini, γ_{SL} katı sıvı yüzey enerjisini γ_{LV} sıvı buhar yüzey enerjisini ifade eder. Kılcal kuvvet olarak adlandırılan yüzey gerilmesi sıvı filmin ıslatarak yoğunlaşmasına destek olur. Çoğunlukla ıslatma işleminin gerçekleşmesi için katının sıvıda çözünmesi zorunludur. Aynı zamanda bu çözünürlük katının sıvıda dağılmasına sebep olur. Sıvı fazın yayılma hızı katı hale göre daha fazladır [69].

Alışılmış sıvı faz sinterleme işlemleri üst üste gelen üç kademedan oluşmaktadır. Sıvı faz sinterlemenin esas kademeleri ve mikro yapıda meydana gelen farklılıklar Şekil 4.16'da verilmiştir. Toz karışımları ilk kademedan sıvı fazın ortaya çıkma sıcaklığına kadar ısıtma işlemi gerçekleştirilmekte, sıvı faz meydana geldikten sonra sıvı fazın katı toz partiküllerinde meydana getirdiği kuvvetle ilişkili hızlı başlangıç yoğunlaşması gerçekleşmektedir. Gözenekler sistemin yüzey enerjisi en az duruma getirilmeye çabalanırken giderilir. Yeniden düzenleme esnasında mikro yapı, kılcal hareketler istikametinde viskoz bir katı gibi hareket eder. Sinterlenen pelletin viskozitesi ile gözeneklerin giderilmesi ters orantılı olup artmakta ve yoğunlaşma hızı ise devamlı azalmaktadır [75].



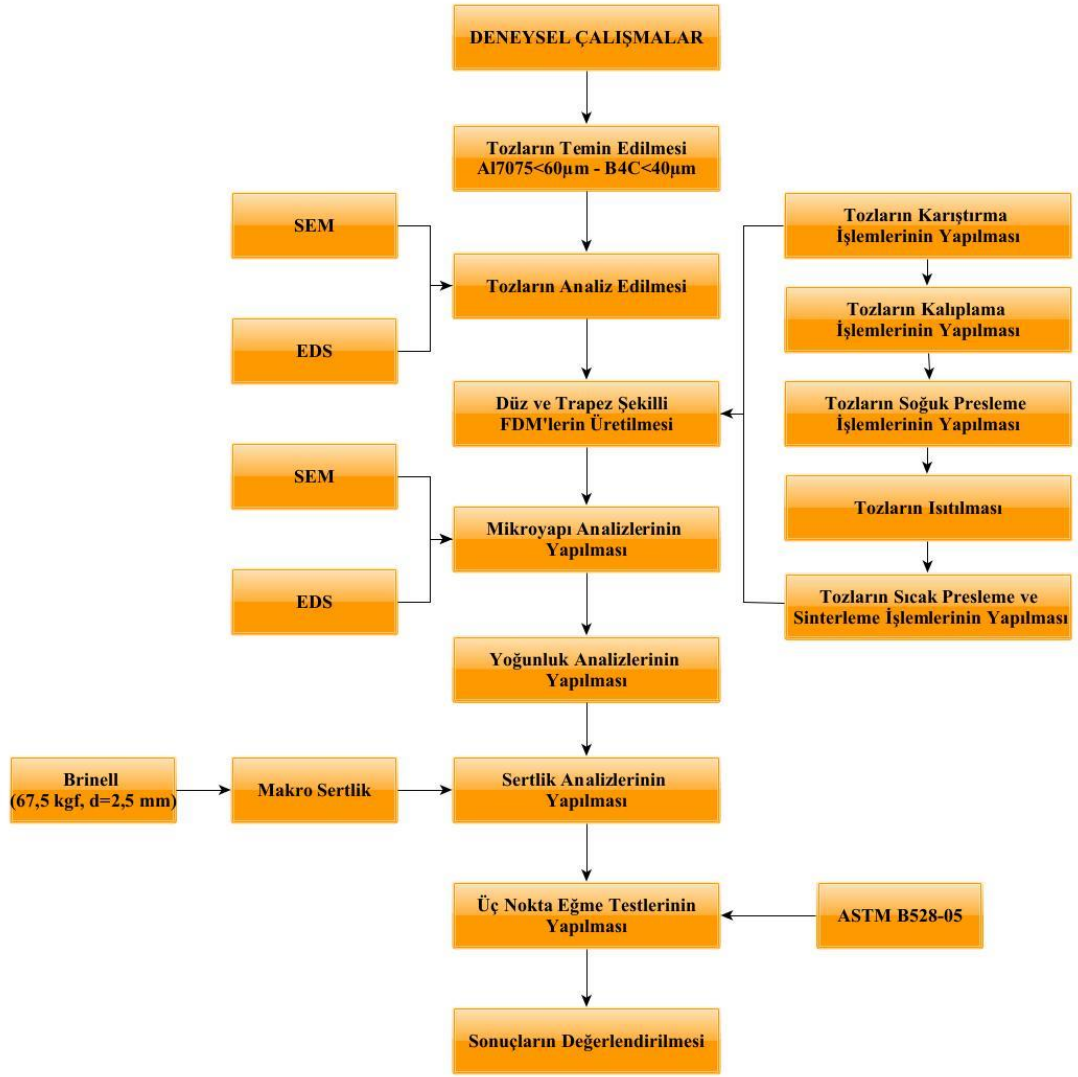
Şekil 4.16. Sıvı faz sinterlenmesinde meydana gelen mikroyapı değişimleri [75].

BÖLÜM 5

METERYAL VE METOD

5.1. FDM'LERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MAKİNE VE EKİPMANLAR

Bu çalışmada; farklı oranlarda B₄C takviyeli AA 7075 matrisli üç ve dört tabakadan oluşan düz ve trapez (30°, 45° ve 60°) geçişli FDM'lerin toz metalürjisi yöntemi ile üretimi için kalıp tasarlanmış, tasarlanan kalıp üretilmiş ve FDM üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen FDM'lerin metalürjik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaya ait akış şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaya ait akış şeması

5.2. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAM MADDELER

Alüminyum alaşımları; düşük yoğunluk, iyi korozyon direnci ve yüksek elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı havacılık, askeri cihazlarda ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçakların gövde ve kanat yapımında kullanılan 7xxx serisi alüminyum alaşımları mevcut alüminyum matrisli kompozitler arasında en çok tercih edilen matris malzemesidir. AA 7075 yüksek mukavemet korozyon direnci ve yeterli tokluk özelliklerine sahip olması nedeni ile 7xxx serisi alaşımlar içinde yaygın kullanılan alaşım gurubudur [13,14,85–88]. Yukarıda belirtilen üstün özelliklerden dolayı FDM üretiminde matris malzemesi olarak küresel şekle sahip ortalama toz boyutu $\leq 60 \mu\text{m}$ olan AA 7075 malzemesi hazır olarak temin

edilmiştir. Temin edilen AA 7075 tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Bor karbür yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek ısıl dayanım, ve iyi kimyasal kararlılığa sahip seramik malzemedir [6,15,41,89]. Bu üstün özelliklerden dolayı FDM’nin takviye malzemesi olarak B₄C tercih edilmiş olup ortalama toz boyutu $\leq 40 \mu\text{m}$ olan B₄C tozu hazır olarak temin edilmiştir. Çizelge 5.2’de FDM üretiminde kullanılan tozların teknik özellikleri verilmiştir.

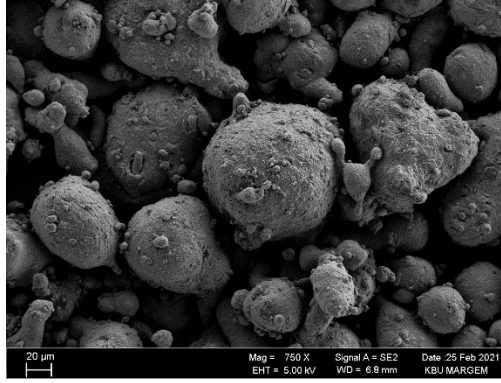
Çizelge 5.1. AA 7075 alaşım tozlarının kimyasal bileşimi

Element	% Kimyasal Bileşim
Çinko	5,50
Magnezyum	2,50
Krom	2,50
Bakır	1,60
Demir	0,5
Silisyum	0,4
Manganez	0,3
Titanyum	0,2
Alüminyum	Geri Kalan

Çizelge 5.2. FDM imalatında kullanılan tozların özellikleri[90–92].

Özellikler	Malzemeler	
	AA 7075	B ₄ C
Yoğunluk [g/cm^3]	2,81	2,52
Sertlik [HV]	175	3770
Termal iletkenlik katsayısı [W/m K]	130	30
Elastiklik modülü [GPa]	71,7	471
Ergime sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	477-635	2450

Şekil 5.2’de FDM üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.3’te FDM üretiminde kullanılan AA 7075 tozunun seçili alandaki Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS) sonuçları verilmiştir. Şekil 5.4’de FDM üretiminde kullanılan B₄C tozunun seçili alandaki EDS sonuçları verilmiştir.

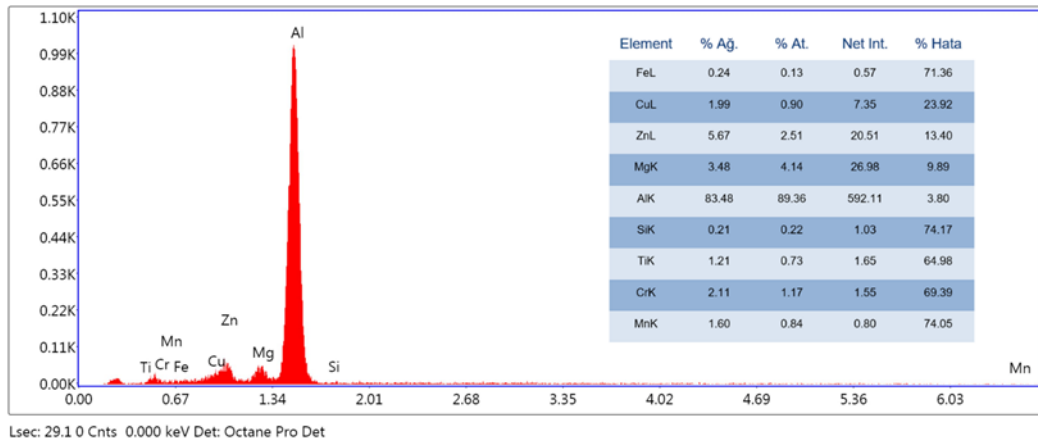
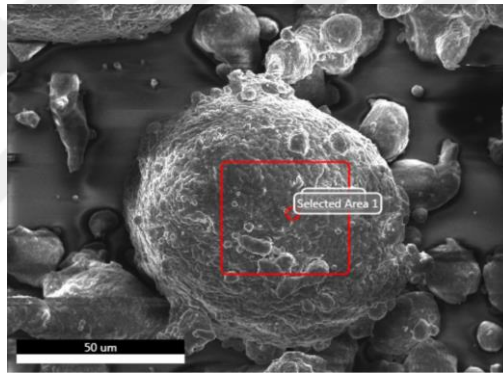


(a)

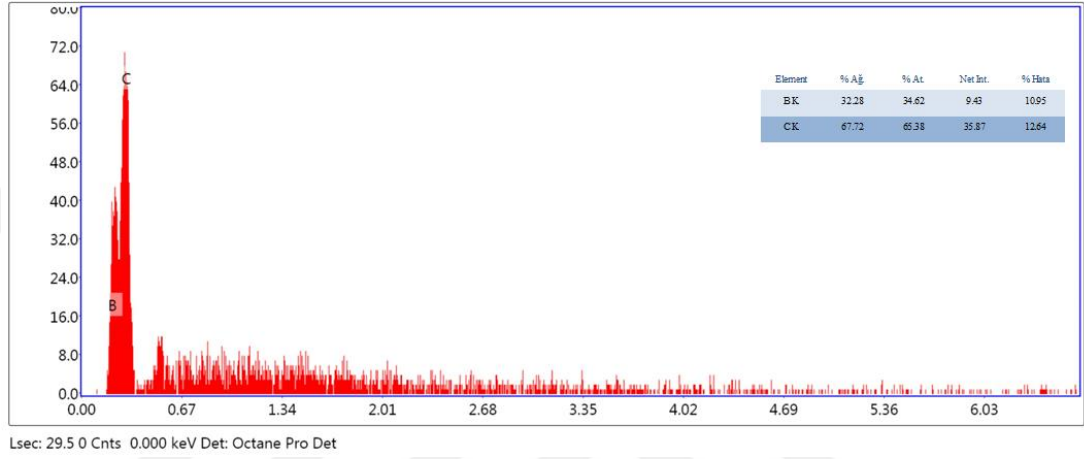
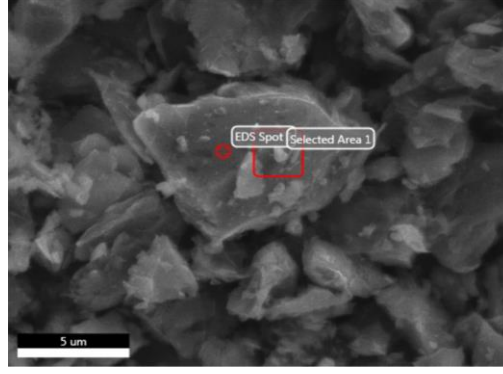


(b)

Şekil 5.2 Kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri a) Matris malzemesi AA 7075 tozu b) Takviye elemanı B₄C tozu



Şekil 5.3. AA 7075 tozunun seçili alandaki EDS sonuçları

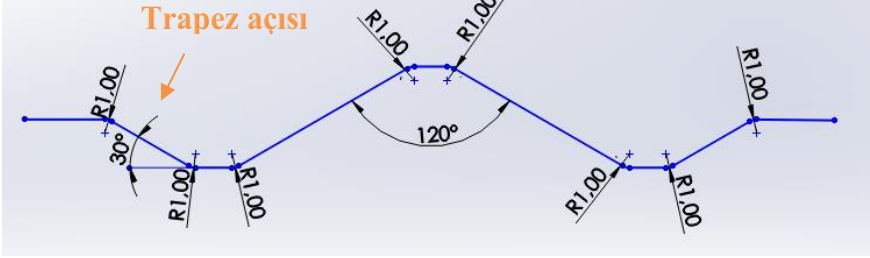
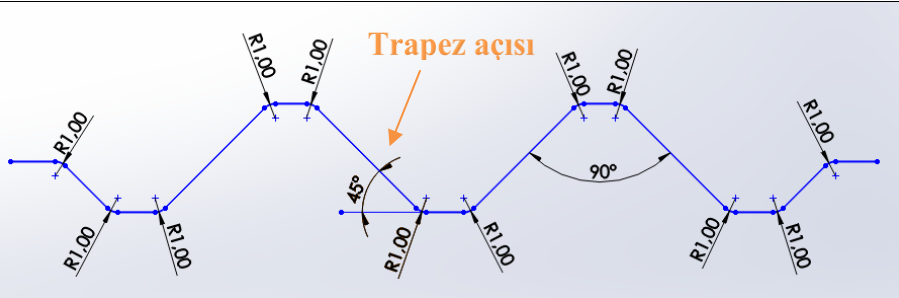
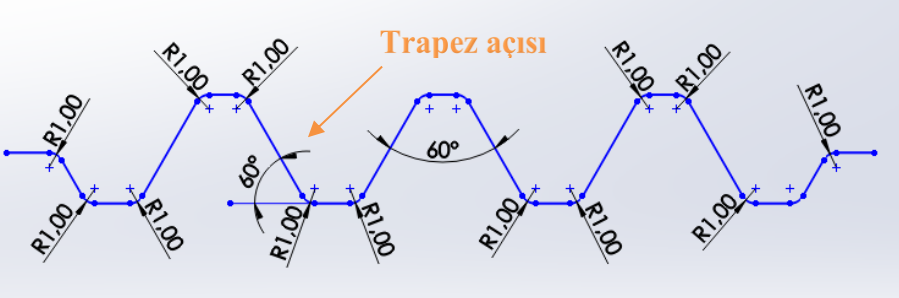


Şekil 5.4. B₄C tozunun seçili alandaki EDS sonuçları

5.3. FDM ÜRETİMİ

Yapılan bu tez çalışmasında, B₄C takviyeli AA 7075 matrisli düz ve trapez geçişli FDM'lerin imalatında toz metalürjisi yönteminden faydalanılmıştır. İmal edilen düz ve trapez geçişli FDM'ler üç ve dört tabakalı olmakla birlikte imalatı gerçekleştirilen FDM'lerin kalınlıkları sabit olarak 12,7 mm belirlenmiştir. İmalatı gerçekleştirilen trapez geçişli FDM'lerin açıları sırası ile 30°, 45° ve 60°'dir. İmalatı gerçekleştirilen trapez geçişli numunelerin geometrik unsurlarına ait açı detayları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Trapez geçişli numunelerin geometrik unsurlarına ait açı detayları

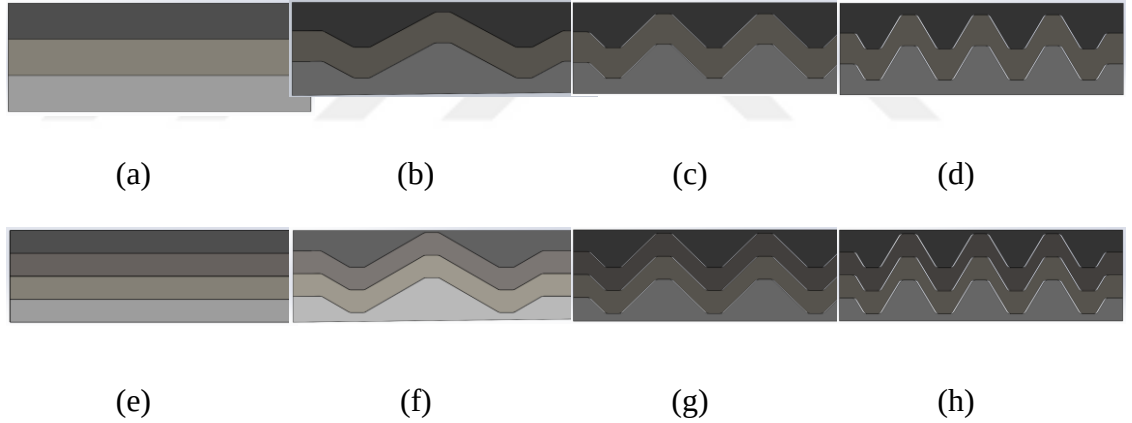
30° Trapez Açısı	
45° Trapez Açısı	
60° Trapez Açısı	

Üç tabakalı FDM'lerin her bir tabakadaki B₄C miktarı ağırlıkça sırası ile % 0-30-60 olacak şekilde imal edilmiştir. Dört tabakalı FDM'lerin her bir tabakadaki B₄C miktarı sırası ile ağırlıkça % 0-20-40-60 olacak şekilde imal edilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen numunelerin kodlama sistemi Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. İmalatı gerçekleştirilen numunelerin kodlama sistemi

FDM Numuneleri		FDM Kodları
Üç Tabakalı	Düz Geçişli FDM	0A
	30° Trapez Geçişli FDM	30A
	45° Trapez Geçişli FDM	45A
	60° Trapez Geçişli FDM	60A
Dört Tabakalı	Düz Geçişli FDM	0B
	30° Trapez Geçişli FDM	30B
	45° Trapez Geçişli FDM	45B
	60° Trapez Geçişli FDM	60B

İmalatı gerçekleştirilen FDM'lerin şematik görünümü Şekil 5.5'te verilmiştir.

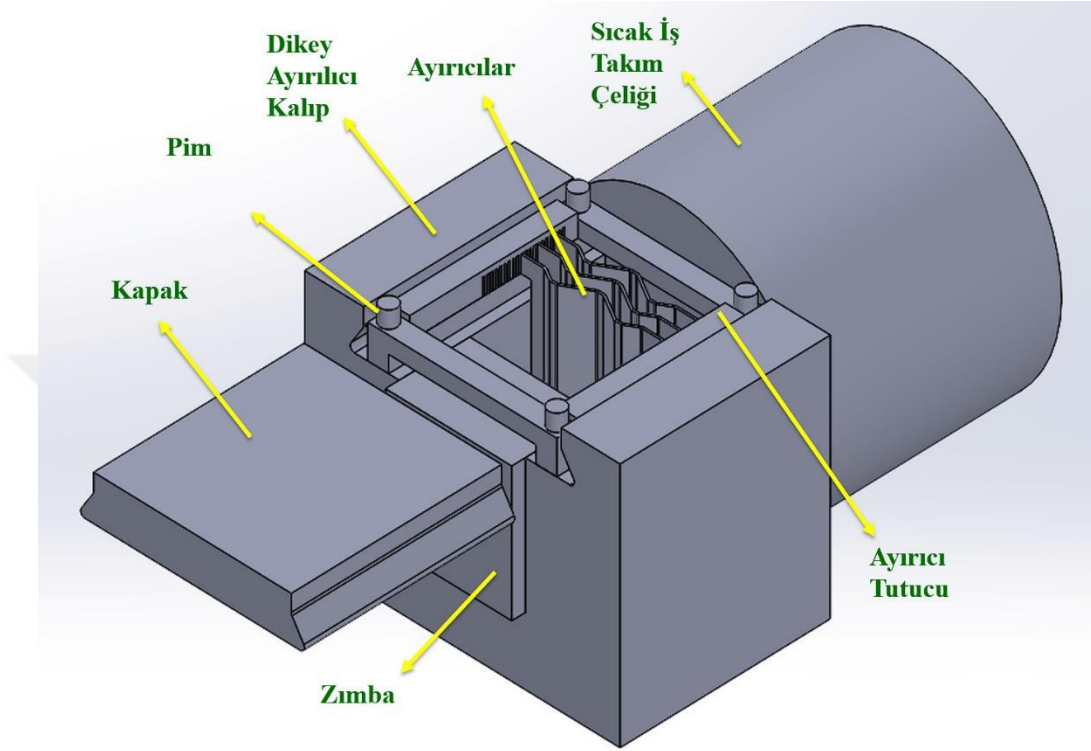


Şekil 5.5. İmalatı gerçekleştirilen FDM'lerin şematik görüntüsü a) 0A, b) 30A, c) 45A, d) 60A, e) 0B, f) 30B, g) 45B, h) 60B

5.4. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN KALIP ve YARDIMCI ELEMANLAR

Düz ve trapez geçişli FDM'leri üretebilmek amacıyla katı modelleme programından faydalanıp dikey ayırıcılı kalıbın ve sıcak iş takım çeliği kalıbın modellemesi yapılmıştır. Tasarımı yapılan dikey ayırıcılı kalıp ve sıcak iş takım çeliği kalıbın birleştirilmiş modeli Şekil 5.6'da verilmiştir. Dikey ayırıcılı kalıp 110x110x155

ebatlarında 4140 çeliği olarak ve sıcak iş takım çeliği kalıp 140 mm çapında h13 sıcak iş takım çeliği olarak satın alınmıştır. Satın alınan kalıp malzemeleri tel erezyon ve freze tezgahında kalıbın iç kısmı 60x60 mm² olacak şekilde işlenmiştir.



Şekil 5.6. Tasarımı yapılan dikey ayırıcılı kalıbın ve sıcak iş takım çeliği kalıbın birleştirilmiş modeli

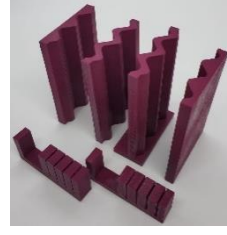
Dikey ayırıcılı kalıba tabakalarına göre toz yerleştirdikten sonra tozların sıkıştırılması ve ayırıcılar kaldırılırken tozların kalıp içinde kalmasını sağlamak amacı ile üç boyutlu yazıcıdan yardımcı plastik elemanlar imal edilmiştir. Şekil 5.7’de imal edilen dört tabakalı yardımcı plastik elemanlar görülmektedir.



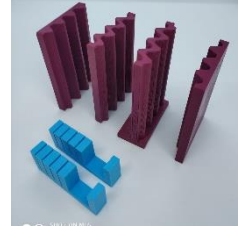
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.7. Dört tabakalı yardımcı plastik elemanlar a) 0B için b) 30B için c) 45B için d) 60B için

5.5. TOZLARIN HAZIRLANMASI

FDM'nin her bir tabakasında kullanılan AA 7075 ve B₄C tozu 0,1 mg hassasiyete sahip "RADWAG" marka terazi (Şekil 5.8. (a)) kullanılarak tartım işlemi yapılmıştır. Homojen bir karışım sağlayabilmek amacı ile tartım işlemi yapılan tozlar "WAB" marka turbula cihazında (Şekil 5.8. (b)) 2 saat süre ile karıştırılma işlemine tabi tutulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 5.8. Kullanılan a) RADWAG marka terazi b) WAB marka turbula cihazı

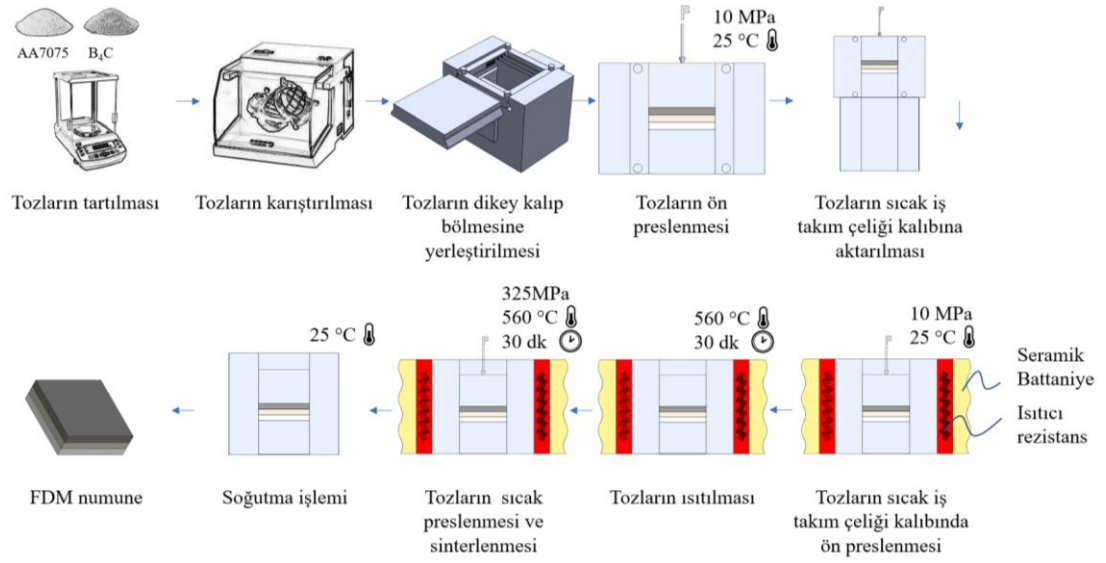
5.6. TOZLARIN PRESLENMESİ

FDM’lerin üretimi Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü imalat laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. FDM üretim ünitesi ve yardımcı ekipmanlar Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. FDM üretim ünitesi ve yardımcı ekipmanlar

FDM'lerin imalat süreçlerinin şematik gösterimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. FDM'lerin imalat süreçlerinin şematik gösterimi

FDM imalatında kullanılacak dikey ayırıcılı kalıp ve sıcak iş takım çeliği kalıp (Şekil 5.11) katı yağlayıcı kullanılarak yağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.11. Yağlama işlemi gerçekleştirilmiş a) Dikey ayırıcılı kalıp b) Sıcak iş takım çeliği kalıp

Yağlanmış dikey ayırıcılı kalıba ayırıcılar yerleştirilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Dikey ayırıcılı kalıba ayırıcıların yerleşimi

Turbulada karıştırılan AA 7075 ve B₄C tozları ağırlıkça belirlenen oranlarda tabakalarına göre dikey ayırıcılı kalıbın bölmelerine yerleştirilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Dikey ayırıcılı kalıba tozların doldurulması

Dikey ayırıcılı kalıbın bölmeleri üç boyutlu yazıcıdan çıktısı alınan plastik yardımcı elemanlardan yararlanarak kalıbın içinden çıkarılmıştır (Şekil 5.14).



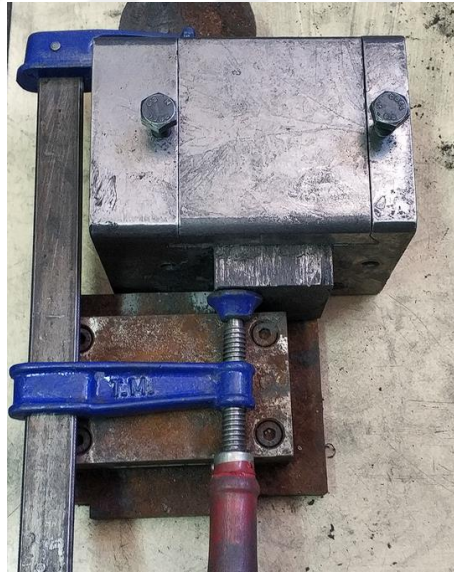
(a)



(b)

Şekil 5.14. a) Dikey ayırıcılı kalıptan ayırıcıların çıkarılması b) Dikey ayırıcılı kalıptan ayırıcılar çıkarılınca tozun görüntüsü

Dikey ayırıcılı kalıbın kapağı kapatılmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Kapağı kapatılmış dikey ayırıcılı kalıp

Kapağı kapatılan dikey ayırıcılı kalıba 160 tonluk hidrolik pres ile 10 MPa basınç uygulanarak ön sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Dikey ayırıcılı kalıba ön basınç uygulanması

Ön sıkıştırma İşlemi yapılan FDM numuneleri dikey ayırıcılı kalıptan sıcak iş takım çeliği kalıbına pres yardımı ile aktarılmıştır (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. FDM numunesinin sıcak iş takım çeliğine aktarılması

Ardından sıcak iş takım çeliği kalıba 10 MPa basınç uygulanmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. FDM numunesine sıcak iş takım çeliğinde ön basınç uygulanması

FDM numuneleri 560 °C sıcaklığa kadar ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve 30 dakika kadar beklenmiştir. FDM numuneleri 560 °C sıcaklıkta 325 MPa basınç altında 30 dakika süresince sıcak olarak preslenmiş ve sinterlenmiştir (Şekil 5.19).



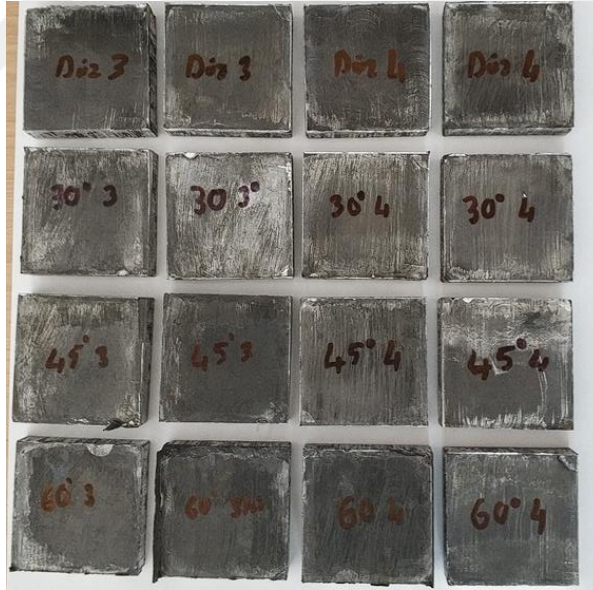
Şekil 5.19. FDM numunesinin basınç altında sinterlenmesi

Sıcak olarak preslenen ve sinterlenen FDM numuneleri ardından oda sıcaklığında soğutulmuştur (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. FDM numunesinin oda sıcaklığında soğutulması

Üretimi gerçekleştirilen numunelerin bir kısmının görüntüleri Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21. İmalatı gerçekleştirilen FDM numunelerinin bir kısmı

5.7. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

İmalatı gerçekleştirilen FDM numuneleri mikroyapı karakterizasyonu için “METKON METACUT 251” abrasiv kesme cihazı (Şekil 5.22) ile uygun boyutlarda kesim işlemi

(Şekil 5.23) gerçekleştirilmiştir. Ardından kesilen numuneler bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler sırası ile 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 2500 numaralı zımpara kağıtları ile zımpara işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımpara işleminin ardından FDM numuneler 1-3 µm boyutlarındaki elmas solüsyondan faydalanılarak keçe yardımı ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatılan FDM numuneler Keller (5 ml HNO₃ + 2 ml HF + 3 ml HCl + 190 ml H₂O) çözeltisi ile dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi yapılan FDM numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı karakterizasyon incelemeleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları ve Araştırma Merkezi'nde bulunan "FEI QUANTA FEG 250" marka SEM ile yapılmıştır. Mikroyapı karakterizasyonunda AA 7075 matris malzemesi ile B₄C takviye malzemesi arasındaki arayüzey bölgeleri, B₄C takviye malzemesinin AA 7075 matris malzemesi içindeki dağılımları ve FDM'nin tabakaları arasındaki geçiş bölgesi incelenmiştir. Ayrıca üç nokta eğme sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiştir. SEM incelemelerinin yanısıra imalatı gerçekleştirilen numunelerin mikroyapısal olarak kimyasal bileşimini analiz amacı ile EDS analizi yapılmıştır.



Şekil 5.22. METKON METACUT 251 abrasiv kesme cihazı



Şekil 5.23. Uygun boyutlarda kesilen örnek numune

5.8. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ

İmalatı gerçekleştirilen B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM numunesinin yoğunluk ölçümü Şekil 5.8 (a)'da gösterilen 0,1 mg hassasiyete sahip “RADWAG” marka terazi ve yoğunluk ölçüm kitinden faydalanılmıştır. FDM’lerin yoğunluk ölçüm işlemi Arşimet prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçüm işleminde Eşitlik 5.1’den faydalanılır [4].

$$\rho_d = \frac{w}{G} \times Rho \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5.1)$$

Yoğunluk ölçme işlem basamakları maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

- FDM numunesinin havadaki ağırlığı tartılır (w).
- Terazinin darası alınır
- Numunenin su içinde ağırlığı ölçülür (G)
- Havadaki ağırlık suda ölçülen ağırlığa bölünüp katalogdan suyun sıcaklığına göre belirlenen katsayı (*Rho*) ile çarpılarak FDM numunelerinin yoğunluğu (ρ_d) elde edilir.

Arşimet prensibine göre yoğunluk tespit edilir. Sonra teorik yoğunluk hesap edilir. Eşitlik 5.2’den faydalanılarak bağıl yoğunluk hesaplanır [93].

$$\rho_b = \frac{\rho_d}{\rho_t} \times 100 \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte;

ρ_b = Bağlı yoğunluk (%)

ρ_d = Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk (gr/cm³)

ρ_t = Toz karışım oranlarına dayalı teorik yoğunluk (gr/cm³).

Üretilen FDM'lerin gözenekliliğini tespit etmek için aşağıdaki Eşitlik 5.3 kullanılmıştır [37].

$$G = \left(\frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (5.3)$$

G= Gözeneklilik (%)

ρ_t = Teorik Yoğunluk (gr/cm³)

ρ_d = Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk (gr/cm³)

5.9. SERTLİK TESTİ

B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM numunesinin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmeden önce standart metalografik numune hazırlama yöntemi uygulanmıştır. FDM'lerin tabakalarına ait sertlik değerleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'nde bulunan "QNESS Q250M" tipi sertlik ölçüm cihazı (Şekil 5.24) kullanılarak Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile tespit edilmiştir. FDM'nin Brinell sertlik ölçümleri 2,5 mm çapında çelik bilye kullanılarak 62,5 kg yük altında gerçekleştirilmiştir. FDM'nin her bir tabakasından en az 5 ölçüm yapılmış ve tabakanın geneline hitap eden sertlik değerinin belirlenmesi için ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.24. QNESS Q250M sertlik ölçüm cihazı.

5.10. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

İmalatı gerçekleştirilen B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM numunelerinin eğilme davranışlarının incelenmesi için ASTM B528-05 standartlarına uygun üç nokta eğme testleri yapılmıştır. FDM numuneler hassas kesme cihazında ASTM B528-05 standardında belirtilen boyutlarda (AxBxL) (12,7x12,7x31,8 mm) kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesimi yapılan numuneler 50 kN kapasiteli “INSTRON 3369” (Şekil 5.25. (a)) çekme cihazında 2 mm/dk hızında üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Her bir FDM numunesinin çapraz kırılma dayanımları karşılaştırılması amacıyla B₄C takviyeli (Şekil 5.25. (b)) ve takviyesiz (Şekil 5.25. (c)) yüzeylerine ayrı ayrı üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir.

Çapraz kırılma dayanımını tespit etmek için Eşitlik 5.4’ten faydalanılmıştır [94].

$$P = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5.4)$$

P= Çapraz kırılma dayanımı (MPa)

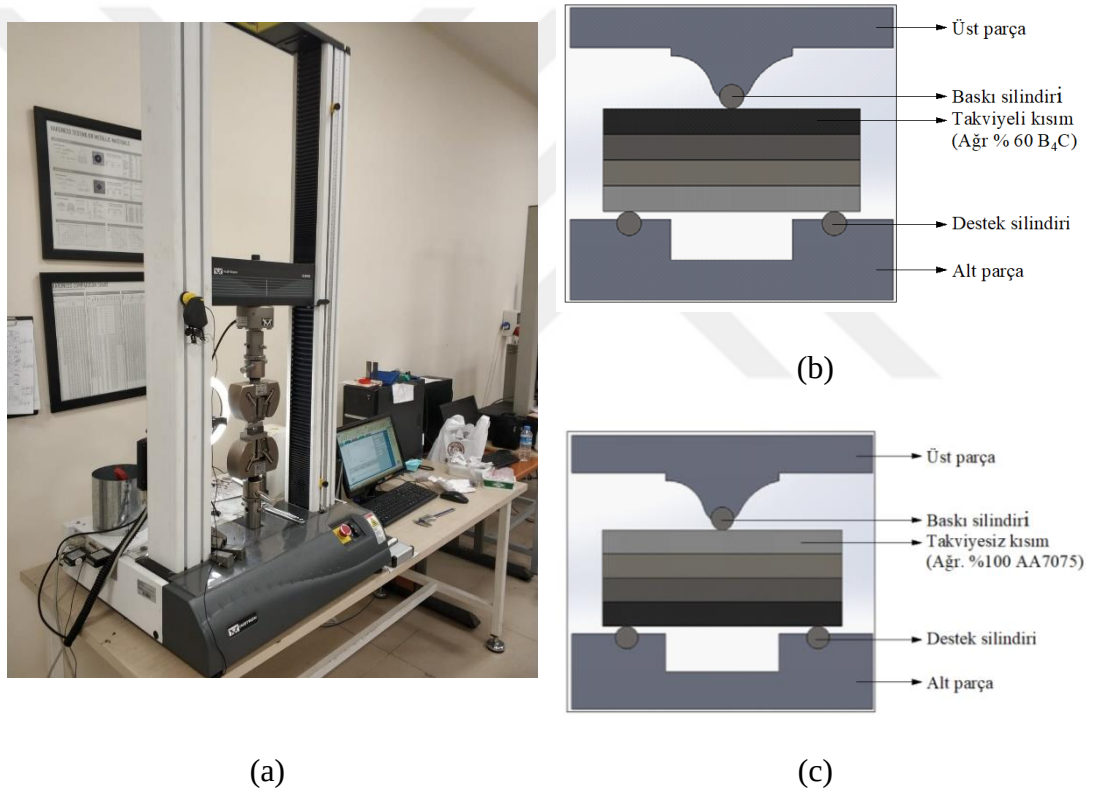
F= Kopma anında numuneye uygulanan kuvvet (N)

L= Destek silindirleri arasındaki mesafe (mm)

b= Numunenin genişliği (mm)

h= Numunenin yüksekliği (mm)

Her bir FDM numunesi için 3 farklı üç nokta eğme numunesi hazırlanmış ve üç nokta eğme testi 3 kere tekrarlanmıştır. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.25. Üç nokta eğme testi; a) Test cihazı görseli, b) FDM'nin takviyeli yüzeyinin üç nokta eğme cihazına yerleşimi, c) FDM'nin takviyesiz yüzeyinin üç nokta eğme cihazına yerleşimi

BÖLÜM 6

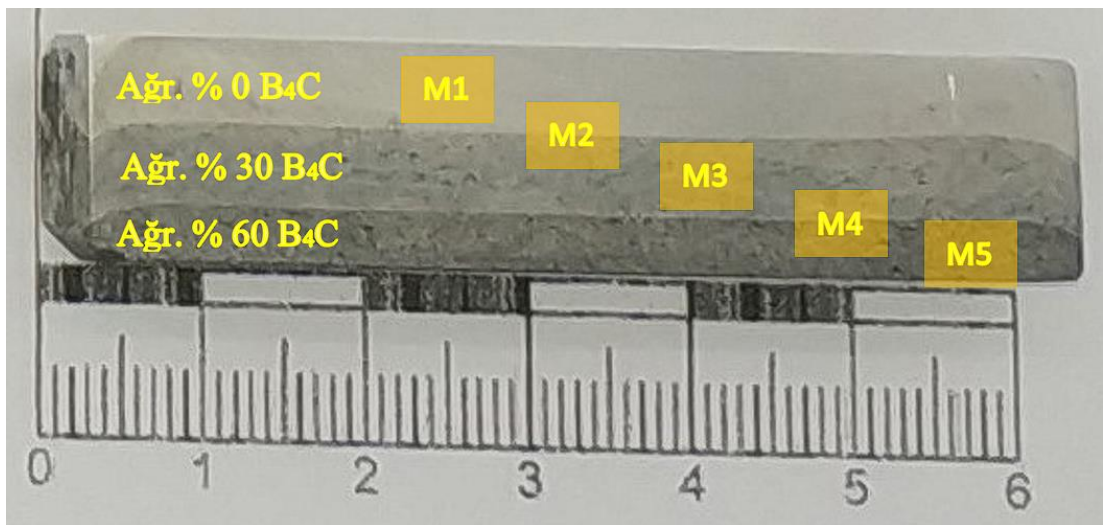
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER İLE İLGİLİ SONUÇLAR

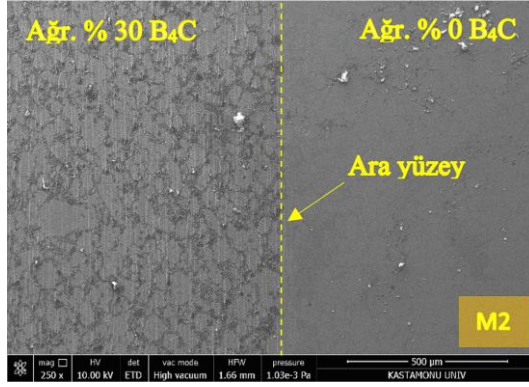
Bu çalışmada ağırlıkça farklı oranlarda B₄C takviyeli AA 7075 matrisli 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numuneleri toz metalürjisi yöntemi ile imal edilmiş ve imal edilen numunelerin mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

6.1.1. FDM'lerin Mikroyapı İncelemeleri

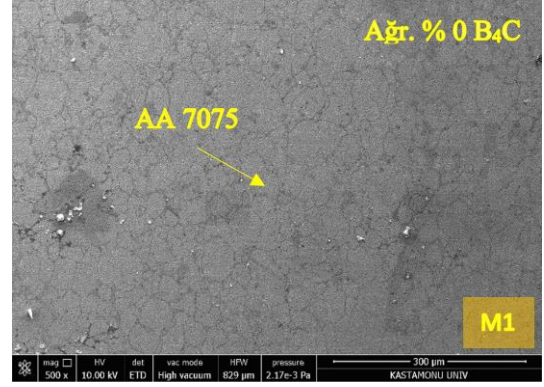
Bu çalışmada toz metalürjisi tekniği ile imalatı gerçekleştirilen B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM'lerin tabakalarının ve tabakalar arasındaki geçiş alanlarının SEM görüntü incelemesi yapıldı. İmalatı gerçekleştirilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin makro görüntüleri ve SEM görüntüleri Şekil 6.1 ile Şekil 6.16 arasında sunulmuştur.



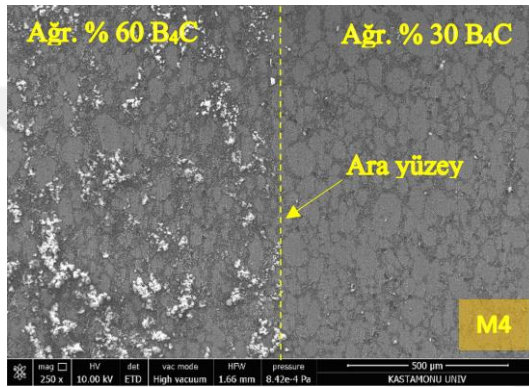
Şekil 6.1. 0A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



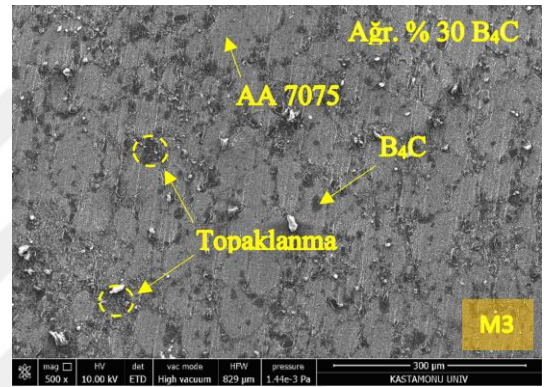
(a)



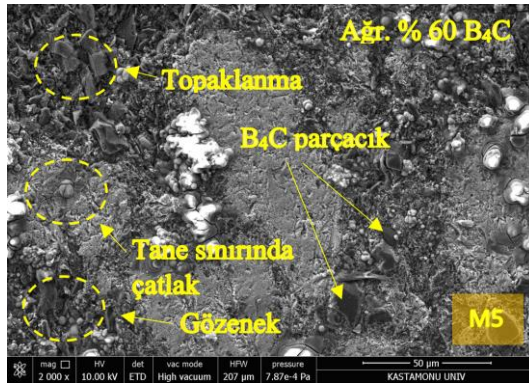
(b)



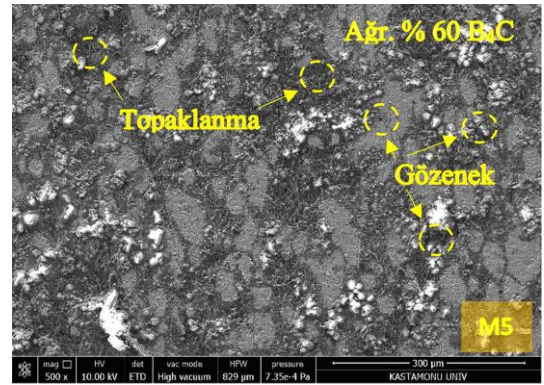
(c)



(d)



(e)

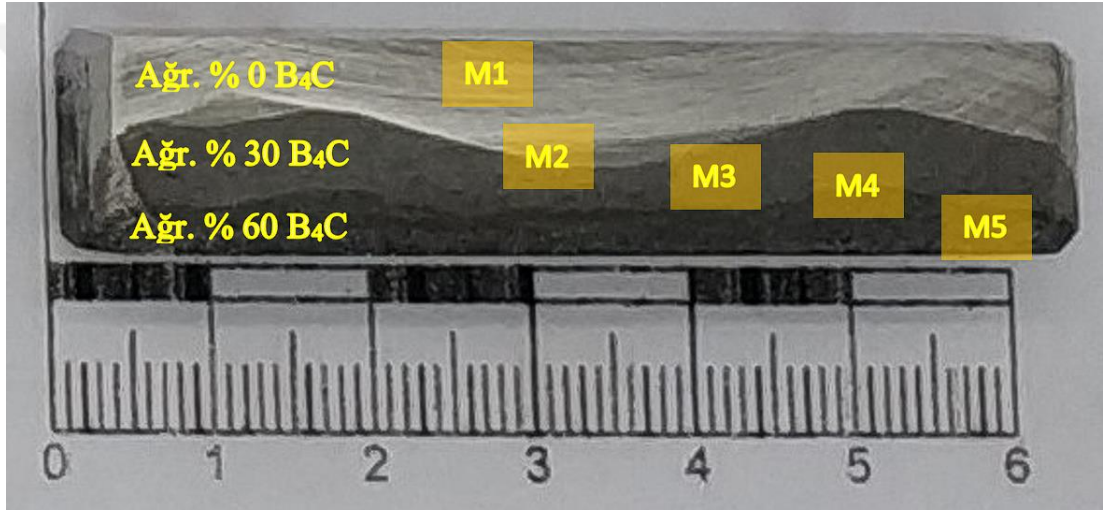


(f)

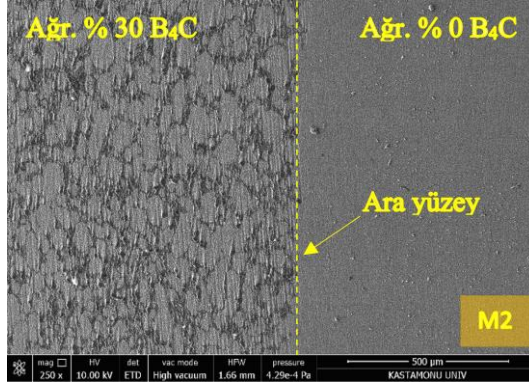
Şekil 6.2. 0A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) Büyütülmüş “M5” bölgesi, f) “M5” bölgesi

Şekil 6.2’de 0A numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde siyah bölgeler B₄C takviye elemanını açık bölgeler ise matris tabakasını ifade etmektedir. Şekil 6.2 (a) ve (c) ‘de ara yüzey geçişleri incelendiğinde ara yüzeylerin bir hat boyunca uzandığı ve

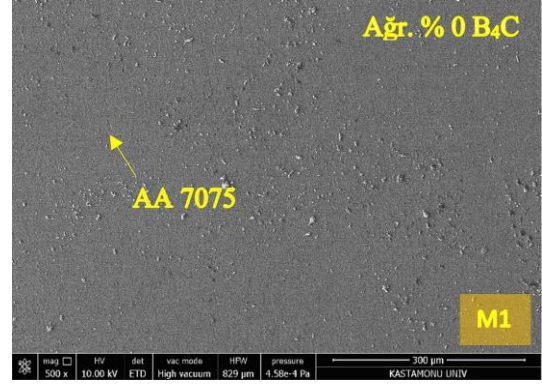
herhangi bir ayrılma ve kırılma gözlenmemiştir. Şekil 6.2 (d)'de % 30 B₄C içeren tabakasında bazı bölgelerde topaklanmalar görülmekte olup B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojendir. Şekil 6.2 (f)'de % 60 B₄C içeren tabakasında B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenekler ve topaklanmalar görülmüştür. 0A numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.2 (e)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde bazı bölgelerde tane sınırında çatlak, topaklanma ve gözenek görülmüştür.



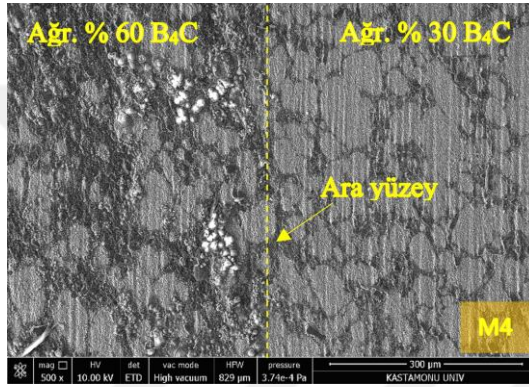
Şekil 6.3. 30A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



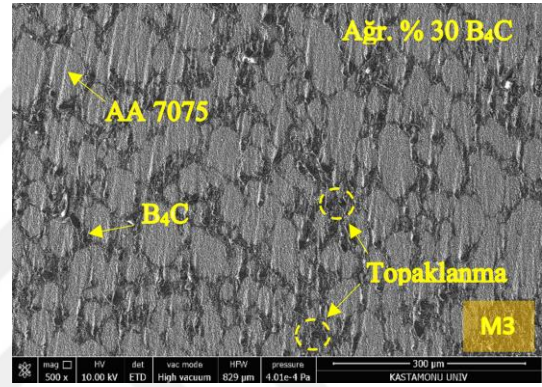
(a)



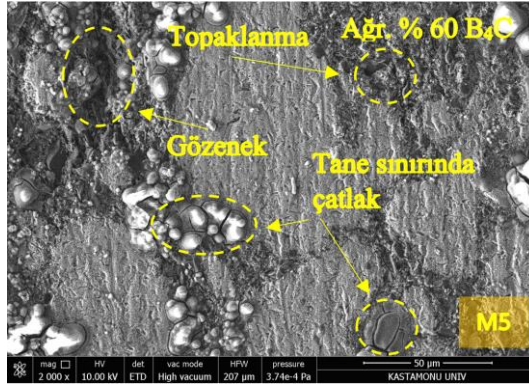
(b)



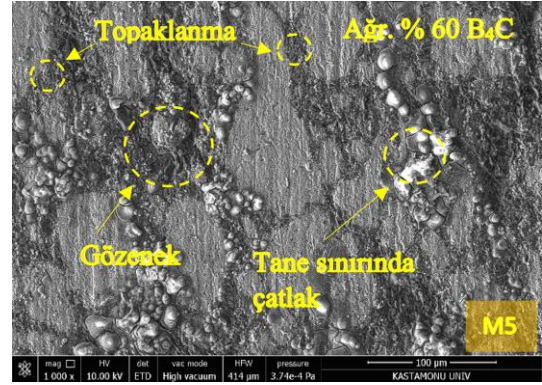
(c)



(d)



(e)

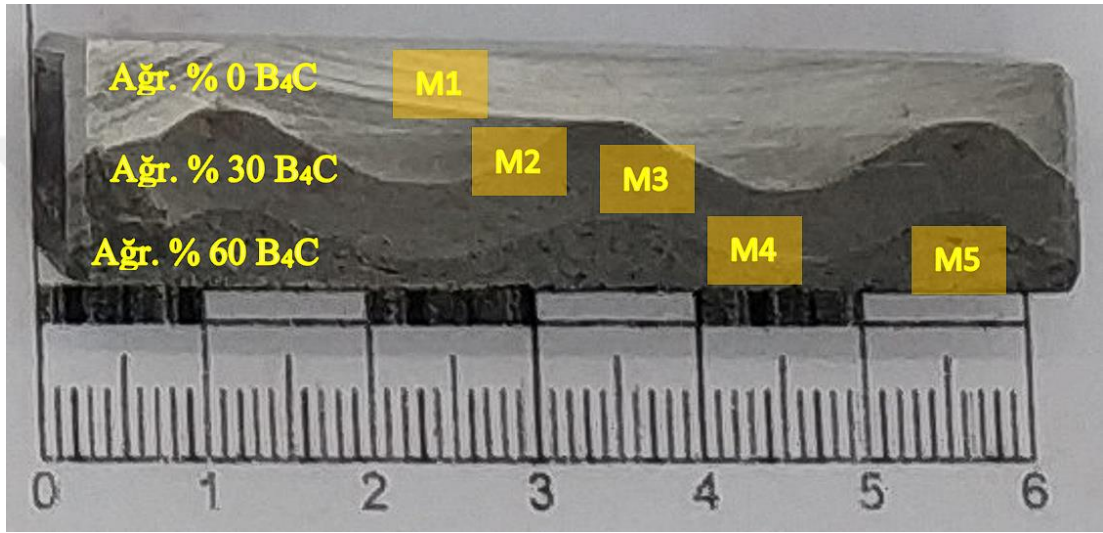


(f)

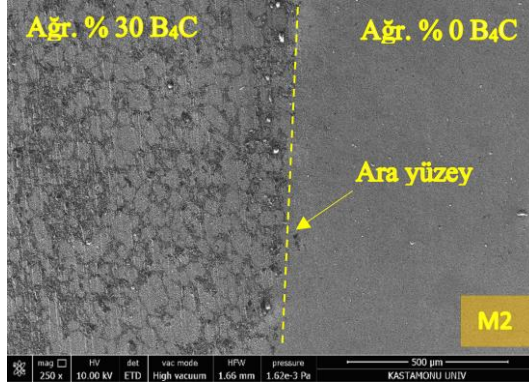
Şekil 6.4. 30A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) Büyütülmüş “M5” bölgesi, f) “M5” bölgesi

Şekil 6.4 (a) ve (c)’de 30A numunesinin ara yüzey geçişlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde; ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma gözlenmemiştir. Şekil 6.4 (d)’de % 30 B₄C içeren tabakasında B₄C takviye

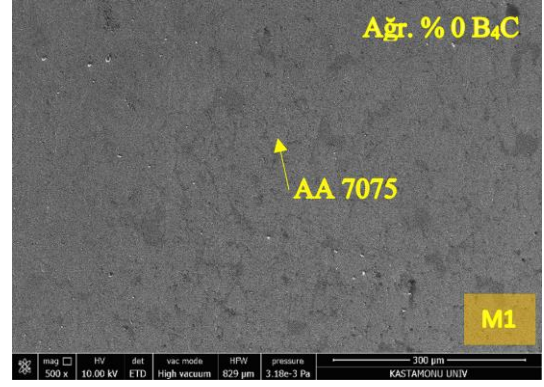
elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen olup bazı bölgelerde topaklanmalar mevcuttur. Şekil 6.4 (f)'de % 60 B₄C içeren tabakası kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenek ve topaklanma görülmüştür. 30A numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.4 (e)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde bazı bölgelerde tane sınırında çatlaklar, topaklanma ve gözenek görülmüştür.



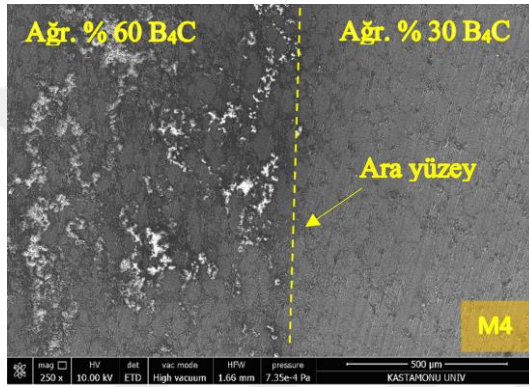
Şekil 6.5. 45A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



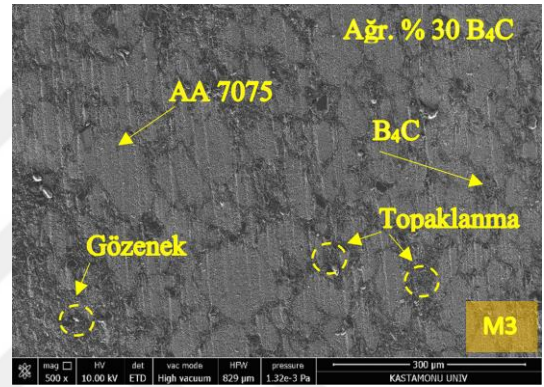
(a)



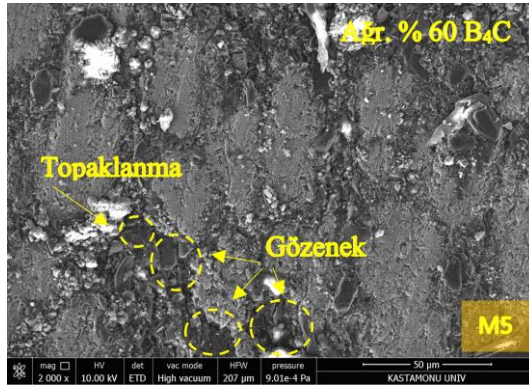
(b)



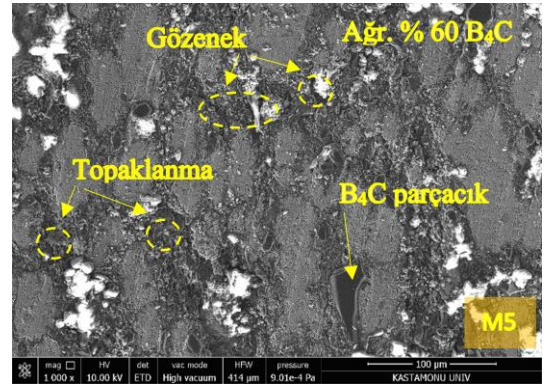
(c)



(d)



(e)

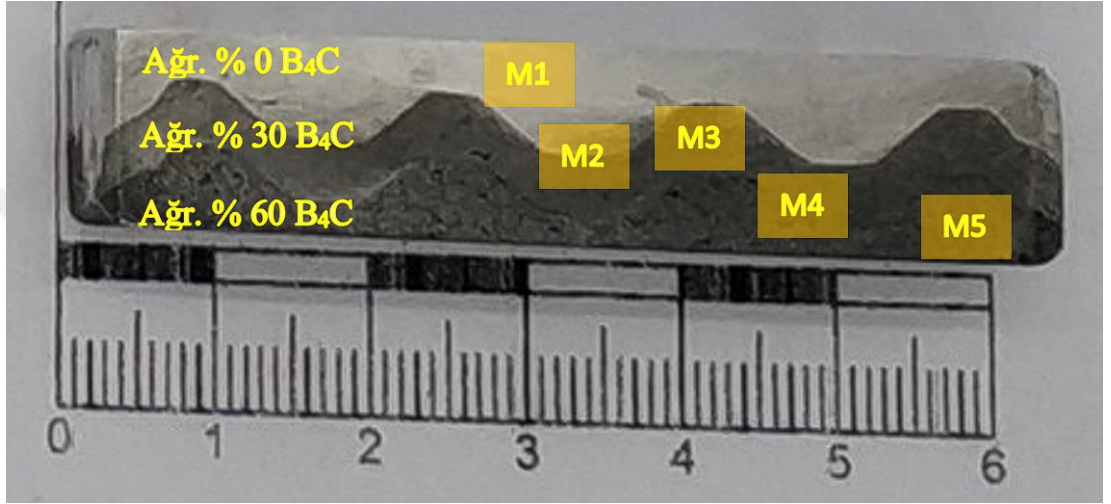


(f)

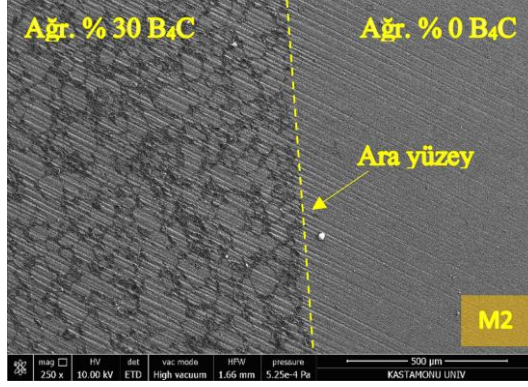
Şekil 6.6. 45A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) Büyütülmüş “M5” bölgesi, f) “M5” bölgesi

Şekil 6.6 (a) ve (c)’de 45A numunesinin ara yüzey geçişlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde; ara yüzeylerin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma gözlenmemiştir. Şekil 6.6 (d)’de % 30 B₄C içeren tabakasında bazı bölgelerde

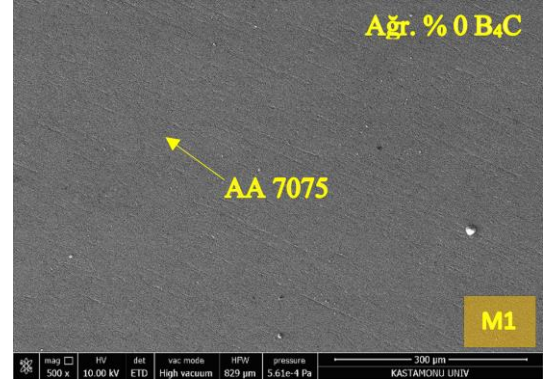
gözenek ve topaklanmalar görülmekte olup kısmen homojendir. Şekil 6.6 (f)'de %60 B₄C içeren tabakası kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenekler ve topaklanmalar görülmüştür. 45A numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.6 (e)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde bazı bölgelerde topaklanma ve gözenekler görülmüştür.



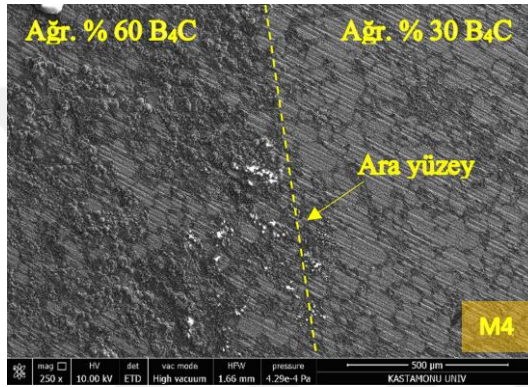
Şekil 6.7. 60A numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



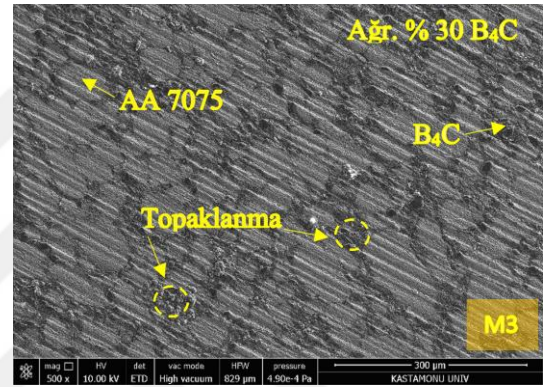
(a)



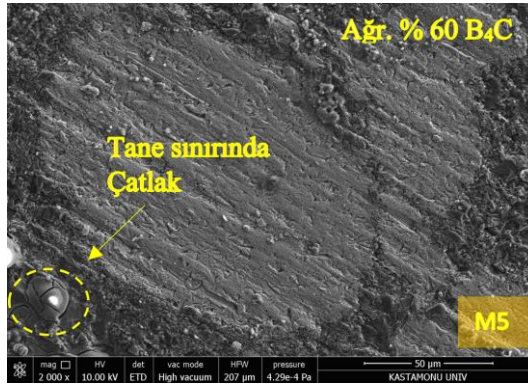
(b)



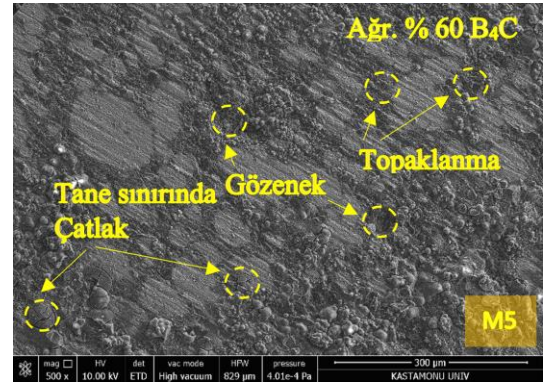
(c)



(d)



(e)

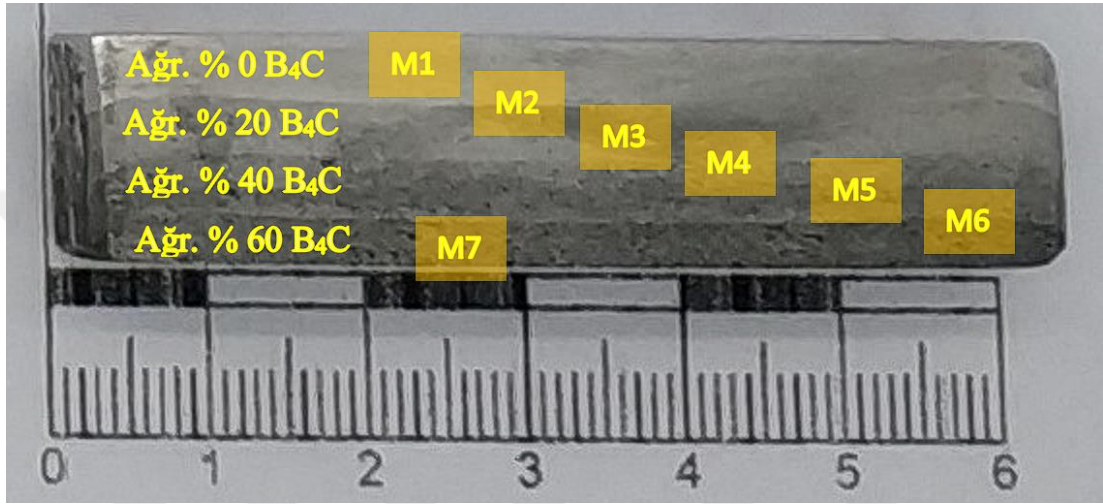


(f)

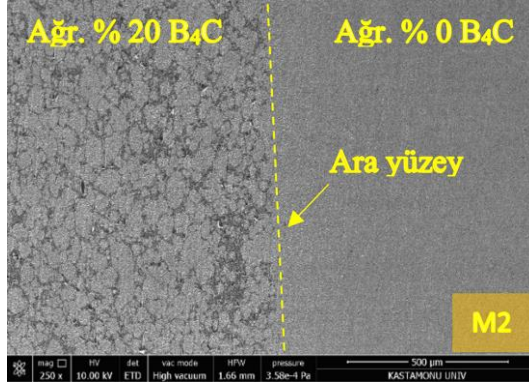
Şekil 6.8. 60A numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) Büyütülmüş “M5” bölgesi, f) “M5” bölgesi

Şekil 6.8 (a) ve (c)’de 60A numunesinin ara yüzey geçişlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma görülmemektedir. Şekil 6.8 (d)’de % 30 B₄C içeren tabakası kısmen

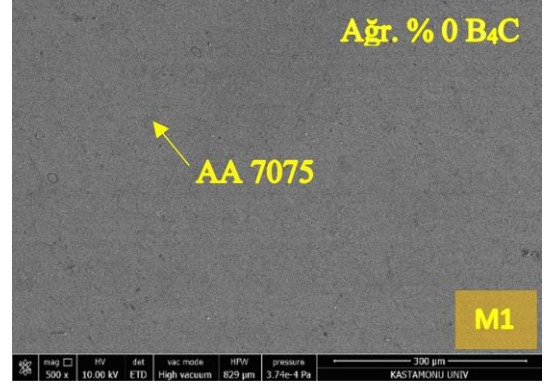
homojen olup bazı bölgelerde topaklanmalar mevcuttur. Şekil 6.8 (f)'de % 60 B₄C içeren tabakası kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenekler, topaklanmalar ve tane sınırında çatlaklar görülmüştür. 60A numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.8 (e)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde tane sınırında çatlak görülmüştür.



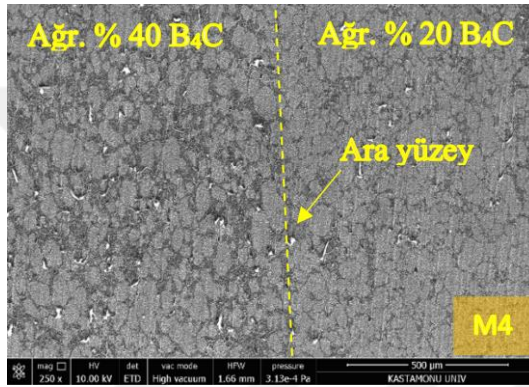
Şekil 6.9. 0B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



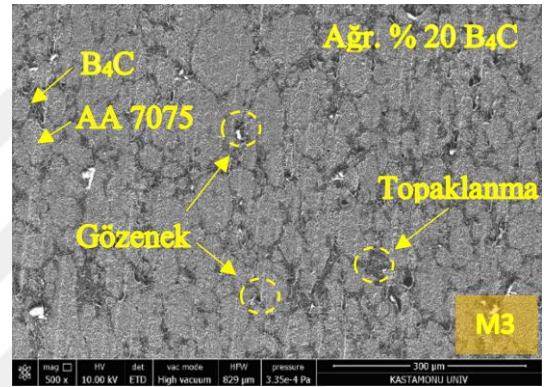
(a)



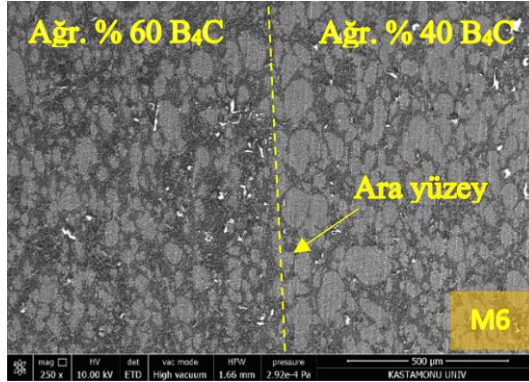
(b)



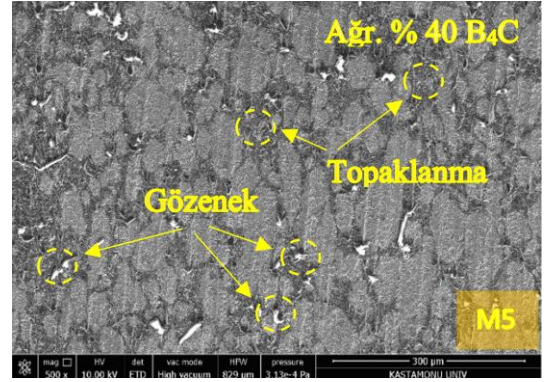
(c)



(d)

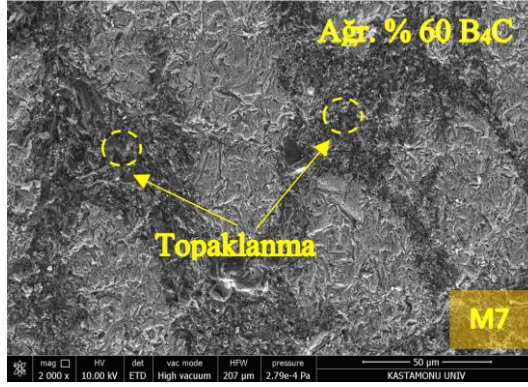


(e)

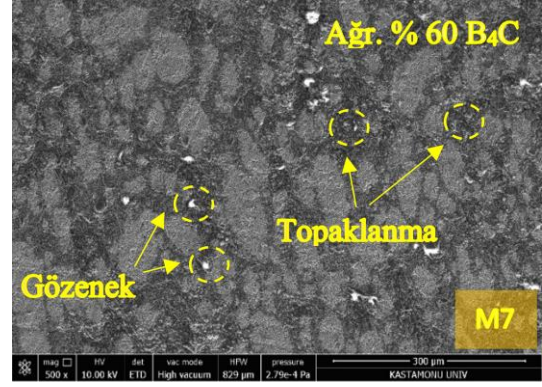


(f)

Şekil 6.10. 0B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) “M6” bölgesi, f) “M5” bölgesi g) Büyütülmüş “M7” bölgesi, h) “M7” bölgesi



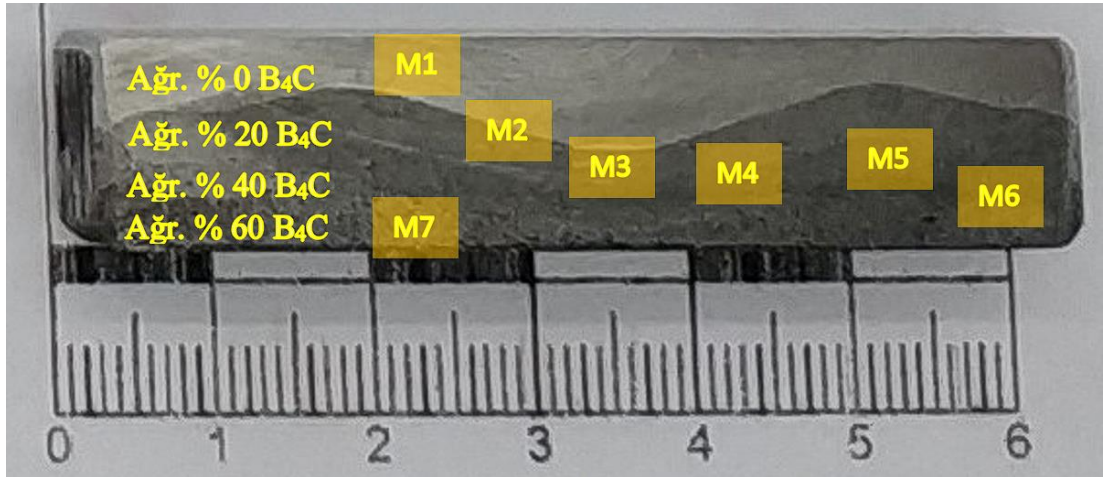
(g)



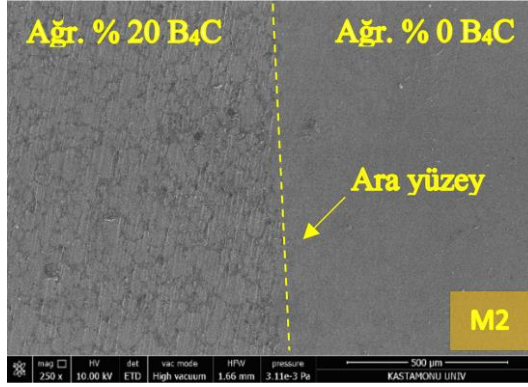
(h)

Şekil 6.10. (devam ediyor).

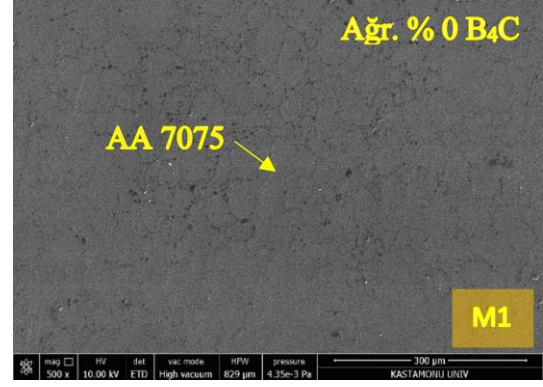
Şekil 6.10 (a), (c) ve (e) 'de 0B numunesinin ara yüzey geçişlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma görülmemektedir. Şekil 6.10 (d), (f) ve (h)'da SEM görüntülerinde bazı bölgelerde topaklanmalar ve gözenekler görülmekle birlikte kısmen homojendir. 0B numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.10 (g)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde bazı bölgelerde topaklanmalar görülmüştür.



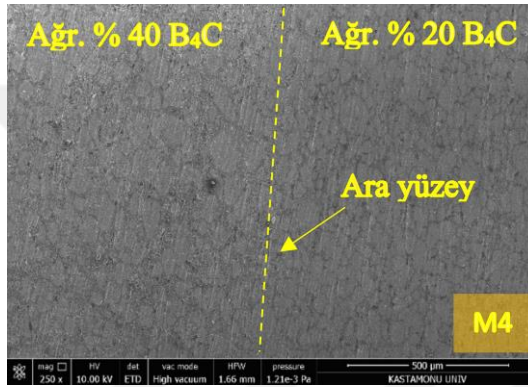
Şekil 6.11. 30B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



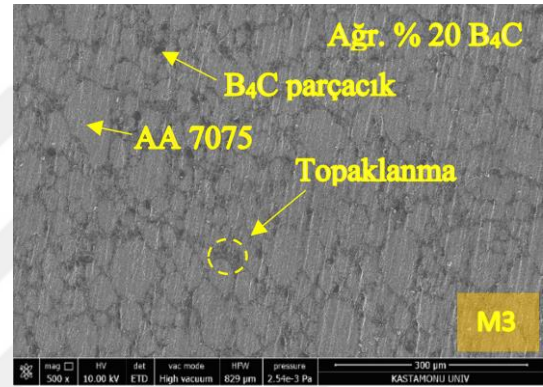
(a)



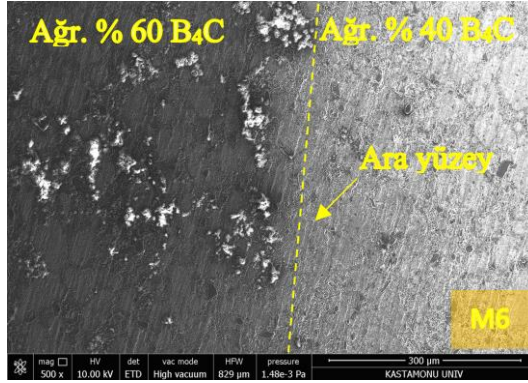
(b)



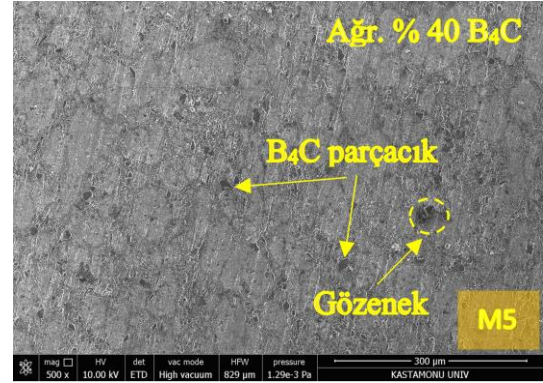
(c)



(d)

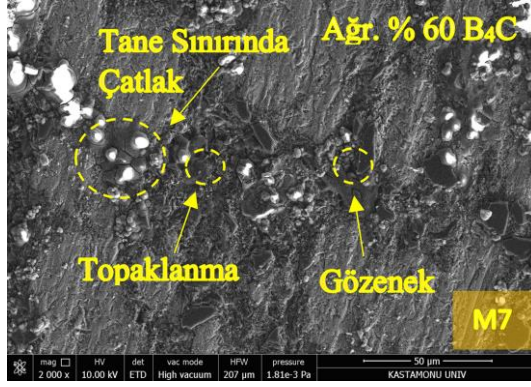


(e)

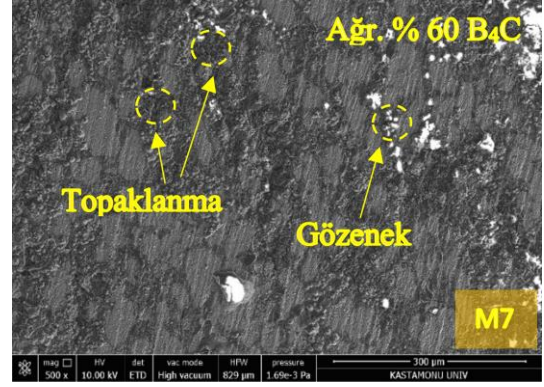


(f)

Şekil 6.12 30B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) “M6” bölgesi, f) “M5” bölgesi g) Büyütülmüş “M7” bölgesi, h) “M7” bölgesi



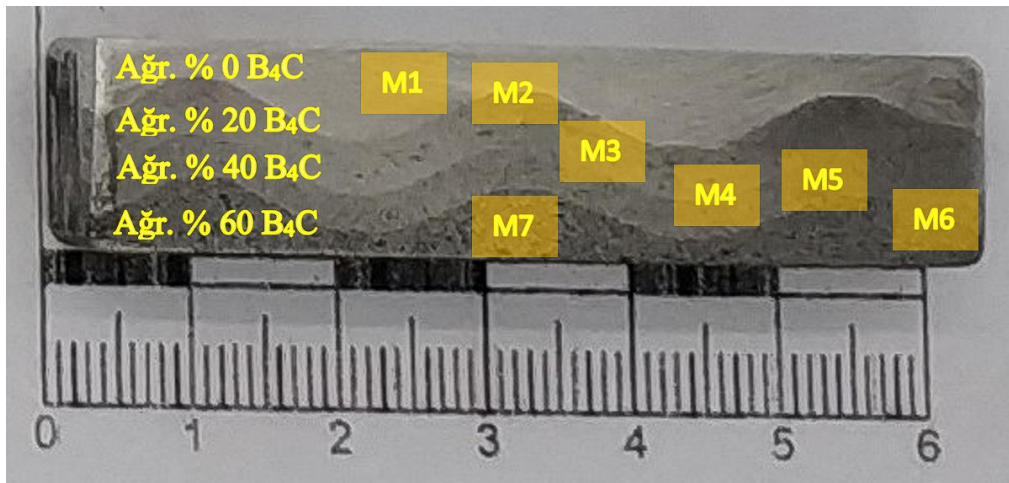
(g)



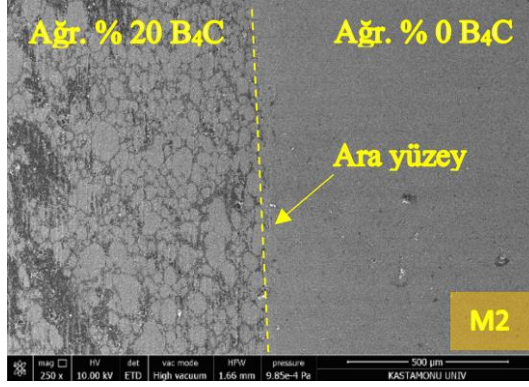
(h)

Şekil 6.12. (devam ediyor).

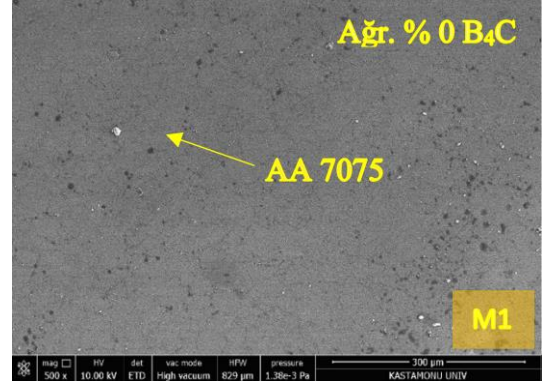
Şekil 6.12 (a), (c) ve (e)'de 30B numunesinin ara yüzey geçişlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma görülmemektedir. Şekil 6.12 (d)'de % 20 B₄C içeren tabakasında bazı bölgelerde topaklanma olup B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen dağılmıştır. Şekil 6.12 (f) ve (h)'da SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenek ve topaklanmalar görülmüştür. 30B numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.12 (g)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsü ayrıntılı olarak incelendiğinde tane sınırında çatlaklar, topaklanma ve gözenek görülmüştür.



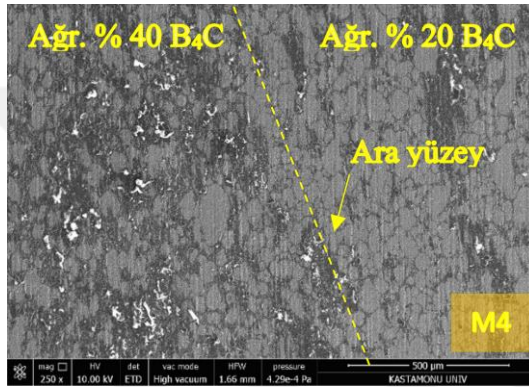
Şekil 6.13. 45B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



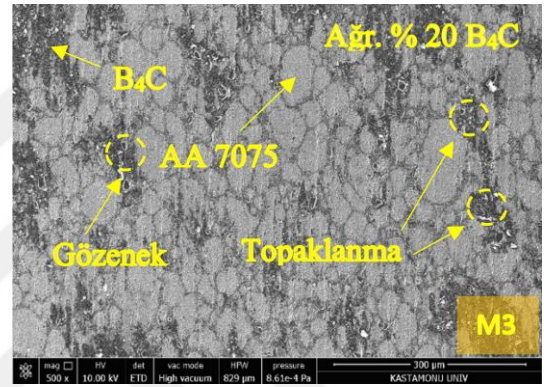
(a)



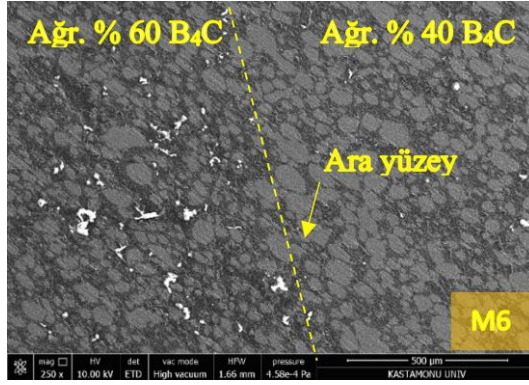
(b)



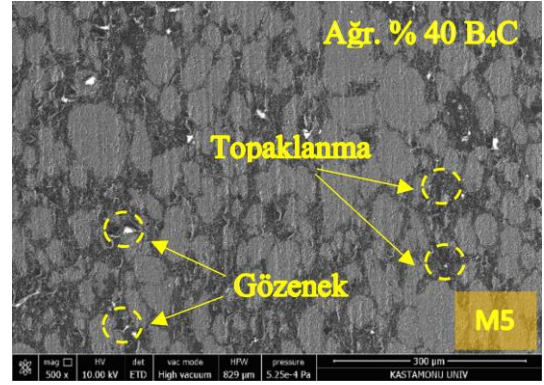
(c)



(d)

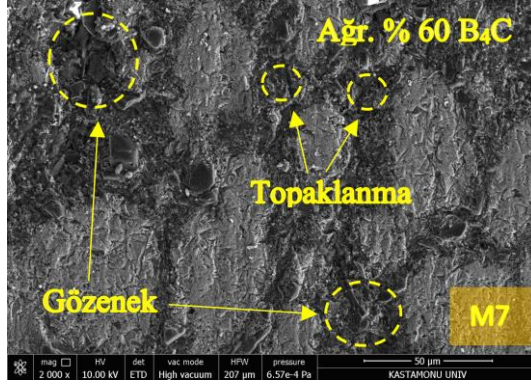


(e)

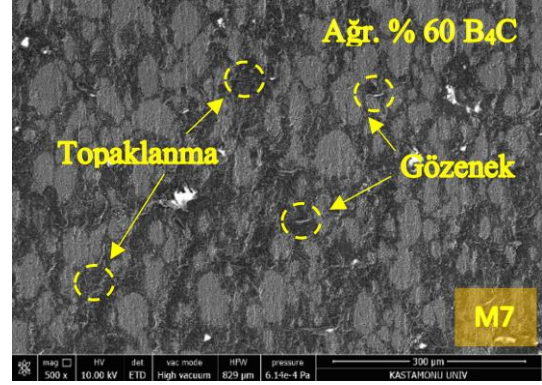


(f)

Şekil 6.14. 45B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) “M6” bölgesi, f) “M5” bölgesi g) Büyütülmüş “M7” bölgesi, h) “M7” bölgesi



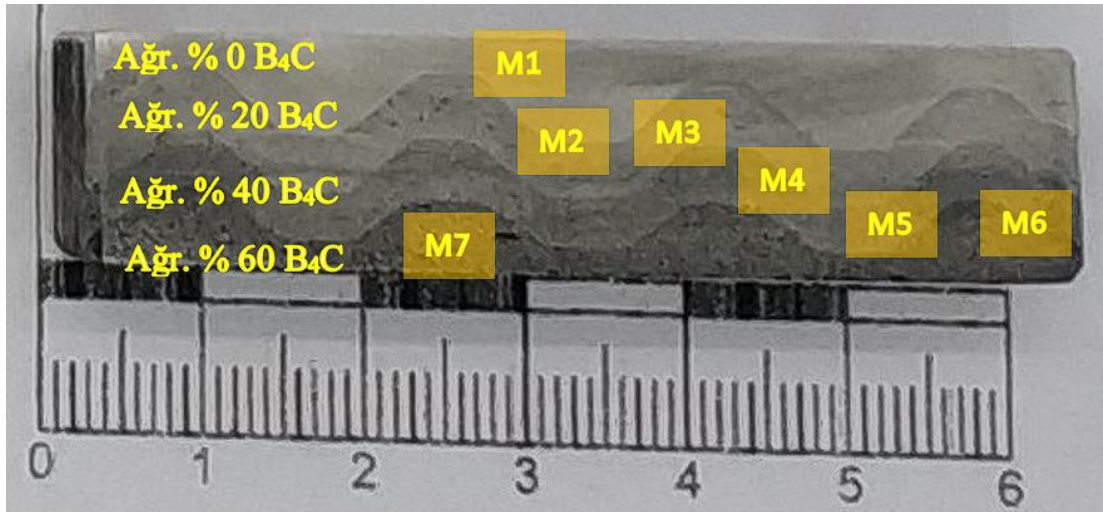
(g)



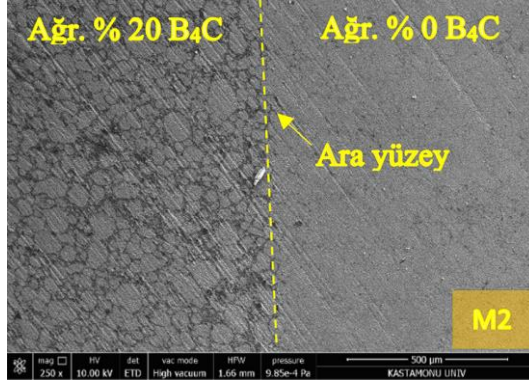
(h)

Şekil 6.14. (devam ediyor).

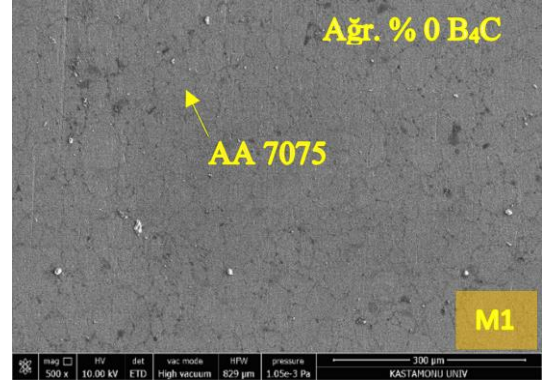
Şekil 6.14 (a), (c) ve (e)'de 45B numunesinin ara yüzey geçişleri incelendiğinde ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma görülmemektedir. Şekil 6.14 (d), (f) ve (h)'da SEM görüntülerinin bazı bölgelerde topaklanma ve gözenek olup B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen dağılmıştır. 45B numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.14 (g)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde tane sınırında topaklanma ve gözenekler görülmüştür.



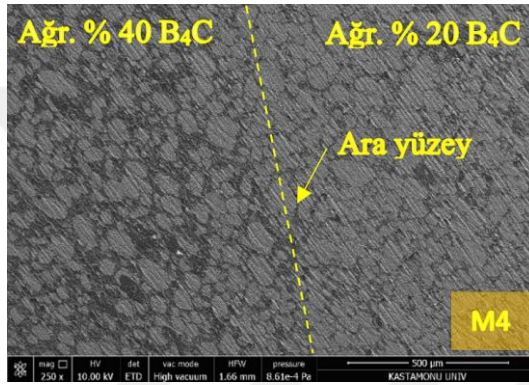
Şekil 6.15. 60B numunesinin mikroyapı inceleme bölgelerini gösteren makro fotoğraf



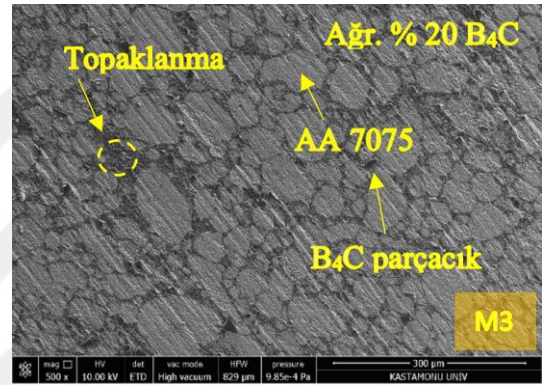
(a)



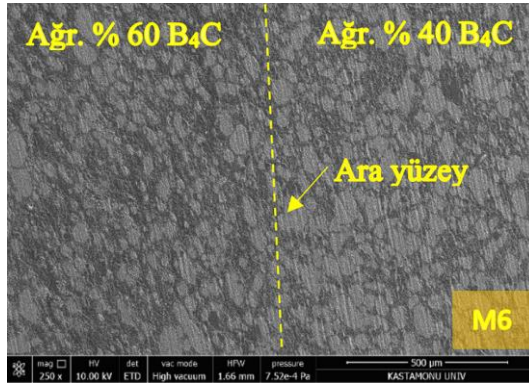
(b)



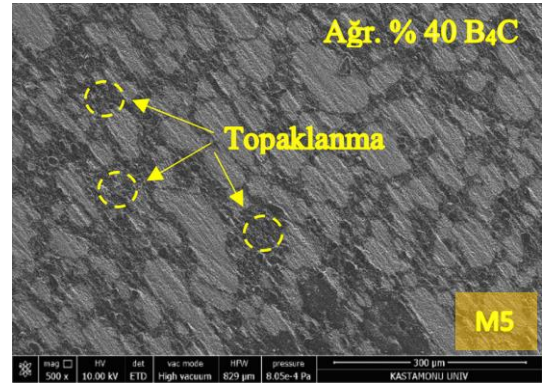
(c)



(d)

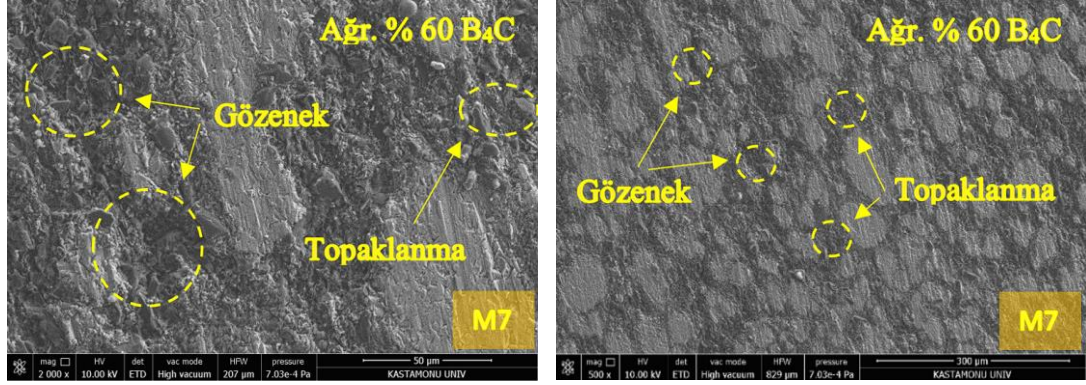


(e)



(f)

Şekil 6.16. 60B numunesinin mikroyapısına ait SEM görselleri; a) “M2” bölgesi, b) “M1” bölgesi, c) “M4” bölgesi, d) “M3” bölgesi, e) “M6” bölgesi, f) “M5” bölgesi g) Büyütülmüş “M7” bölgesi, h) “M7” bölgesi



(g)

(h)

Şekil 6.16. (devam ediyor).

Şekil 6.16 (a), (c) ve (e)'de 60B numunesinin ara yüzey geçişleri SEM görüntülerinde ara yüzey geçişinin bir hat boyunca uzandığı ve herhangi bir ayrılma ve kırılma görülmemektedir. Şekil 6.16 (d)'de % 20 B₄C içeren tabakasında bazı bölgelerde topaklanma olup B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen dağılmıştır. Şekil 6.16 (f) ve (h)'da SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanı AA 7075 matris içinde kısmen homojen olup bazı bölgelerde gözenekler ve topaklanmalar görülmüştür. 60B numunesinde takviye oranı arttıkça gözenekler ve topaklanmalar artmaktadır. En fazla gözenek ve topaklanma % 60 B₄C içeren tabakada görülmüştür. Şekil 6.16 (g)'de % 60 B₄C içeren tabakanın büyütülmüş SEM görüntüsünde tane sınırında topaklanma ve gözenekler görülmüştür.

SEM görüntüleri incelendiğinde siyah ve açık bölgeler görülmüştür. Siyah bölgeler B₄C takviye elemanını ve açık bölgeler ise AA7075 matris malzemesini ifade etmektedir. SEM görüntülerinde B₄C takviye partikülünün AA7075 matrisi içinde homojene yakın dağılım gösterdiği gözlenmiştir. B₄C takviye partikülünün AA7075 matrisinin tane sınırları boyunca dağıldığı tespit edilmiştir. 0B, 30B, 45B ve 60B numunelerin % 20 B₄C takviye partikülü içeren ikinci tabakasının SEM görüntüleri incelendiğinde bazı bölgelerde topaklanmalar ve gözenekler görüldüğü ve B₄C takviye partikülünün AA7075 matris içerisinde kısmen homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ayrıca B₄C takviye partikülünün AA7075 tane sınırları boyunca düzgün yerleştiği tespit edilmiştir. 0A, 30A, 45A ve 60A numunelerin % 30 B₄C takviye partikülü içeren ikinci tabakasının SEM görüntüleri incelendiğinde bazı bölgelerde topaklanmalar ve

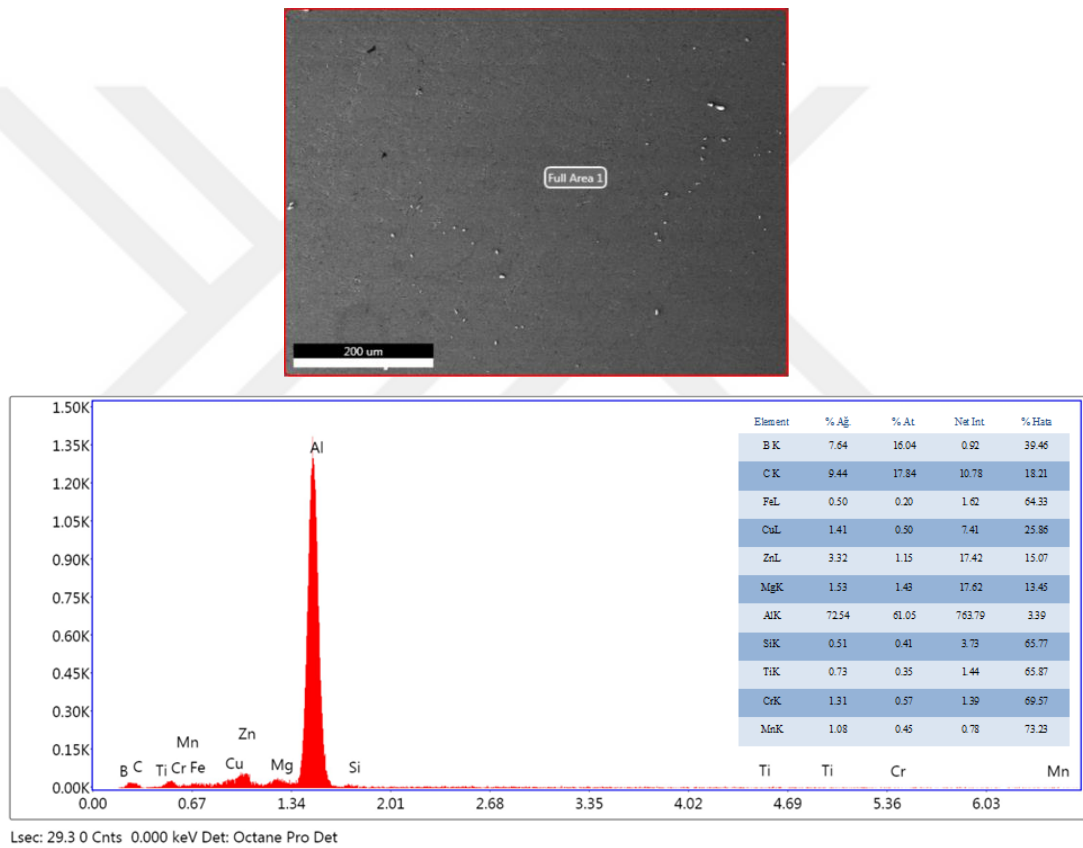
gözenekler görüldüğü ve B₄C takviye partikülünün AA7075 matris içerisinde homojene yakın dağıldığı gözlenmiştir. B₄C takviye partikülünün AA7075 tane sınırları boyunca yerleştiği tespit edilmiştir. 0B, 30B, 45B ve 60B numunelerin % 40 B₄C takviye partikülü içeren üçüncü tabakasının SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye partikülünün AA7075 matris içerisinde kısmen homojen olduğu bazı bölgelerde topaklanmalar ve gözenekler görüldüğü gözlenmiştir. 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin % 60 B₄C takviye partikülü içeren tabakasının SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye partikülünün AA7075 matris içerisinde kısmen homojen olduğu bazı bölgelerde tane sınırında çatlaklar, topaklanmalar, mikro boşluklar ve gözeneklerin görüldüğü gözlenmiştir. Tane sınırında çatlakların nedeni matris ile takviye elemanı arasındaki ısı genleşme farklılıkları olduğu düşünülmektedir. FDM'nin tabakalarında takviye miktarı arttıkça tane sınırı boyunca takviye elemanı miktarının arttığı görülmüştür. Bu durumun, FDM mikroyapısında, topaklanma, mikro boşluklar ve gözenegi artırdığı tespit edilmiştir[19,23,26].

İmalatı gerçekleştirilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin tabakalar arası geçiş bölgeleri incelendiğinde direnç, ısı iletkenlik ve mukavemeti etkileyecek numune boyunca hiçbir ayrılma ve kırılma görülmemiştir. FDM 'nin bir tabakadan diğerine geçişlerin sürekli olduğu gözlenmiştir. 0B, 30B, 45B ve 60B numunelerinin düşük takviye oranlarında tabakalar arası geçişlerin belirgin bir şekilde görülebildiği fakat yüksek takviye oranlarında geçişlerin belirgin olmadığı gözlenmiştir.

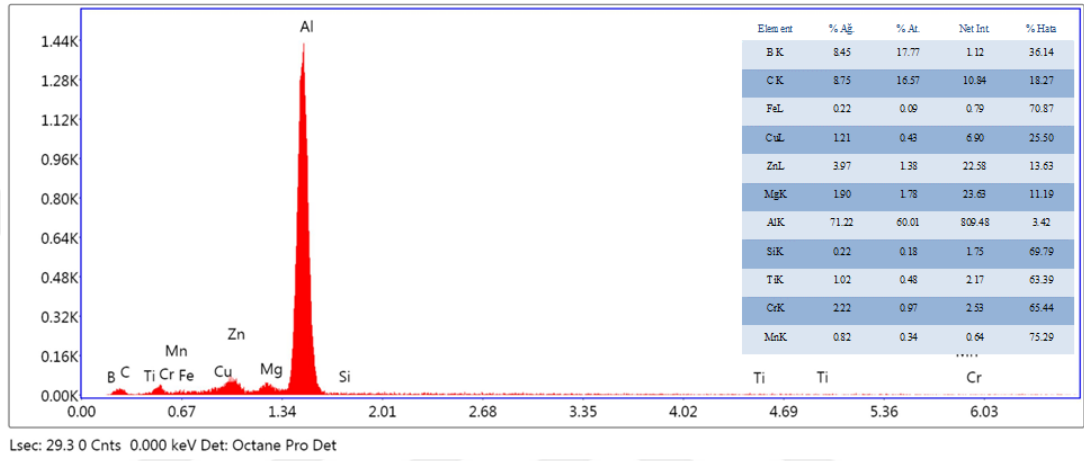
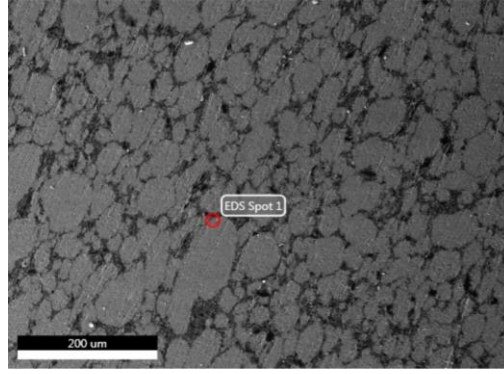
6.1.2 EDS Sonuçları

Üretilen FDM numunelerinin kimyasal bileşenlerini belirleyebilmek amacıyla 30A ve 30B numunelerinin EDS tekniği ile analizleri yapılmıştır. Yapılan EDS analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 6.17 ile 6.21 arasında sunulmuştur. Şekil 6.17'de 30B numunesinin birinci tabakasında temel elementin Al olduğu azda olsa B ve C elementlerini içerdiği tespit edilmiştir. Şekil 6.18'de 30B numunesinin ikinci tabakasında temel elementin Al olduğu ve takviye elemanın elementleri B ve C gözlenmiştir. Şekil 6.19 (a)'da 30A numunesinin ikinci tabakasındaki spot 1'in EDS sonucu incelendiğinde temel elementlerinin B ve C olduğu görülmüştür. Şekil 6.19

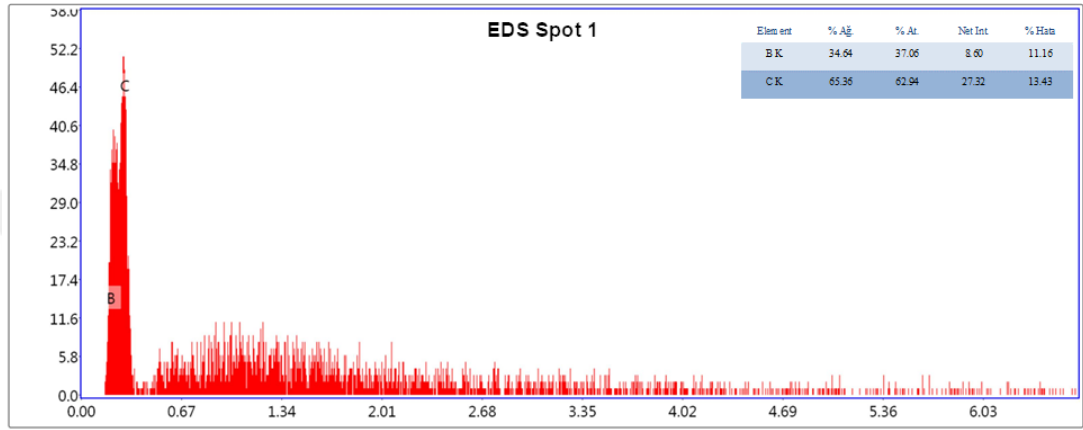
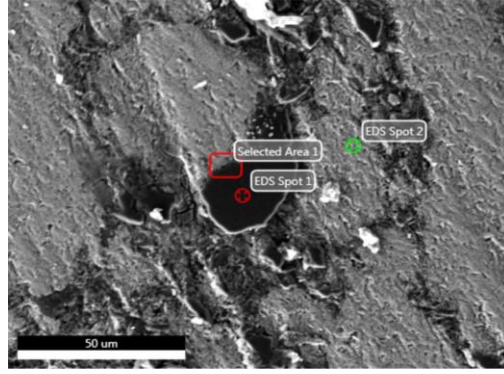
(b)'de 30A numunesinin ikinci tabakasındaki spot 2 noktasının EDS sonucu incelendiğinde temel elementin Al olduğu görülmüştür. Şekil 6.19 (c)'de 30A numunesinin ikinci tabakasındaki selected area 1 noktasının EDS sonucu incelendiğinde temel elementin Al olduğu, B ve C elementlerinin gözlemlendiği tespit edilmiştir. Şekil 6.20'de 30B numunesinin üçüncü tabakasında ve Şekil 6.21'de 30B numunesinin dördüncü tabakasında temel elementin Al olduğu ve takviye elemanın elementleri B ve C gözlenmiştir. Bu sonuçtan anlaşılabacağı üzere seçilen şekil 6.18 ile 6.21 arasındaki EDS alanlarının kompozit tabakalardan oluştuğunu desteklemektedir.



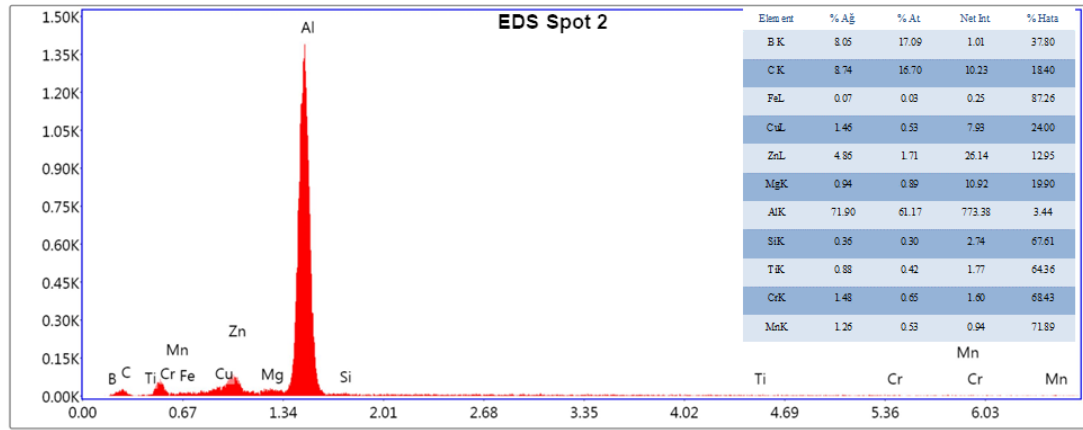
Şekil 6.17. 30B numunesinin birinci tabakasının EDS analizi



Şekil 6.18. 30B numunesinin ikinci tabakasının EDS analizi

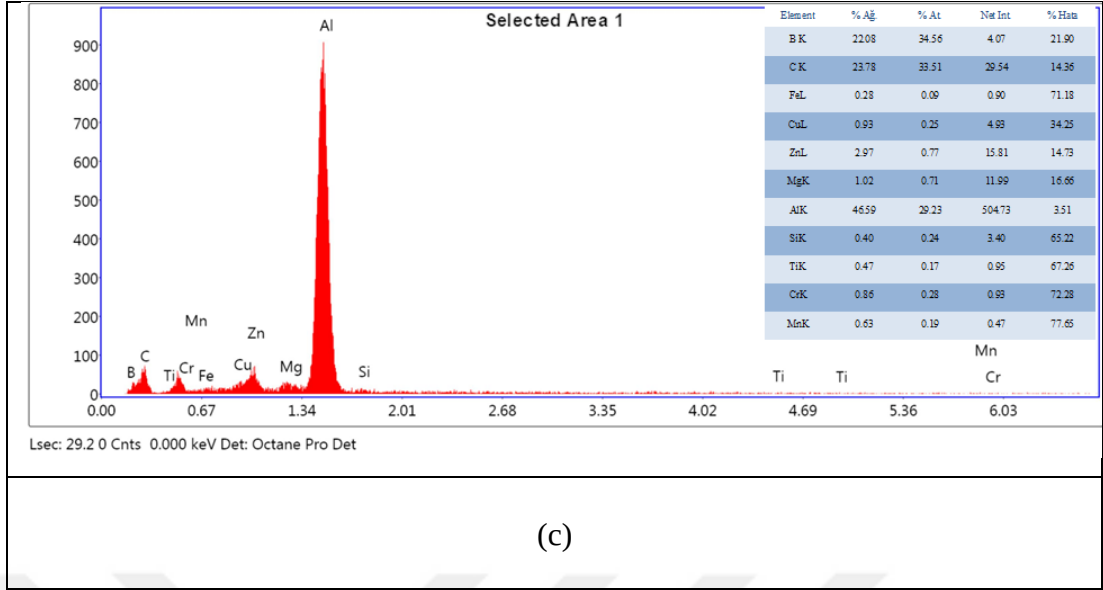


(a)

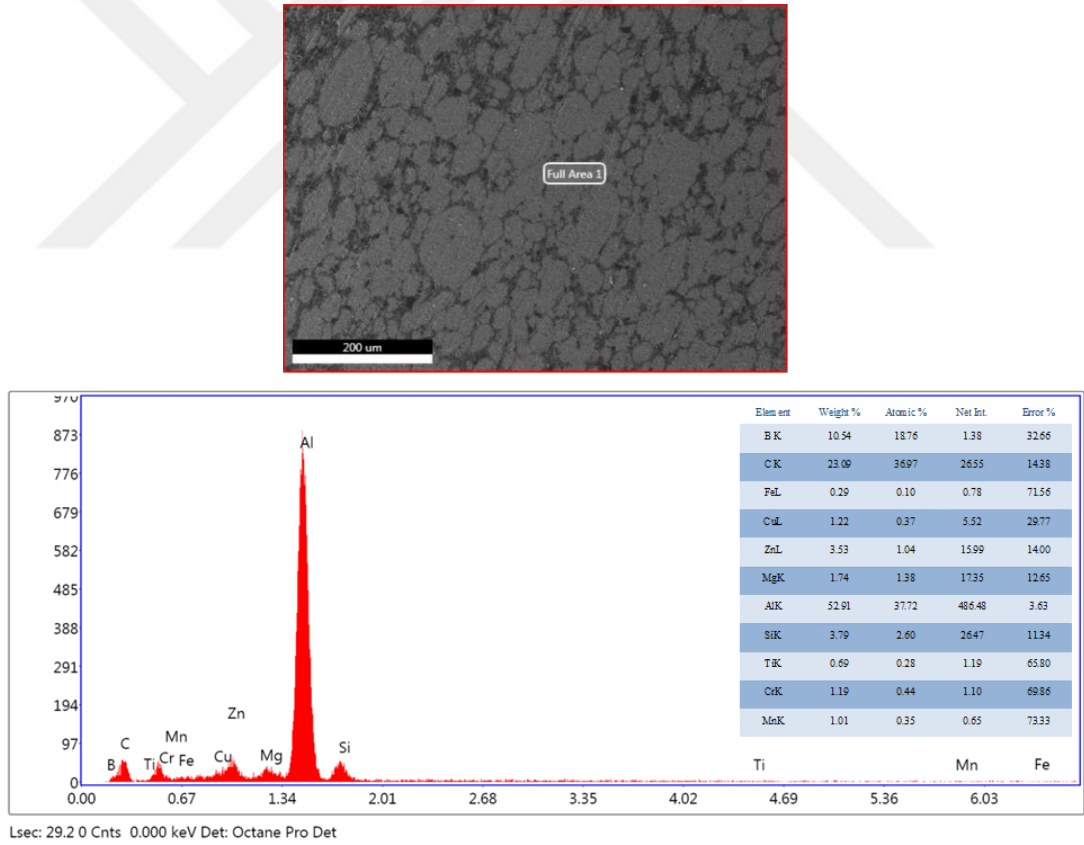


(b)

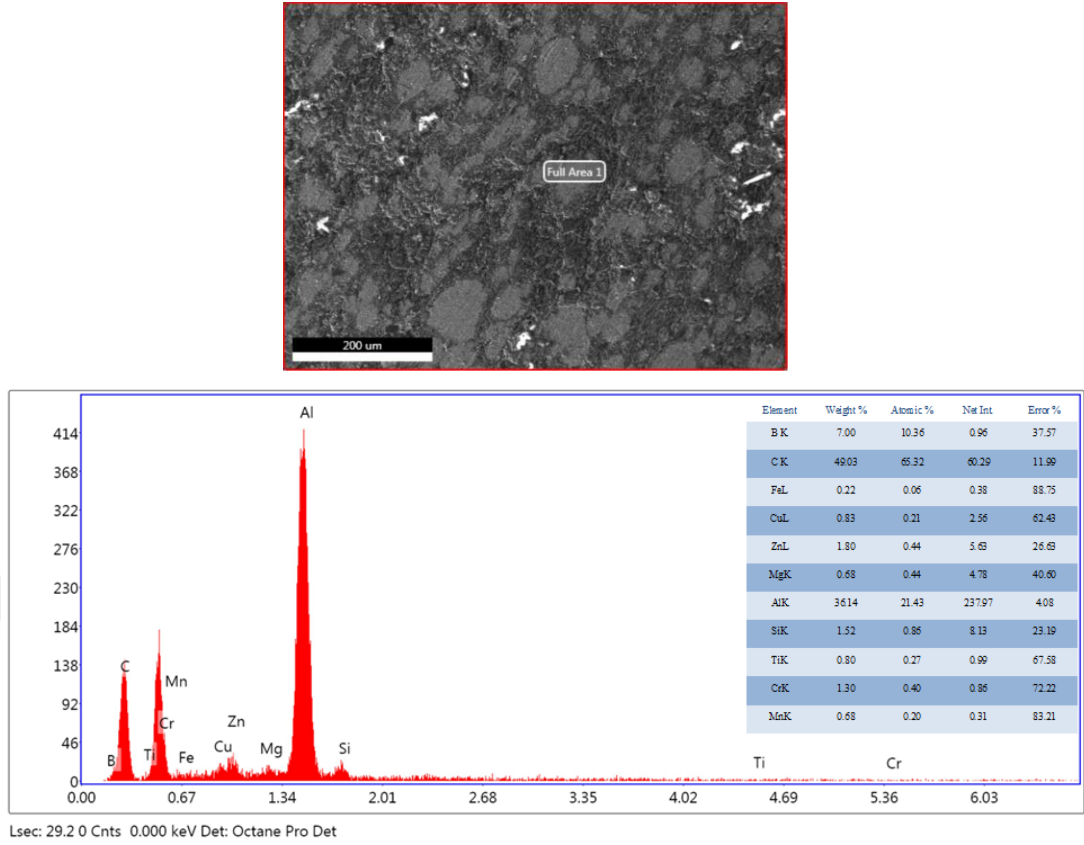
Şekil 6.19. 30A numunesinin ikinci tabakasının a) Spot 1 noktasının EDS analizi b) Spot 2 noktasının EDS analizi c) Selected area 1 bölgesinin EDS analizi



Şekil 6.19. (devam ediyor).



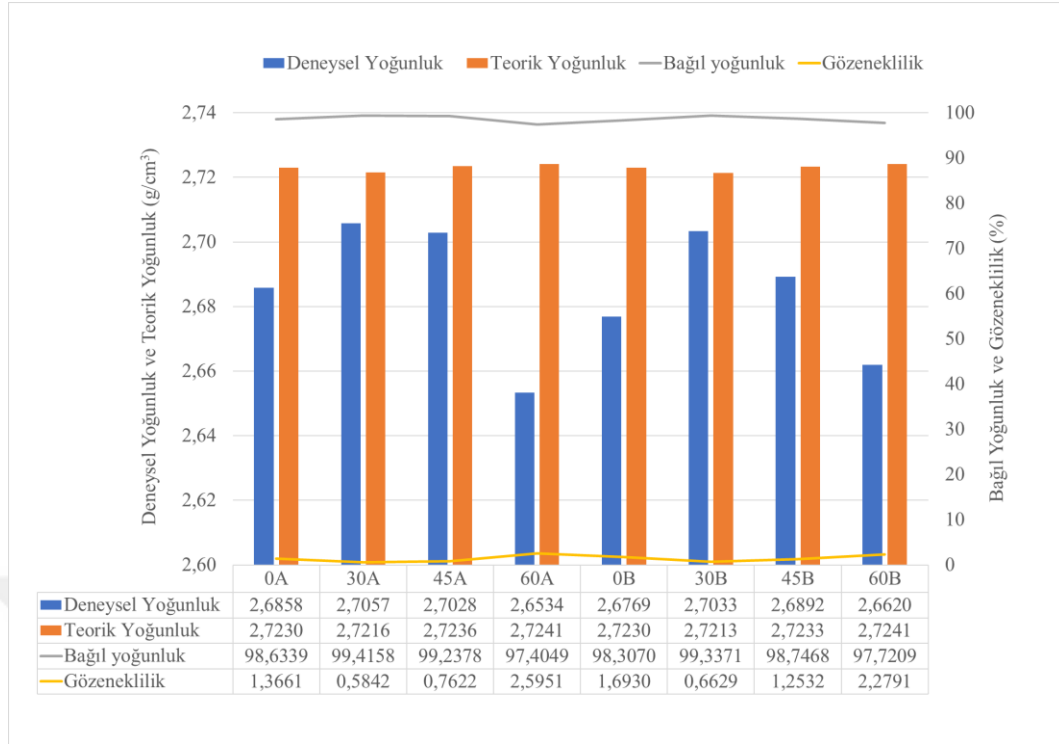
Şekil 6.20. 30B numunesinin üçüncü tabakasının EDS analizi



Şekil 6.21. 30B numunesinin dördüncü tabakasının EDS analizi

6.1.3 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

İmal edilen üç ve dört tabakalı FDM'lerin deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözenekliliklerine ait sonuçlar ve grafik Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Şekil 6.22 incelendiğinde en yüksek deneysel yoğunluk değeri 2,7057 g/cm³ değer ile 30A numunesi göstermiştir ve en düşük yoğunluk değeri 2,6534 g/cm³ değer ile 60A numunesi göstermiştir. Deneysel yoğunluklar incelendiğinde 60A numunesi hariç aynı tip üç tabakalı FDM'lerin deneysel yoğunlukları aynı tip dört tabakalı FDM'lere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bağıl yoğunluklar incelendiğinde 60A numunesi hariç aynı tip 3 tabakalı FDM'lerin bağıl yoğunlukları aynı tip dört tabakalıya göre daha yüksektir. B₄C takviye elemanı oranı dört tabakalı numunelerde üç tabakalı numunelere göre daha fazla artmaktadır. Bu durum B₄C takviye elemanı artış oranının sıkıştırılabilirliği olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir [95].



Şekil 6.22. Üç ve dört tabakalı FDM'lerin yoğunluk ve gözenekliliği

Şekil 6.22'de üç tabakalı FDM'lerin deneysel yoğunlukları incelendiğinde 45A numunesinin deneysel yoğunluk değeri $2,7028 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Üç tabakalı en yüksek deneysel yoğunluğa sahip 30A numunesinin yoğunluk değeri 45A numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 0,11 daha yüksek değere sahiptir. Üç tabakalı en düşük deneysel yoğunluğa sahip 60A numunesinin deneysel yoğunluk değeri 45A numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 1,83 daha düşük değere sahiptir. 0A numunesinin deneysel yoğunluk değeri 45A numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 0,63 daha yüksek değere sahiptir.

Şekil 6.22'de dört tabakalı FDM'lerin deneysel yoğunluğu incelendiğinde 30B numunesi $2,7033 \text{ g/cm}^3$ değeri ile en yüksek deneysel yoğunluğa sahiptir. 45B numunesinin deneysel yoğunluk değeri 30B numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 0,52 daha düşük değere sahiptir. Dört tabakalı en düşük deneysel yoğunluğa sahip 60B numunesinin deneysel yoğunluk değeri 30B numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 1,53 daha düşük değere sahiptir. 0B numunesinin deneysel yoğunluk değeri 30B numunesinin deneysel yoğunluk değerinden % 0,98 daha düşük değere sahiptir.

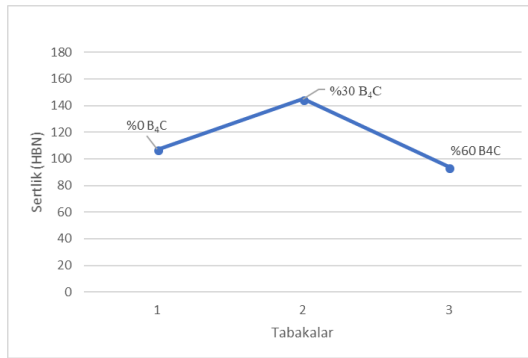
6.1.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin Brinell sertlik değerleri araştırılmıştır. FDM numunelerinin Brinell sertlik değerleri Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

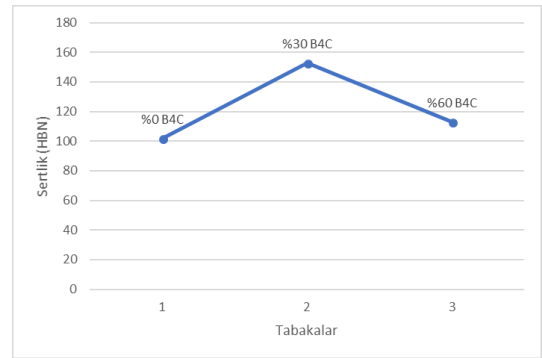
Çizelge 6.1. FDM’lerin Brinell sertlik değerleri

FDM Numuneleri	Brinell Sertlik Değerleri (HBN)			
	1. Tabaka (% 0 B ₄ C)	2. Tabaka (% 30 B ₄ C)	3. Tabaka (% 60 B ₄ C)	
0A	107	145	94	
30A	102	153	113	
45A	107	150	122	
60A	103	150	107	
FDM Numuneleri	1. Tabaka (% 0 B ₄ C)	2. Tabaka (% 20 B ₄ C)	3. Tabaka (% 40 B ₄ C)	4. Tabaka (% 60 B ₄ C)
0B	102	141	170	103
30B	107	127	161	111
45B	113	137	166	125
60B	102	132	164	130

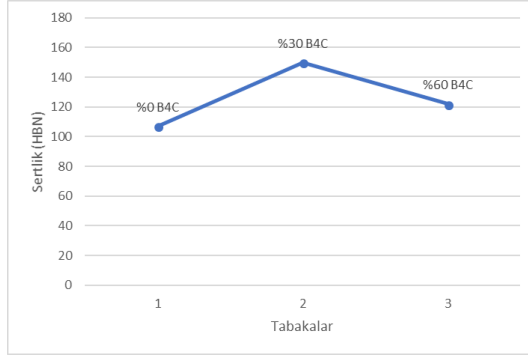
Çizelge 6.1’de 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin tabaka sertlikleri incelendiğinde en yüksek Brinell sertlik değeri 170 HBN ile 0B numunesinin üçüncü tabakasıdır. En düşük Brinell sertlik değeri ise 94 HBN ile 0A numunesinin üçüncü tabakasıdır. Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de sırası ile üç ve dört tabakalı FDM’lerin tabakalarına ait Brinell sertlik değerinin grafiksel gösterimi verilmiştir.



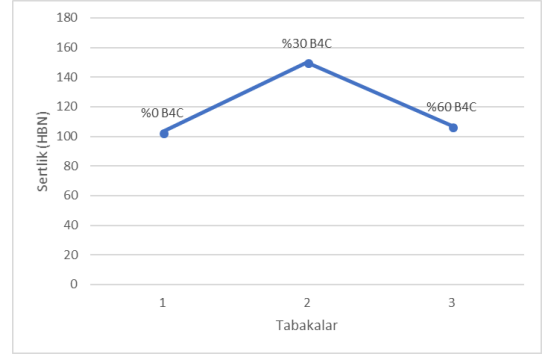
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.23. Brinell sertlik değerinin grafiksel gösterimi a) 0A b) 30A c) 45A d) 60A

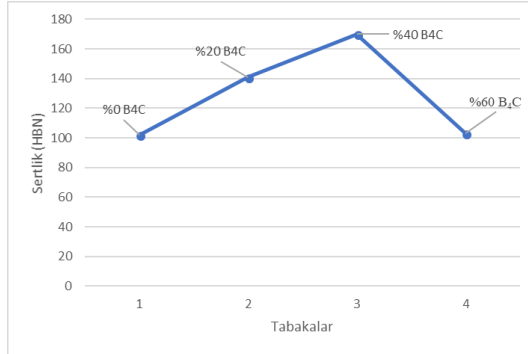
Şekil 6.23 (a) incelendiğinde 0A numunesinin en yüksek Brinell sertlik değeri 145 HBN ile ağırlıkça % 30 B₄C içeren ikinci tabakasından elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri 94 HBN ile ağırlıkça % 60 B₄C içeren üçüncü tabakasından elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakasının Brinell sertlik değeri 107 HBN'dir. 0A numunesinde ağırlıkça % 30 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır. Karışımlar kanuna göre takviye elemanı oranı arttıkça sertlik değerinin artması beklenir. Ağırlıkça % 60 B₄C içeren tabakada sertliğin azalmasının nedeni porozite ve topaklanmanın takviye elemanı oranı arttıkça artmasına bağlanabilir.

Şekil 6.23 (b) incelendiğinde 30A numunesinin en yüksek Brinell sertlik değeri 153 HBN ile ağırlıkça % 30 B₄C içeren ikinci tabakasından elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri en yüksek Brinell sertlik değerine sahip olan ikinci tabakadan % 33,33 daha düşük değere sahip olan ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 60 B₄C içeren üçüncü tabakasının Brinell sertlik değeri en yüksek Brinell sertlik değerine sahip olan ikinci tabakadan % 26,14 daha düşüktür. 0A numunelerine benzer şekilde 30A numunelerinde de ağırlıkça % 30 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır.

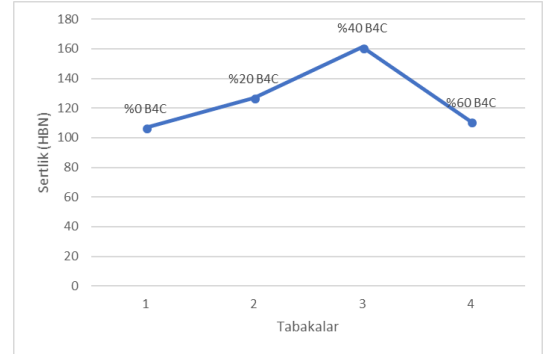
Şekil 6.23 (c) incelendiğinde 45A numunesinin en düşük Brinell sertlik değeri 107 HBN ile ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. En yüksek Brinell

sertlik değeri en düşük Brinell sertlik değerine sahip olan birinci tabakadan % 40,19 daha yüksek değere sahip olan ağırlıkça % 30 B₄C içeren ikinci tabakadan elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 60 B₄C içeren üçüncü tabakasının Brinell sertlik değeri en düşük Brinell sertlik değerine sahip olan birinci tabakadan % 14,02 daha yüksektir. 0A ve 30A numunelerine benzer şekilde üç tabakalı 45A numuneside ağırlıkça %30 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır.

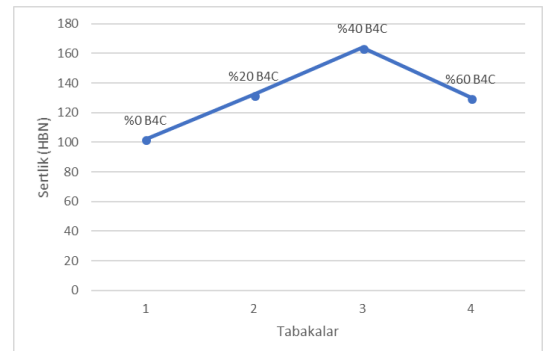
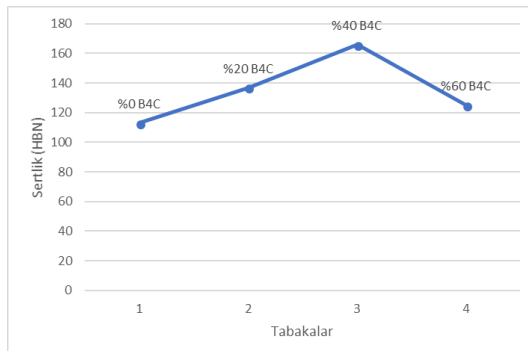
Şekil 6.23 (d) incelendiğinde 60A numunesinin ağırlıkça % 60 B₄C içeren üçüncü tabakanın Brinell sertlik değeri 107 HBN'dir. En yüksek Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 60 B₄C içeren üçüncü tabakanın Brinell sertlik değerinden % 40,19 daha yüksek değere sahip olan ağırlıkça % 30 B₄C içeren ikinci tabakadan elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri % 60 B₄C içeren üçüncü tabakanın Brinell sertlik değerinden %3,74 daha düşük değere sahip olan ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. 0A, 30A ve 45A numunelerine benzer şekilde 60A numuneside ağırlıkça % 30 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır.



(a)



(b)



(c)

(d)

Şekil 6.24. Brinell sertlik değerinin grafiksel gösterimi a) 0B b) 30B c) 45B d) 60B.

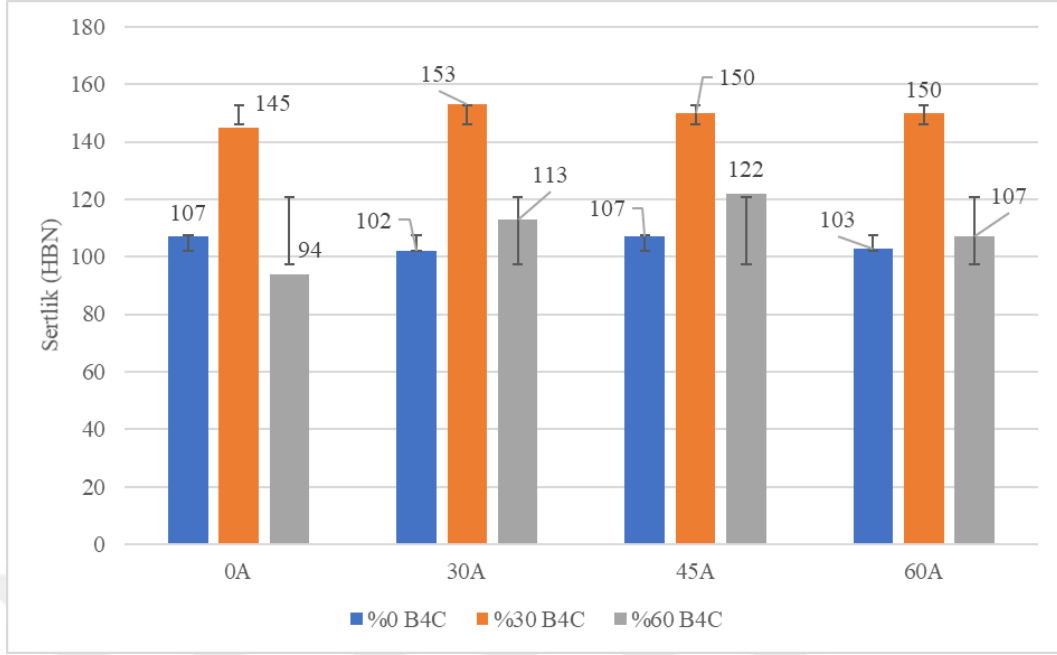
Şekil 6.24 (a) incelendiğinde 0B numunesinin en yüksek Brinell sertlik değeri 170 HBN ile ağırlıkça % 40 B₄C içeren üçüncü tabakasından elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri 102 HBN ile ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakasından elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakasının Brinell sertlik değeri 141 HBN'dir. FDM'nin ağırlıkça % 60 B₄C içeren dördüncü tabakasının Brinell sertlik değeri 103 HBN'dir. 0B numunesinde ağırlıkça % 40 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise sertlik azalmıştır. Karışımlar kanuna göre takviye elemanı oranı arttıkça sertlik değerinin artması beklenir. Ağırlıkça % 60 B₄C içeren tabakada Brinell sertliğinin azalmasının nedeni porozite ve topaklanmanın takviye elemanı oranı arttıkça artmasına bağlanabilir.

Şekil 6.24 (b) incelendiğinde 30B numunesinin en yüksek Brinell sertlik değeri 161 HBN ile ağırlıkça % 40 B₄C içeren üçüncü tabakasından elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri en yüksek Brinell sertlik değerine sahip olan üçüncü tabakadan % 33,54 daha düşük değere sahip olan ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakasının Brinell sertlik değeri en yüksek Brinell sertlik değerine sahip olan üçüncü tabakadan % 21,12 daha düşüktür. FDM'nin ağırlıkça % 60 B₄C içeren dördüncü tabakasının Brinell sertlik değeri en yüksek Brinell sertlik değerine sahip olan üçüncü tabakadan % 31,06 daha düşüktür. 0B numunesine benzer şekilde 30B numunesinde ağırlıkça % 40 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır.

Şekil 6.24 (c) incelendiğinde 45B numunesinde en düşük Brinell sertlik değeri 113 HBN ile ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. En yüksek Brinell sertlik değeri en düşük Brinell sertlik değerine sahip olan birinci tabakadan % 46,90 daha yüksek değere sahip olan ağırlıkça % 40 B₄C içeren üçüncü tabakadan elde edilmiştir. FDM'nin ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakasının Brinell sertlik değeri

en düşük Brinell sertlik değerine sahip olan birinci tabakadan % 21,24 daha yüksektir. FDM'nin ağırlıkça % 60 B₄C içeren dördüncü tabakasının Brinell sertlik değeri en düşük Brinell sertlik değerine sahip olan birinci tabakadan % 10,62 daha yüksektir. 0B ve 30B numunelerine benzer 45B numuneside ağırlıkça % 40 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve ağırlıkça % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır.

Şekil 6.24 (d) incelendiğinde 60B numunesinin ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakanın Brinell sertlik değeri 132 HBN'dir. En yüksek Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakanın Brinell sertlik değerinden % 24,24 daha yüksek değere sahip olan ağırlıkça % 40 B₄C içeren üçüncü tabakadan elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakanın Brinell sertlik değerinden % 22,73 daha düşük değere sahip olan ağırlıkça %0 B₄C içeren birinci tabakadan elde edilmiştir. Ağırlıkça % 60 B₄C içeren dördüncü tabakanın Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakanın Brinell sertlik değerinden % 1,52 daha düşüktür. 0A,30B ve 45B numunelerine benzer şekilde 60B numuneside ağırlıkça % 40 B₄C takviye elemanı oranına kadar Brinell sertlik değeri artmış ve % 60 B₄C takviye oranı değerinde ise Brinell sertlik değeri azalmıştır. Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da sırası ile üç ve dört tabakalı ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre FDM'lerin Brinell sertlik grafikleri sunulmuştur.

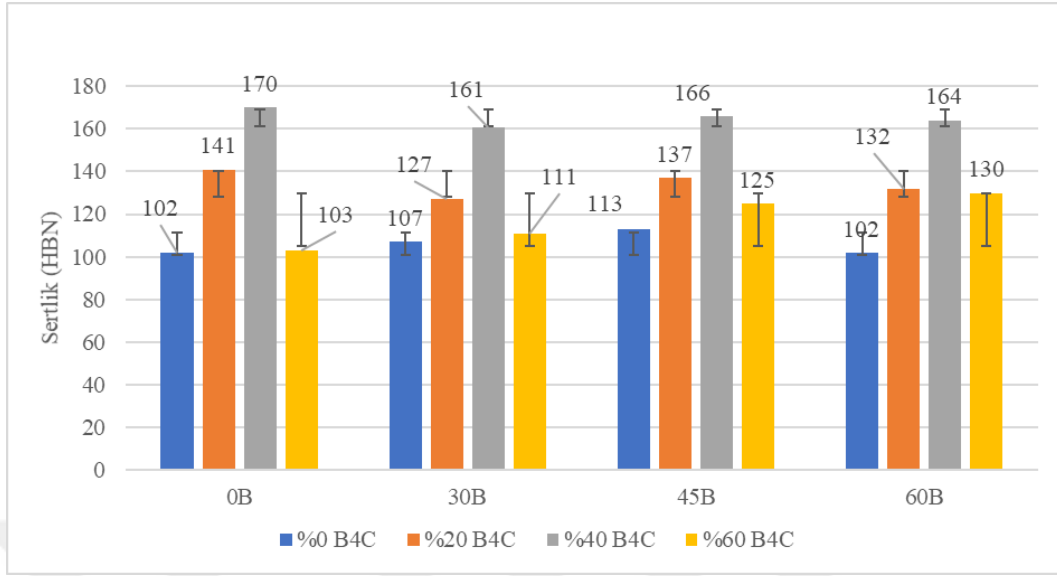


Şekil 6.25. Üç tabakalı ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre FDM’lerin Brinell sertlik grafikleri

Şekil 6.25’de grafik incelendiğinde ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakanın en yüksek Brinell sertlik değeri 107 HBN ile 0A ve 45A numuneleridir. En düşük sertlik değeri 102 HBN ile 30A numunesidir. 60A numunesinin Brinell sertlik değeri 103 HBN’dir.

Şekil 6.25’de grafik incelendiğinde ağırlıkça % 30 B₄C içeren ikinci tabakanın en yüksek Brinell sertlik değeri 153 HBN ile 30A numunesidir. En düşük Brinell sertlik değerine sahip 0A numunesi en yüksek Brinell sertlik değerine sahip 30A numunesinden % 5,23 daha düşüktür. 45A ve 60A numunelerinin Brinell sertlik değeri en yüksek 30A numunesinden % 1,96 daha düşüktür.

Şekil 6.25’de grafik incelendiğinde ağırlıkça % 60 B₄C içeren ikinci tabakanın en düşük Brinell sertlik değeri 94 HBN ile 0A numunesidir. En yüksek Brinell sertlik değerine sahip 45A numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 0A numunesinden % 29,79 daha yüksektir. 30A numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 0A numunesinden % 20,21 daha yüksektir. 60A numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 0A numunesinden % 13,83 daha yüksektir.



Şekil 6.26. Dört tabakalı ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre FDM'lerin Brinell sertlik grafikleri

Şekil 6.26'da grafik incelendiğinde ağırlıkça % 0 B₄C içeren birinci tabakanın en yüksek Brinell sertlik değeri 113 HBN ile 45B numunesidir. Aynı zamanda en düşük sertlik değeri 102 HBN ile 0B ve 60B numuneleridir. 30B numunesinin Brinell sertlik değeri 107 HBN'dir.

Şekil 6.26'da grafik incelendiğinde ağırlıkça % 20 B₄C içeren ikinci tabakanın en yüksek Brinell sertlik değeri 141 HBN ile 0B numunesidir. En düşük Brinell sertlik değerine sahip 30B numunesi en yüksek Brinell sertlik değerine sahip 0B numunesinden % 9,93 daha düşüktür. 45B numunesinin Brinell sertlik değeri en yüksek 0B numunesinden % 2,84 daha düşüktür. 60B numunesi Brinell sertlik değeri en yüksek 0B numunesinden % 6,38 daha düşüktür.

Şekil 6.26'da grafik incelendiğinde ağırlıkça % 40 B₄C içeren üçüncü tabakanın en düşük Brinell sertlik değeri 161 HBN ile 30B numunesidir. En yüksek Brinell sertlik değerine sahip 0B numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 30B numunesinden % 5,59 daha yüksektir. 45B numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 30B numunesinden % 3,10 daha yüksektir. 60B numunesi en düşük Brinell sertlik değerine sahip 30B numunesinden % 1,86 daha yüksektir.

Şekil 6.26’da grafik incelendiğinde ağırlıkça % 60 B₄C içeren dördüncü tabakada 45B numunesinin Brinell sertlik değeri 125 HBN’dir. En yüksek Brinell sertlik değerine sahip 60B numunesi 45B numunesinin Brinell sertlik değerinden % 4 daha yüksektir. En düşük Brinell sertlik değerine sahip 0B numunesi 45B numunesinin Brinell sertlik değerinden % 17,6 daha düşüktür. 30B numunesi 45B numunesinin Brinell sertlik değerinden %11,2 daha düşüktür.

B₄C takviyeli AA7075 matrisli FDM’lerin tabakalarına göre Brinell sertlik değerlerinin araştırılması sonucunda; en yüksek Brinell sertlik değeri 0B numunesinin üçüncü tabakasında 170 HBN olarak ölçülmüştür. En düşük Brinell sertlik değeri 0A numunesinin üçüncü tabakasında 94 HBN olarak ölçülmüştür. FDM’lerin tabakalarındaki Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 40 B₄C takviye oranına kadar arttığı tespit edilmiştir. Bu durum karışımlar kanuna göre açıklanabilir. Kompozit malzemelerde arzu edilen sınırlar dahilinde (homojen dağılım özelliği, porozite miktarı, vd.) başarılı bir kompozit üretildiği takdirde, takviye elemanı oranı belirli bir değere kadar arttıkça mekanik özellikler ve sertlik değerinin karışımlar kuramına göre artması beklenmektedir. Eşitlik 6.1’de kompozitlerin karışımlar kuramına göre sertliğini teorik olarak hesaplamada kullanılan matematiksel ifade sunulmuştur.

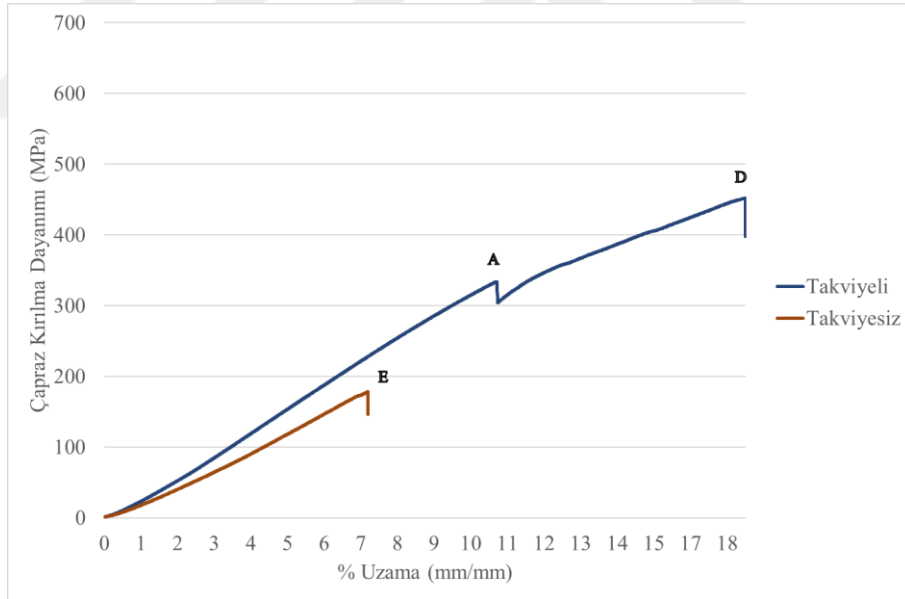
$$H_K = H_m f_m + H_t f_t \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte; H_k kompozitin sertliğini, H_m matrisin sertliğini, f_m matrisin ağırlıkça oranını, H_t takviye elemanının sertliğini, f_t ise takviye elemanının ağırlıkça oranını ifade etmektedir. Sarıkan gerçekleştirdiği çalışmada en yüksek Brinell sertlik değerini üç tabakalı B₄C takviyeli AA7075 matrisli FDM’nin ağırlıkça % 40 B₄C içeren tabakasında 120 °C sıcaklıkta 48 saat yaşlandırma sonucunda 247,1 HBN olarak ölçmüştür [96]. Üretimi gerçekleştirilen FDM’lerin mikro yapıları incelendiğinde B₄C takviye partiküllerinin AA7075 matrisinin tane sınırlarına dağıldığı tespit edilmiştir. FDM’de ağırlıkça B₄C takviye partikül oranının artması ile tane sınırında biriken partikül miktarının arttığı gözlenmiştir. Numuneler aynı şartlarda üretilmesine rağmen artan takviye oranları plastik deformasyonun matris malzemesinde artmasına ve B₄C takviye malzemesi ile AA 7075 matris malzemeleri arasında gerilmelerin artmasına

neden olmuştur [60]. FDM numunelerine ait tabakaların Brinell sertlikleri ağırlıkça % 40 B₄C takviye oranına kadar artmıştır. Brinell sertliklerindeki bu artış ağırlıkça % 40 B₄C takviye oranından sonra ise azalış göstermiştir. Brinell sertlik değerinde meydana gelen düşüşün sebebi takviye miktarı arttıkça gözenek ve topaklanmanın artması gösterilebilir. Benzer sonuçlar Yıldız ve Sur, Erdemir vd. bulmuştur [18,23].

6.1.5. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

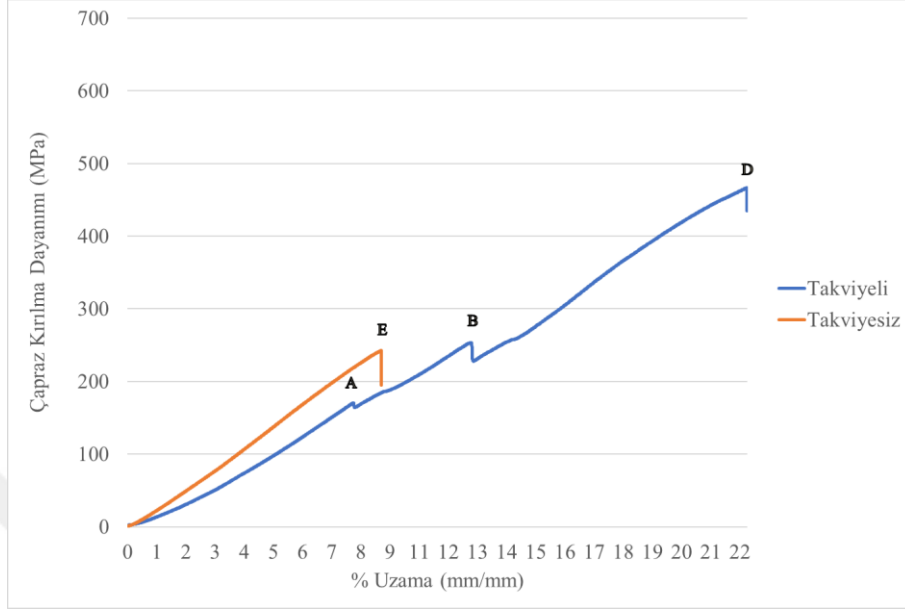
Toz metalürjisi tekniği ile üretilen üç ve dört tabakalı düz ve trapez geçişli B₄C takviyeli AA 7075 matrisli FDM'lerin üç nokta eğme deneyi gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyinde çapraz kırılma dayanımları karşılaştırılmak amacıyla yük FDM'nin takviyeli ve takviyesiz yüzeyine ayrı ayrı uygulanmıştır. 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin üç nokta eğme deneyi sonucunda meydana gelen çapraz kırılma dayanım grafikleri Şekil 6.27 ile Şekil 6.34 arasında sunulmuştur.



Şekil 6.27. 0A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

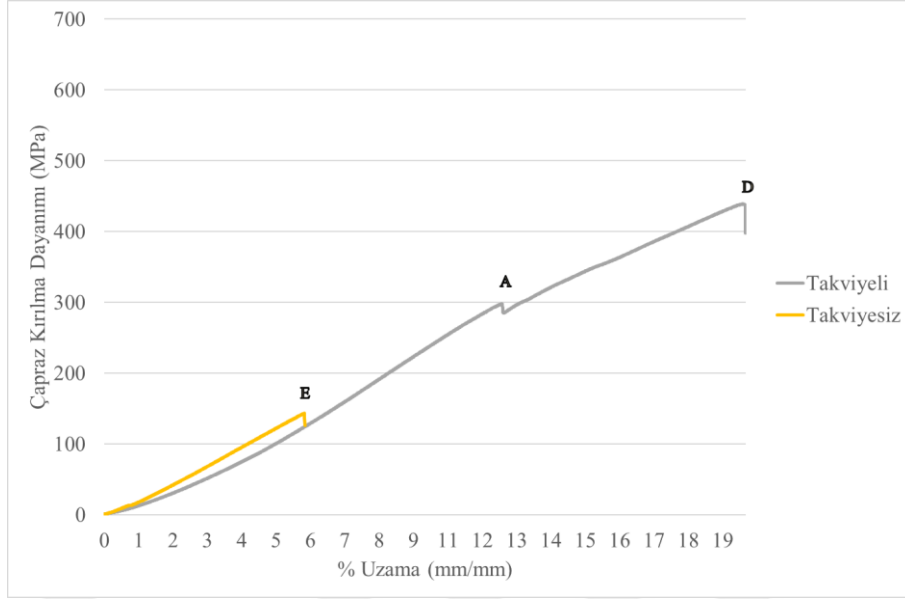
Şekil 6.27’de 0A numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 0A numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 0A numunesinin

takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



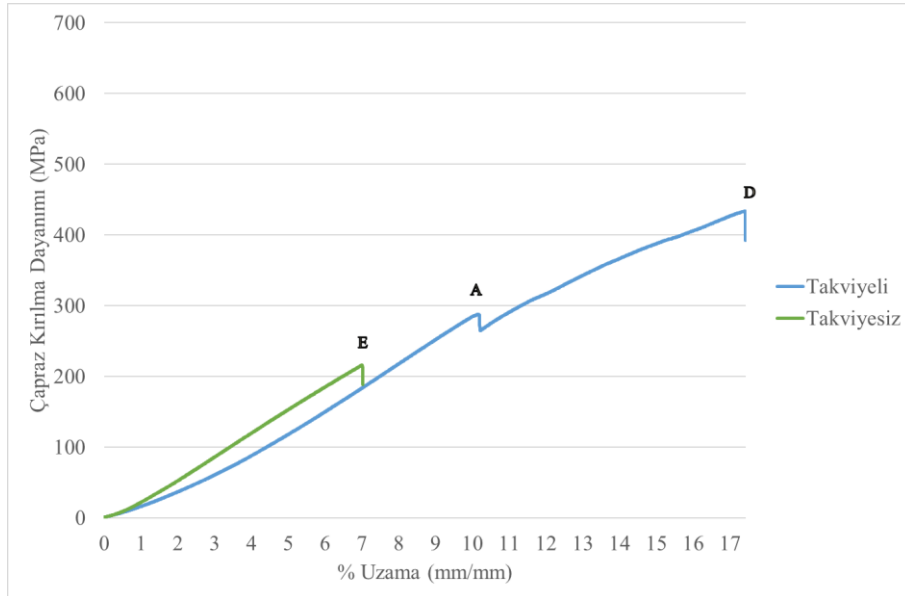
Şekil 6.28. 30A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

Şekil 6.28’de 30A numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 30A numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş B noktasında çatlak ilerlemesi devam etmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 30A numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



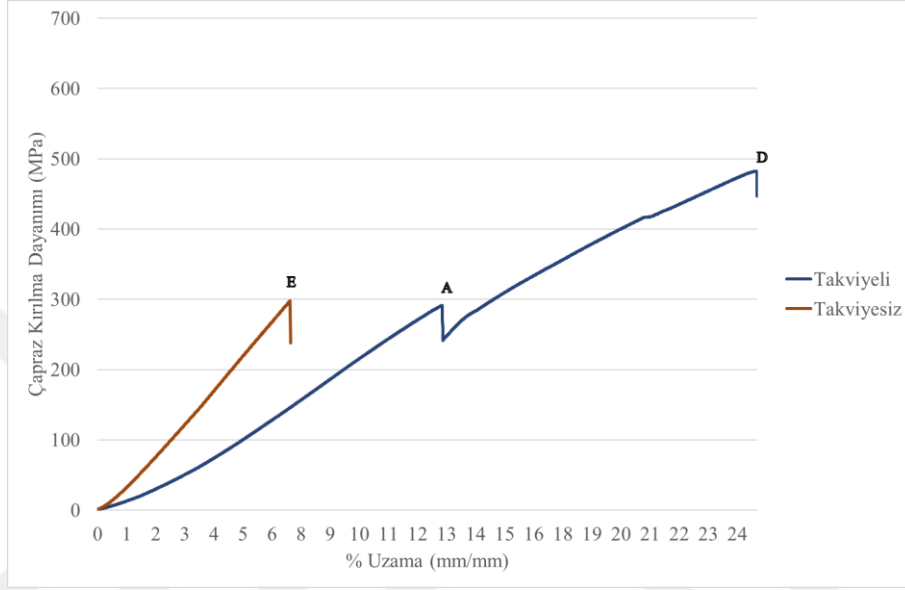
Şekil 6.29. 45A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

Şekil 6.29’da 45A numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 45A numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 45A numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır



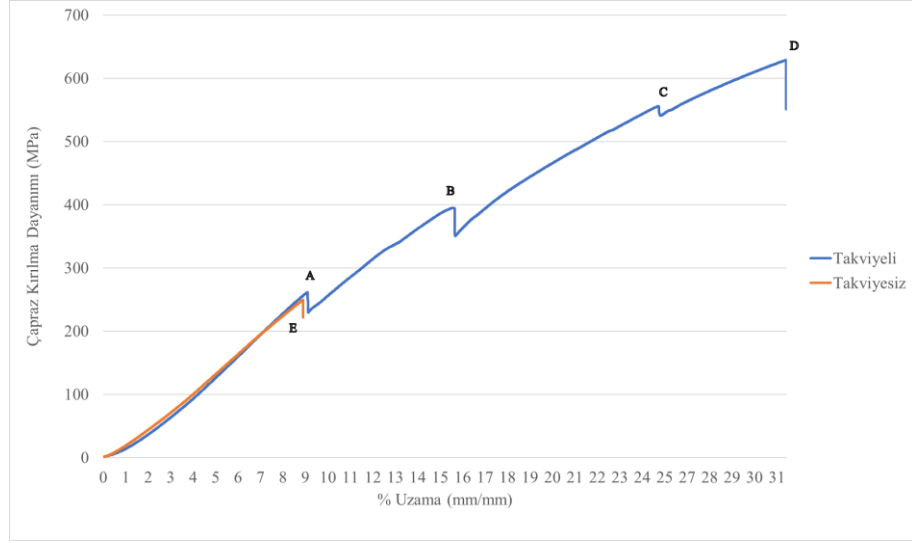
Şekil 6.30. 60A numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi.

Şekil 6.30'da 60A numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 60A numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 60A numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



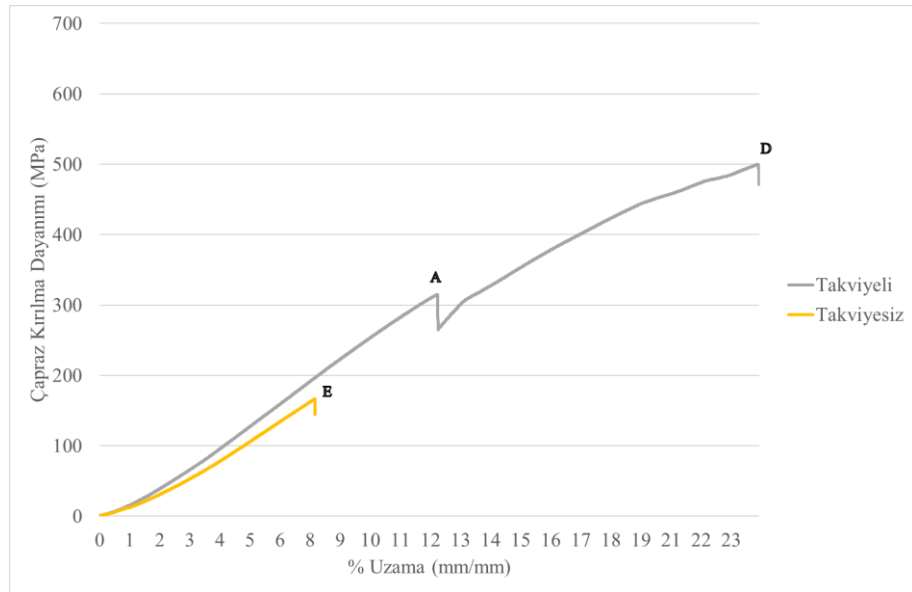
Şekil 6.31. 0B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi.

Şekil 6.31'de 0B numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 0B numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 0B numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



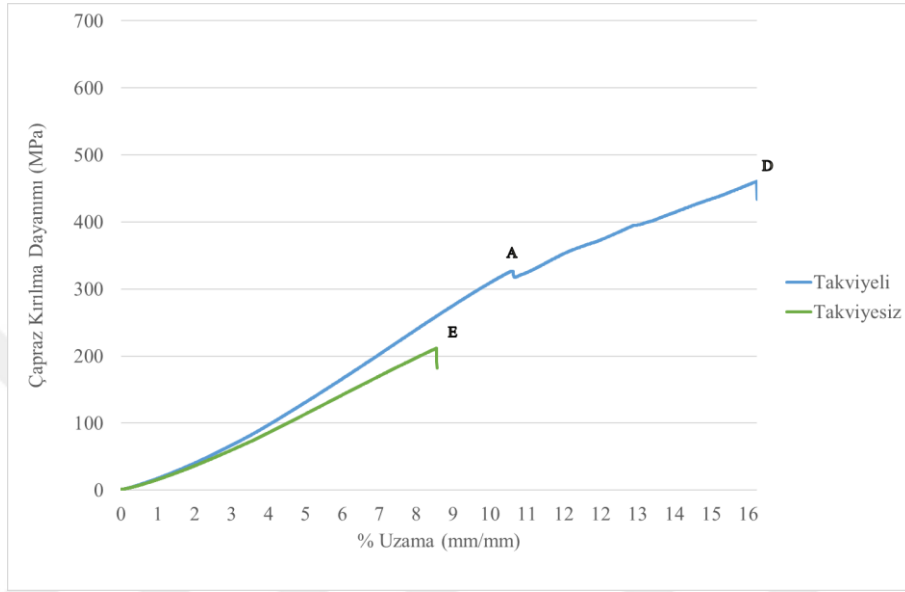
Şekil 6.32. 30B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

Şekil 6.32’de 30B numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 30B numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş B ve C noktasında çatlak ilerlemesi devam etmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 30B numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



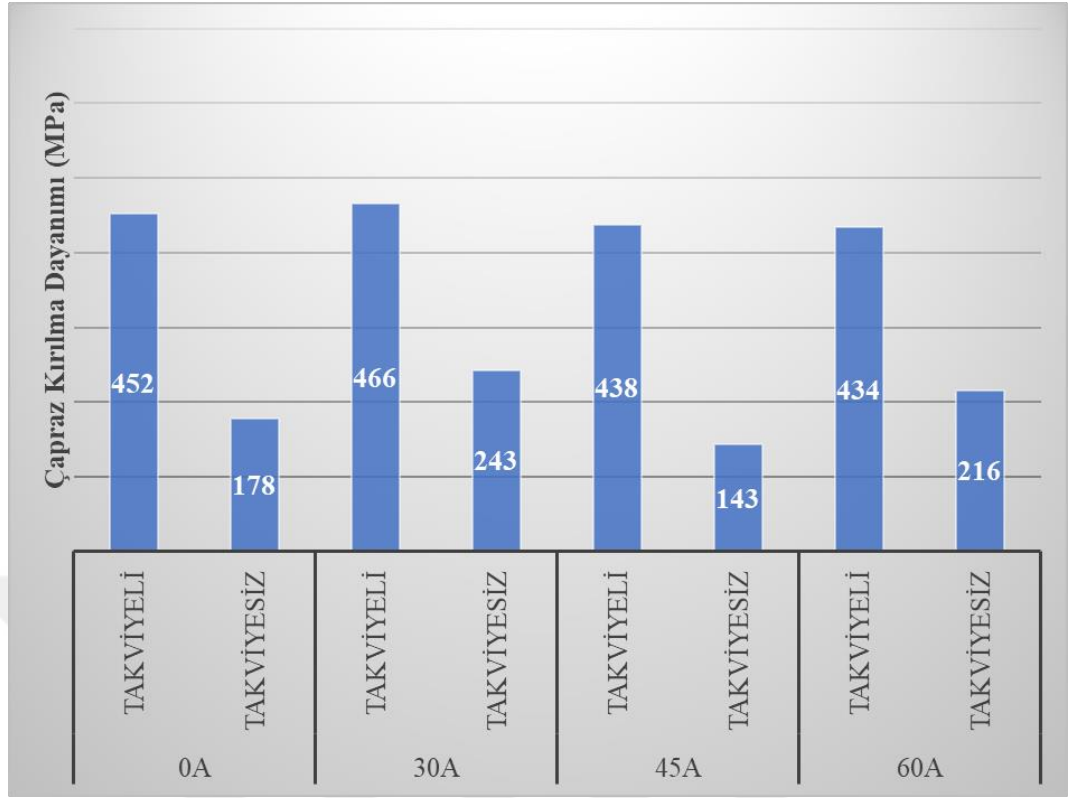
Şekil 6.33. 45B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

Şekil 6.33’de 45B numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 45B numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 45B numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



Şekil 6.34. 60B numunesinin çapraz kırılma dayanımının grafiksel gösterimi

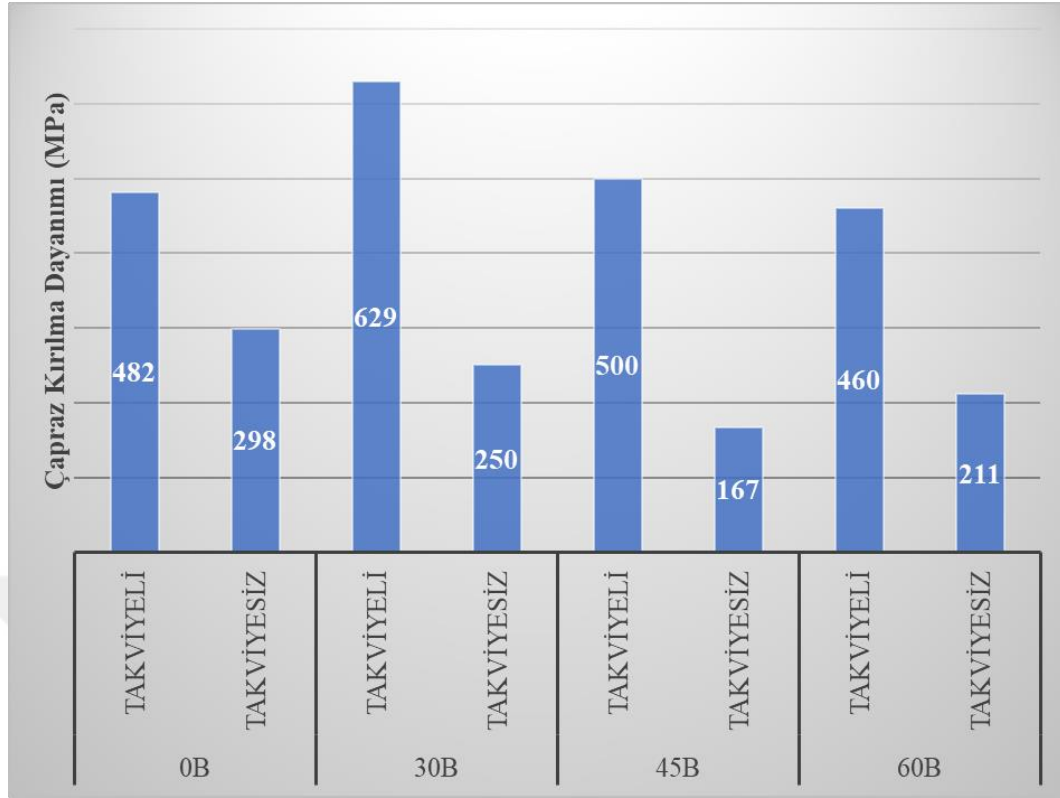
Şekil 6.34’de 60B numunesinin çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde takviyeli yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda 60B numunesinde ilk çatlak A noktasında meydana gelmiş ve D noktasında ise kırılmıştır. 60B numunesinin takviyesiz yüzeyinden gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucunda ise E noktasında kırılmıştır.



Şekil 6.35. Üç tabakalı FDM’lerin çapraz kırılma dayanımlarının grafik gösterimi

Şekil 6.35 incelendiğinde üç tabakalı FDM’lerde yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı 466 MPa ile 30A numunesinden elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı 434 MPa ile 60A numunesinden elde edilmiştir. 0A numunesinin çapraz kırılma dayanımı 452 MPa’dır. 45A numunesinin çapraz kırılma dayanımı 438 MPa’dır.

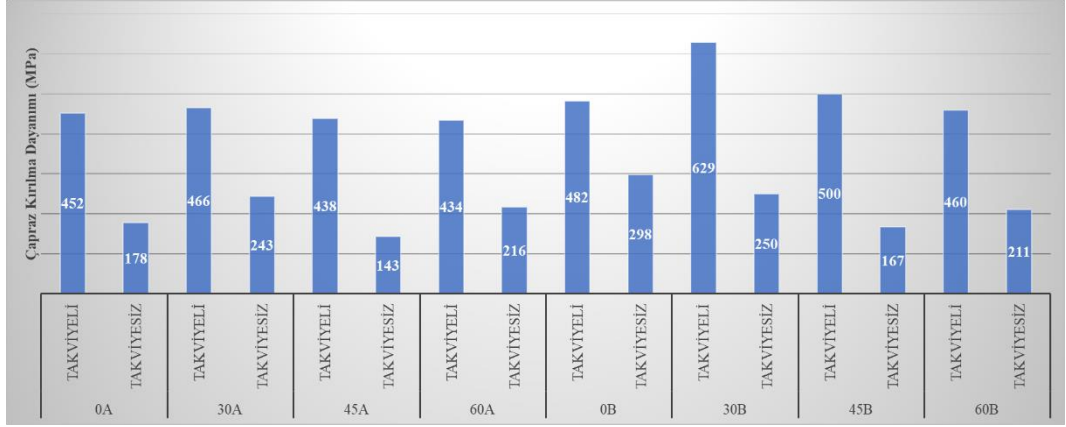
Şekil 6.35 incelendiğinde üç tabakalı FDM’lerde yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımı 143 MPa ile 45A numunesinden elde edilmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanım değerine sahip 30A numunesi en düşük çapraz kırılma dayanımına sahip 45A numunesinden % 69,93 daha yüksektir. 60A numunesi en düşük çapraz kırılma değerine sahip 45A numunesinden % 51,05 daha yüksektir. 0A numunesi en düşük çapraz kırılma değerine sahip 45A numunesinden % 24,48 daha yüksektir.



Şekil 6.36. Dört tabakalı FDM'lerin çapraz kırılma dayanımları grafik gösterimi

Şekil 6.36 incelendiğinde dört tabakalı FDM'lerde yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı 629 MPa ile 30B numunesinden elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma değerine sahip 60B numunesi en yüksek çapraz kırılma dayanımına sahip 30B numunesinden % 26,87 daha düşüktür. 45B numunesi en yüksek çapraz kırılma değerine sahip 30B numunesinden % 20,51 daha düşüktür. 0B numunesi en yüksek çapraz kırılma değerine sahip 30B numunesinden % 23,37 daha düşüktür.

Şekil 6.36 incelendiğinde dört tabakalı FDM'lerde yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında 30B numunesinin çapraz kırılma dayanımı 250 MPa elde edilmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımına sahip 0B numunesi 30B numunesinden % 19,2 daha yüksektir. En düşük çapraz kırılma dayanımına sahip 45B numunesi 30B numunesinden % 33,2 daha düşüktür. 60B numunesinin çapraz kırılma dayanımı 30B numunesinden % 15,6 daha düşüktür.



Şekil 6.37. Üç ve dört tabakalı FDM’lerin çapraz kırılma dayanımları grafik gösterimi

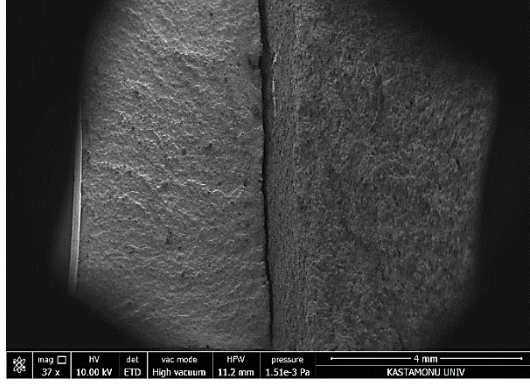
Şekil 6.37 incelendiğinde üç ve dört tabakalı FDM’lerde yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı 629 MPa ile 30B numunesinden elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı ise 434 MPa ile 60A numunesinden elde edilmiştir.

Şekil 6.37 incelendiğinde üç ve dört tabakalı FDM’lerde yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı 298 MPa ile 0B numunesinden elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı ise 143 MPa ile 45A numunesinden elde edilmiştir.

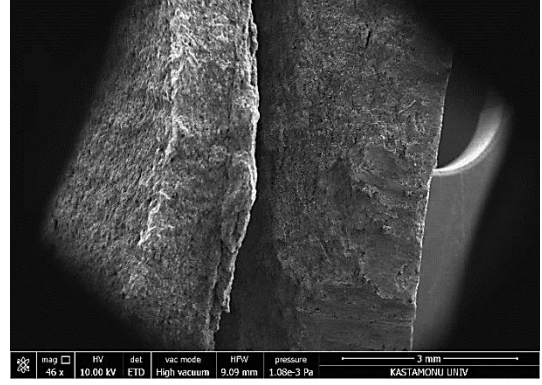
FDM’lere üç nokta eğme deneyinde yük uygulandığında ilk önce çatlak oluşmuş daha sonra çatlak ilerlemiş ve FDM numunelerde kırılma meydana gelmiştir. B₄C takviye elemanı FDM’lerde çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini azalttığı tespit edilmiştir. FDM numunelere yapılan üç nokta eğme deneyi sonucunda yükün uygulandığı yüzeyin malzemenin mukavemetine etki ettiği tespit edilmiştir. Yük takviyeli yüzeyden uygulandığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Benzer sonuçları Wu vd elde etmiştir [30]. Çapraz kırılma dayanımları 60B numunesi hariç FDM numunelerinin tabaka sayısı arttıkça artış göstermiştir. Hem üç tabakalı FDM’de hem de dört tabakalı FDM’de en yüksek çapraz kırılma dayanımı 30A ve 30B numunesinin takviyeli tarafından elde edilmiştir. Bunun nedeni 30A ve 30B numunelerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyinde yük trapezin en üst noktasına uygulanması ve 45A, 45B numunelerinin ve 60A, 60B

numunelerinin geçişler arasında yüzey alanı arttığından imalat sırasında pres tarafından bu bölgelere daha az basınç uygulanması olabilir. Üç nokta eğme deneyinden sonra üç (1. tabaka % 0 B₄C içeren tabaka, 2. tabaka % 30 B₄C içeren tabaka, 3. tabaka % 60 B₄C içeren tabaka) ve dört tabakalı (1. tabaka % 0 B₄C içeren tabaka, 2. tabaka % 20 B₄C içeren tabaka, 3. tabaka % 40 B₄C içeren tabaka, 4. tabaka % 60 B₄C içeren tabaka), en iyi ve en kötü takviyeli ve takviyesiz FDM'lerin kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri gerçekleştirilmiş olup Şekil 6.38 ile Şekil 6.45 arasında sunulmuştur.

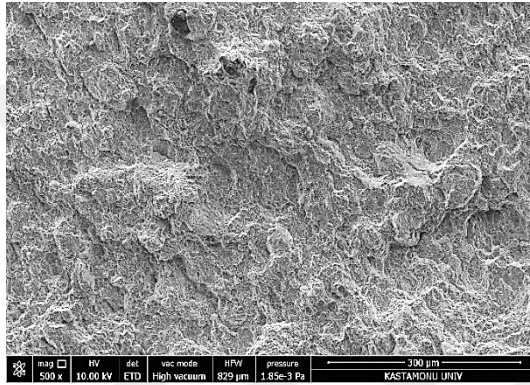




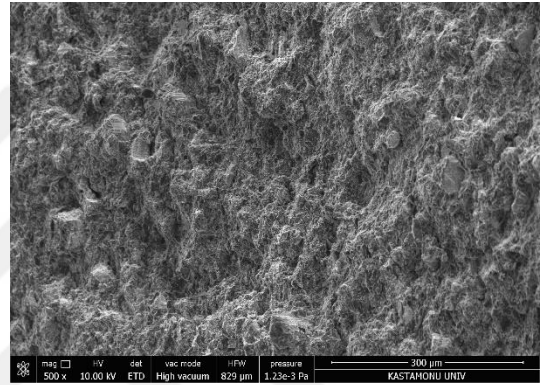
(a)



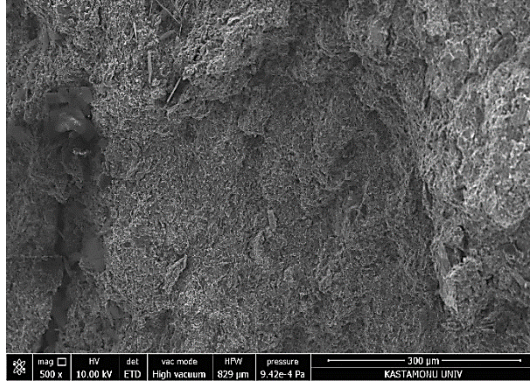
(b)



(c)



(d)

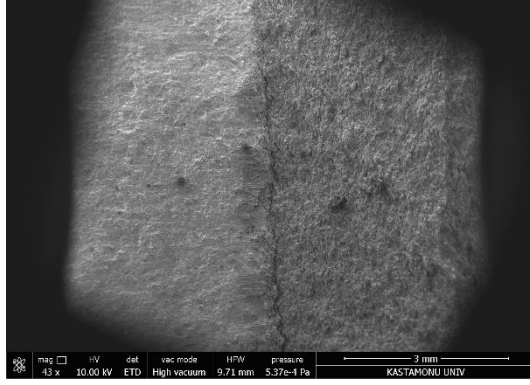


(e)

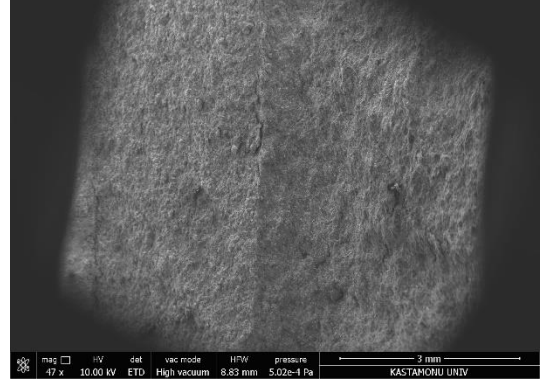
Şekil 6.38. Yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. Tabaka

Üç nokta eğme deneyinde üç tabakalı FDM'ye yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı gösteren 30A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.38'de incelenmiştir. Şekil 6.38

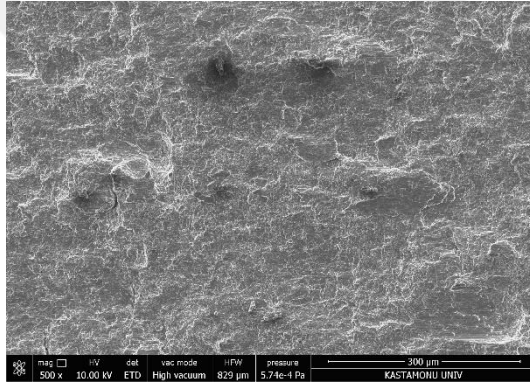
(a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği görülmüştür. Bu durum çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. Ayrıca % 0 B₄C içeren tabaka ile % 30 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ve % 30 B₄C içeren tabaka ile % 60 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.38 (c), (d) ve (e)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.



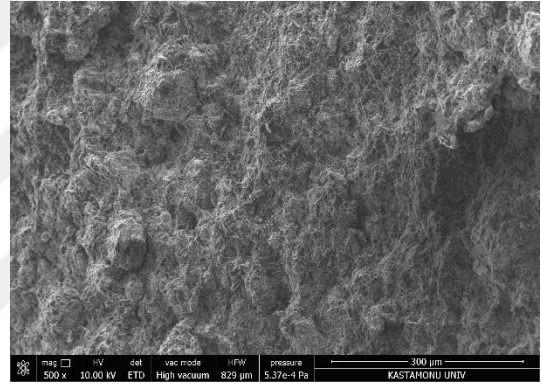
(a)



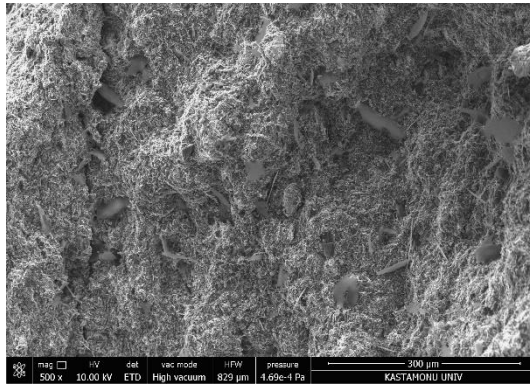
(b)



(c)



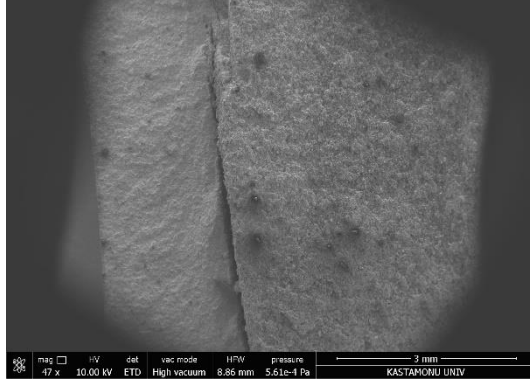
(d)



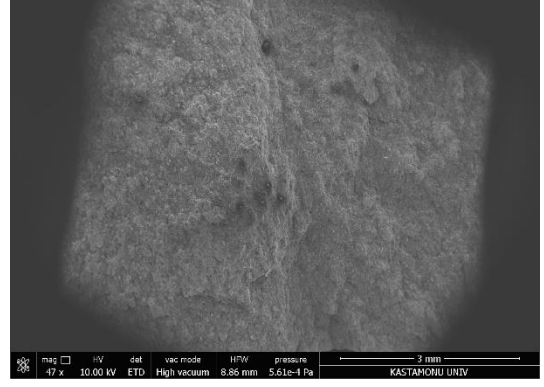
(e)

Şekil 6.39. Yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 60A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka

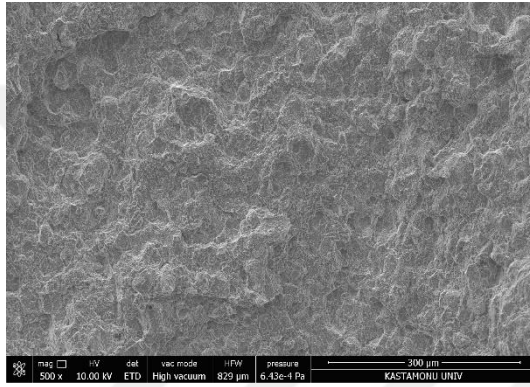
Üç nokta eğme deneyinde üç tabakalı FDM'ye yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımı gösteren 60A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.39'da incelenmiştir. Şekil 6.39 (a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği görülmüştür. Bu durum çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. Ayrıca % 0 B₄C içeren tabaka ile % 30 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.39 (d) ve (e)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 30 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.



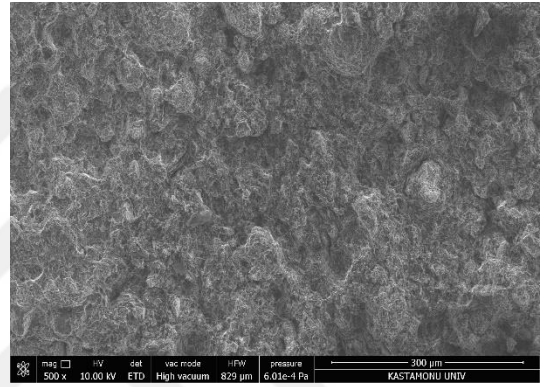
(a)



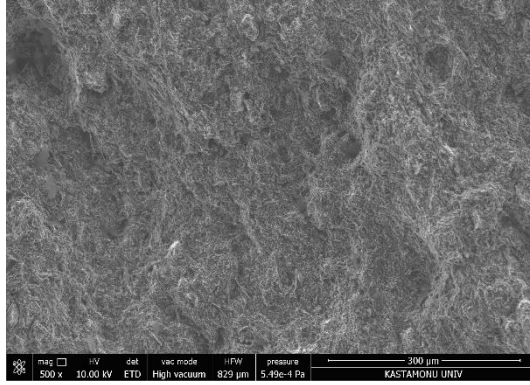
(b)



(c)



(d)



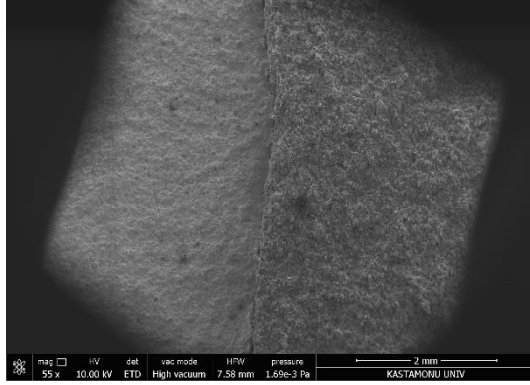
(e)

Şekil 6.40. Yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka

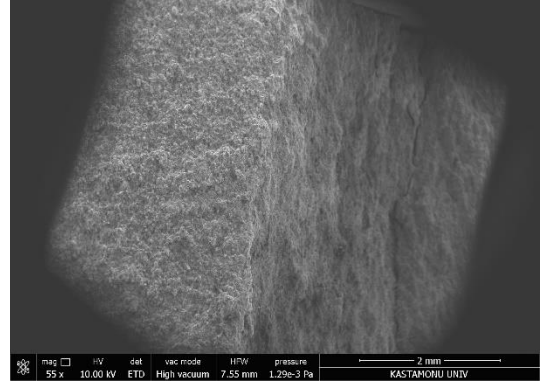
Üç nokta eğme deneyinde üç tabakalı FDM'ye yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı gösteren 30A numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.40'da incelenmiştir. Şekil 6.40 (a)

ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabaka ile % 30 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.40 (c), (d) ve (e)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.

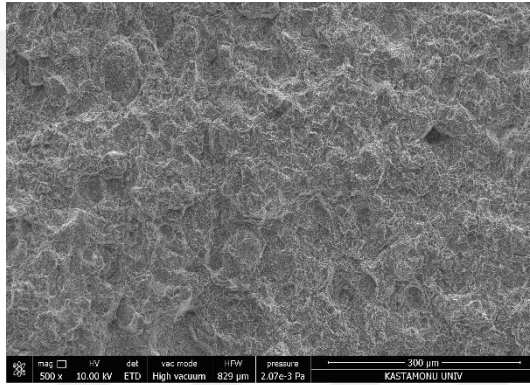




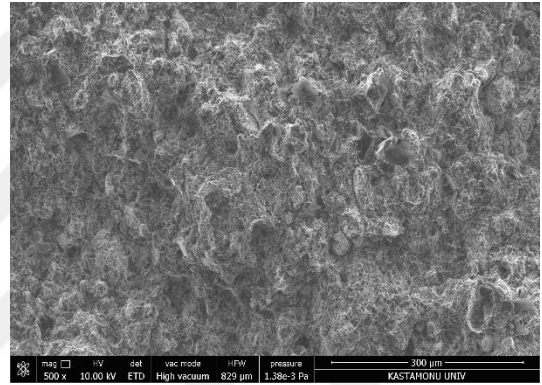
(a)



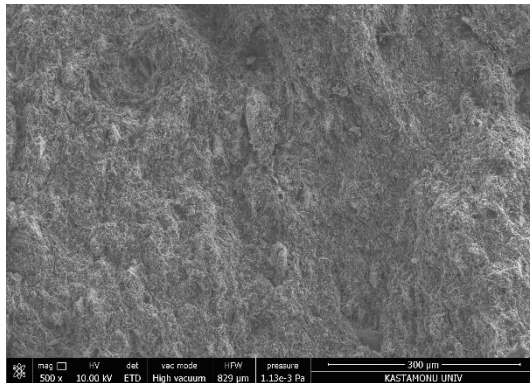
(b)



(c)



(d)

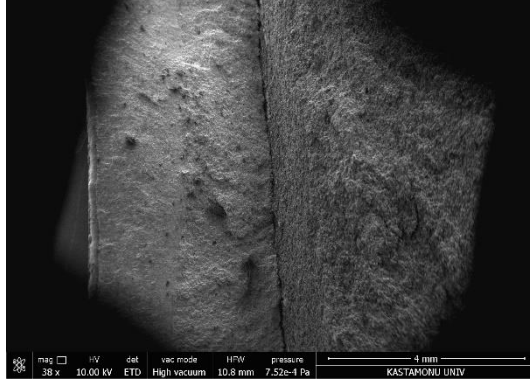


(e)

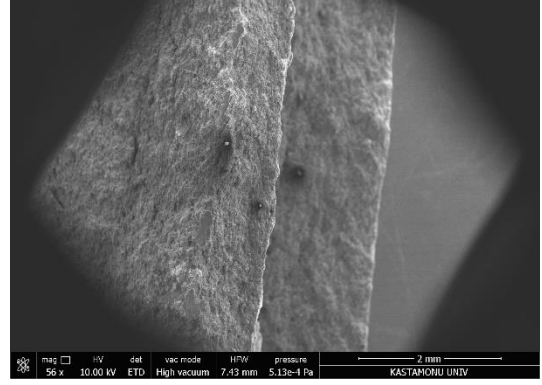
Şekil 6.41. Yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 45A numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 2. ile 3. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka

Üç nokta eğme deneyinde üç tabakalı FDM'ye yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımı gösteren 45A

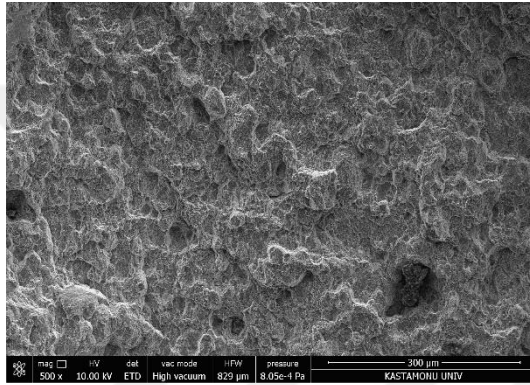
numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.41’de incelenmiştir. Şekil 6.41 (a) ve (b)’nin SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği görülmüştür. Bu durum çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. Ayrıca % 0 B₄C içeren tabaka ile % 30 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.41 (c), (d) ve (e)’de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.



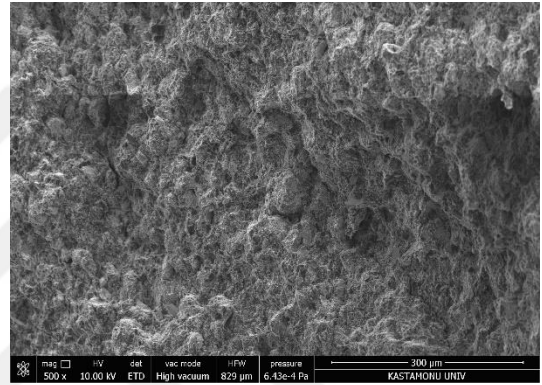
(a)



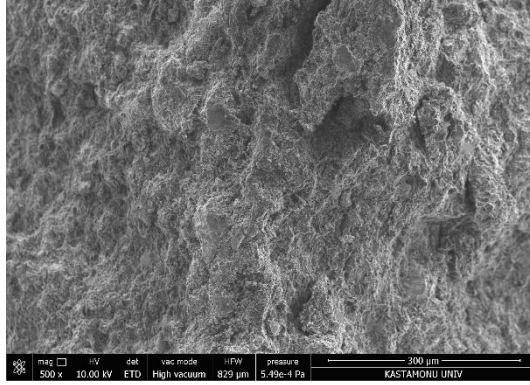
(b)



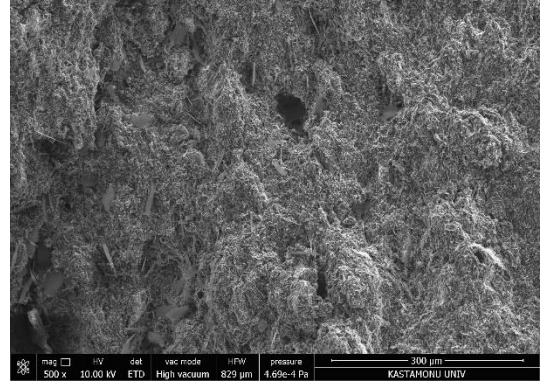
(c)



(d)



(e)

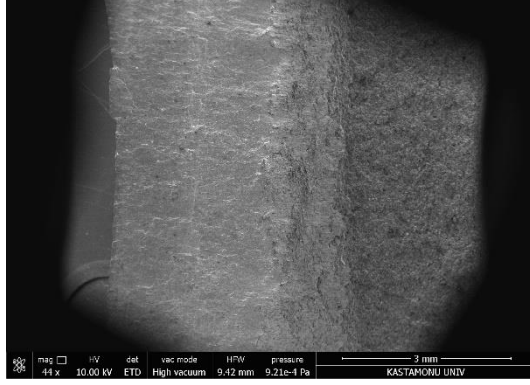


(f)

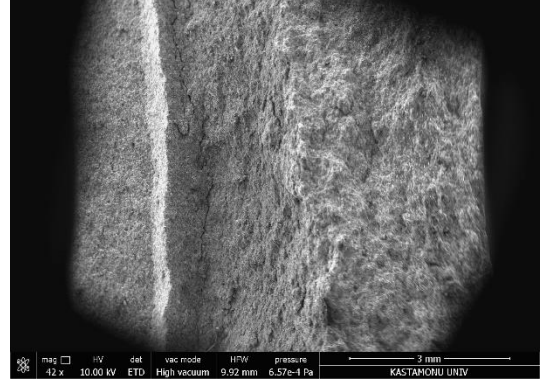
Şekil 6.42. Yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 30B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka.

Üç nokta eğme deneyinde dört tabakalı FDM'ye yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı gösteren 30B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.42'de incelenmiştir. Şekil 6.42

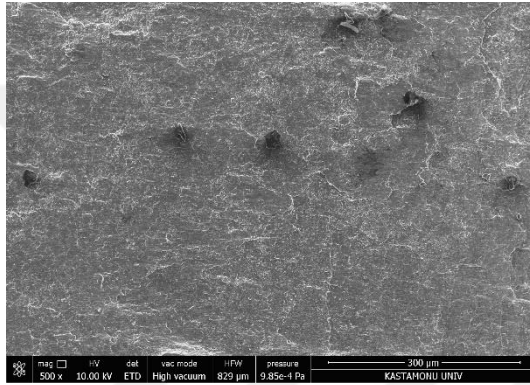
(a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini engellediği görülmüştür. Bu durum çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. Ayrıca % 0 B₄C içeren tabaka ile % 20 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ve % 40 B₄C içeren tabaka ile % 60 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.42 (c), (d), (e) ve (f)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.



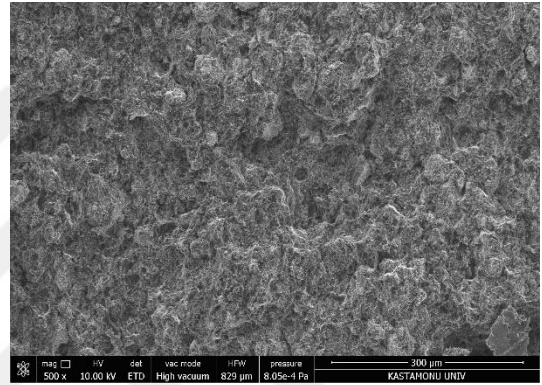
(a)



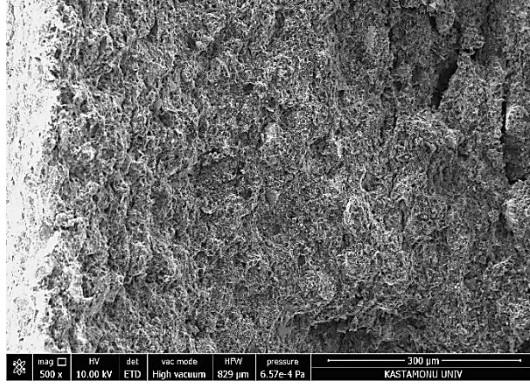
(b)



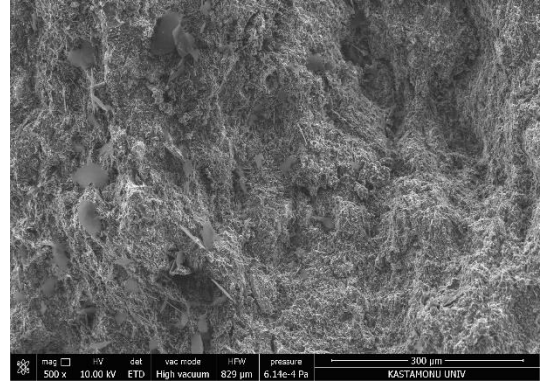
(c)



(d)



(e)

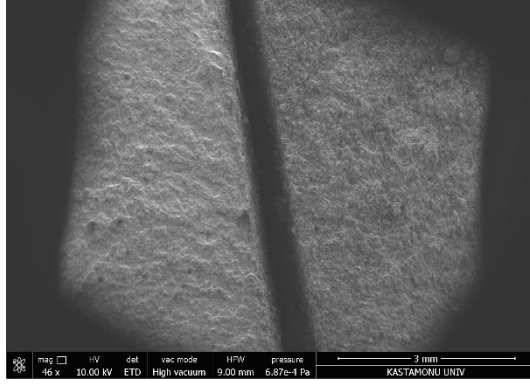


(f)

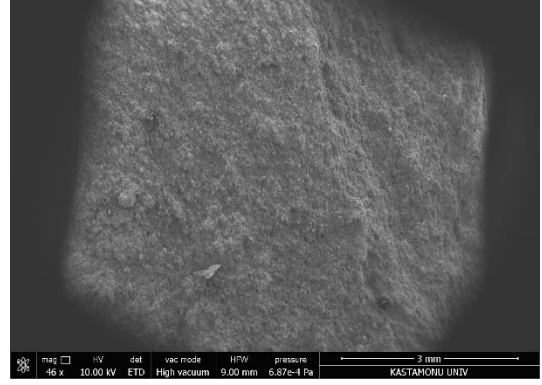
Şekil 6.43. Yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 60B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka.

Üç nokta eğme deneyinde dört tabakalı FDM'ye yük takviyeli (% 60 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımı gösteren 60B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.43'de incelenmiştir. Şekil 6.43

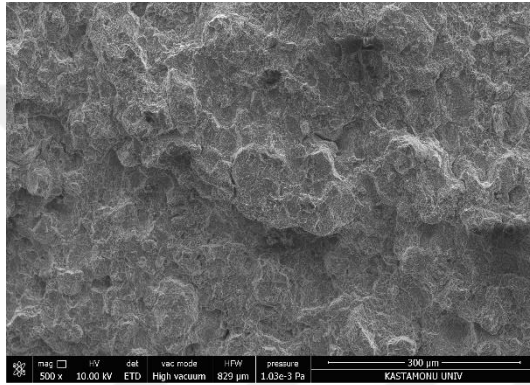
(a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği görülmüştür. Bu durum çapraz kırılma dayanımını artırmıştır. Şekil 6.43 (d), (e) ve (f)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 20 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanın matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.



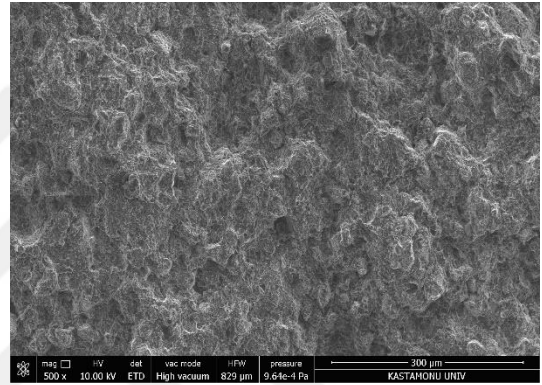
(a)



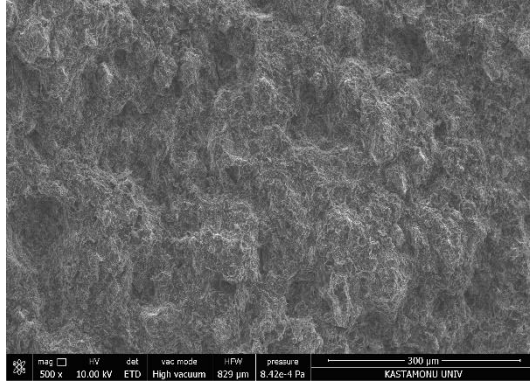
(b)



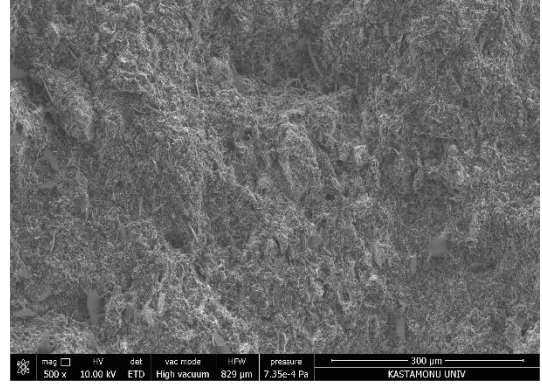
(c)



(d)



(e)



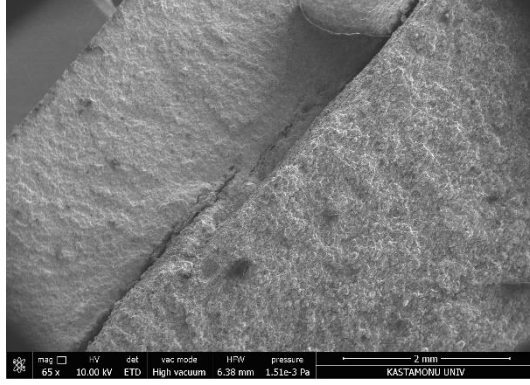
(f)

Şekil 6.44. Yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımlı 0B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka.

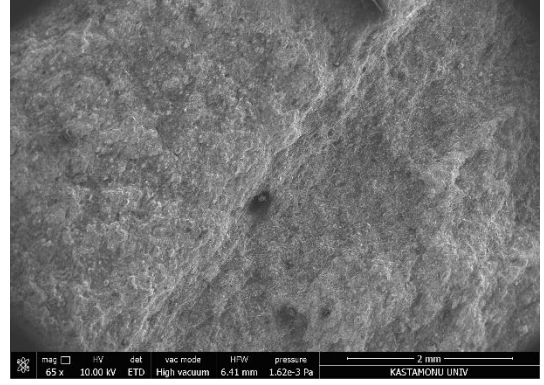
Üç nokta eğme deneyinde dört tabakalı FDM'ye yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı gösteren 0B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.44'de incelenmiştir. Şekil 6.44

(a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabaka ile % 20 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.44 (c), (d), (e) ve (f)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.

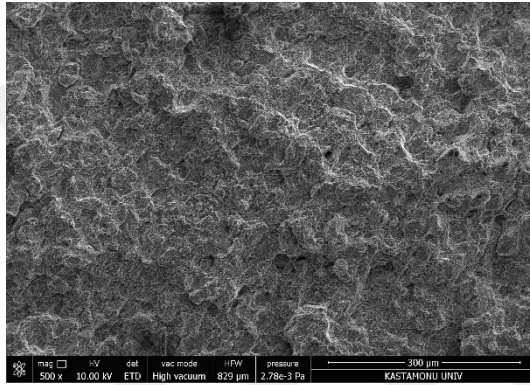




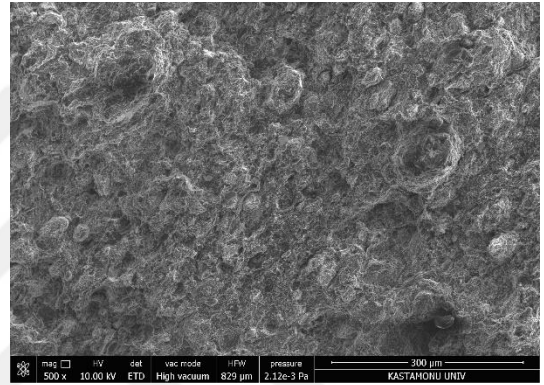
(a)



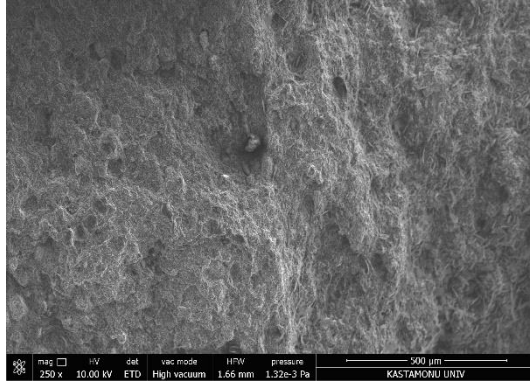
(b)



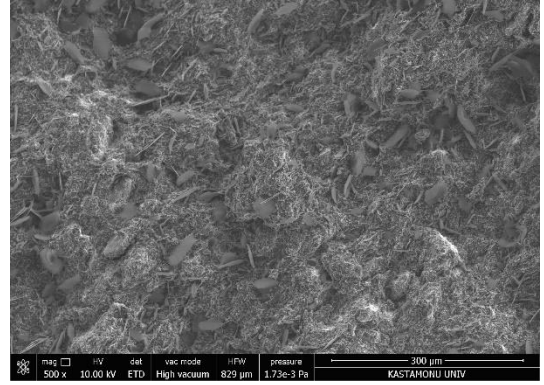
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.45. Yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımlı 45B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 1. ile 2. tabaka arasındaki geçiş bölgesi b) 3. ile 4. tabaka arasındaki geçiş bölgesi c) 1. tabaka d) 2. tabaka e) 3. tabaka f) 4. tabaka.

Üç nokta eğme deneyinde dört tabakalı FDM'ye yük takviyesiz (% 0 B₄C içeren tabaka) yüzeyden uygulandığında en düşük çapraz kırılma dayanımı gösteren 45B numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.45'de incelenmiştir. Şekil 6.45

(a) ve (b)'nin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabaka ile % 20 B₄C içeren tabaka arasındaki geçiş bölgesinde ayrışma gözlenmiştir. Şekil 6.45 (c), (d), (e) ve (f)'de kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde % 0 B₄C içeren tabakada çukurcuğun belirgin ve en derin olduğu, B₄C takviye elemanı ilavesi ile çukurcuğun belirginliğinin ve derinliğinin azaldığı ve en az belirgin ve derin çukurcuğa ise % 60 B₄C içeren tabakanın sahip olduğu gözlenmiştir. B₄C takviye miktarı arttıkça gerçekleşen kırılmanın gevrek olduğu azaldıkça ise metallere benzeyip sünek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde takviye elemanının matris içinde tutulduğu bu durum ise matris ile takviye elemanın iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesidir.

Üç ve dört tabakalı, en iyi ve en kötü takviyeli ve takviyesiz FDM'lerin kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri sonucunda B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yön değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği ve böylece çapraz kırılma dayanımının arttığı gözlenmiştir. Karabulut vd. yaptıkları çalışmada B₄C takviye partiküllerinin AA 6061 matris yapısı boyunca çatlakların hızlı ilerlemesini engellediği ve kompozit deformasyonunu sınırladığını, bu durumda kompozitin eğilme mukavemetini artırdığını tespit etmişlerdir [97]. Ayrıca FDM'lerin tabakalarının kırılma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde takviye miktarı arttıkça kırılma yüzeyinde görülen çukurların belirginlik ve derinliği azalmaktadır. FDM'lerin % 0 B₄C içeren tabakası metaller gibi sünek kırılma özelliği gösterirken takviye oranı arttıkça kırılma gevrek özellik göstermektedir. Kırılma yüzeyinde yapılan incelemelerde takviye elemanı ile matrisin iyi bir ara yüzeye sahip olduğunun göstergesi takviye elemanının matris içinde tutulmasıdır. Benzer sonuçları Zhang vd. bulmuştur [98].

BÖLÜM 7

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı oranlarda B₄C takviyeli AA 7075 matrisli 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin metalografik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla toz metalürjisi yöntemi ile imalatı için dikey ayırıcılı kalıp ve sıcak iş takım çeliği kalıbı tasarlanmış, tasarlanan kalıplar imal edilmiş ve FDM üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı ve kırılma yüzeyi incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Dikey ayırıcılı kalıp kullanarak 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin üretimi toz metalürjisi tekniği ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen FDM'lerin mikro yapı görüntüleri inceleme sonucunda FDM'nin tabakalar arası geçiş bölgelerinde fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etki edecek bir boşluk, kopma ve ayrılma gözlenmemiştir.
- B₄C takviyeli AA 7075 matrisli 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde B₄C takviye partikülünün AA 7075 matrisinin tane sınırında homojene yakın dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. B₄C takviye elemanının artması ile gözenek ve topaklanma miktarında da artış gözlenmiştir.
- FDM'lerin yoğunluk incelemeleri sonucunda en yüksek yoğunluk değeri 2,7057 g/cm³ değer ile 30A numunesi göstermiştir ve en düşük yoğunluk değeri 2,6534 g/cm³ değer ile 60A numunesi göstermiştir. İmal edilen üç tabakalı ve dört tabakalı FDM'lerin yoğunluk farkının poroziteden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- FDM'lerin tabakalarının Brinell sertlik araştırmaları sonucunda en yüksek Brinell sertlik değeri 0B numunesinin 3. tabakasında 170 HBN olarak llmştr. En düşük Brinell sertlik değeri 0A numunesinin 3. tabakasında 94 HBN olarak llmştr. FDM'lerin tabakalarındaki Brinell sertlik değeri ağırlıkça % 40 B₄C takviye oranına kadar arttığı tespit edilmiş bu değerden sonra takviye oranı artmasına rağmen azalış göstermiştir.
- Gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucuna göre FDM numunelere yükün uygulandığı yüzeyin malzemenin mukavemetine etki ettiği tespit edilmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı üç nokta eğme testinde yk takviyeli yüzeyden uygulandığında 629 MPa ile 30B numunesinden elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı üç nokta eğme testinde yk takviyesiz yüzeyden uygulandığında 143 MPa ile 45A numunesinden elde edilmiştir.
- Üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlara göre 60B numunesi hariç tabaka sayısı arttıa çapraz kırılma dayanımında artış meydana gelmiştir.
- Üç ve dört tabakalı üç nokta eğme deneyinde yk takviyeli ve takviyesiz yüzeyden uygulandığında en iyi ve en kötü çapraz kırılma dayanımı elde ededilen FDM'lerin kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri sonucunda B₄C takviye elemanın çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yn değiştirmesine neden olarak çatlak ilerlemesini önlediği ve böylece çapraz kırılma dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca FDM'lerin tabakalarının kırılma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde takviye miktarı arttıa kırılma yüzeyinde görülen çukurların belirginlik ve derinliği azalmaktadır.

Elde edilen sonuçlardan faydalanılarak gelecek çalışmalarda şu öneriler sunulabilir. Bunlar;

- Çalışmada retilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerinin balistik özellikleri incelenebilir.
- Çalışmada retilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin işlenebilirlikleri incelenebilir.
- Çalışmada retilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin aşınmaya karşı dayanımı incelenebilir.

- Çalışmada üretilen 0A, 30A, 45A, 60A ve 0B, 30B, 45B, 60B numunelerin trapez açısı değiştirilerek mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Balasubramanian, M., "Composite materials and processing", **Composite Materials And Processing**, 1–599 (2013).
2. Campbell, F. C. (Flake C. ., "Structural composite materials", 612 (2010).
3. Yastımoğlu, F. and Özkan, A., "Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı", **Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi**, 5 (1): 56–66 (2017).
4. Sur, G., "Karma Takviyeli Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü**, Ankara, (2008).
5. Boyle, M. A., Martin, C., and Neuner, J. D., "ASM Handbook Volume 21: Composites", **ASM International**, 78–89 (2001).
6. Çolak, N. Y. and Turhan, H., "Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Al-Si/B4C Kompozit Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", **Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 28 (2): 259–266 (2016).
7. Gökmen, U., "Al 2024 Esaslı B4C/SiC Parçacık Takviyeli Hibrit Kompozitlerin TIG Kaynağı ile Birleştirilmesi", **Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 31 (ÖS1): 69–78 (2016).
8. Nishida, Y., "Introduction to metal matrix composites: Fabrication and recycling", **Introduction To Metal Matrix Composites: Fabrication And Recycling**, 9784431542377: 1–203 (2013).
9. Uygur, İ. and Saruhan, H., "Aluminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri", **SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 8 (1): 167–174 (2004).
10. Gökmeşe, H. and Karadağ, H. B., "Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji**, 6 (2): 385–398 (2018).
11. Çinici, H., Gökmen, U., Kırmızı, G., and Çamkerten, R., "Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmiş B4C Takviyeli AA 7xxx Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımının Belirlenmesi", **Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 5 (1): 383–383 (2017).
12. Pasha, A. and B.M, R., "Functionally graded materials (FGM) fabrication and

- its potential challenges & applications", *Materials Today: Proceedings*, 52: 413–418 .
13. Yildirim, M. and Özyürek, D., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen 7075 Al Alaşımlarında Mn Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 6 (2): 269–276 (2018).
 14. Canakci, A. and Varol, T., "Microstructure and properties of AA7075/Al-SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing", *Powder Technology*, 268: 72–79 (2014).
 15. Jin, H., Li, S., and Ouyang, Q., "Fabrication of Double-Layer 2024Al-2024Al/B₄C Composite by Plasma Activated Sintering and Its Mechanical Properties", *Http://Www.Sciencepublishinggroup.Com*, 2 (1): 1 (2017).
 16. Udupa, G., Rao, S. S., and Gangadharan, K. V., "Functionally Graded Composite Materials: An Overview", *Procedia Materials Science*, 5: 1291–1299 (2014).
 17. Savaş, Ö. and Başer, M. S., "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Fleyk-Al₃Ti/Al Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması | TRDizin", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 36 (1): (2020).
 18. Erdemir, F., Canakci, A., and Varol, T., "Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al₂024/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 25 (11): 3569–3577 (2015).
 19. Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O., and Keleş, Ö., "The ballistic performance of SiC–AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy", *Materials & Design (1980-2015)*, 56: 31–36 (2014).
 20. Lin, C. Y., Bathias, C., McShane, H. B., and Rawlings, R. D., "Production of silicon carbide Al 2124 alloy functionally graded materials by mechanical powder metallurgy technique", *Powder Metallurgy*, 42 (1): 29–33 (1999).
 21. Aydın, M. and Apalak, M. K., "Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact", *Materials Science And Engineering: A*, 671: 107–117 (2016).
 22. Surya, M. S. and Prasanthi, G., "Manufacturing and Micro structure study of

- Al-SiC Functionally graded material", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 621–627 (2017).
23. Yıldız, T. and Sur, G., "Investigation of drilling properties of AA7075/Al₂O₃ functionally graded materials using gray relational analysis:", <https://doi.org/10.1177/0954405421995657>, 235 (9): 1384–1398 (2021).
 24. Wu, C., Shi, R., Zhang, J., Luo, G., Shen, Q., Gan, Z., Liu, J., and Zhang, L., "Synthesis of functionally graded AA7075-B₄C composite with multi-level gradient structure", *Ceramics International*, 45 (6): 7761–7766 (2019).
 25. Surya, M. S. and Nilesh, T. V., "Synthesis and Mechanical Behaviour of (Al/SiC) Functionally Graded Material Using Powder Metallurgy Technique", *Materials Today: Proceedings*, 18: 3501–3506 (2019).
 26. Surya, M. S. and Prasanthi, G., "Effect of Silicon Carbide Weight Percentage and Number of Layers on Microstructural and Mechanical Properties of Al7075/SiC Functionally Graded Material", *Silicon* 2021 14:4, 14 (4): 1339–1348 (2021).
 27. Chauhan, P. K. and Khan, S., "Microstructural examination of aluminium-copper functionally graded material developed by powder metallurgy route", *Materials Today: Proceedings*, 25: 833–837 (2020).
 28. Rajasekhar, K., Suresh Babu, V., and Davidson, M. J., "Microstructural and mechanical properties of Al-Cu functionally graded materials fabricated by powder metallurgy method", *Materials Today: Proceedings*, 41: 1156–1159 (2021).
 29. Jin, X., Wu, L., Sun, Y., and Guo, L., "Microstructure and mechanical properties of ZrO₂/NiCr functionally graded materials", *Materials Science And Engineering: A*, 509 (1–2): 63–68 (2009).
 30. Wu, C., Wu, J., Ma, K., Zhang, D., Xiong, S., Zhang, J., Luo, G., Chen, F., Shen, Q., Zhang, L., and Lavernia, E. J., "Synthesis of AA7075-AA7075/B₄C bilayer composite with enhanced mechanical strength via plasma activated sintering", *Journal Of Alloys And Compounds*, 701: 416–424 (2017).
 31. Radhika, N., "Mechanical Properties and Abrasive Wear Behaviour of Functionally Graded Al-Si₁₂Cu/Al₂O₃ Metal Matrix Composite", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals* 2016 70:1, 70 (1): 145–157 (2016).

32. Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., and Pai, B. C., "Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites", *Materials Characterization*, 61 (10): 923–928 (2010).
33. Kumar, B., Joshi, A., Mer, K. K. S., Prasad, L., Pathak, M. K., and Saxena, K. K., "The impact of centrifugal casting processing parameters on the wear behaviour of Al alloy/Al₂O₃ functionally graded materials", *Materials Today: Proceedings*, 62: 2780–2786 (2022).
34. El-Galy, I. M., Ahmed, M. H., and Bassiouny, B. I., "Characterization of functionally graded Al-SiCp metal matrix composites manufactured by centrifugal casting", *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4): 371–381 (2017).
35. Chawla, K. K., "Composite Materials: Science and Engineering, Third Edition", Composite Materials: Science and Engineering, Third Edition, *Springer New York*, 1–542 (2012).
36. Chung, D. D. L., "Composite materials : science and applications", 349 (2010).
37. Kayabaşı, İ., "Metal matrisli kompozit malzeme üretim sistemi imalatı ve performansının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2016).
38. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4th Edition", *John Wiley & Sons, Inc.*, 1025 (2010).
39. Chawla, N. and Chawla, K. K., "Metal Matrix Composites Second Edition", *Springer Science+Business Media, Inc.*, 401 (2006).
40. Bhaskar, C., Kandpal, B. C., Kumar, J., and Singh, H., "Production technologies of metal matrix composite -A Review", (2014).
41. Karakoç, H. and Çitak, R., "B₄C Takviyelendirilmiş Alüminyum Kompozit Malzemelerin TIG Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi", *El-Cezeri Journal Of Science And Engineering*, 4 (3): 584–592 (2017).
42. Shen, H.-S., "Functionally Graded Materials : Nonlinear Analysis of Plates and Shells", *Functionally Graded Materials*, (2016).
43. Mahamood, R. M. and Akinlabi, E. T., "Functionally Graded Materials", (2017).
44. "Functionally Graded Materials 1996", Functionally Graded Materials 1996, *Elsevier*, (1997).
45. Gupta, A. and Talha, M., "Recent development in modeling and analysis of

- functionally graded materials and structures", *Progress In Aerospace Sciences*, 79: 1–14 (2015).
46. El-Galy, I. M., Saleh, B. I., and Ahmed, M. H., "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view", *SN Applied Sciences* **2019 1:11**, 1 (11): 1–23 (2019).
 47. Jung, Y. G., Ha, C. G., Shin, J. H., Hur, S. K., and Paik, U., "Fabrication of functionally graded ZrO₂/NiCrAlY composites by plasma activated sintering using tape casting and it's thermal barrier property", *Materials Science And Engineering: A*, 323 (1–2): 110–118 (2002).
 48. Kar, K. K., "Composite materials: Processing, applications, characterizations", *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*, 1–686 (2016).
 49. Pandey, P. M., Rathee, S., Srivastava, M., and Jain, P. K., "Functionally Graded Materials (FGMs)", *CRC Press*, Boca Raton, (2021).
 50. Ulutaş, A., "Bor takviyeli bakır kompozitinin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve mekanik-elektriksel özelliklerinin incelenmesi", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).
 51. Šalak, A., Selecká, M. (Marcela), and Danninger, H. (Herbert), "Machinability of Powder Metallurgy Steels", 2. ed. Ed., *Cambridge International Science Pub*, Cambridge, 536 (2005).
 52. Günay, M., "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
 53. Yalçın, B., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).
 54. Smith, L. N. and Midha, P. S., "An interactive system for optimum and concurrent design of components for manufacture by powder metallurgy technology", *Journal Of Materials Processing Technology*, 61 (1–2): 187–192 (1996).
 55. Abdel-Rahman, M. and El-Sheikh, M. N., "Workability in forging of powder metallurgy compacts", *Journal Of Materials Processing Tech.*, 54 (1–4): 97–102 (1995).

56. German, R. M. and Gülsoy, H. O., "Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları", **Nobel**, (2014).
57. Eksi, A. K. and Yuzbasioglu, A. H., "Effect of sintering and pressing parameters on the densification of cold isostatically pressed Al and Fe powders", **Materials And Design**, 28 (4): 1364–1368 (2007).
58. P.W., L., "ASM Handbook, Volume 7: Powder Metallurgy", ASM Handbook, (2007).
59. Tsukerman, S. A., "Powder Metallurgy.", **Elsevier Science**, 153 (2013).
60. Erdemir, F., "Fonksiyonel derecelendirilmiş Al₂O₃/SiC kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu", **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2016).
61. Rao, P. N., "Manufacturing Technology. Volume 1 : Foundry, Forming and Welding", **Tata McGraw-Hill**, 502 (2009).
62. Krar, S. F. and Gill, A., "Exploring Advanced Manufacturing Technologies", **Industrial Press**, (2003).
63. Angelo, P. C. and Subramanian, R., "Powder Metallurgy : Science, Technology and Applications", **PHI Learning Private Limited**, 300 (2008).
64. German, R. M., "Particulate Composites : Fundamentals and Applications.", **Springer**, (2018).
65. Demirel, M., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni₃Al Metallerarası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması", **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2007).
66. ASTM International., American Society for Testing and Materials., and American Society for Testing and Materials. Meeting., "Symposium on Powder Metallurgy Buffalo Spring Meeting, American Society for Testing Materials, March 3, 1943.", **American Society For Testing And Materials**, Philadelphia, Pa :, (1943).
67. Upadhyaya, G., "Powder Metallurgy Technology", **Cambridge International Science Publishing**, Cambridge, 160 (2002).
68. Kılıç, E. F., "Alüminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2007).
69. German, R. M., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", **Türk Toz**

Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 572 (2016).

70. Diler, Anıl, E., "Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-Sicp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme Dayanımı Ve Aşınma Özelliklerine Etkileri", *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
71. Jiang, G., Daehn, G., and Wagoner, R., "Inclusion particle size effects on the cyclic compaction of powder composites", *Scripta Materialia - SCRIPTA MATER*, 44: 1117–1123 (2001).
72. German, R. M., "Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures", *Metallurgical Transactions A*, 23 (5): 1455–1465 (1992).
73. Ulutaş, A., "Değişik Oranlardaki Cu, FeCr VE FeMn Alaşımlarının Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
74. Gökçe, A., "Yapısal uygulamalar için alüminyum esaslı malzemelerin toz metalurjisi kullanılarak geliştirilmesi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).
75. Özgün, Ö., "Toz Metalurjisi İle Üretilen Alaşımlı Çeliklerin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).
76. Somunkıran, İ., "Kobalt Esaslı Alaşımların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
77. Matik, U., "Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Demir Esaslı Parçaların Akımsız Nikel Kaplanabilirliği Ve Yorulma Dayanımına Etkisi", *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2003).
78. Erden, M. A., "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşım çeliklerinin mikroyapı mekanik özellik ilişkisinin araştırılması", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
79. Koç, V., "Toz Metalurjisi Tekniği İle Üretilen Bir Paslanmaz Çelikte Katkı Elemanlarının Aşınma Direncine Etkileri", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
80. Karaman, Y., "Toz Metalurjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, .

81. Hausner, H. H., "New Methods for the Consolidation of Metal Powders", **Springer US**, (2013).
82. Beiss, P., Ruthardt, R., and Warlimont, H., "Powder Metallurgy Data ·1 Introduction: Datasheet from Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies ·Volume 2A1: ``Powder Metallurgy Data`` in SpringerMaterials (https://doi.org/10.1007/10689123{_}1)", **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, .
83. Söyler, A. U., "Fe-Mn-Si Esaslı Şekil Bellek Alaşımların İleri Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Üretimi", **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2014).
84. Salak, A. and Rieckensky, V., "Ferrous Powder Metallurgy", **Cambridge International Science Publishing**, 452 (1995).
85. Liu, R., Wu, C., Zhang, J., Luo, G., Shen, Q., and Zhang, L., "Microstructure and mechanical behaviors of the ultrafine grained AA7075/B4C composites synthesized via one-step consolidation", **Journal Of Alloys And Compounds**, 748: 737–744 (2018).
86. Karabulut, Ş., Gökmen, U., and Çinici, H., "Study on the mechanical and drilling properties of AA7039 composites reinforced with Al₂O₃/B₄C/SiC particles", **Composites Part B: Engineering**, 93: 43–55 (2016).
87. Kumar, S. and Balasubramanian, V., "Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/SiCp powder metallurgy composites", **Wear**, 264 (11–12): 1026–1034 (2008).
88. Azimi, A., Shokuhfar, A., Nejadseyfi, O., Fallahdoost, H., and Salehi, S., "Optimizing consolidation behavior of Al 7068-TiC nanocomposites using Taguchi statistical analysis", **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)**, 25 (8): 2499–2508 (2015).
89. Narale, M. N., Kulkarni, S. G., Menghani, J. V., and Lal, A., "Experimental investigation and optimization of multiple performance characteristics of Al-Mica-B₄C hybrid reinforced composite in drilling operation", **Materials Today: Proceedings**, 5 (9): 19763–19772 (2018).
90. "Aluminum 7075-T6; 7075-T651", <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1> (2022).

91. Bozkurt, Y. Y., "Development Of Boron Carbide - Calcium Hexaboride Ceramic Composites", *Yıldız Technical University*, (2020).
92. Töngör, B. C., "Sodyum Feldspat Ve Bor Karbür İçerikli Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu", *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, (2022).
93. Abouacha, N. M. E., "Karbon Nano Fiber Katkılı Elmaslı Kesici Takımların Karakterizasyonu", *Kastamonu Üniversitesi*, (67AD).
94. Islak, S., "Karbür Katkılı Mermer Kesici Takımların Çalışma Performansına Sinterleme Parametrelerinin Etkisi", *Fırat Üniversitesi*, (2012).
95. Garıba, A. M. M., "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Ti-B4c Kompozit Malzemelerin Mekanik Ve Korozyon Özellikleri", *Kastamonu Üniversitesi*, (2021).
96. Sarıkan, B., "İşlevsel derecelendirilmiş bor karbür takviyeli aa7075 esaslı kompozitlerin 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik özelliklerinin incelenmesi", *Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
97. Karabulut, Ş., Karakoç, H., and Çıtak, R., "Influence of B4C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B4C composites", *Composites Part B: Engineering*, 101: 87–98 (2016).
98. Zhang, L., Shi, G., Xu, K., Hao, W., Li, Q., Junyan, W., and Wang, Z., "Phase transformation and mechanical properties of B4C/Al composites", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (2): 2116–2126 (2020).

EK AÇIKLAMALAR A.

NUMUNE SONUÇLARI



EK AÇIKLAMALAR B.

ALFABETİK KAYNAK GÖSTERİMİ

ÖZGEÇMİŞ

İsmail KAYABAŞI ilkokulu Safranbolu'nun Bağlar İlkokulunda, ortaokul ve lise öğretimini ise Safranbolu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2002-2007 yılları arasında Erciyes Üniversitesi, Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliğinde lisans eğitimini tamamladı. 2016 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını tamamladı. 2015 yılından itibaren Kastamonu Üniversitesi Küre Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta olup 2022 yılında Küre Meslek Yüksekokulu Müdürlüğüne atanmıştır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres :

