

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ Ti-B₄C KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ**

ABDUALKARIM MUSBAH M GARIBA

DOKTORA TEZİ

DOÇ. DR. SERKAN ISLAK

MART - 2021
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Abdualkarim Musbah M GARIBA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ Ti-B₄C KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ

ABDUALKARIM MUSBAH M GARIBA

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DOÇ. DR. SERKAN ISLAK

Bu tez çalışması, geleneksel toz metalürjisi (soğuk presleme+sinterleme) yöntemi kullanılarak üretilen Ti-B₄C/KNF fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) mekanik ve korozyon özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Titanyum (Ti) matris olarak kullanılırken, bor karbür (B₄C) ve karbon nanofiber (KNF) takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Numuneler üç tabakalı olarak üretilmiştir. Üst ve alt tabakalar kompozitler olarak (Ti-B₄C/KNF) ve katkısız orta kısım ise Ti olarak üretilmiştir. Takviye miktarının mekanik ve korozyon özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, titanyuma hacimce %5, %10 ve %15'lik B₄C ve hacimce %0,5 KNF ilave edilmiştir.

FDM'ler, tabakasız yapıların mekanik özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Vickers sertlik test cihazı yardımı ile sertlik testi yapılmıştır. Numunelerin yoğunlukları Arşimet yasası ile ölçülmüştür. Numunelerin mikroyapı ve faz bileşimi optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FDM'lerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) üç nokta eğme testi kullanılarak belirlenmiştir. Kırık yüzeylerin morfolojileri SEM-EDS ile incelenmiştir. FDM'lerin korozyon özellikleri potansiyodinamik yöntemle belirlenmiştir. Korozyon çözeltisi olarak 3 M HCl tercih edilmiştir. Korozyon oranları Tafel eğrileri üzerinden hesaplanırken korozyon yüzeyi SEM-EDS kullanılarak incelenmiştir.

Mikroyapı sonuçları, takviye elemanlarının (B₄C ve KNF), Ti matrisi içerisinde homojen olarak dağıldığını ve tabakaların uyumlu bir şekilde birbirine bağlı olduğunu göstermiştir. B₄C ve KNF katkısı sonrası, malzemelerin sertliğinde anlamlı bir artış görülmüştür. FDM'lerin ÇKD değerleri tabakasız numunelerin değerlerinden daha yüksektir (saf Ti hariç). Buradan, orta tabakaların malzemelerin tokluğunu arttırdığı anlaşılmaktadır. 3 M HCl çözeltisine ait korozyon sonuçları farklı korozyon dirençleri olduğunu ve bu dirençlerde takviye miktarı değiştiğinde korozyon oranının başlangıçta artma ve akabinde düşüş eğilimi sergilediğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, B₄C, KNF, titanyum, korozyon

Mart 2021, 115 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF FUNCTIONALLY GRADED Ti-B₄C COMPOSITE MATERIALS

ABDUALKARIM MUSBAH M GARIBA

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SERKAN ISLAK

This thesis study was aimed to investigate the mechanical properties and corrosion properties of Ti-B₄C/CNF functionally graded materials (FGMs) produced using conventional powder metallurgy (cold pressing+sintering) method. When using titanium (Ti) as a matrix, boron carbide (B₄C) and carbon nanofiber (CNF) were used as reinforcements. Samples were produced as three layers. The upper and lower layers are produced as composites (Ti-B₄C/CNF) and the middle part without additives as Ti. In order to investigate the effect of the amount of the reinforcement on mechanical and corrosion properties, %5, %10 and %15 by volume of B₄C and %0,5 by volume of CNF were added to the titanium.

FGMs were compared with the mechanical properties of non-layered structures. Hardness testing was carried out with the help of Vickers hardness test device. The densities of the samples were measured by Archimedes' principle. Microstructure and phase composition of samples were performed by using optical microscope, SEM-EDS and XRD analyses. Transverse rupture strength (TRS) of FGMs were determined by using three-point bending test. The morphologies of the fractured surfaces were examined with SEM-EDS. Corrosion properties of FGMs are determined by potentiodynamic method. 3 M HCl was preferred as the corrosion solution. Corrosion rates were calculated from the Tafel curves and the corrosion surface was examined by using SEM-EDS.

Microstructure results showed that the reinforcing elements (B₄C and CNF) are homogeneously distributed in the Ti matrix and the layers are harmoniously bonded. With the addition of B₄C and CNF, there was a significant increase in the hardness of the materials. TRS values of FGMs were higher than that of non-layered samples (except pure Ti). It is understood from here that the middle layers increase the toughness of the materials. The corrosion results in 3 M HCl solution showed different corrosion resistances, in which corrosion rate showed the evolution trend of initial increase and subsequent decrease, while amount of reinforcement changed.

KEYWORDS: Functionally graded materials, B₄C, CNF, titanium, corrosion

March 2021, 115 Page

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tezim boyunca bana yol gösteren ve her türlü desteği ve imkânı sağlayarak değerli bilgilerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serkan ISLAK'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu süreçte gösterdikleri tüm rehberlik için tez izleme komitesi üyelerine çok teşekkür ederim; görüşleri, fikirleri ve geri bildirimleri kesinlikle benim için çok değerliydi.

Son olarak, eğitim aldığım yıllar boyunca ve bu tezi araştırırken ve yazarken bana sonsuz destek ve sürekli cesaret verdikleri için aileme çok derin şükranlarımı sunmalıyım. Onlar olmadan bu başarı mümkün olamazdı. Teşekkür ederim.

ABDUALKARIM MUSBAH M GARIBA

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xii
GRAFİKLER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
3. TEORİK İNCELEME	11
3.1 Kompozit Malzemeler	11
3.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
3.1.1.1 Kompozitlerin sınıflandırılması I.....	13
3.1.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması II	14
3.1.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Süreci.....	15
3.1.2.1 Laminasyon işlemi	16
3.1.2.2 Filament sarma işlemi	17
3.1.2.3 Pultrüzyon işlemi	17
3.1.2.4 Reçine transfer kalıplama işlemi	18
3.1.3 Kompozit Uygulamaları	18
3.1.4 Modern Yapılarda Kompozit Malzemelerin Uygulanması	19
3.1.4.1 Metal matrisli kompozitler	22
3.1.4.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK).....	23
3.1.4.3 Polimer matrisli kompozitler (PMK)	25
3.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	26
3.2.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özgün Özellikleri	26
3.2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) Uygulama Alanları.....	26
3.2.2.1 Havacılık ve uzay endüstrisi	27
3.2.2.2 Otomobil endüstrisi	28
3.2.2.3 Biyomedikal ekipman	28
3.2.2.4 Savunma üretimi	29
3.2.2.5 Enerji/Güç üretimi.....	30
3.2.2.6 Elektrik/Elektronik ekipmanlar	30
3.2.2.7 Denizcilik endüstrisi.....	30
3.2.2.8 Opto-Elektronik.....	31
3.2.2.9 Spor ekipmanları	31
3.2.2.10 Diğerleri	31

3.2.3	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Yöntemleri	32
3.2.3.1	Filtrasyon/Slip döküm	32
3.2.3.2	Sıvı metal infiltrasyon yöntemi	32
3.2.3.3	Santrifüj döküm yöntemi	33
3.2.3.4	Şerit döküm yöntemi	34
3.2.3.5	Kaplama yöntemleri	35
3.3	Toz Metalurjisi	36
3.3.1	Toz Üretimi	36
3.3.1.1	Mekanik yöntemlerle üretim	37
3.3.1.2	Atomizasyon teknikleri	37
3.3.2	Toz Karıştırma ve Harmanlama	38
3.3.3	Sıkıştırma	38
3.3.4	Sinterleme	39
3.4	Titanyum ve Alaşımları	40
3.4.1	Titanyum ve Alaşımlarına Giriş	40
3.4.2	Titanyumun Kristal Yapısı	41
3.4.3	Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	42
3.5	Bor Karbür (B ₄ C)	44
3.6	Karbon Nano Fiber (KNF)	49
3.7	Korozyon	53
3.7.1	Metallerin Korozyonu	54
3.7.2	Elektrokimyasal Hususlar	55
3.7.2.1	Anodik reaksiyon	55
3.7.2.2	Katodik reaksiyon	56
3.7.3	Elektrot Potansiyelleri	56
3.7.4	Galvanik Seri	57
3.7.5	Korozyon Hızları	58
3.7.6	Korozyon Türleri	58
3.7.6.1	Konsantrasyon hücre korozyonu	58
3.7.6.2	Galvanik korozyon	58
3.7.6.3	Taneler arası korozyon	59
3.7.6.4	Çukur korozyonu	59
3.7.6.5	Tekdüze dağlama korozyonu	60
3.7.6.6	Gerilme korozyonu çatlaması	60
3.7.6.7	Yorulma korozyonu	60
3.7.6.8	Sürtünme korozyonu	61
3.7.6.9	Aralık korozyonu	61
3.7.7	Korozyon Giderme ve İyileştirme İşlemi	62
3.7.7.1	Yabancı maddeyi çıkarmak için temizleme	62
3.7.7.2	Korozyon giderme	62
3.7.7.3	Yüzey işlemleri	63
3.7.7.4	Benzer olmayan malzemelerle temas	63
3.7.7.5	Boya sökme (gerektiğinde)	63
3.7.7.6	Kimyasal yöntem	63
3.7.7.7	Asitli temizleme	63
3.7.7.8	Koruyucu kaplama uygulaması	64
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
4.1	Kompozitlerin Hammaddeleri ve Üretimi	65

4.1.1	Hesaplama.....	66
4.1.2	Karıştırma	69
4.1.3	Presleme.....	69
4.1.4	Sinterleme	70
4.2	Uygulanan Testler	70
4.2.1	Üç Nokta Eğme Testi.....	71
4.2.2	Yoğunluk Ölçümü.....	72
4.2.3	Sertlik Testi.....	72
4.2.4	Metalografik Çalışmalar	73
4.2.5	Mikroyapı İncelemeleri (Optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD).....	74
4.2.6	Korozyon Testi	75
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
5.1	SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Sonuçları	76
5.2	EDS (Enerji Dağılımlı Spektrometre) Sonuçları.....	77
5.3	XRD (X-ışını Kırınımı) Sonuçları.....	80
5.4	Yoğunluk Ölçümü Sonuçları.....	82
5.5	Sertlik Testi Sonuçları	84
5.6	Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	85
5.6.1	Kırık Yüzey İncelemesi	87
5.7	Korozyon Testi Sonuçları.....	90
5.7.1	Tafel Polarizasyon Ölçümleri	90
5.7.2	Yüzey Topografyası Analizi.....	92
6.	GENEL SONUÇLAR.....	100
7.	ÖNERİLER.....	102
	KAYNAKLAR	103
	ÖZGEÇMİŞ.....	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	12
Şekil 3.2 Filament sarma işlemi	17
Şekil 3.3 Kompozitlerde çeşitli takviye türleri: a) parçacıklar, b) kısa fiberler, c) sürekli (uzun) fiberler, d) levhalar	21
Şekil 3.4 Boeing 787 için uçak gövdesi fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin dağılımları ve yüzdeleri.....	28
Şekil 3.5 İmplantın medial tarafı ve distal ucundan yatay ve dikey mesafeler....	29
Şekil 3.6 Lensin Sandviç Yapısı	31
Şekil 3.7 Filtrasyon/Slip Döküm işlemi.	32
Şekil 3.8 Basınçlı kalıp infiltrasyon işlemi	33
Şekil 3.9 Santrifüj döküm işlemi.....	34
Şekil 3.10 Şerit döküm işlemi	35
Şekil 3.11 Kaplama işlemi	36
Şekil 3.12 Gaz atomizasyon tekniği.....	38
Şekil 3.13 Sıkıştırma işlemi	39
Şekil 3.14 Sinterleme işlemi	39
Şekil 3.15 Seçilmiş metallerin yoğunlukları	41
Şekil 3.16 Hcp α ve bcc β fazının kristal yapısı.....	42
Şekil 3.17 B-C faz diyagramı.....	45
Şekil 3.18 B ₄ C'nin rombohedral birim hücre yapısı.....	46
Şekil 3.19 Bileşime göre altıgen B ₄ C birim hücresinin kafes parametreleri.....	46
Şekil 3.20 B ₄ C katı çözeltilisinde artan bor içeriğinin veya B ₄ C ile dengede artan serbest karbon (grafit) ile sertliği azaltan etkileri.....	47
Şekil 3.21 Gözenekliliğe dayalı bor karbür eğilme dayanımı.....	48
Şekil 3.22 Temel elektro lif çekim düzeneği, Taylor konisi ve kararsızlığı dahil olmak üzere PAN elektro lif çekimi şematik diyagramı	51
Şekil 3.23 Her biri iyonlarını içeren 1M'lik bir çözeltiye daldırılmış demir ve bakır elektrotlardan oluşan bir elektrokimyasal hücre. Bakır elektro biriktirme yaparken demir korozyona uğrar.....	56
Şekil 4.1 (a) Ti, (b) B ₄ C ve (c) KNF tozların SEM görüntüleri ve XRD desenleri	66
Şekil 4.2 Üç nokta eğme testi düzeneği	72

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 Çeşitli B ₄ C seramiklerinin mekanik özellikleri	48
Tablo 3.2 KNF 'nin özellikleri.....	53
Tablo 3.3 Galvanik Serisi.....	57
Tablo 4.1 Tozların saflık ve tane boyutu değerleri	65
Tablo 4.2 Numunelerin Ağırlığı.....	68
Tablo 4.3 Numunelerin toz ağırlıkları.....	68
Tablo 5.1 Numunelerin sertlik değerleri	85
Tablo 5.2 Oda sıcaklığında 3 M HCl'de kaydedilen Ti-B ₄ C+KNF FDM'lerin hesaplanan korozyon potansiyeli, korozyon akımı, Tafel eğimleri ve korozyon hızı.....	92

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1	MMK malzemelerinin uygulama örnekleri: a) Al-Al ₂ O ₃ 'ten yapılan bağlantı çubukları b) WC-Co ile yapılmış taş kesici uçlu makaralı koni ucu	23
Fotoğraf 3.2	SMK malzemelerinin uygulama örnekleri: a) yanma odası elemanı, b) fren diski.....	24
Fotoğraf 3.3	N, N-dimetilformamid (DMF) içinde %8 PAN çözeltisinden Elektrospun PAN nanofiberlerin temsili SEM görüntüleri (a); iki aşamalı ısıtmadan elde edilen KNF: 30 dakika süreyle 200 °C ve 1 saat süreyle 750 °C (b); çok aşamalı kademeli ısıtmadan türetilen KNF: 30 ila 230 °C arasında 5 °C/dak., 230 ila 270 °C arasında 1 °C/dak., (c) 270 ile 800°C arası 5°C/dak.....	52
Fotoğraf 4.1	Hassas terazi	68
Fotoğraf 4.2	Toz karıştırma turbulası.....	69
Fotoğraf 4.3	Pres makinesi ve kullanılan kalıp.....	70
Fotoğraf 4.4	Tüp fırın.....	70
Fotoğraf 4.5	Vickers sertlik test cihazı	73
Fotoğraf 4.6	Zımparalama ve parlatma makinesi	74
Fotoğraf 4.7	Görüntüleme ve faz analizi tespiti için kullanılan cihazlar: (a) Optik mikroskop, (b) SEM ve (c) XRD	74
Fotoğraf 4.8	Korozyon Ünitesi	75
Fotoğraf 5.1	1 nolu FDM numunesinin makro görüntüsü	76
Fotoğraf 5.2	FDM ve bulk numunelerin SEM görüntüleri: (a) (Ti+%5B ₄ C) FDM. (b) (Ti+%10B ₄ C) FDM. (c) (Ti+%15B ₄ C) FDM. (d) (Ti+%5 B ₄ C+%0,5 KNF) FDM. (e) (Ti+%10B ₄ C+%0,5 KNF) FDM. (f) (Ti+%15B ₄ C+%0,5 KNF) FDM. (g) Saf Ti. (h) (Ti+%5B ₄ C). (i) (Ti+%5 B ₄ C+%0,5 KNF)	77
Fotoğraf 5.3	FDM ve bulk numunelerde çatlak ilerlemesi	87
Fotoğraf 5.4	Ti+%5 B ₄ C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü: (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka.....	87
Fotoğraf 5.5	Ti+%10 B ₄ C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka.....	88
Fotoğraf 5.6	Ti+%15B ₄ C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka.....	88
Fotoğraf 5.7	Ti-15%B ₄ C-0.5%KNF FDM numunesinin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafları: (a) orta katman, (b) kompozit katman, (c) A bölgesi ve (d) B bölgesi	89
Fotoğraf 5.8	Ti numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) 2000X ve (b) 1000X	90
Fotoğraf 5.9	FGM'siz Ti+%5 B ₄ C+%0,5CNF numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) 2000X ve (b) 1000X	90
Fotoğraf 5.10	Ti+%5 B ₄ C numunesinin SEM görüntüleri: (a) korozyondan önce, (b) korozyondan sonra	93
Fotoğraf 5.11	Ti+%10 B ₄ C numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra.....	93

Fotoğraf 5.12	Ti+%15B ₄ C numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra.....	94
Fotoğraf 5.13	Ti+%5 B ₄ C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra	94
Fotoğraf 5.14	Ti+%10 B ₄ C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra	94
Fotoğraf 5.15	Ti+%15B ₄ C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra	95
Fotoğraf 5.16	Saf Ti numunesinin SEM görüntüsü (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra.....	95

GRAFİKLER DİZİNİ

	Sayfa
Grafik 5.1 (Ti+%5 B ₄ C) kompozit tabakasının EDS analizi	78
Grafik 5.2 (Ti+%5 B ₄ C+%0,5 KNF) kompozit tabakasının EDS analizi.....	79
Grafik 5.3 Ti orta tabakasının matris katmanının EDS analizi	79
Grafik 5.4 Titanyum matris ve B ₄ C, KNF Takviyesi için XRD desenleri (1- (Ti+%5B ₄ C)FDM, 2-(Ti+%10B ₄ C)FDM, 3-(Ti+%15 B ₄ C)FDM, 4- (Ti+%5 B ₄ C+0,5KNF)FDM, 5-(Ti+%10 B ₄ C+0,5KNF)FDM, 6- (Ti+%15 B ₄ C+0,5KNF)FDM, 7-(Ti saf) FDM'siz, 8-(Ti+%5 B ₄ C) FDM'siz, 9-(Ti+%5 B ₄ C+0,5KNF) FDM'siz).....	81
Grafik 5.5 Ti-B faz diyagramı.....	82
Grafik 5.6 Numunelerin yoğunluğu ve gözenekliliği	83
Grafik 5.7 Çapraz kırılma dayanımı değerleri	89
Grafik 5.8 Tafel grafikleri (1-(Ti+%5B ₄ C)FDM, 2-(Ti+%10B ₄ C)FDM, 3- (Ti+%15B ₄ C)FDM, 4-(Ti+%5B ₄ C+0,5KNF)FDM, 5-(Ti+%10B ₄ C+ 0,5KNF)FDM, 6-(Ti+%15 B ₄ C+0,5KNF)FDM, 7-(Ti saf) FDM'siz, 8-(Ti+%5 B ₄ C) FDM'siz, 9-(Ti+%5 B ₄ C+0,5KNF) FDM'siz).....	92
Grafik 5.9 Ti+%5 B ₄ C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	96
Grafik 5.10 Ti+%10 B ₄ C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	96
Grafik 5.11 Ti+%15B ₄ C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	97
Grafik 5.12 Ti + %5 B ₄ C + %0,5 KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	97
Grafik 5.13 Ti+%10 B ₄ C+%0,5KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	98
Grafik 5.14 Ti+%15 B ₄ C+%0,5KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi	98
Grafik 5.15 Saf Ti numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
EDM	: Elektriksel Deşarjla İşleme
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
Kıc	: Kırılma Tokluğunun
LMD	: Lazer Metal Biriktirme
MMK	: Metal Matris Kompozitler
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitte
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
SMK	: Seramik Matrisli Kompozitlerde
SPS	: Kıvılcım plazma sinterleme
TM	: Toz Metalürjisi
TZP	: Tetragonal Zirkonya Polikristalleri
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesi ile ihtiyaç duyulan malzemelerin üretimine olanak sağlayan malzeme bilimi alanı, teknolojik alanlarda yeniliklerin oluşmasına yardımcı olmaya devam etmektedir. Kullanılacakları alanlara ve ortamlara göre malzemeler kendilerinden istenen bazı özelliklere sahip olmalıdır (Vermesan ve Friess, 2013).

Malzemeler servis yük ve koşullarını taşıyacak yeterli özelliğe sahip değilse, en gelişmiş türbin veya uçak tasarımlarının işe yaramayacağını anlamak için uzman olmak gerekmez. Alan ne olursa olsun, gelişmelerin dayanacağı son sınır malzemelere bağlıdır. Bu bağlamda, kompozit malzemeler, malzemeler üzerinde yapılan sürekli optimizasyon çalışmalarında dev bir adımı ifade etmektedir (Chawla, 2012).

Açıkçası, kompozit malzemeler yeni veya günümüzde ortaya çıkmış bir fikir değildir. Doğa, kompozit malzemeler fikrinin kullanıldığı örneklerle doludur. Odun, bir lignin matrisinde selüloz lifleri olan lifli bir kompozittir. Selüloz lifler yüksek çekme mukavemetine sahiptir fakat çok esnektir (yani düşük esnemezliğe sahiptir), oysa lignin matrisi lifleri birleştirir ve esnemezliği sağlar. Kemik, vücudun çeşitli kısımlarının ağırlıklarını destekleyen bir başka doğal kompozit örneğidir (Chawla, 2012).

Kompozit malzemelerdeki takviyeler partikül, pul, kıllar, kısa fiber, sürekli (uzun) fiberler veya levhalar şeklinde olabilir. Kompozitlerde kullanılan pek çok takviyenin lifli bir forma sahip olduğu ortaya çıkmıştır zira malzemeler lifli formda olduklarında diğer tüm formlardan daha güçlü ve daha serttir. Özellikle, bu kategori kapsamında, çok düşük bir yoğunluk ile birlikte çok yüksek mukavemete ve çok yüksek esnemezliğe sahip olan gelişmiş fiberler denilen malzemelerle daha çok ilgileneceğiz (Campbell, 2010).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme zorlu bir çalışma ortamında özelliklerini kaybetmeden ve kullanım esnasında aksamadan işlevine devam edebilen gelişmiş bir mühendislik malzemesidir. Geleneksel kompozit malzemeler, ya bileşen malzemelerin özellikleri arasında uyum bulunan homojen karışımlardır ya da laminat kompozit

malzemelerde olduğu gibi birleştirilen iki farklı malzemedir, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ise bu geleneksel kompozit malzemelerden tamamen farklıdır ve bir malzemenin diğerine bileşim gradyanı ile karakterize edilir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, farklı işlevleri karşılamak için tasarlanmış malzemelerdir (Mahamood ve Akinlabi, 2017).

Mühendislik uygulamasına yönelik fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme fikri ilk olarak 1980'lerin başında, Japonya'daki araştırmacıların bir projede bir uzay düzleminde çok yüksek sıcaklık farkına dayanabilen bir kompozit malzeme türü gerektiren bir sorunla karşılaşılmasıyla ortaya atıldı. Uygulama kompozit malzemelerin bir tarafının yaklaşık 2000 K sıcaklığa tabi tutulmasını ve bu sıcaklığın kompozit malzemenin diğer kısmına iletilmemesini gerektirmekteydi (Bohidar vd., 2014).

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Cirakoglu vd. (2002), çalışmalarında, yanma sentez tekniğinin kullanılması ile temel Ti ve B tozlarından fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretimini araştırmışlardır. Bu tekniğin seçilmesinin nedeni titanyum ile bor arasındaki ekzotermik reaksiyonu kullanmasıdır. Reaksiyonların kontrolü, sisteme üçüncü bir öge eklemeyen stokiometriden uzak bileşimler seçilerek gerçekleştirildi. Bileşimsel olarak derecelendirilmiş üç tabakalı (Ti- ağırlıkça %10–18 B, Ti- ağırlıkça %5–15 B) ve beş katmanlı (Ti- ağırlıkça %5–10–15–18 B) green kompaktlar ateşlendi. Bileşim seçiminin ve sıcaklığın yayılım ve ürün oluşumuna etkisi incelenmiştir. Ekzotermik reaksiyonlarda daha fazla kontrol sağlamak için önce titanyum tarafı ateşlendi. Bu nedenle, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) kompaktlarında tek bileşimlere kıyasla kısmen daha uzun ateşleme süresi ve daha yüksek reaksiyon sıcaklıkları kaydedildi. X-ışını kırınımı çalışmaları, yüksek ekzotermiklik nedeniyle TiB ve TiB₂'nin stoikiometrik olmayan bileşimlerde bile oluştuğunu göstermiştir. Bu tür reaksiyonlar bir tarafında titanyum ve diğer tarafında Ti-TiB-TiB₂ bulunan FDM'ler üretmiştir. Üretilen Ti-TiB-TiB₂ dereceli kompozit malzemeler, sürekli ve çatlaksız arayüzler sergilemiştir (Cirakoglu vd., 2002).

Çalışmalarında, He vd. (2008) slip döküm yöntemi ile TZP/SUS304 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) geliştirmiştir. Mikroskopik gözlemler TZP/SUS FDM kimyasal bileşim ve mikroyapısının kademeli olarak adım adım dağıldığını ve geleneksel seramik/metal birleştirmesinde oluşan makroskopik seramik/metal arayüzünü ortadan kaldırdığını göstermiştir. Tabakaların her bir arayüzü belirgin kusurlar olmadan iyi bir şekilde bağlanmıştır ve TZP/SUS sistemin mekanik özellikleri yapısal değişikliklere önemli ölçüde bağlıdır (He vd., 2008).

Shahrjerdi vd. (2011), hidroksiapatit (HA) ve titanyum (Ti) için optimum sinterleme sıcaklığı kullanarak silindir şeklinde fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretmişlerdir. FDM kademesi titanyumdan başlayarak hidroksiapatite doğru yapılmıştır. Çalışmada, toz ilave miktarları, toz karıştırma, tozların seçimi ve soğuk preslemenin etkileri detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Deneysel olarak optimum bir sinterleme haritası elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarını doğrulamak için

büzülme, SEM, EDX ve Vickers mikro sertliği olmak üzere dört yöntem kullanılmıştır. Farklı katmanlar ile üretilen FDM silindirin yapı ve kompozisyon analizi, tasarımın işlevselliğini doğrulamıştır. Elde edilen doğrusal büzülme, uygun bir geçerlilik göstergesi olmuştur. Vicker'ın HA / Ti sertliği, saf mikrokristalin Ti metalinkinden daha yüksekti ve HA/Ti FDM'nin 3. ve 4. katmanlarında azalmıştır. Yazarlar, incelemelerin, FDM malzeme özelliklerinin teorik formülasyonu için kullanılabilirlik derecelendirme indeksi değerinin bir tahminine yol açabileceğini rapor etmişlerdir (Shahrjerdi vd., 2011).

Liu vd. (2012), W/Cu içerikli beş farklı FDM'yi farklı sıcaklıklarda mikrodalga sinterleme tekniği ile üretmişlerdir. 1350 °C'de mikrodalga sinterlenmiş W/Cu FDM numunesi için %93'e varan bağıl yoğunluk ve 200 W/mK kadar yüksek oda sıcaklığında termal iletkenlik elde edilmiştir. SEM görüntüleri, Cu ve W elementinin EDX dağılım haritaları ve XRD analizi, W/Cu FDM numunelerinin tüm derecelendirilmiş yapısının mikrodalga sinterlemeden sonra muhafaza edilebileceğini ve Cu bakımından zengin katmanların bağıl yoğunluğunun, W açısından zengin katmanlarındakinden fazla olduğu açıklanmıştır. Cu açısından zengin katmanlarda, W parçacıkları Cu ağı ile iyi bir şekilde kuşatılmıştır. Kısa sinterleme süresi nedeniyle, W/Cu FDM numunelerinin her katmanındaki W tane boyutu, başlangıçtaki W tozlarına kıyasla neredeyse değişmeden kalmıştır. Mevcut sonuçlar, mikrodalga sinterlemenin ince W mikroyapısı ile yoğun W/Cu FDM üretimi için potansiyel bir yaklaşım olduğunu göstermiştir (Liu vd., 2012).

Miranda vd. (2013), SiC ve Al₂O₃ takviyeli alüminyum matrisli FDM'leri sürtünme karıştırma kaynağı ile üretmişlerdir. Partiküllerin dağılımı ve homojenliği üzerine işlem parametrelerinin etkisini belirlemek için bir dizi yüzey analiz çalışması yapılmıştır. Oluşturulan tabakalar, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve sertlik testi ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, bu metot ile uygun bir tabaka elde edilebileceği, partiküllerin alt malzemeye gözeneksiz ve çatlaksız olarak iyi bağlandığını, takviyelendirilmiş partiküllerle doldurulmuş delinmiş deliklere sahip sarf malzemesi, önceki partiküller çevreye kaybolurken partikül geri kazanımı açısından daha verimli olduğunu göstermiştir (Miranda vd., 2013).

Udupa vd. (2014), Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemeler (FDKM) olarak da adlandırılan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler FDM'lerin farklı

malzemelerden oluştuğunu bu nedenle farklı işlemler için gerekli olan farklı mekânsal bileşimler yapmak üzere tasarlanmış homojen olmayan maddeler olduklarından bahsetmiştir. Mevcut çalışma FDKM'lere, temel kavramlarına, türlerine, hazırlık işlemlerine ve özelliklerine genel bir bakış sunmaktadır. Odak noktamız, mevcut çok boyutlu üretim koşullarında FDKM'lere yönelik bilgi ve uygulamalarıdır. Mevcut üretim sanayilerini ve diğer uygulamaların taleplerini analiz edersek, FDM/FDKM'lerin bazı mevcut sorunları çözmek için gerekli olduğunu fark edeceğiz. Toz metalürjisi tekniklerini göz önünde bulundurarak, KNT takviyeli Al FDKM'leri konu alan basit bir vaka çalışmasını ele aldık. Gelecekteki gelişimini öngörmede faydalı olacak mevcut FDKM araştırmasında bir bakış açısı sunmuştur (Udupa vd., 2014).

Carvalho (2015)'nin çalışmasında piston segmanlarındaki hasar öncelikle aşınmaya ve ardından yorulmaya atfedilmiştir. Hasarları optimize edilmiş mekanik davranışa sahip bir FDM-Fonksiyonel derecelendirilmiş Malzeme kompoziti oluşturarak önemli ölçüde azaltılabilir. Yazarın amacı, motor kompresyon piston segmanları için düşünülebilecek bir AlSi-KNT Fonksiyonel derecelendirilmiş Malzeme (FDM) üretmektir. AlSi derecelendirilmiş kompozitler (ağırlıkça %0–2 KNT FDM takviyeli) toz metalürjisi (TM) işleme yoluyla FDM'leri üretmek için tasarlanmış yeni bir ekipmanla elde edildi. SEM analizi, üretilen FDM'lerin mekanik özellikler üzerinde ağırlıkça % takviye oranlarında kademeli bir değişime sahip olduğunu göstermiştir. Akma dayanımı, nihai çekme dayanımı, çekme gerinimi, yorulma sınırı performansı ve aşınma kaybının sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Piston segmanları için geliştirilen AlSi–KNT fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitin evrensel bir özellikler dengesine sahip olması beklenmektedir (Carvalho, 2015).

Carvalho vd. (2015), bir FDM piston segmanı ile ilgili olarak, daha yüksek mekanik gerilmelere ve artan aşınmaya maruz kalan bölgeler olan segman dış yüzeyine KNT'lerin yerleştirilmesinin önerildiğini belirtmiştir. Ayrıca, sadece dış yüzeylerde ağırlıkça %2 gradyan seçiminin en iyi maliyet fayda oranıyla ilişkili olduğu da vurgulanmalıdır. Mekanik özellikler ve aşınma arasındaki daha iyi bir uyum ağırlıkça %2 KNT'lerin birleşiminde ortaya çıkar ve daha büyük kırılmalar gelişmiş aşınma

direncini artırırken buna karşın mekanik özelliklerde bir azalma olmuştur (Carvalho vd., 2015).

Matějček vd. (2015)'nin çalışmasında, füzyon cihazlarının plazma kaplama bileşenlerinde potansiyel uygulama için tungsten-çelik kompozitler ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) geliştirmiştir. Bunların rolü, plazma kaplama tungsten zırh ile yapısal malzeme arasındaki ara yüzeyde termal gerilimleri azaltmaktır. Bu çalışmada, sıcak presleme ile tungsten ve çelik tozlarından üretilen uniform kompozitler ve kademeli tabakalar incelenmiştir. Tekdüze dağılımı ve fazları iyi bağlanmış tam yoğun kompozitler oluşturulmuştur. Arayüzlerde ince bir Fe_2W intermetalik faz katmanı bulunmuştur. Oluşumunu önlemek için, tungsten ve çelik arasına üçüncü bir faz (tungsten karbür) eklenmiştir. Üretilmiş ve tavlanmış haldeki her iki kompozit türünün yapısı, termal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir (Matějček vd., 2015).

Liu vd. (2016), bileşimdeki sürekli bir değişimden dolayı yüksek sıcaklık uygulamaları için $Ni-Al_2O_3$ fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) önemli hale geldiğini söylemiştir. Fakat geleneksel işleme yöntemleriyle $Ni-Al_2O_3$ FDM'lerin üretimi, yalıtkan seramik bileşimi nedeniyle uzun ve maliyetli bir süreçtir. Bu araştırma kendinden indüklemeli elektriksel deşarjla işleme (EDM) ile $Ni-Al_2O_3$ FDM'lerin işlenmesine yönelik yeni bir yöntem sunmaktadır. Kendinden indüklenen EDM, yalıtkan bileşimdeki deşarjları tetiklemek için $Ni-Al_2O_3$ FDM'lerin iletken bileşimlerini kullanmaktadır. Kendiliğinden indüklenen EDM ile delinen dört tabakalı $Ni-Al_2O_3$ FGM'lerin talaş kaldırma mekanizmaları, deşarj özellikleri, yüzey özellikleri, talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınma oranını içeren işleme özellikleri araştırılmıştır. %70 Ni- dereceli tabakanın ve %30 Ni-dereceli tabakanın dâhil olduğu derecelendirilmiş tabakaların geleneksel eritme ve buharlaşmaya ek olarak Al_2O_3 partiküllerinin yer değiştirmesiyle uzaklaştırıldığı bulunmuştur. İletken tabakadan kaynaklı deşarjlardan yararlanılarak saf Al_2O_3 tabakası eritilmiş ve buharlaştırılmıştır. Deşarj özellikleri, yüzey özellikleri, talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınma oranı, derecelendirilmiş bileşimlerin talaş kaldırma mekanizmalarından önemli ölçüde etkilenmiştir. Bu bulgular, kendinden indüklenen EDM'nin $Ni - Al_2O_3$ FDM'leri etkili bir şekilde işleyebildiğini göstermektedir (Liu vd., 2016).

Mirazimi vd. (2016), bakır matrisli kompozitlerin elektrik bağlantısı uygulamalarında kullanılacak ısı ve elektriksel olarak iletken malzemeler için olası aday olarak daha fazla ilgi gördüğüne dikkat çekmiştir. Bu çalışmada, beş tabakalı Cu/YSZ (yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonyum), fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ve hacimce %3 ve %5 YSZ parçacıkları artı saf Cu numunesi içeren bakır matrisli kompozit numuneler toz metalürjisi (TM) yöntemi ve kıvılcım plazma sinterleme (SPS) konsolidasyon işlemi kullanılarak sentezlenmiştir. Tüm numunelerin mikroyapısal ve bazı fiziksel ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. Mikroskopik incelemeler, çok ince YSZ parçacıklarının bakır matris içinde neredeyse homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Her bir FDM tabakasında uygun bir arayüz gözlemlenmiştir. Yoğunluk ölçümü, kompozitin derecelendirilmiş yapısının SPS işleminden sonra iyi bir şekilde yoğunlaştırılabileceğini göstermiştir. Cu/YSZ FDM numunesinin çeşitli tabakalarının mikrosertlik değerleri kademeli olarak 56,3'ten (saf bakır tarafından) 75,2 HV'ye (Cu- hacimce %5 YSZ tarafına) değişmiştir. YSZ içeriğinin artması elektriksel iletkenlikte bir azalmaya neden olmuştur. Ek olarak, Cu/YSZ FDM numunesinin [308,0 W/(mK)] ısı iletkenliğinin Cu- hacimce %5 YSZ kompozit numunesinden [260,7 W/ (mK)] daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna göre, Cu/YSZ FDM'nin aynı bileşende farklı malzeme özelliklerinin gerekli olduğu kayar elektrik kontaktları gibi elektrik uygulamaları için iyi bir aday olabileceği sonucuna varılabilir (Mirazimi vd., 2016).

Bahraminasab vd. (2017), tarafından yapılan çalışmada, ortopedik protezlerin halen sınırlı kullanım ömrüne sahip olduğu ve bu durumun ilgili risklerle birlikte revizyon cerrahisi gerektirdiği belirtilmiştir. Bu durum yaygın şekilde tek bileşenli ve tekdüze olan üretimi için kullanılan biyomalzemelerin hassasiyetiyle bir dereceye kadar ilişkilidir. Bu yüzden, mevcut biyomalzemelerin eksikliklerini gidermek için kompozitler ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) gibi hibrit biyomalzemeler geliştirilmektedir. Mevcut araştırma, kıvılcım plazma sinterleme (SPS) ile üretilen alümina-titanyumdan yapılmış bir FDM'nin yapısının ve fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesine odaklanmaktadır. Her bir FDM tabakasının ilgili kompozitleri de üretilmiştir. Sinterlemeden sonra yapısal, mekanik ve fiziksel testler yapılmıştır. X-ışını kırınımı kullanılarak yapılan mikroyapısal analiz, özellikle titanyum içeriğinin artmasıyla kompozitlerdeki Ti_3Al ve $TiAl$ varlığını ortaya

çıkarmıştır. Taramalı elektron mikrografları, iki faz arasında ve FDM tabakaları arasında iyi yapışma ve bağ olduğunu göstermiştir. Kompozitlerin ve FDM numunelerin sertlik ve eğilme mukavemeti test edilmiş ve Ti hacim oranındaki artışın bu özellikleri monoton olarak azalttığı tespit edilmiştir. Dahası, FDM numunesinin sinterleme davranışı ve kırılma mekanizmaları incelenmiş ve tartışılmıştır (Bahraminasab vd., 2017).

Li vd. (2017), tarafından yapılan bir çalışmada, Ti-6Al-4V ve SS316'dan bir fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretmek için yeni bir üretim işlemini keşfetmede lazer metal biriktirme (LMD) kullanılmıştır. Ti-6Al-4V ve SS316A arasında intermetalik fazların oluşumunu önlemek için bir geçiş bileşimi yolu sunulmuştur (Ti-6Al-4V→V→Cr→Fe→SS316). Geçiş bileşimi yolu izlenerek LMD ile ince bir duvar numunesi üretilmiştir. Mikroyapı karakterizasyonu ve bileşim dağılım analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile yapılmıştır. SEM görüntüleri, FDM numunesinin mikroyapı morfolojisini göstermektedir. EDS sonuçlarıyla belirlenen eleman gradyan dağılımı FDM geçiş bileşim yolu tasarımını yansıtabilir. X-ışını kırınımı testleri yapıldı ve sonuçlar göstermiştir ki intermetalik faz oluşumu bileşim yolunun takip edilmesini etkin bir biçimde önlemiştir. Vickers sertlik numarasının (VHN) Ti-6Al-4V'den SS316'ya dağılımını belirlemek için Vickers sertlik testi kullanılmıştır. VHN sonuçları LMD işleminde önemli bir sert kırılma faz oluşumunun olmadığını göstermiştir (Li vd., 2017).

Wang vd. (2017), çalışmalarında nano-SiC partiküllerinin (n-SiCp) değişen hacim oranlarında (%1-7) fonksiyonel derecelendirilmiş 2014Al/SiC kompozitlerinin toz metalürjisi ile üretildiğini ifade etmiştir. N-SiCp içeriğinin korozyon ve aşınma davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kompozitlerin mikroyapıları optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve transmisyon elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir. Kompozitlerin korozyon davranışı, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde potansiyodinamik polarizasyon taramaları ile değerlendirildi. Korozyon sonuçları, hacimce %3 n-SiC içeren kompozit tabakanın korozyon akımının 2014Al matrisin akımından çok daha düşük olduğunu göstermektedir. Kompozitlerin mekanik özellikleri mikro sertlik testleri ve ball-on-disk aşınma testleri ile değerlendirildi.

Uygulanan yük 15 N'dan 30 N'a arttırıldıkça, kompozitlerin aşınma oranları önemli ölçüde artmış ve aşınma mekanizması hafif aşınma rejiminden şiddetli aşınma rejimine dönüşmüştür. Ayrıca, hacimce %3 n-SiCp/2014Al kompozit tabakada yapışma ve aşındırıcı aşınma mekanizmalarının önemli bir rol oynadığı en düşük aşınma oranının da tespit edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, n-SiCp'nin, sert bir çekirdek ve aşınmaya veya korozyona dirençli sert bir yüzey gerektiren uygulamalar için FDM üretiminde etkili adaylar olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2017).

Li vd. (2018), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler sayesinde otomobil, havacılık, enerji ve tıbbi cihaz sektörlerinde fonksiyonel metal parçaları üretmek için yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir. Toz yatak füzyon birleştirme ve yönlendirilmiş enerji biriktirme dahil olmak üzere metal katkılı üretim işlemleri iki ana kategorisi için, parçalar, doğrudan bir CAD modelinden tozlar veya teller şeklinde besleme stok malzemelerinin eritilmesi yoluyla üretilir. Metal katkılı imalatın benzersiz termal döngüsü şunlarla karakterize edilir: 1) Çok yüksek sıcaklık gradyanları ile yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle hızlı ısıtma oranı, 2) Küçük eriyik havuzu hacmi nedeniyle yüksek soğutma oranlarında hızlı katılaşma ve 3) Üst toz tabakasının eş zamanlı eritilmesini ve alttaki önceden katılaşmış tabakaların yeniden eritilmesini içeren geri erimedir.

Çok yüksek artık gerilme gradyanları son kullanım parçalarının işlevselliğini önemli ölçüde kötüleştiren parça bozulmalarına neden olduğundan, eklemeli üretimdeki özgün termal döngünün neden olduğu artık gerilme, üretilen metal parçaları için önemli bir sorundur. Bu araştırma, artık gerilme kaynakları, özellikleri ve azaltma konusundaki mevcut araştırmayı kapsamlı bir biçimde değerlendirmektedir. İlk olarak, eklemeli üretim metal parçalarında artık gerilme ve mikroyapı arasındaki ilişki vurgulanır. Daha sonra hem uygulanan metal parçalarda hem de işlem sonrası olanlarda artık gerilmenin karakteristiği ve ölçüm yöntemleri özetlenmiştir. Üçüncü olarak, yerinde ve işlem sonrası kontrol yöntemleri de dahil olmak üzere artık gerilme azaltma ve kontrol yöntemleri kapsamlı bir biçimde tartışılmıştır. Dahası, bu çalışmada gelecek çalışmalar için yönlendirmeler de mevcuttur (Li vd., 2018).

Yusefi vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, saf bir bakır katman da dahil 11 tabakalı W-Cu fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Mekanik olarak alaşımlanmış Ni-Mn-Cu tozlarının W ve Cu tozları ile karıştırılması, tozların istiflenmesi, istiflenmiş tabakaların preslenmesi ve son olarak 1000 °C’de sinterlenmesi ile numuneler hazırlanmıştır. Bir Ni–Mn–Cu sistemin kullanılması iyi sinterleme davranışını ve fiziksel ve mekanik özellikleri kaybetmeden maliyeti düşürebilir. Malzemenin bileşimi taramalı elektron mikroskobu görüntüleri baz alınarak ve Ni ve Mn varlığında Cu atomlarının W parçacıklarına yayılabileceğini gösteren enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi haritalamasına göre analiz edildi. Tüm tabakalar çok yüksek bir bağıl yoğunluğa sahipti, böylece yoğunlaşmalarını ve mükemmel sinterleme davranışlarını göstermekteydi. Ayrıca Cu fazındaki gözeneklilik değerlerinin FDM boyunca yaklaşık olarak %2,39 oranında değişmeden kaldığı tespit edilmiştir. Mekanik ölçümler, sertlik (%72), elastik modülü (%61) ve nihai çekme dayanımının (%58) W-Cu FDM boyunca W içeriğiyle arttığını buna karşın kırılma tokluğunun (K_{IC}) ters yönde değiştiğini göstermiştir (minimum 4,52 MPa/m 0,5) (Yusefi vd., 2018).

Bertoletto vd. (2020), FDM’leri seramik kesici takımlara uygulamışlardır. Bu nedenle, iki kesici takım malzemesi seçilmiştir: daha yüksek tokluğu nedeniyle sement karbür ve yüksek sıcaklıklarda yüksek aşınma direnci nedeniyle ise alümina bazlı seramiktir. Alümina esaslı seramikler fonksiyonel olarak sinterlenmiş karbür ile derecelendirilmiş ve spark plazma sinterleme tekniği kullanılarak sinterlenmiştir. Termal artık gerilmeler tahmin edilmiştir. Ayrıca alümina tabakası için mikro yapı, bağıl yoğunluk ve Vickers sertliği ve kırılma tokluğu değerlendirilmiş ve eğilme mukavemeti ve işleme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan, mikroyapı analizi FDM'nin parçalarını çatlaksız olduğunu göstermiştir. En önemli sonuç, FGM'lerin eğilme mukavemeti değerlerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Sonuçlar FDM kesici takım olarak üretilebileceğini göstermiştir (Bertoletto vd., 2020).

3. TEORİK İNCELEME

3.1 Kompozit Malzemeler

Malzemelerin yaşamlarımız üzerinde öyle etkileri vardır ki, insanlığın tarihsel dönemleri malzemelerden sonra tayin edilmiş ve isimleri verilmiştir. Son elli yılda, kompozit malzemeler, plastikler ve seramikler, ortaya çıkan baskın malzemeler olmuştur. Kompozit malzemelerin hacmi ve uygulama sayısı durmaksızın yeni pazarlara girerek ve ele geçirerek istikrarlı bir şekilde büyümüştür. Çoğumuz fiberglas tekneler ve grafit spor malzemelerine aşinayız ve kompozit malzemelerin muhtemel uygulamaları sadece bireyin hayal gücü ile sınırlıdır (Kelly ve Ed, 2012).

Gelişmiş özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmak için iki veya daha fazla farklı malzemenin birleştirilmesiyle bir kompozit malzeme oluşturulur. Örneğin, taşlar çimentoyla birleşip içindeki taşlar kadar sağlam ama taşları oymaya kıyasla daha kolay şekillendirilebilen betonu oluştururlar. Betonun gelişmiş özellikleri mukavemet ve üretim kolaylığı iken, çoğu fiziksel, kimyasal ve işleme ile ilgili özellikler uygun bir malzeme kombinasyonu ile geliştirilebilir. En yaygın kompozitler, bir bağlayıcı içinde bir arada tutulan güçlü fiberler ile yapılmış olanlardır. Fiberler kadar etkili olmasa da parçacıklar veya pullar da takviye elemanları olarak kullanılırlar (Norhasri vd., 2017).

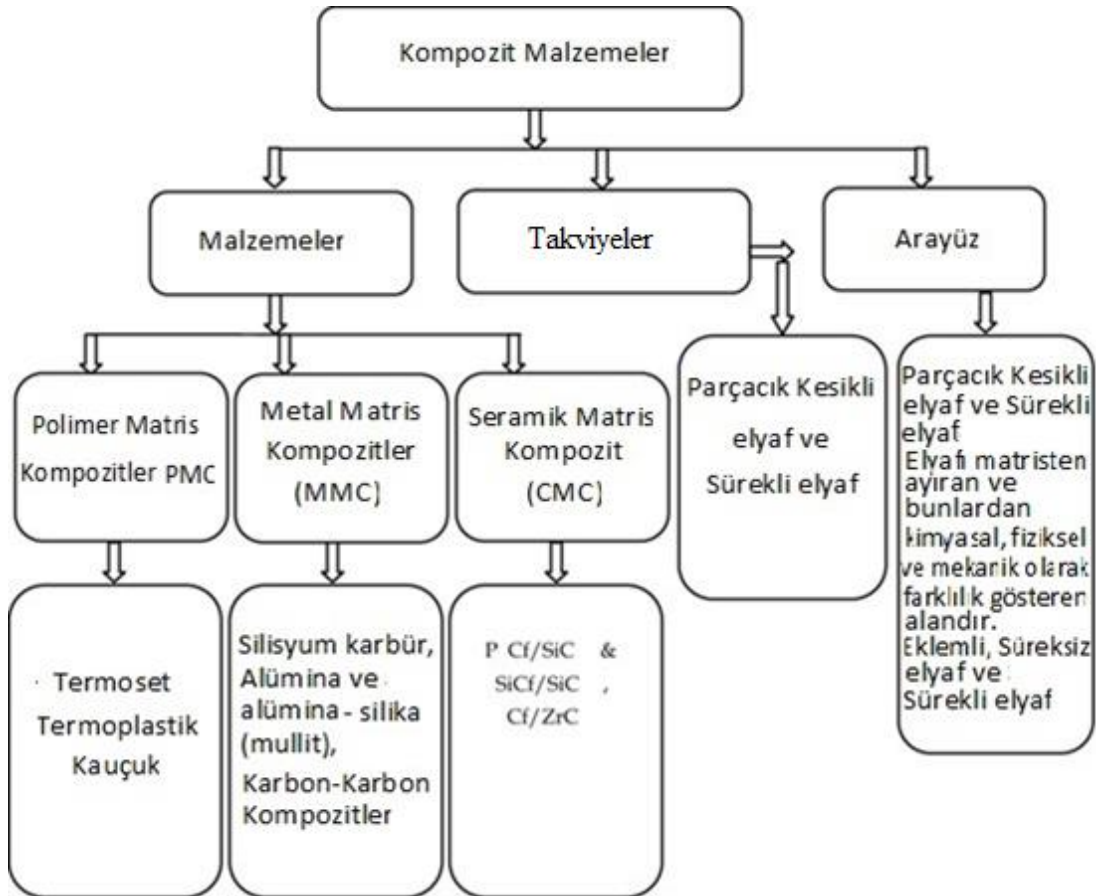
En eski kompozitler doğaldır. Odun, bir lignin matrisindeki selüloz liflerinden oluşur. İnsan kemiği, bir interstisyel kemik matrisine gömülü lif benzeri osteonlardan oluşur. İnsan yapımı kompozitlerin geçmişi tuğlalar ve çömlükler için saman takviyeli kil kullanımına kadar uzanırken, modern kompozitler çeşitli fiber ve parçacık takviyeli metal, seramik veya polimer bağlayıcılar kullanır. Örneğin, fiberglas tekneler cam elyaf takviyeli polyester reçineden yapılır. Bazen kompozitler birden fazla takviye malzemesi türü kullanılırlar ve bu durumda hibrit olarak adlandırılırlar. Örneğin, betonarmeyi düşündüğümüzde çelik çubuklarla daha da fiber takviyeli hale getirilen bir parçacık takviyeli kompozittir.

Hafif bir çekirdek malzemenin sert ve güçlü malzemelerin iki yüzü arasında sıkıştırıldığı sandviç yapıda olduğu gibi, bazen gelişmiş bir ürün oluşturmak için farklı malzemeler katman haline getirilir (Agarwal vd., 2017).

Ana etkenler aşağıdaki gibi olacak şekilde kompozit malzemeler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.

3.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı fazdan (matris fazı ve dağılık faz) oluşan ve herhangi bir bileşenden önemli ölçüde farklı kitle özelliklerine sahip bir malzemedir. Kompozit malzemelerin genel sınıflandırması Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Chawla, 2012)

Matris fazı

Sürekli bir karaktere sahip olan birincil faza matris denir. Matris genellikle daha sünek ve daha az sert olan fazdır. Dağınık fazı tutar ve onunla bir yükü paylaşır.

Dağınık (takviye edici) faz

İkinci faz (veya fazlar) süreksiz bir biçimde matrise gömülmüştür. Bu ikincil faza dağınık faz denir. Dağınık faz genellikle matristen daha güçlüdür, bu nedenle bazen takviye fazı olarak da adlandırılır. Çoğu yaygın malzeme (metal alaşımları, katkı Seramikler ve katkı maddeleriyle karıştırılmış Polimerler) yapılarında az miktarda dağınık faz bulundurlar, ancak özellikleri temel bileşenlerine (çeliğin fiziksel özellikleri saf demire benzer) benzediğinden dolayı kompozit malzemeler olarak değerlendirilmezler (Taya ve Arsenault, 2016).

Kompozit malzemelerin iki sınıflandırma sistemi vardır. Bunlardan biri matris malzemesine (metal, seramik, polimer) ve ikincisi ise malzeme yapısına bağlıdır (Kainer, 2006).

3.1.1.1 Kompozitlerin sınıflandırılması I

Matris malzemesine dayalı kompozit malzemeler aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

Metal Matrisli Kompozitler (MMC)

Metal matrisli kompozitler metalik bir matristen (alüminyum, magnezyum, demir, kobalt, bakır) ve bir dağınık seramik (oksitler, karbürler) veya metalik (kurşun, tungsten, molibden) fazından oluşurlar.

Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)

Seramik matrisli kompozitler, bir seramik matris ve diğer seramik malzemelerin (dağınık faz) gömülü liflerinden oluşur.

Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)

Polimer matrisli kompozitler termoset (Doymamış Polyester (UP), Epoksi (EP) veya termoplastik (Polikarbonat (PC), Polivinilklorür, Naylon, Polistiren) ve gömülü cam, karbon, çelik veya Kevlar fiberlerden (dağınık faz) meydana gelen bir matristen oluşur.

3.1.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması II

Takviye edici malzeme yapısına bağlı kompozit malzemeler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Partikül Kompozitler

Partikül kompozitler, parçacıklar halinde dağınık bir faz ile takviye edilmiş bir matristen oluşurlar.

1. Partiküllerin rastgele yönelimine sahip kompozitler.
2. Partiküllerin tercih edilen yönelimine sahip kompozitler. Bu malzemelerin dağınık fazı, birbirine paralel yerleştirilmiş iki boyutlu düz levhacıklardan (pullardan) oluşur.

Lifli Kompozitler

1. Kısa fiber takviyeli kompozitler. Kısa fiber takviyeli kompozitler süreksiz fiberler formunda dağınık bir faz ile takviye edilmiş bir matristen oluşur (uzunluk $< 100 \times \text{çap}$).
 - i. Rastgele fiber yönelimli kompozitler.
 - ii. Tercih edilen fiber yönüne sahip kompozitler.

2. Uzun fiber takviyeli kompozitler. Uzun fiber takviyeli kompozitler, sürekli (uzun) fiberler formunda dağılmış bir faz ile takviye edilmiş bir matristen oluşur.
 - i. Fiberlerin tek yönlü yönelimi.
 - ii. Fiberlerin çift yönlü yönelimi (dokunmuş).

Laminat Kompozitler

Bir fiber takviyeli kompozit, farklı fiber yönlenmelerine sahip birkaç katmandan oluşuyorsa, buna çok katmanlı (açılı-tabakalı) kompozit denir.

3.1.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Süreci

Kompozit yapıların işlevine göre, iki kategoriye ayrılabilir.

Birbirine bağlanmış katmanlara sahip *laminatlar*.

Sandviçler, kompozit malzemelerin ince yüzleri (dış yüzeyleri) arasında düşük yoğunluklu bir çekirdek içeren çok katmanlı yapısal malzemelerdir.

Bir gözlem olarak, gelişmiş kompozit malzemelerin bazı uygulamalarında, tek tek katmanların kendisi de fiber-matris türünde kompozitler olabileceğinden bahsedilebilir. Kompozit üretiminin birçok işlemden oluşur, en önemli işlemlerin bazıları şunlardır:

- El yatırma ve otomatik bant yerleştirme,
- Reçine enjeksiyonu,
- Basınçla kalıplama,
- Pultrüzyon,

- Filament sargısı.

Diğer kompozit sınıflandırması, yüksek ve düşük hacim şeklindeki iki kategoriden dolayı işlem hacminden sonra gerçekleşebilir.

Düşük hacimli işlemler yüksek çalışma maliyeti ile düşük maliyetli kalıplara manuel ve düşük basınçlı sprey yerleştirmedir. Düşük yoğunluklu çalışma ile telafi edilen takımlar ve kurulum için başlangıç maliyeti yüksek olan yüksek-hacimli işlemlerdir. Buna ek olarak, laminasyon işlemleri el yatırma işlemi şeklinde veya levha kalıplama bileşikleri kullanılarak otomatikleştirilmiş laminasyon şeklinde her ikisinde de bulunabilir.

Laminasyon, filament sarma, pultrüzyon ve reçine transfer kalıplama karşılaştırmalı düz parçaların elde edilmesi için kullanılan, yakından kontrol edilen özelliklere sahip sürekli siber kompozitlerinin üretimiyle ilişkilidir.

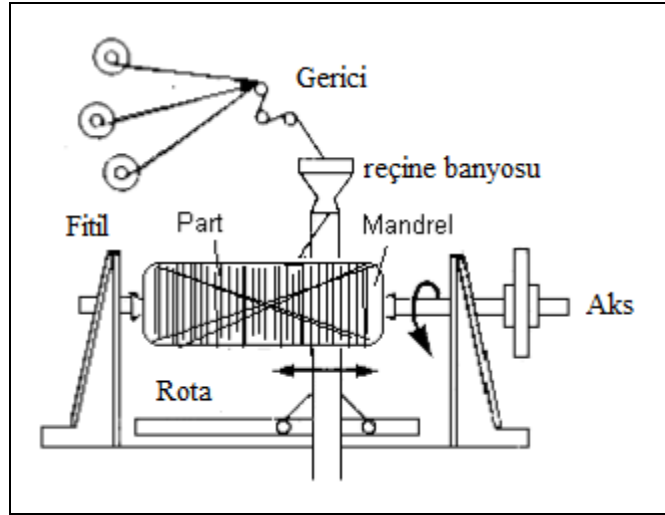
Küvetlerin ve diğer silindirik parçaların imalatında potansiyel ve yüksek hızlı bir işlem, sabit kesit şekillerine sahip parçaların üretimi için pultrüzyon işlemi uygulanan filament sarma işlemidir ve reçine transfer kalıplama ile enjeksiyonla kalıplama arasında bazı benzerlikler bulunmaktadır.

3.1.2.1 Laminasyon işlemi

Laminasyon işlemi gelişmiş malzemelerin üretiminde büyük ölçüde kullanılmaktadır. İşlemi geliştirmek için, birbirine paralel hizalanmış fiberlerle yüksek kompozit özelliğine sahip önemprenye edilmiş takviyeli bir malzeme olan bir prepreg malzemesi kullanılabilir. Ürün formunun bir örneği çeşitli işlemlerle kesilir ve prepreg malzemesi istenen laminat geometrisine sabitlenir. Son iş parçası, istiflenmiş tabakaların bir otoklavda basınç ve ısı altında kürlenmesiyle elde edilir. Örneğin, grafit-epoksi kompoziti yaklaşık 180 °C’de ve 0,7 MPa’lık basınçta kürlenir ve bismaleimidler gibi yüksek sıcaklık kompoziti için kürlenme sıcaklığı 320 °C’dir. Yerleştirme ve otoklavlama işleminden geçen bir parçanın ardından bir kalıp, takımları gerektirir. Kompozitlerin üretimi için malzeme takımları, alüminyum, çelik, elektrikli kaplanmış nikel, yüksek sıcaklıkta epoksi reçine sistem dökümü vb. dir (Frketic vd., 2017).

3.1.2.2 Filament sarma işlemi

Filament sarma işlemi nispeten yavaştır ve fiber yönünü kontrol etme imkanı sunar ve parçaların çapı parça boyunca değiştirilebilir. İşlem esnasında, fitil veya bant bir reçine banyosundan çekilir ve döner bir mandrelde sarılır. Filament sarma mandrelleri metal veya ametal olabilir ve kurlmeden sonra çözülebilmeye veya kolay parça çıkarma ihtimalini garantiler. Fiber demeti birkaç bin karbon fiberden birkaç santimetreye kadar çeşitli boyutlara sahiptir. Son hali verilmiş parça bir otoklavda kür işlemine tabi tutulur ve daha sonra mandrelden çıkarılır (Şekil 3.2) (Önder, 2007).



Şekil 3.2 Filament sarma işlemi (Önder, 2007)

Mandrel çıkarıldığı zaman, geriye kalan içi boş bir şekildir. Boru, tüp, basınçlı kaplar, tanklar ve benzeri şekillerde çeşitli parçalar bu işlemle gerçekleştirilebilir. Parçaların yapısını geliştirmek için karbon fiberler epoksi reçine sistemleri ile sarılır (Adrian ve Gheorghe, 2010).

3.1.2.3 Pultrüzyon işlemi

Pultrüzyon işlemi, bir reçine matris banyosu boyunca fiber demetlerin sürekli taşınmasını akabinde önceden ısıtılmış bir kalıba veya bir kalıp setine damlatılmasını ifade eder. Parçanın ıslak doymuş takviyeden katı bir parçaya değiştirildiği kurlenme işleminden sonra, pultrüzyon istenilen uzunlukta testere ile kesilir.

Kompozitler için pultrüzyon işlemi, pultrüzyonda parçanın kalıbın çıkış ucundan çekilmesi dışında metal ekstrüzyonlarına eşdeğerdir.

3.1.2.4 Reçine transfer kalıplama işlemi

Bu işlem, eşleşen metal kalıplarda basınçla kalıplama ile parçaların el yatırması veya püskürtülmesi arasında gerçekleşir (Adrian ve Gheorghe, 2010).

Reçine transfer kalıplama (RTM) işleminde, bir yarım kalıp takımı takviye malzemesi ile yüklenir ve daha sonra birbirine kenetlenir. Daha sonra reçine pompalanır veya takviye malzemesi infüze edilerek kalıba kendi ağırlığı ile beslenir. Kalıp reçine ile doldurulduktan sonra kapatılır ve sertleşmeye bırakılır. Kürlemeden sonra, yarım kalıplar sökülür ve son kırıma ve bitirme işlemi için parça çıkarılır.

RTM, daha hızlı döngü sürelerine izin verirken püskürtme yöntemi olarak daha az iş gerektirir. RTM döngü zamanları basınçlı kalıplamaya göre daha uzundur fakat düşük takım maliyeti bu durumu özellikle düşük bir üretim için telafi eder. Reçine transfer kalıplamayla, banyo ve duş kabinleri, dolaplar, uçak parçaları ve otomotiv bileşenleri gibi büyük, karmaşık öğeler üretilir.

Kompozit malzemelerin işlenmesinde, otomatikleştirilmiş enjeksiyon kalıplama ve vakumlu torbalama, mutlaka ısı, basınç, vakum ve inert atmosfer kombinasyonu ile kürlenmesi gereken el yatırma veya otomatik bant yerleştirmesi olan otoklav kürleme işlemi yaygın olarak kullanılır.

Yeterli kompozit işleminin seçimi, kompozitlerin türü, uygulamalar, kaliteli parçalar, üretim boyutu, maliyetler vb. gibi bazı kurallara dayanarak yapılır.

3.1.3 Kompozit Uygulamaları

Gelişmiş kompozit malzemeler, havacılıkta kullanılan birçok parçayı metaller yerine bu kompozitlerle değiştiren yüksek mukavemet, yüksek esnemezlik veya düşük ısı iletkenlik gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler (Mavhungu vd., 2017).

Gelişmiş kompozitler, uzay endüstrileri tarafından kullanılan bir organik reçine matrisinde karbon/grafit, bor veya aramid fiberler gibi malzemeler içermektedir. Bu malzemelerin hafiflik, sertlik ve güçlülük gibi spesifik özellikleri hava taşıtlarından otomotiv ve kamyon parçalarına, uzay araçlarından baskılı devre kartlarına, her çeşit tekne gövdesi ve hokey tekmelikleri gibi spor ekipmanlarına ve uzay mekiğinin içeri çekilebilir kolunun menteşesine kadar kullanılırlar.

Karbon/grafit takviyeli kompozitler ısı kararlılık, yüksek sıcaklık dayanımı, iyi ablyon özellikleri ve yalıtım kapasitesi gerektiren birçok uygulamada kullanılırlar.

Grafit fiberler, karbon fiberlere nazaran altı kat daha fazla çekme dayanımına sahiptirler ve daha fazla mukavemet ve daha yüksek ısı iletkenlik gerektiren yerlerde kullanılırlar.

Fiziksel kararlılıkları ve yüksek sıcaklıkları nedeniyle karbon fiberler roket nozülü tasarımlarında ve ablyon haznelinde kullanılırlar (Zhang vd., 2016).

Genel olarak, çeşitli uygulamalarda kompozit malzemeler metal parçaların yerini başarıyla alabilirler.

3.1.4 Modern Yapılarda Kompozit Malzemelerin Uygulanması

Hizmete alınan makine ve cihazlar, en önemlileri işlevsellik, dayanıklılık ve güvenilirlik, uygun maliyetli ve mevcut malzemeler, kolay ve düşük maliyetli imalat ve montaj, kullanım güvenliği, ucuz ve ekonomik çalıştırma, düşük enerji tüketimi ve düşük ağırlık olmak üzere tasarımın getirdiği tüm gerekliliklere uygun olmalıdır. Makine ve cihaz özelliklerinde aranan gereksinimleri karşılama gerekliliği, malzemenin yapısının ve kimyasal formunun gelişimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ancak, malzeme sadece mühendislik planlarını gerçekleştirmedeki uygunluğuna bakarak anlaşılmaz (Romig vd., 2003).

Artık, malzemelerin de enerji kaynakları ve iletişim yöntemleriyle eşit derecede insanlığın temel medeniyet kazanımları olduğunu biliyoruz. Medeniyetimizin gelişimi yönünden bu durum gözlenebilir, çünkü sadece aletlerin yapılabileceği malzeme

temelinde çağların isimleri verilmiştir, yani taş, bronz, demir, çelik (çağları gibi). Gözümüzün önünde olan şu ki artık çelik dünyayı yönetmekten vazgeçmiş ve yeni malzemeler üretme ve kullanma yeteneği ülkelerin medeniyet düzeyini belirlemeye başlamıştır (Burckhardt, 2019).

Bu nedenle, çağdaş sanatın ilerlemesi ve gelişimi, yeni yapı malzemelerinin tasarımını ve mevcut olanların ustaca kullanımını optimize etmeyi amaçlayan malzeme mühendisliğiyle ayrılmaz bir şekilde bağlantılıdır.

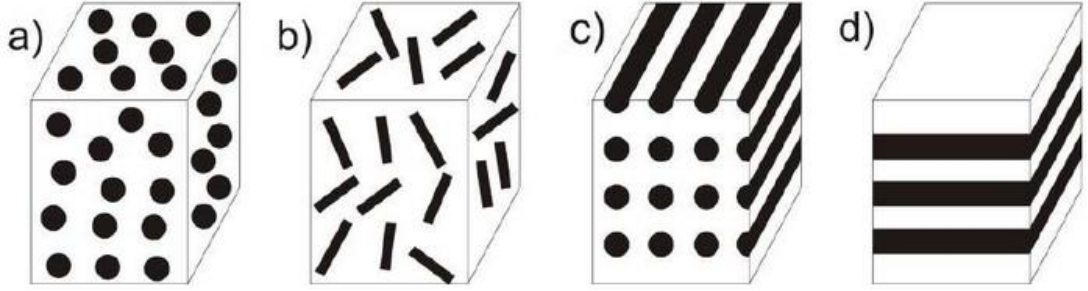
Malzeme biliminin gelişimindeki mevcut eğilimler, yapısal tasarım alanındaki optimum çözümün bir malzeme seçimi değil, varsayılan yük ve çalışma koşulları parametrelerine karşılık gelen bir yapının tasarımı ve mümkün olan en az sayıda önlenemez teknolojik kusurlar olduğu yönündedir. Bununla birlikte, yeni nesil malzemelerin aynı anda belirli işlevsel görevleri yerine getirmesi gerektiği de dikkate alınmalıdır (sensörler, kendi kendine teşhis, kendi kendine onarım vb.). Karmaşık fiziksel ve kimyasal olayların teorik modellenmesi, karmaşık deneysel araştırma ve yeni süreçlerin geliştirilmesi ile ilişkili olduğundan dolayı bu gereksinimler malzeme tasarımına ilişkin mevcut bilgi durumunun çok zor bir görev olduğu anlamına gelir. Bu yüzden, bu alanda araştırma yapmaya devam etmek ve maddenin yapısından atomlararası etkileşim düzeyine kadar bilginizin ölçeğini kademeli olarak arttırmamız gerekmektedir (Ashby ve Johnson, 2013).

Malzemenin tasarlanması durumunda, yapısı ve özellikleri (fiziksel, kimyasal, nükleer, elektrik, mekanik, teknolojik vb.) sadece yapının niteliğini oluşturmakla kalmaz (ışın, levha, kabuk, yük, sınır koşulları) ayrıca teknolojik süreçleri de oluşturur.

Kompozit malzemeleri oluşturan fiberler, tekstillerin üretim ve ardından işlenme yöntemine bağlı olarak çeşitli şekillerde olabilir. Çeşitli dokuma ve tozlardan (kısa fiberler) veya keçelerden oluşan iplik teli, fitil, dokuma kumaş demetleri şeklinde alıcıya teslim edilebilir. Her bir fiber çapı, kristallerin boyutuna yakındır. Fiberler genellikle çap uzunluk oranı olarak tanımlanan çok yüksek bir orana sahiptirler.

Polimer matrisli kompozitte (PMK) cam elyaf, karbon, aramid veya doğal malzemeler kullanılır. Temel amaç, matrisin esnemezliğini ve mukavemetini arttırmaktır. Seramik

fiberler (bor, alüminyum, silisyum alüminid, silisyum karbür) yüksek mukavemet ve esnemezliğe sahiptir ve seramik matrisli kompozitlerde (SMK) veya metal matrisli kompozitlerde (MMK) takviye malzemesi olarak kullanılırlar. Seramik malzemelerin temel rolü, yüksek sıcaklıklara veya çatlama karşı direnci artırmaktır (Pastuszak ve Muc, 2013).



Şekil 3.3 Kompozitlerde çeşitli takviye türleri: a) parçacıklar, b) kısa fiberler, c) sürekli (uzun) fiberler, d) levhalar

Takviye, dört ana kompozit malzeme türünü belirler (Şekil 3.3) ve bunlar aşağıdaki gibidir:

- a. Parçacıklar (süresiz takviye elemanı olarak da bilinir),
- b. Kısa fiberler veya kıllar,
- c. Sürekli fiberler,
- d. Levhalar.

Kompozit malzemelerden yapılmış makine ve cihazları doğru bir şekilde tasarlamak için, çeşitli uyaranların etkisi altındaki malzemenin neden belirli bir şekilde davrandığını açıklamak ve tanımlamak istiyoruz, bu da çeşitli fiziksel olayların anlaşılmasını ve tanımlanmasını gerektirmektedir. Günümüzde sadece kompozitlerin dahil olduğu ve geleneksel malzemelere göre avantajlarını gözle görülür şekilde artırdıkları geniş bir örnek yelpazesi sunuyoruz.

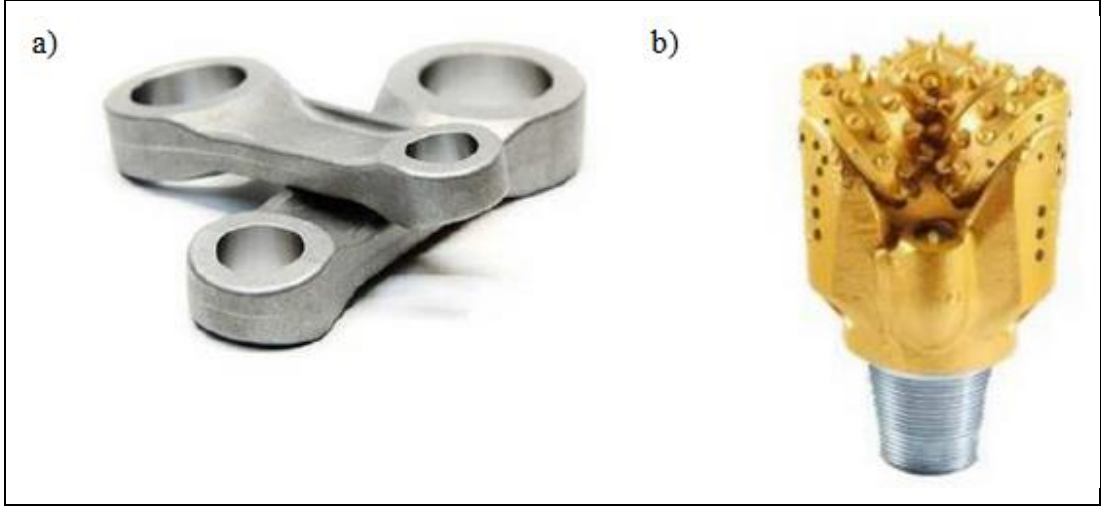
3.1.4.1 Metal matrisli kompozitler

MMK'ler genellikle matris olan metal veya metalik alaşımdan ve metal veya seramik malzemelerden yapılmış takviyeden oluşur (Miracle, 2005).

MMK'in yüksek özgül mukavemeti ve esnemezlik gibi bazen en önemliler arasında olmayabilen özelliklerinin yanı sıra, eşit derecede değerli başkaları da vardır. Temel olarak elektronik cihazların dahil olduğu uygulamalara termal genişlemeyi, doğrusal termal genleşme katsayısını düşürme, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik (yanlışıklıkla yapılan su verme işleminde dahi yüksek ısı iletkenliği sağlamak)veya aşınma direncini kontrol edebilme kabiliyeti. Ayrıca, iyi çaprazlama özellikleri, ısı kararlılığı, geliştirilmiş döngüsel yorgunluk özellikleri veya düşük kirlilik de diğer özellikler olarak listelenebilir (Pastuszak ve Muc, 2013).

Alüminyum – alüminyum oksit (Al-Al₂O₃). Fiber takviyeli kompozittir. Malzemesi enerji nakil hatlarında, gemi pervanelerinin, torpidoların ve diğer su altı nesnelere gövdelerinin yapımında kullanılır. Yüksek sertliği ve mukavemeti ve düşük ısı genleşme katsayısı nedeniyle antenler, platformlar gibi uzay yapılarında da uygulanırlar. Otomotiv endüstrisinde bağlantı çubuklarının, piston başlarının, fren elemanlarının (yüksek sıcaklıklarda aşınma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren) imalatında ve askeri uygulamalarda motor gövdelerinin veya roket kanatlarının ve sabitleyicilerin üretimi için kullanılır.

Alüminyum – silisyum karbür (Al-SiC). Silisyum karbür fiberlerinin tungsten çekirdekte biriktirildiği fiber takviyeli kompozittir. Bu gruptaki kompozit malzemelerin uygulama alanları Al-Al₂O₃ kompozitler ile aynıdır buna örnek Fotoğraf. 3.3'de gösterilmiştir (Singh vd., 2011).



Fotoğraf 3.1 MMK malzemelerinin uygulama örnekleri: a) Al-Al₂O₃'ten yapılan bağlantı çubukları b) WC-Co ile yapılmış taş kesici uçlu makaralı koni ucu

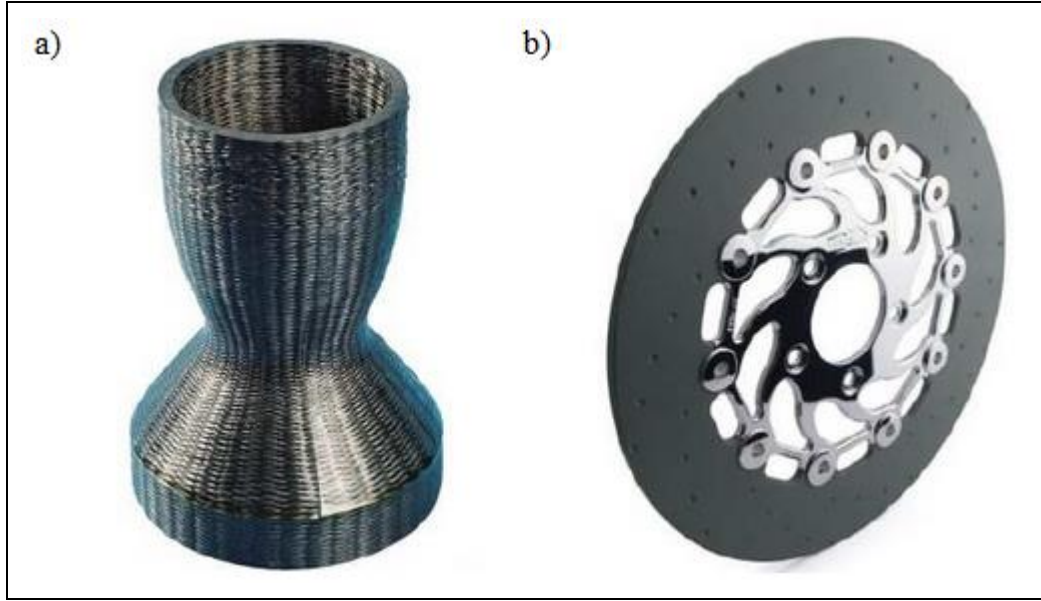
3.1.4.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Sürekli veya ayırık fiberler, kıllar veya parçacıklar ile takviye edilmiş seramik kompozit malzemeler ürünün hafif ağırlıkta olduğu uygulamalarda en iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere ve yüksek sıcaklıklarda (800 °C'nin üzerinde) yüksek mukavemete ve çalışma ortamındaki korozyona ve kimyasal erozyona karşı yüksek bir dirence sahiptir. Bu kompozitler, yüksek sertlik, termal şok direnci, manyetik olmayan özellikler, aşınma direnci, monolitik seramiklere kıyasla hasar toleransı ve düşük termal genleşme katsayısı ile karakterizedir. Kırılgan matrisin güçlendirilmesi için yeterli takviye sağlanması halen çözülemeyen bir sorundur. Bununla birlikte, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında makro ve mikro çatlakların büyüme oranı küçüktür. Bunlar termal şok direnci homojen seramik malzemelerden daha yüksek olan malzemelerdir (Chawla, 2012).

Şu anda, seramik matris kompozitin en iyi bilinen ve en yaygın kullanılan malzemeleri şunlardır:

- a. Alüminyum oksit matrisi: Al₂O₃-SiC, Al₂O₃-ZrO₂, Al₂O₃-SiC-ZrO₂, Al₂O₃SiC,
- b. Silisyum nitür matrisi: Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-SiC,

c. Silisyum karbür matrisi: SiC- SiC, SiC-MeB₂, SiC-TiB₂.



Fotoğraf 3.2 SMK malzemelerinin uygulama örnekleri: a) yanma odası elemanı, b) fren diski

Seramik Matrisli Kompozitler'in uygulama alanı çok geniştir ve sanayinin aşağıdaki dallarını içerir:

Uzay ve Havacılık: yataklar, yanma odası (Fotoğraf 3.4), yakıt sistemi bileşenleri, ısı kalkanları, türbin bileşenleri ve motorları, termal koruma sistemleri, kurulum bileşenleri.

Otomotiv endüstrisi: katalitik konvertörler, yakıt enjeksiyon parçaları, dizel motorlar, türbinler, turbo rotorlar, valfler.

Biyomedikal: yapay dişler, iskelet sisteminin yapay kısımları, yapay kalp kapakçığı.

Elektrik mühendisliği: yataklar, gaz türbinleri, yardımcı jeneratörler, yakıt sistemi bileşenleri, füzyon reaktörü duvarları, gaz arıtma filtreleri, ısı değiştiriciler, gaz türbinleri.

Metalurji ve makinede işleme: brülörler, potalar, izolatörler, kesme sistemleri, pres kalıpları, ısı değiştiriciler, su altında kullanım için ekipmanlar, yüksek sıcaklıklarda çalışacak ekipmanlar, ısıl işlem fırınları.

Elektronik: çok katmanlı kapasitörler, gaz ve basınç sensörleri, elektronik ortam.

Kimya: katalizörler, kapsüller, nozullar, ekranlar, radyasyon, yanma odaları, ısı geri kazanım üniteleri, refrakterler.

Askeri ekipman: silah parçaları, motor yanma odası, radom, stealth sistemler, roket nozulları, ana şaft denizaltıları, helikopterler ve roket tahrikine yönelik uçak bileşenleri.

Çevre Mühendisliği: aşırı koşullarda kullanılmak üzere tasarlanmış cihazlar ve sistemler, mesela, su arıtımı için kazanlar (Pastuszak ve Muc, 2013).

3.1.4.3 Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Matriste iki tür malzeme kullanılmaktadır:

- a) *termoplastikler* - polipropilen, poliamid, polikarbonat, polisülfon, polisülfon fenil, poliimid,
- b) *duroplastikler* - (termoplastik reçineler veya kimyasal olarak sertleştirilmiş) - polyester, vinil ester, polibutadien, epoksi, amino (üre, melamin), fenol (resoller, novoller)

Reçineler kimyasal veya termal olarak sertleştirilir, termoplastikler üç boyutlu bir moleküler ağ ve termoplastik - doğrusal zincirler oluşturur. Yapıdaki farklılık, ilkinin ısıtma sırasında plastikleşmemesi, fakat ısıtmanın bir sertlik kaybıyla sonuçlanması ve kompozit çalışmanın işlevsel kapasitesinin üst sınırında olmasıyla sonuçlanır. Üç boyutlu moleküler ağ, reçinenin jelleşmesine neden olan yani, izotropik mekanik özelliklere sahip bir katı elde etmek için -sertleştiricinin eklenmesinden sonra sıvı reçineden elde edilir, sertleştirme geri dönüşü olmayan bir işlemdir. Termoplastikler ısıtıldığında erir (cam geçiş sıcaklığı diye bilinen değeri geçtikten sonra). Hem amorf hem de kristalin termoplastikler, kütleme koşullarına bağlı olarak anizotropik özellikler sergiler. Kısa fiber kompozitler için kullanılırlar (Cogswell, 2013).

3.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), boyutlardaki çeşitlilikle birlikte farklı özelliklere sahip yeni ve gelişmiş malzemeler kategorisidir. Ana malzemelerine kıyasla oldukça farklı olduklarından dolayı, FDM'ler farklıdır ve bazıları benzersizdir. FDM'ler çeşitli uygulamalarda kullanılır; bu nedenle, ana malzemelerin maliyeti, üretim için kullanılan işlemlerin türü ve imalat maliyetlerinden dolayı bazıları maliyetlidir (Mahamood vd., 2012).

3.2.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özgün Özellikleri

FDM bileşenleri, bazı endüstriyel proseslerin belirli ihtiyaçlarını karşılayan belirli yararlı karakteristik özelliklere sahiptir; bu nedenle, geleneksel kompozit malzemelerin eksikliklerini etkin bir şekilde giderirler. Aşağıda belirtildiği gibi FDM'ler geleneksel ve kompozit malzemeler'e göre birçok avantaja sahiptir (Udupa vd., 2014):

- FDM'ler, uyumsuz malzemelerden yapılmış iki bileşeni tam olarak bağlayabilen bir arayüz tabakasına sahiptir; bu nedenle, bağ mukavemetini önemli ölçüde artırırlar.
- FDM kaplama ve arayüz, artık ve termal gerilmeleri azaltmak için kullanılabilir.
- Malzemeleri bağlamak ve uç nokta ile arayüz gerilimlerini ortadan kaldırmak için FDM kaplama kullanılabilir.
- FDM kaplama yalnızca bağlantıların mukavemetini artırmakla kalmaz, aynı zamanda çatlak itici kuvvetini de azaltabilir.

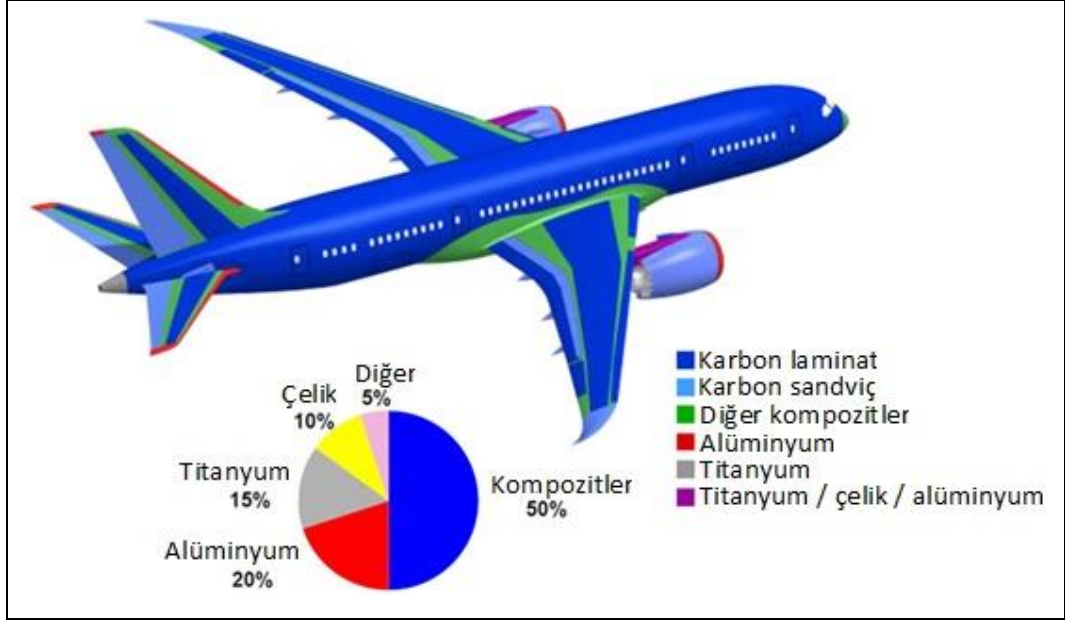
3.2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) Uygulama Alanları

FDM'ler birçok insan girişiminde oldukça fazla önem kazanmıştır. İleri teknolojiye dayalı post-modern endüstrilerde, FDM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelecekte

birçok başka endüstride ve uygulamada büyük potansiyele sahiptirler. Mevcut ve ileride yapılacak birçok önemli FDM uygulaması bu bölümde bahsedilmiştir. Çağımızda, otomobil, havacılık, biyomedikal, savunma, enerji üretimi, elektrik/elektronik cihaz imalatı, denizcilik, termo-elektronik ve opto-elektronik endüstrileri gibi ileri teknolojiye dayalı endüstrilerde kullanılmaktadır. (Tofail vd., 2018).

3.2.2.1 Havacılık ve uzay endüstrisi

FDM'ler başlangıçta bazı uzay aracı gövdelerini yapmak için kullanıldı (Şekil 3.4). Havacılık ve uzay endüstrisinde başarıyla denendikleri, test edildikleri ve kullanıldığı için son zamanlarda kullanımları artmıştır. Havacılık ve uzay yapılarının ve ekipmanlarının çoğu artık FDM'ler kullanılarak üretilmektedir. Roket motorları, ısı değişim panelleri, uzay aracı giriş yapıları ve kameralar, reflektörler, güneş panelleri, türbin kanadı kaplamaları, türbin çarkları, mekiklerin füze uçları ve füzeler de dahil ekipmanların imalatı için iyi bir seçenektirler. FDM'ler mükemmel ses ve ısı yalıtım özellikleri sunar, bu nedenle de bina duvarlarında kullanılırlar. Yüksek verimli otomobillerin birçok önemli otomobil parçası, aşağıdaki kısımda bahsedilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler yardımı ile yapılmaktadır (Bayode vd., 2018).



Şekil 3.4 Boeing 787 için uçak gövdesi fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin dağılımları ve yüzdeleri (Wanhill, 2017)

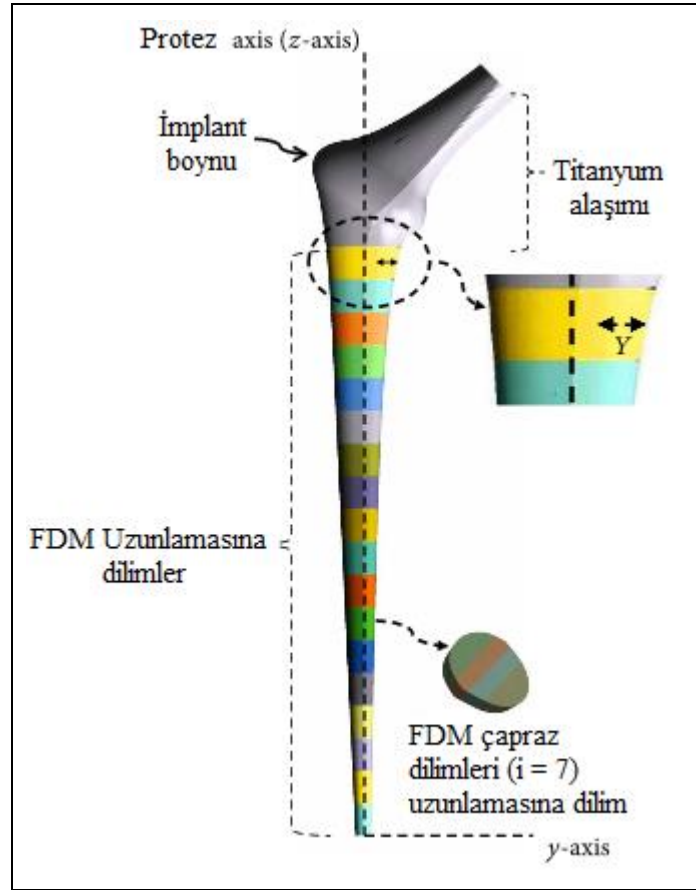
3.2.2.2 Otomobil endüstrisi

Farklı özelliklere sahip çeşitli malzemeler gerektiren endüstrilerden biridir, ancak FDM'lerin bu alanda kullanımı hala oldukça sınırlıdır, çünkü yüksek maliyet bunların kullanımlarını sınırlayan yegane engel olarak görülmektedir, fakat bazı önde gelen otomobil üreticileri pahalı otomobillerin işlevsel olarak önemli bileşenlerini üretmek için bunları kullanırlar. Mevcut olarak, bujiler, dizel motor pistonlarının motor silindir gömlekleri, yaprak yaylar, tahrik milleri, yanma odaları, volanlar, amortisörler, araba gövdelerinin bileşenleri, yarış arabalarının frenleri ve pencere camları yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, mika veya dioksit gibi FDM partikül kaplamalarının yardımıyla gelişmiş araba gövdesi katmanları için de kullanılırlar (Riesenfeld vd., 2015).

3.2.2.3 Biyomedikal ekipman

İnsan vücudunun oluşması için doğa kendi FDM'lerini kullanmıştır. Aslında dişler ve kemikler, hasar görmeleri veya yaşlanmaları durumunda değiştirilebilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerdir. Doğal fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler yardımı ile doğal vücut parçalarının yerine biyo-uyumlu mühendislik malzemeleri kullanılabilir. Şimdiye kadar pek çok fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler

başarıyla denendi ve implant şeklinde insan vücuduna yerleştirildi (Şekil 3.5). Kemik ve diş protezleri için genellikle gözenekli gradyan FDM'ler kullanılır çünkü özellikleri doğal kemiklerin özellikleriyle eşleşmektedir. Genellikle, gözenekli gradyan FDM'ler iskelet protez implantları üretmek için kullanılır, çünkü bunların uygun şekilde derecelendirilmiş gözenekliliği gerilme korumasını en aza indirmeye yardımcı olur (Thieme vd., 2001). Titanyum kullanılarak yapılan bazı dereceli gözenekli dental implantlar, Osseo-entegrasyon implant özelliklerini geliştirir. Ayrıca, hidroksiapatit (HA), yeni dokuların büyümesine izin veren ve aynı zamanda bir hastaya hareket için değerli mekanik özellikler sağlayan iki modlu insan kemiği yapısı gibidir (Rodríguez-Lorenzo ve Ferreira, 2004).



Şekil 3.5 İmplantın medial tarafı ve distal ucundan yatay ve dikey mesafeler (Moussa ve Yadav, 2017)

3.2.2.4 Savunma üretimi

FDM'ler savunma ekipmanlarında kullanım için çok yararlı olan yüzeylerde çatlakların ilerlemesini sınırlayan kayda değer miktarda penetrasyon direncine

sahiptir. Bazı FDM'ler, zırh levhalar, kesme levhaları ve kurşungeçirmez yelek/ kalkan gibi savunma ekipmanlarının üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca kurşun geçirmez hale gelmeleri için araç gövdelerine yerleştirilirler (Yılmaz, 2019).

3.2.2.5 Enerji/Güç üretimi

Güç üretimi ve enerji tasarrufu endüstrileri, sürekli olarak yeni ve kullanışlı malzeme arayışında olan ve hızla değişen endüstrilerdir. Ekipmanlarının verimliliğini artırmak için FDM'lerden faydalanırlar. Nükleer reaktörün iç duvarları, güneş panelleri, enerji tasarrufu sağlayan termo-elektrik dönüştürücüler, güneş pilleri, basınçlı kaplar/ tüpler ve katı oksit yakıt üretmek için dereceli elektrotlar gibi hassas ekipmanların üretiminde kullanılırlar. Dahası, bazı piezo-elektrik FDM'ler, ultrasonik transdüserler, yakıt hücreleri, termal bariyer kaplamaları ve türbin kanatlarının kaplamalarını yapmak için kullanılırlar (El-Galy vd., 2019).

3.2.2.6 Elektrik/Elektronik ekipmanlar

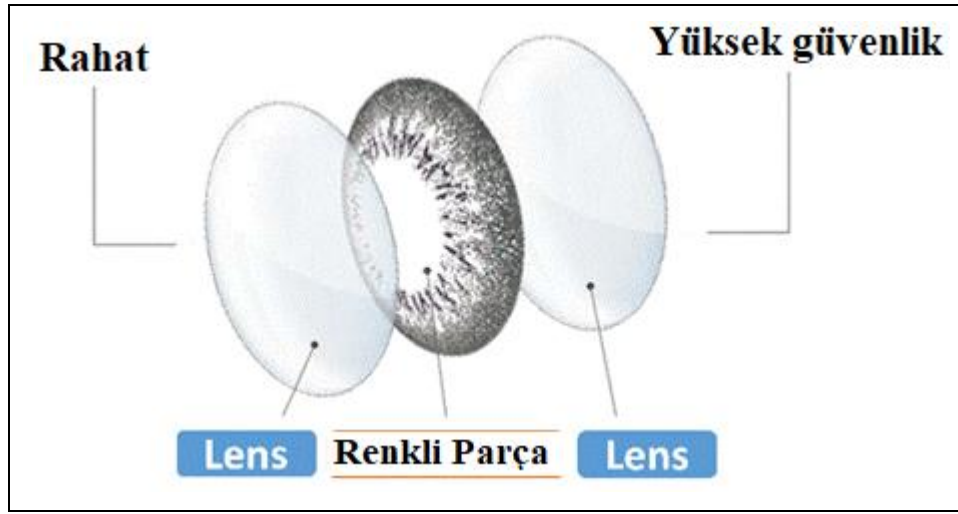
Elektronik ve elektrik cihazları yapmak için FDM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Esasen, alan-uzayı ve elektrot alanı gerilimlerini azaltmak, diyotlar, sensörler ve izolatörler gibi yarı iletkenleri üretmek için uygulanırlar. Bu termal koruyucu elemanlar, mikro-elektronik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılır ve genellikle karbon nanotüp FDM'lerle üretilirler (Shumiya vd., 2004).

3.2.2.7 Denizcilik endüstrisi

FDM'ler denizcilik ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gemilerin ve denizaltıların farklı bileşen ve gövdelerinin imalatında kullanılırlar. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılarak üretilen bileşenler dalış silindirleri, pervane milleri, boru sistemleri, sonar kubbeleri ve silindirik basınçlı gövdeleri içermektedir (Udupa ve Gangadharan, 2012).

3.2.2.8 Opto-Elektronik

Bu malzemeler ayrıca farklı opto-elektronik bileşenleri ve cihazları üretmek için de kullanılırlar. Bu sektör temelde optik fiberleri, lensleri (Şekil 3.8), güneş pillerini, yüksek verimli foto dedektörleri, ayarlanabilir foto dedektörleri, manyetik depolama cihazları ve farklı kırılma indislerine sahip yarı iletkenleri kullanılmaktadır (Tahersima, 2018).



Şekil 3.6 Lensin Sandviç Yapısı

3.2.2.9 Spor ekipmanları

Bazı FDM'ler, özellikle dayanıklı kayaklar, golf sopaları ve tenis raketleri üretmek için spor ekipmanı imalatında kullanılır. Seçici FDM'ler kullanılarak üretilirler (Lukkassen ve Meidell, 2003).

3.2.2.10 Diğerleri

FDM'lerin kullanımı yaygındır. Kesici aletler, yüksek ısı dayanımı gerektiren aletler, kalıplar, yangın söndürme ekipmanları, yangına dayanıklı kapılar, paslanmaz çelik tıraş bıçakları, kasklar ve gözlük çerçeveleri yapımında kullanılırlar (Miyamoto vd., 2013).

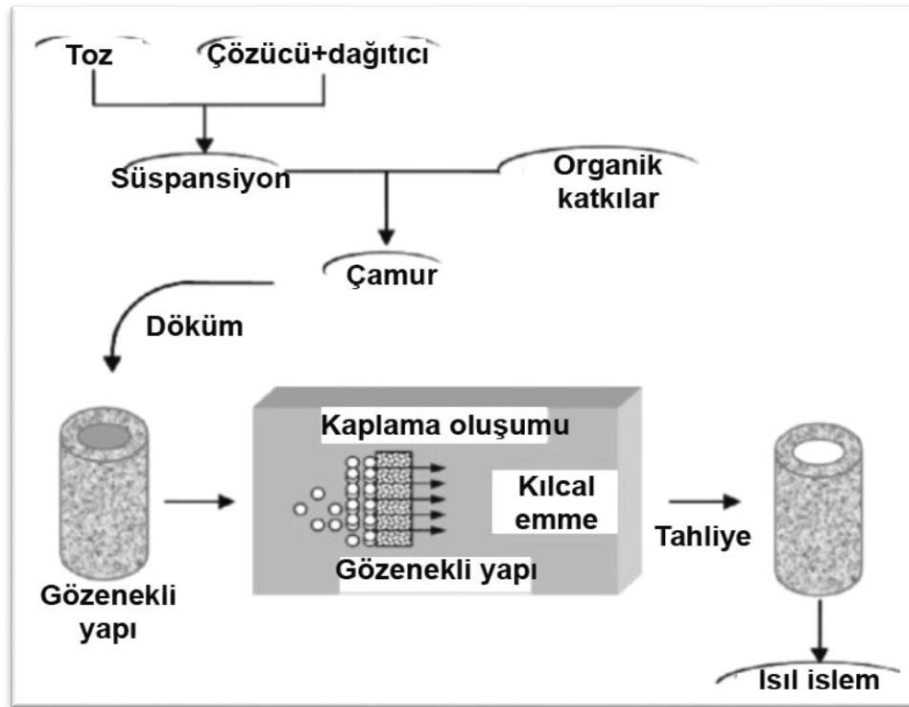
Bunun yanında, basınçlı kaplar, MRI tarayıcı kriyojenik tüpler, dizüstü bilgisayar gövdeleri, yakıt tankları, röntgen masaları ve müzik aletleri üretmek için de

kullanılırlar. Miyamoto'nun kapsamlı bir şekilde bahsettiği Japon ürünlerinde geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar. Gelecekte, FDM uygulamaları muhtemelen artacaktır ve üretim maliyetlerinin azaltılması durumunda önemli ölçüde artacaktır.

3.2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Yöntemleri

3.2.3.1 Filtrasyon/Slip döküm

Gözenekli bir yapı, farklı özelliklere sahip bir dizi bulamaç içerisine daldırıldığında, kapiler kuvvetler yardımıyla sıvı gözeneklere girer. Bu kuvvetler, tabakaları kademeli bir gradyanla yüzeyde bırakır. Bu prensipler, ardışık slip döküm durumunda da geçerlidir. Uygulama ihtiyaçlarını birkaç tabakanın karşılaması durumunda filtrasyon ve slip döküm (Şekil 3.10) büyük ölçekli üretim potansiyeline sahiptir (Kieback vd., 2003).

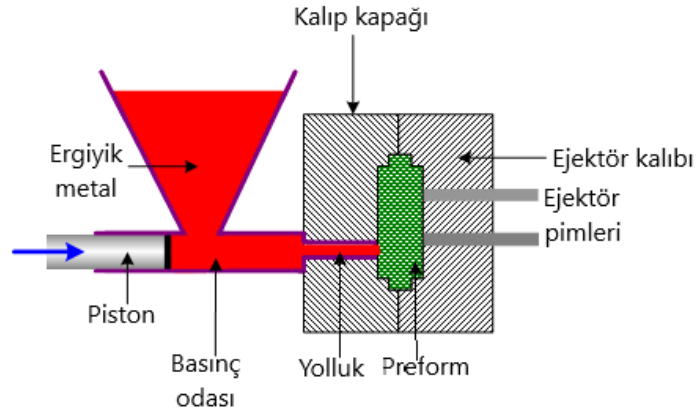


Şekil 3.7 Filtrasyon/Slip Döküm işlemi (Jedidi vd., 2009).

3.2.3.2 Sıvı metal infiltrasyon yöntemi

İnfiltrasyon, farklı erime noktalarına sahip olan FDM'lere uygundur. Bu işlem için, önce uygun gözeneklilik gradyanına sahip bir yarı-işlenmiş form geliştirilir.

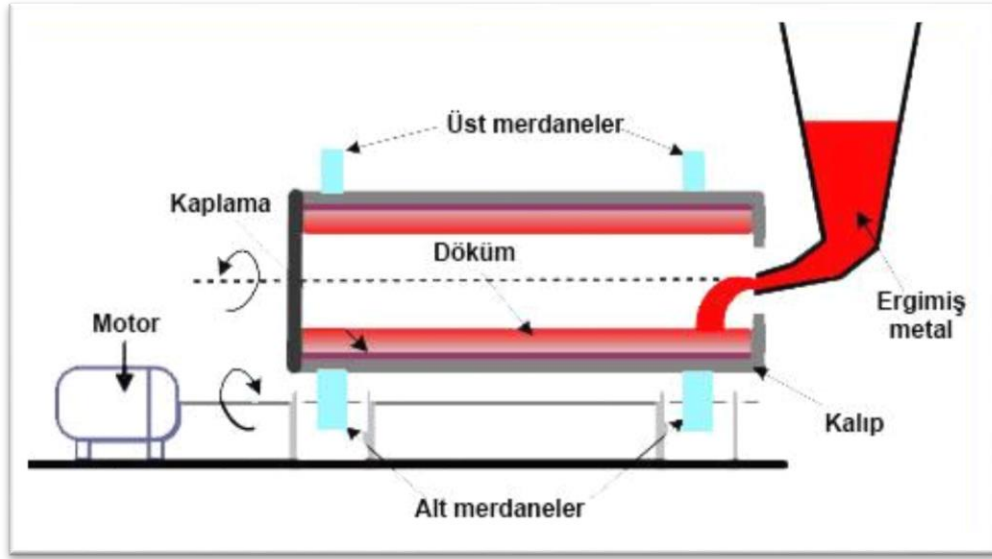
Sonrasında, daha düşük erime noktasına sahip bir bileşenin erimiş malzemesi ile infiltre edilir. Yarı-geliştirilmiş form, yalnızca açık gözeneklere sahiptir ve eriyik içinde çözünmemelidir. Bu bahsedilen infiltrasyon süreci seramik, metal ve cam FDM'lere uygundur fakat, genel olarak metaller ve seramikler ıslak değildir ($\theta > 90^\circ$ ıslatma açısında) ve önceden geliştirilmiş formlar/ön-formlar kendiliğinden infiltre olmazlar. Büyük gözenekleri infiltre etmek için infiltrasyon işlemi sırasında basınç uygulanır (Kieback vd., 2003).



Şekil 3.8 Basınçlı kalıp infiltrasyon işlemi (Garg, 2019)

3.2.3.3 Santrifüj döküm yöntemi

Kalıbı döndürerek FDM'leri üretmek için bu işlemde yerçekimi kuvveti ve onun etkileri kullanılmıştır. Silindirik bileşenlerin üretimi için bu işlem uygulanır. Bu işlemde erimiş metal dönen bir kalıpta serbest bırakılır. Erimiş metal, kalıbın dönüşü sırasında katılaşır. Santrifüj döküm, düşük gözeneklilik, yüksek mekanik özellikler ve tekdüze mikroyapı gibi bazı avantajlara sahiptir. Temel olarak, katı parçacıklar ve erimiş metal arasındaki yoğunluk farklılıklarının oluşturduğu merkezkaç kuvveti farkıyla bileşim gradyanı elde edilmiştir (Gupta ve Talha, 2015).

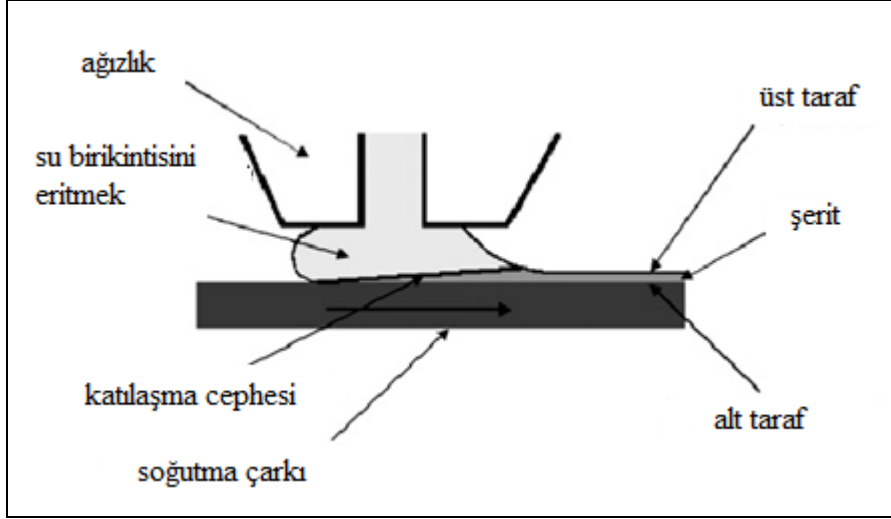


Şekil 3.9 Santrifüj döküm işlemi (Desai ve Saruhan, 2012)

3.2.3.4 Şerit döküm yöntemi

Harç karışımı hareketli kayış üzerinde bıçak kenarının altından geçen hareketli bir kayış üzerine yayıldığında şerit/bant döküm yöntemi uygulanır. Bu da tekdüze kalınlık kazanacak şekilde harcı şekillendirir. Harç karışımını hazırlamak için toz karışım organik bir çözücü ile karıştırılır. Uygun bağlayıcılar ve plastikleştiriciler uygulanır. Daha sonra, film kalınlığında olacak şekilde harç şekillendirilir ve sonunda bant şeklini alır. Bu durumda, boyut maksimum birkaç metre veya en az birkaç milimetre kalınlığında olabilecek şekilde değişken olabilir. Bir döküm bıçağı yardımıyla kalınlık ayarlanır (Gasik, 2010).

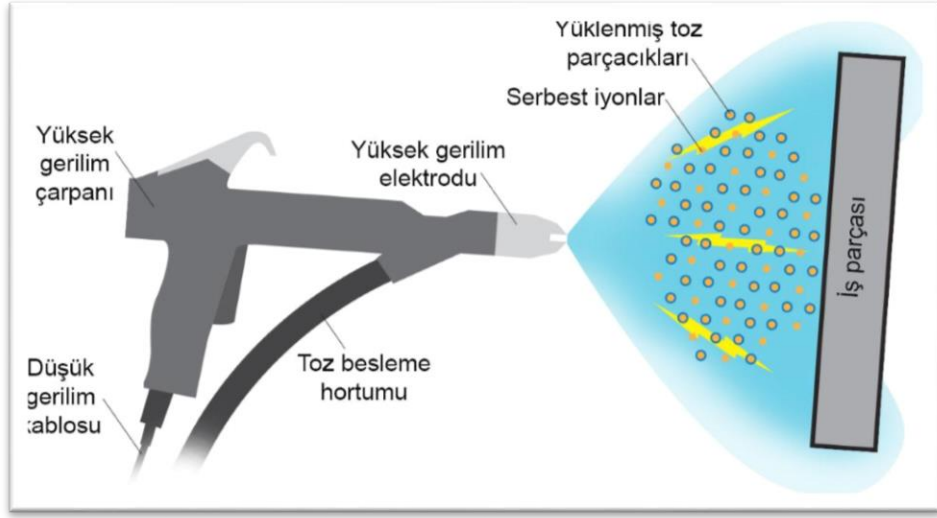
Daha sonra çözücü kurutulur ve bu kurutma yeşil bir tortu açığa çıkarır. Kademeli FDM gradyanları, farklı bileşimler içeren bantların üst üste dizilmesi ile üretilir. Bant yığını oluşturulduğunda, yüksek sıcaklıkta (50-200 °C) ve 3-30MPa basınç altında sinterlenir. Yüksek sıcaklık ve basınçta, istiflenen kademeli kısım sinterlenir ve bu durum organik bağlayıcının çıkarılmasına yardımcı olur. Bileşenlerin yoğunluğunu artırmak için kullanışlıdır. Bu sürecin en büyük faydası, yüksek çözünürlüklü FDM'ler üretmektir; fakat, bu işlem sınırlı parça mukavemetine yol açar, ancak bu, sinterleme basıncına ve sıcaklığına bağlıdır (Chumanov vd., 2015).



Şekil 3.10 Şerit döküm işlemi (Paluga, 2007)

3.2.3.5 Kaplama yöntemleri

Sulzer-Metco yakın zamanda aslında bir hibrit biriktirme işlemi olan PS-PVD (plazma püskürtme - fiziksel buhar biriktirme) yöntemini geliştirdi. Bu işlem, kaplamaları buharlaştıran ekonomik ve geleneksel düşük basınçlı plazma sprej (LPPS) yöntemleri ile PVD işleminin bir kombinasyonudur. LPPS yöntemi çok kalın ve çok ince kaplamaların (en az 1 mm kalınlık) biriktirilmesine izin veren 50-200 mbar basınç aralığında kullanılır. Çalışma basıncı düşürüldüğü zaman, plazma alevi homojen ve tekdüze kaplama sağlayacak şekilde 50 ile 500 mm arasında değişir. Kararlı PS-PVD işlemi için, çalışma basıncı 0,5 ile 2 mbar arasında ve plazma alev uzunluğu 2 m'den fazla olmalıdır. Bu durumda alev çapı 200 ila 400 mm arasında değişir. Açıkçası, PS-PVD işlemi için basınç gereksinimi PVD sürecinden daha fazladır. Yüksek plazma akış sıcaklığı ile birlikte yüksek plazma akış hızı (2000 m/s'den fazla), sonuç olarak iç kısımların yanında başka yerlerde de kaplama birikmesine izin verecek şekilde hammaddeyi kolayca buharlaştırır (Góral ve Sieniawski, 2012).



Şekil 3.11 Kaplama işlemi (URL 6, 2020)

3.3 Toz Metalurjisi

Harmanlama veya kalıplama ihtiyacı olduğunda toz metalurjisi uygulanır. Bu yöntemde, ince toz halindeki malzemeler önce harmanlanır ve daha sonra istenilen şekli alana kadar preslenir. Daha sonra yüzeyleri birleştirmek için karışım ısıtılır. Bu yöntem ayrıca küçük bileşenlerin olduğu ve yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulan yerlerde de kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi, ev aletleri ve eğlence ekipmanları (birkaç örnek vermek gerekirse) için parça üretiminde az miktarda malzeme atığı ve farklı karışımlar kullanılabilir. Metal tozları üretildiğinde ve sınıflandırıldığında, klasik TM işlem sırası üç ana aşamada uygulanır: (1) tozları karıştırma, (2) sıkıştırma ve (3) sinterleme. Bazı isteğe bağlı ve nihai ikincil işlemler de yapılır (Danninger vd., 2017).

3.3.1 Toz Üretimi

Toz üretim yöntemi, tozun miktarı, boyutu, saflığı, şekli ve üretim maliyeti gibi diğer özellikleri belirler. Toz üretiminin avantajı, toz tanelerin şeklini ve boyutunu tahmin edebilmektir. Neredeyse her malzeme toz haline dönüştürülebilir, fakat toz haline getirmek için seçilen üretim yöntemi maliyete, reaksiyonlara ve özelliklere bağlıdır. Mekanik yöntemler, elektrolitik üretim, kimyasal üretim, atomizasyon teknikleri ve buharlaştırma yöntemleri toz üretiminde kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.

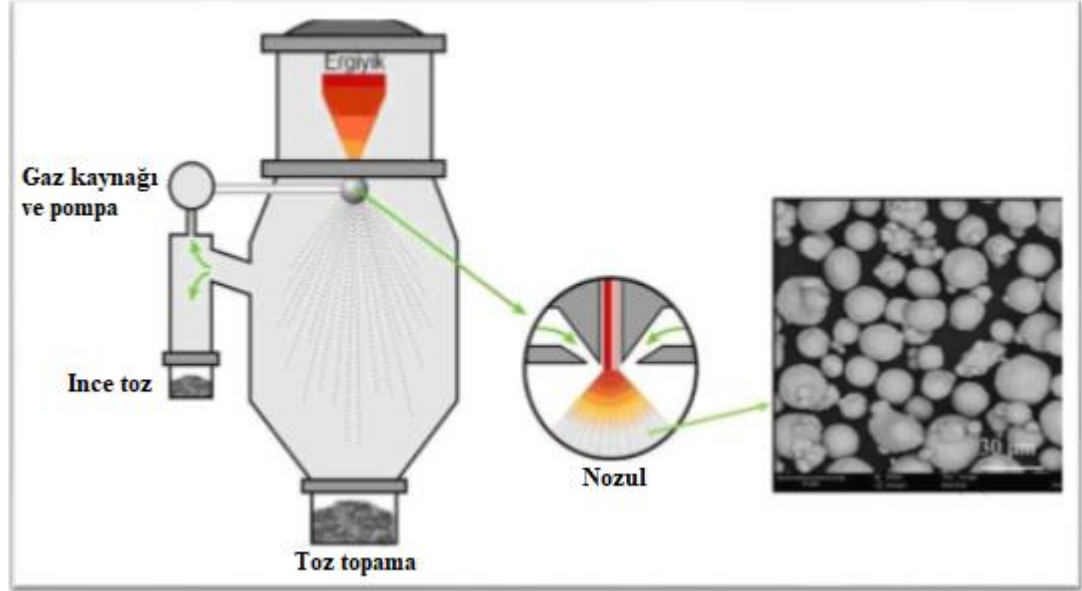
3.3.1.1 Mekanik yöntemlerle üretim

Esas olarak hem mekanik yöntemler hem de diğer üretim yöntemleri enerji uygulandığında yeni yüzey alanları oluşturmaya dayanır. Mekanik üretim yöntemleri dört temel forma sahiptir. Darbe, istenilen malzemelerin yüksek hızda çekiç veya diğer ağır aletler yardımı ile küçük parçalara ayrılmasıdır. Aşındırıcı öğütme, aşındırıcı bilyelerin (bu bilyeler malzemenin özelliklerine göre değişir) bir tambur içerisine yerleştirildiği ve bilyelerin sürtünme kuvveti ile hammaddenin küçük parçalara ayrıldığı bir işlemdir. İşlem genellikle gevrek malzemeleri toz haline getirmek için kullanılır. Sünük malzemeler için uygun değildir çünkü toza dönüştürmek yerine deforme olurlar. Kesme (talaşlı imalat), tornalama, taşlama gibi temel makine ile işleme işlemleri ile gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Bu işlemler uygulanarak düzensiz şekilli büyük parçalar üretilir. Küçük ölçekli toz üretimine uygun olmasına rağmen, verimsiz ve yavaş olduğu için toz üretimi için ilk olarak tercih edilmez. Diş dolgusunda amalgam dolgu maddesi olarak kullanılan gümüş gibi tozlar bu yöntemle üretilir. Sıkıştırma kuvvetine maruz kalan tüm malzemeler kırılma noktasına geldiklerinde toza dönüşme eğilimi gösterirler. Bu özelliğe dayanarak istenilen malzemeler sıkıştırma kuvveti ile toza dönüştürülür. En sık kullanılan yöntemlerden biri mekanik alaşımlama işlemidir. Daha ince ve daha homojen bir mikroyapı elde etmek için katı tozların periyodik olarak kaynaklanması ve daha sonra toz haline getirilmesi sağlanır (Olakanmi vd., 2015).

3.3.1.2 Atomizasyon teknikleri

Bu teknikte istenilen malzeme sıvı formda geçirilir. Bu işlem, erimiş sıvının damlacıklara ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Parçacıkların elde edilmesine yardımcı olması için damlacıklar dondurulur. En yaygın kullanılanlar gaz atomizasyonu ve sıvı atomizasyonudur. Gaz atomizasyonu, sıvı metal damlacıklarının hava, azot, argon veya helyum yardımı ile parçalanmasıyla gerçekleştirilir. Tamamen inert gaz ortamında gerçekleşen gaz atomizasyonu ile saf tozlar elde edilebilir. Elde edilen partikül şekli genel olarak küreseldir. Sıvı ve su atomizasyonu, yağ ve su kullanarak erimiş sıvı damlacıklarını parçalama yöntemidir. Elde edilen malzeme su ile

reaksiyona girebileceğinden işlem bittiğinde temizlik gerekir (Anandharamakrishnan, 2015).



Şekil 3.12 Gaz atomizasyon tekniği (da Silva vd., 2017)

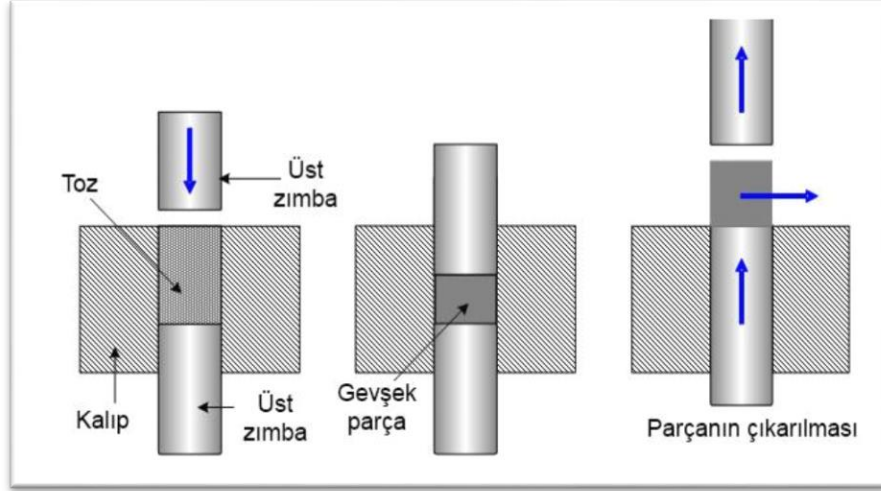
3.3.2 Toz Karıştırma ve Harmanlama

Karıştırma: Bir kimyasal bileşik tozu farklı boyutlarda karıştırıldığında, karıştırma işlemi farklı malzeme tozlarını birleştirir, bu işlemler yaş veya kuru olabilen benzersiz kompozitler üretir. Tamamlanmış ürünlerde istenen özellikleri elde etmek için, tozların büyük çoğunluğu diğer tozlar, bağlayıcılar ve yağlayıcılar ile karıştırılır. Sinterleme esnasında tekdüze kimyası ve yapısı oluşturmak için yeterli difüzyon sağlanmalıdır (Asachi vd., 2018).

3.3.3 Sıkıştırma

İstenen şekillerde kalıplanmaları için, karıştırılan tozlar yüksek basınç altında kalıplara preslenir. Bir iş parçası sıkıştırma sürecinden geçirildiğinde "green kompakt" veya sadece "green" olarak adlandırılır. Bunun manası, iş parçası "henüz tam olarak işlenmemiştir". Çoğu sıkıştırma mekanik, hidrolik ve pnömatik pres ekipmanları ve rijit aletlerle yapılmaktadır (Şekil 3.16). Tozlar sıvılar gibi akmaz, parçacıkları homojen hale gelinceye ve karşı kuvvet oluşuncaya kadar preslenirler; bu karşı kuvvet,

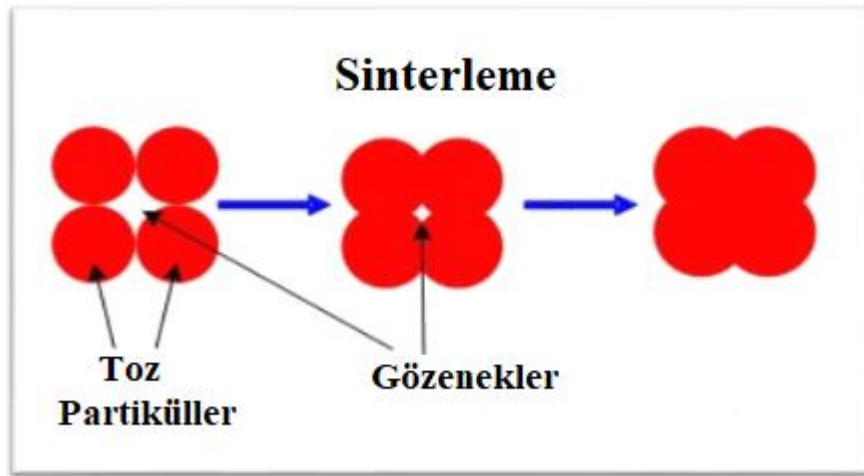
parçacıklar, kalıp yüzeyi ve daha düşük zımba direnci arasındaki sürtünmenin birleşiminden oluşur.



Şekil 3.13 Sıkıştırma işlemi

3.3.4 Sinterleme

Sinterleme, toz metalurjisindeki en önemli işlemlerden biridir. Sinterleme sırasında bağlama işlemi, polimer yanması, boyut değişikliği ve mikro yapının irileşmesi gibi önemli olayları içerir. Katı hal difüzyonu ve bağlanması yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Soğutma işlemi, sıcaklık kontrollü bir atmosferde ürünlerin sıcaklığını düşürür. Bu işlem oksijensiz koşullarda gerçekleştirilir (Şekil 3.17).



Şekil 3.14 Sinterleme işlemi

3.4 Titanyum ve Alaşımları

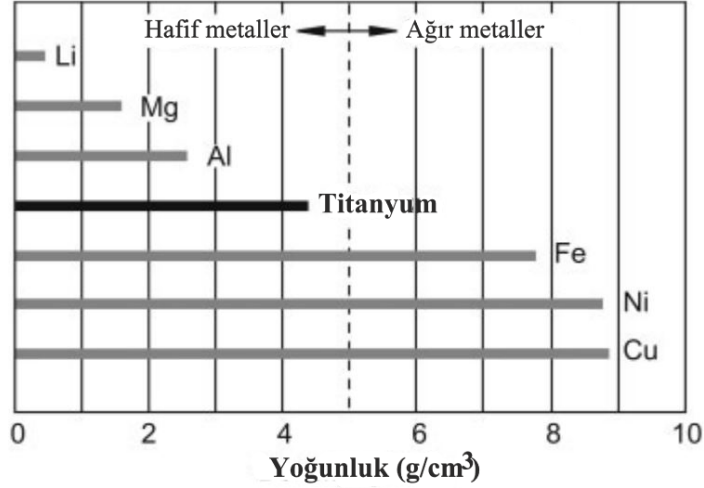
3.4.1 Titanyum ve Alaşımlarına Giriş

Titanyum metali alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra yer kabuğunda dördüncü en bol yapısal metal ve dokuzuncu en çok bulunan elementtir. Nadiren yüksek konsantrasyonlarda bulunur ve asla saf halde bulunmaz. Bu sebeple, bu metalin pahalı olmasının sebebi işlenmesinin zor olmasındandır. Günümüzde bile sadece parti halinde üretilmektedir ve diğeri yapısal metallerde olduğu gibi sürekli bir süreç yoktur. Titanyum genellikle Rusya'nın Ilmen dağlarında bulunan ilmenit (FeTiO_3) veya Avustralya, Hindistan ve Meksika'daki sahil kumlarında bulunan rutil (TiO_2) içeren mineral kumlarda oluşur. Titanyum dioksit boya, kağıt ve plastikte kullanılan çok yönlü bir beyaz pigmenttir ve dünyadaki üretimin çoğunda kullanılır. Rusya, Avustralya, Hindistan ve Meksika'nın yanı sıra, işlenebilir maden yatakları Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Güney Afrika, Sierra Leone, Ukrayna, Norveç ve Malezya'daki bölgelerde de yer almaktadır. Bugün bilinen periyodik sistemdeki 112 kimyasal elementin yaklaşık %85'i metaller veya metaloidlerdir. Demirli veya demirsiz metaller, ingot veya sinterlenmiş metaller, hafif veya ağır metaller gibi metalleri sınıflandırmanın çeşitli yolları vardır. Titanyum, demir içermeyen ve hafif metal olarak sınıflandırılır (Peters vd., 2003; Singh vd., 2017).

Metallerin özellikleri, temelde kristal kafeste atomların metalik bağlanmasına dayanır. Bunun manası şudur ki, kafesteki serbest, hareketli valans elektronları; elektriksel iletkenlik, kristal kafeslerde atomik kaymadan kaynaklı plastik deformasyon ve , artan sertlik ve mukavemet sonucu safsızlık atomlarının kristal kafes içine dahil edilmesiyle gerçekleşen alaşımlama ve azaltılmış süneklik gibi klasik "metalik" özelliklerle sonuçlanır (Peters vd., 2003).

Metallerin ağırlıkları büyük ölçüde değişir. $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ 'de Lityum en düşük yoğunluğa sahipken, Osmiyum ve İridyum $22,5 \text{ g cm}^{-3}$ yoğunluğa sahip en ağır metallerdir. Hafif ve ağır metaller arasındaki ayırım noktası 5 g.cm^{-3} 'tür. Bu nedenle $4,51 \text{ g.cm}^{-3}$ yoğunluğa sahip Titanyum en ağır hafif metaldir. Klasik hafif metal olan

alüminyumdan iki kat daha ağır olmasına rağmen, demir veya nikelin özgül ağırlığının yalnızca yarısı kadardır (Şekil 3.18)(Peters vd., 2003).



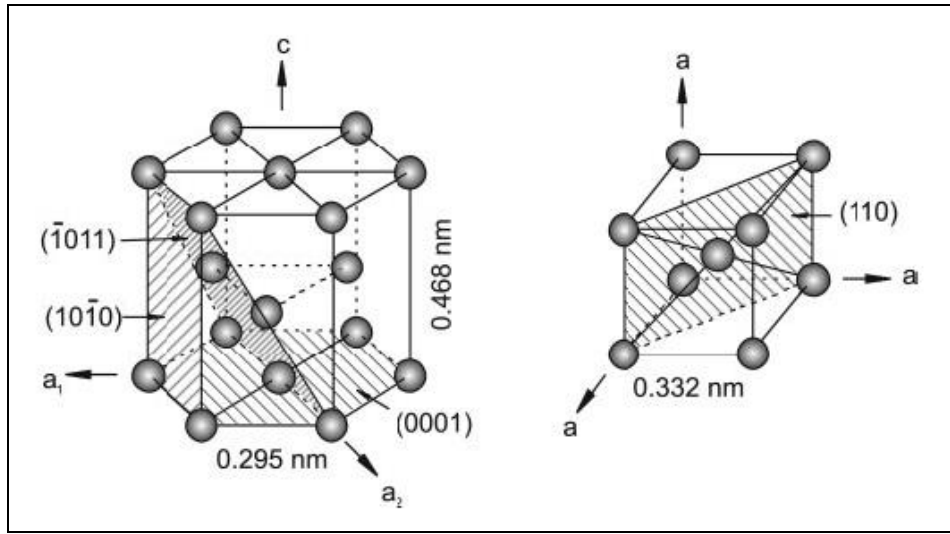
Şekil 3.15 Seçilmiş metallerin yoğunlukları (Peters vd., 2003)

Başlıca iki özelliği ile titanyum alaşımları ön plana çıkmaktadır, bunlar yüksek özgül mukavemet ve mükemmel korozyon direncidir. Bu aynı zamanda havacılık ve uzay sektöründe, kimya sanayinde, tıp mühendisliğinde ve eğlence sektöründe kullanılmalarının tercih edilmesini açıklamaktadır. Sadece 300 °C'nin altındaki sıcaklıklarda karbon fiber takviyeli plastiklerin özgül mukavemeti titanyum alaşımlarına göre daha yüksektir. Daha yüksek sıcaklıklarda titanyum alaşımlarının özgül mukavemeti özellikle dikkat çekicidir. Ancak maksimum uygulama sıcaklığı oksidasyon davranışları ile sınırlıdır. Titanyum alüminidler bu dezavantajı kısmen ortadan kaldırdığından yoğun alaşım geliştirme çalışmalarının konusu haline gelmişlerdir. Konvansiyonel yüksek sıcaklık Titanyum alaşımları yalnızca 500 °C'nin biraz üzerindeki sıcaklıklara kadar kullanılırken, TiAl esaslı alaşımlar, iyi yapılandırılmış yüksek sıcaklık çelikleri ve Ni-bazlı süper alaşımlarla doğrudan rekabet ederler (Peters vd., 2003).

3.4.2 Titanyumun Kristal Yapısı

Ca, Fe, Co, Zr, Sn, Ce, ve Hf gibi bir dizi başka metaller gibi, titanyum çeşitli kristal yapılarda kristalleşebilir. Fakat, her bir modifikasyon yalnızca belirli sıcaklık aralıklarında kararlıdır. Bir kristal yapıdan diğerine tam dönüşüme allotropik dönüşüm denir ve ilgili dönüşüm sıcaklığı ise geçiş sıcaklığı olarak anılır. (Peters vd., 2003).

Saf titanyum ve titanyum alaşımlarının çoğu, düşük sıcaklıklarda α titanyum adı verilen modifiye edilmiş, ideal hegzagonal sıkı paket bir yapıda kristalleşir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda, hacim merkezli kübik yapı kararlıdır ve β titanyum olarak adlandırılır. Saf titanyum için β - geçiş sıcaklığı 882 ± 2 °C'dir. Hegzagonal sıkı paket (hcp) α titanyum ve hacim merkezli kübik (bcc) β titanyumun atomik birim hücreleri, en yoğun şekilde istifli düzlemleri ve yönleri vurgulanarak Şekil 3.20'de şematik olarak gösterilmiştir (Peters vd., 2003).



Şekil 3.16 Hcp α ve bcc β fazının kristal yapısı

3.4.3 Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum iki kristalografik biçimde bulunur. Oda sıcaklığında, alaşımsız (ticari olarak saf) titanyum, alfa (α) fazı olarak adlandırılan hegzagonal sıkı paketli (hcp) kristal yapıya sahiptir. 883 °C'de (1621 °F) bu, beta (β) fazı olarak bilinen hacim merkezli bir kübik (bcc) yapıya dönüşür. Bu kristalografik varyasyonların manipülasyonu geniş bir alaşım ve özellik yelpazesinin geliştirilmesinin temelini oluşturur. Bu aşamalar aynı zamanda titanyum fabrikası ürünlerini sınıflandırmak için uygun bir yol sağlar. Mevcut fazlara bağlı olarak titanyum alaşımları, α alaşımları, β alaşımlar veya $\alpha + \beta$ alaşımları olarak sınıflandırılabilir (Handbook, 1990).

Alfa alaşımları alüminyum ve kalay gibi elementler içerir. Bu α -stabilize edici elemanlar, faz dönüşüm sıcaklığındaki değişikliği engelleyerek veya bunun artmasına neden olarak çalışır (Collings, 1984). Alfa alaşımları genellikle β alaşımlarından daha

üstün sürünme direncine sahiptir ve yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilir. Alaşımlarının bir özelliği olan sünek-kırılğan geçişin olmaması, α alaşımlarını kriyojenik uygulamalar için uygun hale getirir (Handbook, 1990).

Alfa alaşımları tatmin edici mukavemet, tokluk ve kaynaklanabilirlik ile karakterize edilir, ancak β alaşımlarından daha zayıf dövülebilirlik özelliğine sahiptir. Bu son karakteristik, dövme kusurları için daha büyük bir eğilim ile sonuçlanır. Daha küçük azaltmalar ve sık tekrar ısıtma bu sorunları en aza indirebilir. β alaşımlarının aksine, α alaşımları ısıtma işlemiyle güçlendirilemez. Çoğunlukla tavllanmış veya yeniden kristalize edilmiş durumda, çalışmanın neden olduğu artık gerilmeleri ortadan kaldırmak için kullanılırlar (Handbook, 1990).

$\alpha + \beta$ alaşımları, α ve β fazlarının bir karışımını destekleyen ve oda sıcaklığında % 10 ile % 50 arasında β fazı içerebilen bileşimlere sahiptir. Bu alaşımlar tipik olarak iki farklı tipte mikro yapı sergiler. İlk mikroyapı, genellikle işlenmiş mikro yapı olarak adlandırılan, hacim merkezli kübik (bcc) fazın bir matrisinde dağıtılan hegzagonal sıkı paketlenmiş (hcp) fazın yalnızca Widmanstätten çıta benzeri çökeltilerinden oluşur. Bu tür mikro yapılar, alaşımın geçiş sıcaklığının üzerinde termo-mekanik işlenmesinden kaynaklanır. İkinci tip, genellikle α/β ile işlenmiş mikro yapı olarak adlandırılan, dönüştürülmüş bir β matrisinde dağılmış eş eksenli α tanelerinin kombinasyonundan oluşur. Dönüştürülen β matrisi, sırayla, ayrılan ince ölçekli Widmanstätten α çıtalarından oluşur. Bu tür mikro yapılar, alaşımın geçiş sıcaklığının altında termomekanik işlenmesinden kaynaklanır (Tiley vd., 2004). En yaygın $\alpha + \beta$ alaşımı Ti-6Al-4V'dir. Bu özel alaşımın tavllanmış durumda bile oluşturulması nispeten zor olsa da, $\alpha + \beta$ alaşımları genellikle iyi şekillendirilebilirliğe sahiptir (Handbook, 1990).

Beta alaşımları, vanadyum, niyobyum ve molibden gibi α 'dan β fazına geçişin sıcaklığını düşürme eğiliminde olan ve böylece bcc β fazının gelişimini teşvik eden geçiş elementleri içerir. α alaşımlarından daha geniş bir dövme sıcaklıkları aralığında mükemmel dövülebilirliğe sahiptirler ve β alaşımlı levha, çözelti ile muamele edilmiş durumda soğuk şekillendirilebilir (Handbook, 1990).

3.5 Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonraki en sert üçüncü malzemedir. Düşük yoğunluğu (teorik yoğunluk: 2,52 g/cm³) ile birlikte düşünüldüğünde, zırh malzemeleri için birinci sınıf malzemedir. Mükemmel aşınma direnci nedeniyle harç pompalama ve kum püskürtmede nozul malzemesi olarak ve borun yüksek nötron soğurma kesitine dayalı çekirdek kalkanlama uygulamalarında kullanılır. Atomlararası kohezyonunun oldukça yüksek kovalent doğası nedeniyle kristal yapısı karmaşıktır.

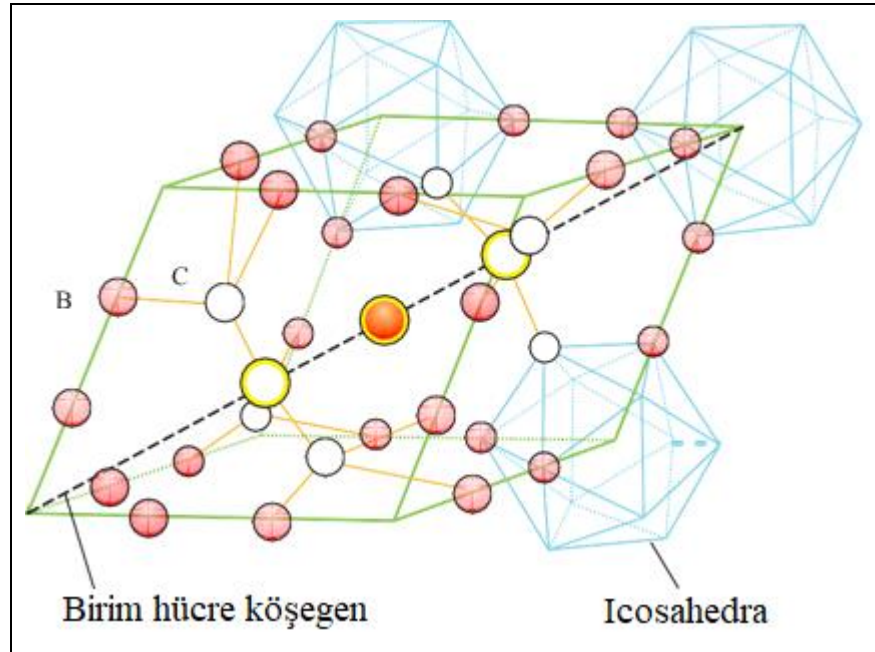
On iki atomlu borca zengin izohedral, bir eşkenar dörtgenin köşelerinde bulunur ve her izohedral, doğrudan bağlarla diğer altısına bağlanır ve üç atomlu izohedraller arasındaki zincirler, izohedral arasında bulunur. İzohedral ve zincirlerdeki karbon için sınırlı bor ikamesi, bor karbürlerin %20 mol karbon ila %8,8 mol karbondaki stokiometrik B₄C'den katı bir çözelti olarak mevcut olmasını sağlar (Cho, 2006).

Mekanik ve balistik performans, gözenekliliğin azalmasıyla, yani nispi yoğunluğun artmasıyla artar; ancak yakın zamana kadar, saf B₄C 'nin yüksek bağıl yoğunluğa basınçsız sinterlenmesinin zor olduğu kanıtlanmıştır. Teorik yoğunluğa yakın bir değer elde etmek, karmaşık şekillerin oluşumunu engelleyen sıcak presleme gerektiriyordu. SiC, Al₂O₃, TiB₂, AlF₃ ve W₂B₅ gibi katkı maddeleri, basınçsız sinterlenmiş yoğunluğu arttırmak için sinterleme yardımcıları olarak kullanılmıştır, ancak oluşan ikinci fazlar mekanik davranış üzerinde genellikle zararlı etkilere sahiptir. B₄C için bilinen en iyi katkı maddesi karbon olup, karbonu B₄C parçacıklarının etrafına dağıtan fenolik reçine biçiminde en başarılı şekilde eklenir ve aynı zamanda bir presleme maddesi görevi görür. Bu katkı maddesi kullanılarak %98'e varan bağıl yoğunluklar elde edilmiştir.

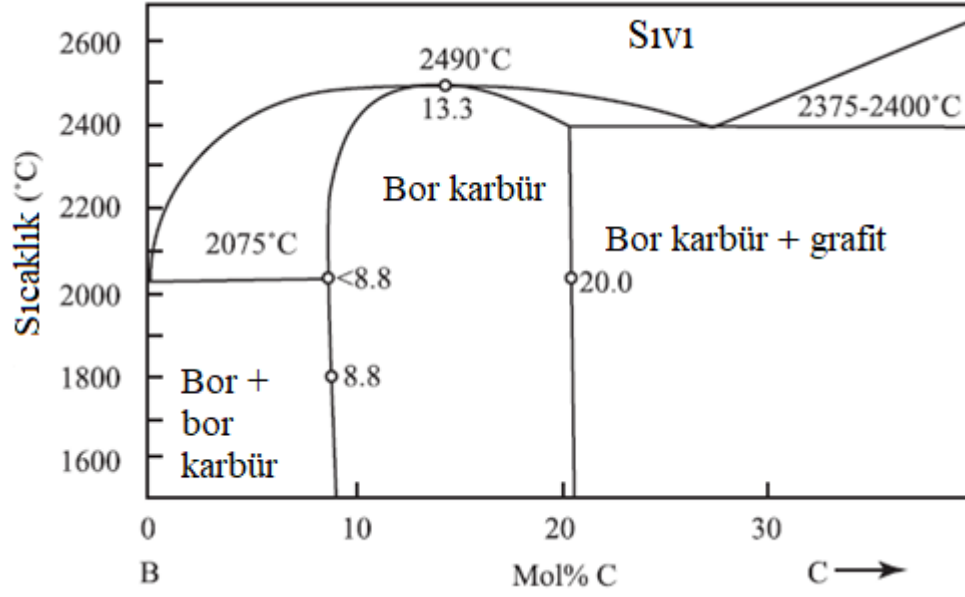
Bor karbür, B₁₂C, B₁₂C₂Al, B₁₂S, B₁₂O₂, B₁₂As₂, B₁₂P₂, ve B₃₋₄Si'yi içeren rhombohedral borun interstisyel bileşiklerinin prototipi olarak düşünülebilir. Bu malzemelerin kristal yapısı, rhombohedronun köşelerinde bulunan icosahedra ve rhombohedronun c eksenine boyunca uzanan bir atom zincirinden oluşur. Çoğu kısım için, bor atomları icosahedranın noktalarını kaplar. İkinci bileşen C, Al, O genel olarak zincir üzerinde meydana gelir. Yakın bağlanmış atomların çok atomlu birimlerinin katı

çerçevesi, refrakter nitelikte olup ve yüksek sertliğe sahiptir (Greim ve Schwetz, 2000).

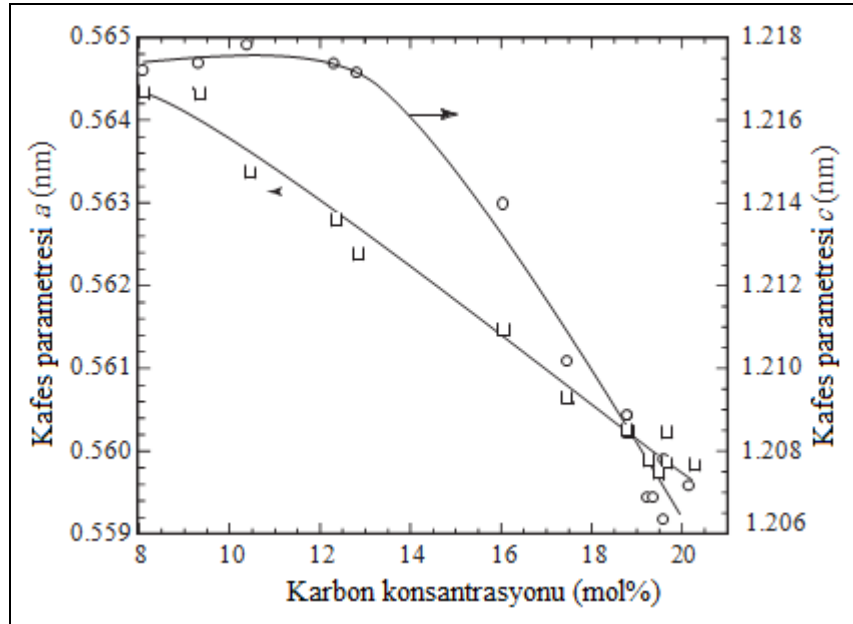
Bor karbür, $B_{10,4}C$ ile B_4C 'ye karşılık gelen sırasıyla %8,8 ile %20 mol C arasında homojenlik aralığına sahip olduğu bildirilen katı bir çözeltidir. Olağanüstü sertliği ve düşük teorik yoğunluğu sayesinde savaş zırhı veya uçak zırhı gibi hafif zırhlar için tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Şekil 3.17'da gösterildiği gibi $2490\text{ }^{\circ}C$ 'de (%13,3 mol C) eşlenik şekilde erir ve $2375\text{-}2400\text{ }^{\circ}C$ 'de ve %29 mol C'lik bileşimde karbonlu bir ötektik oluşturur (Wiley, 2011).



Şekil 3.17 B-C faz diyagramı



Şekil 3.18 B_4C 'nin rombohedral birim hücre yapısı



Şekil 3.19 Bileşime göre altıgen B_4C birim hücresinin kafes parametreleri

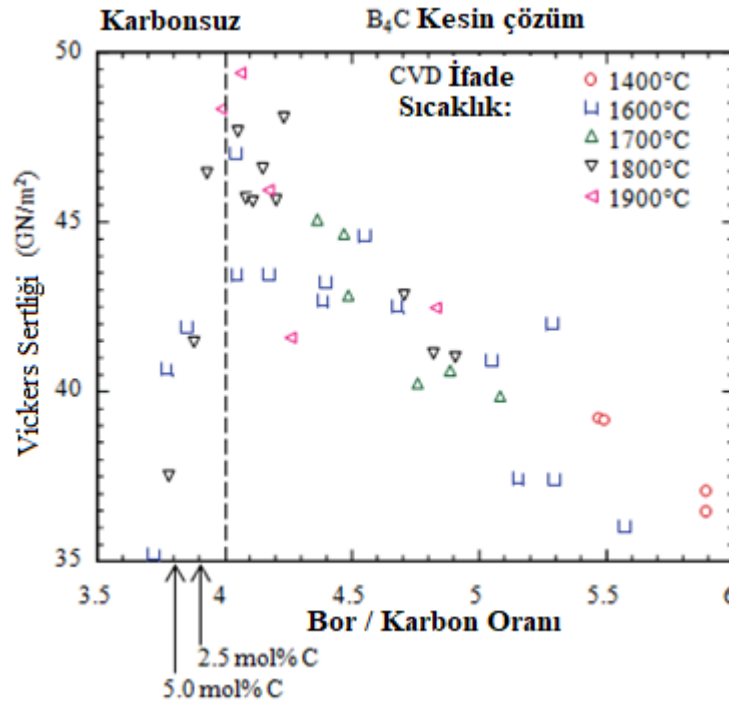
B_4C katı çözeltilisi, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi birim hücrenin merkezin boyunca uzanan üç atomlu zincirlerle birleştirilen sekiz köşedeki 12 atomlu icosahedral birimlerden oluşan rombohedral birim hücre yapısını benimser. Emin tarafından önerildiği gibi, stokiyometrik B_4C için, icosahedra $B_{11}C$ 'dir ve zincirler C-B-C'dir. Bor içeriği başlangıçta arttırıldıkça, icosahedradaki karbonlar tutulurken, her zincirdeki karbonlardan birinin yerini bor alır. %13,3 mol C ($B_{13}C_2$) 'den daha zengin bor içeriği olan bileşimler için, $B_{11}C$ icosahedraların bir kısmı daha sonra B_{12} icosahedra ile yer

değiştirilirken, zincirler C-B-B olarak kalır (Şekil 3.19'de gösterildiği gibi bor ilaveli hegzagonal *c* kafes parametresinin bu bileşimindeki eğim değişikliğiyle kanıtlandığı üzere). Birim hücrenin hacmi, artan karbon içeriği ile doğrusal olarak azalır. Buna karşılık olarak teorik yoğunluk, artan karbon içeriği ile doğrusal olarak artar ve B_{10.4}C için 2,465'ten B₄C için 2,52'ye uzanır.

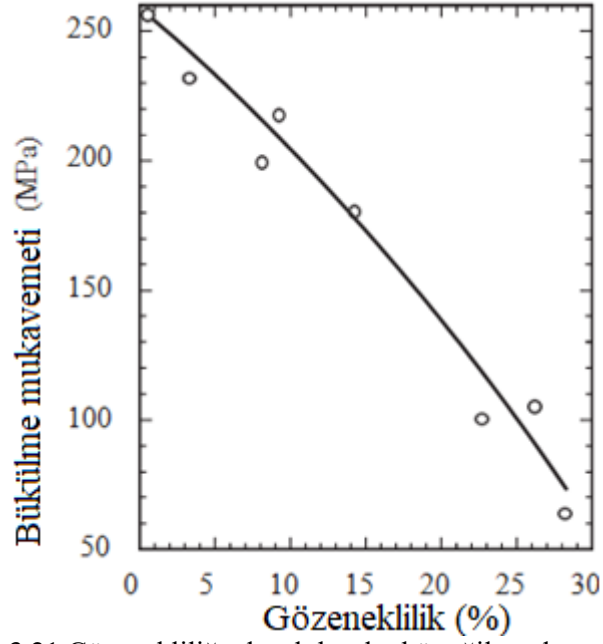
Katı çözeltilerin homojenlik aralığı içinde bor karbürün teorik yoğunluğu karbon içeriği ile doğrusal olarak artar. Aradaki ilişki, %8,8 ≤ [C] ≤ %20,0 aralığında aşağıdaki denklemde tanımlanabilir.

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 2.422 + 0.0048([\text{C}] \text{ at. \%}) \quad (3.3)$$

Stokiyometrik B₄C için ölçülen yoğunluk 2,52g/cm³'tür. Bor karbür bilinen üçüncü en sert malzemedir; ancak gerçek sertlik değerleri dağınıktır ve bu da karşılaştırmaları zorlaştırır. Maksimum sertlik ve iz kırılma tokluğunun stokiyometrik bileşimde olması beklenir (Şekil 3.20). Artan bor içeriği ile bu değerlerdeki azalma bağ mukavemetinin azalmasına katkıda bulunur (Sharifi vd., 2011).



Şekil 3.20 B₄C katı çözeltilerinde artan bor içeriğinin veya B₄C ile dengede artan serbest karbon (grafit) ile sertliği azaltan etkileri



Şekil 3.21 Gözenekliliğe dayalı bor karbür eğilme dayanımı

Homojenlik bölgesindeki karbon içeriği ile eğilme dayanımı artar. Homojenlik bölgesinin ötesinde, serbest grafit mukavemeti azaltır. Bu nedenle, sıcak preslenmiş bor karbürde serbest karbonu ortadan kaldırmak için genelde az miktarda bor eklenir. Gözeneklilik arttıkça (Şekil 3.21'te gösterildiği gibi) ve tane boyutu büyüdükçe eğilme mukavemeti azalır. Tablo 3.1, çeşitli B₄C seramiklerinin mekanik özelliklerini göstermektedir (Sharifi vd., 2011).

Tablo 3.1 Çeşitli B₄C seramiklerinin mekanik özellikleri

Özellik	Malzemeler		
	B ₄ C Sıcak preslenmiş	%5 C li B ₄ C	B ₄ C+TiB ₂ (60:40)
Kütle yoğunluğu (g/cm ³)	2,51	2,51	3,30
Bükülme mukavemeti (4point, 20°C, MPa)	480	560	730
Knoop sertliği	2910	2860	2900
Kırılma tokluğu (K _{IC} , MPa m ^{1/2})	2,2	2,1	6,5
Young modülü (GPa)	441	450	480
Ortalama tane (µm)	5	2	5

3.6 Karbon Nano Fiber (KNF)

Karbon malzemeler doğada yaygın olarak çeşitli şekillerde bulunur. Metalik olmayan bir element olan karbon, bu malzemelerin önemli bir bileşenidir. Karbon sp, sp², ve sp³ hibrit orbitallerine sahip olduğu için, yüksek mukavemete sahiptir. Mükemmel elektrik iletkenliği, ısı iletkenliği, kimyasal kararlılığı, düşük yoğunluğu ve ısı genleşme katsayısına sahip olduğu için katalizör desteği, elektromanyetik dalga koruyucu, hücre elektrotları, takviye yapımı gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Moleküller arasındaki bağ ve yapıya bağlı olarak birkaç karbon allotropa (grafit, elmas, fulleren, karbon nanotüp, karbon nanofiber, grafen vb.) sahiptir ve toz, fiber ve köpük şeklinde işlenebilir. Ek olarak, yapının kontrolüne bağlı olarak geniş bir özgül yüzey alanına sahip olabileceğinden ve grafit yapının dizilişine ve konfigürasyonuna bağlı olarak süper iletkenliğe sahip olabileceğinden, enerji depolama alanında çok ilgi gören bir malzemedir (Okwundu vd., 2018).

Karbon nanofiber, kalınlığı 1 µm'den az olan karbon içeren bir elyaftır ve düz, spiral, sarmal gibi çeşitli formlara sahiptir. Karbon nanofiberler (KNF'ler), olağanüstü mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı yeni üstün mühendislik ürünü malzemeler sınıfına aittir (De ve Geus, 2000). KNF'ler, 10 nanometre ile 200 nanometre arasında değişen çaplara sahip monomoleküler karbon fiberlerden oluşur. Yüksek gerilme dayanımı (12,000 MPa) ve çeliğin yaklaşık 10 katı olan yüksek Young modülü (600 GPa) ile karakterizedir. Mekanik mukavemetin yanında, KNF'ler yüksek elektrik iletkenliği gibi arzu edilen elektriksel özelliklere de sahiptir. KNF'lerin bu özellikleri, çeşitli ara ürünler ve son halini almış katma değerli tüketici ürünlerine işlevsellik kazandırmak amacıyla çeşitli yollarla araştırılmaktadır. KNF'lerin kullanımına dair bir uygulama örneği, yüksek mukavemetli polimer nanokompozitler ile sonuçlanan polimer nanokompozitlerdir. Diğer uygulamalar bu tasarlanmış nanopartiküllerin (ENP'ler) karbon-lityum piller, elektronik cihazlar için başlatma kapasitörleri ve elektriksel olarak iletken polimerlerde kullanımını içermektedir. Bu fiberlerin yüksek özgül yüzey alanı, bu ENP'lerin, özellikle sıvı faz reaksiyonları için katalizör destek malzemeleri olarak kullanımına yönelik araştırılan ek bir özelliktir. Ayrıca KNF'lerin, gelecekteki hidrojen ekonomisi için uzun vadeli etkileri olabilecek, dikkate değer hidrojen depolama kapasiteleri sergilediği bildirilmiştir (Qin vd., 2004).

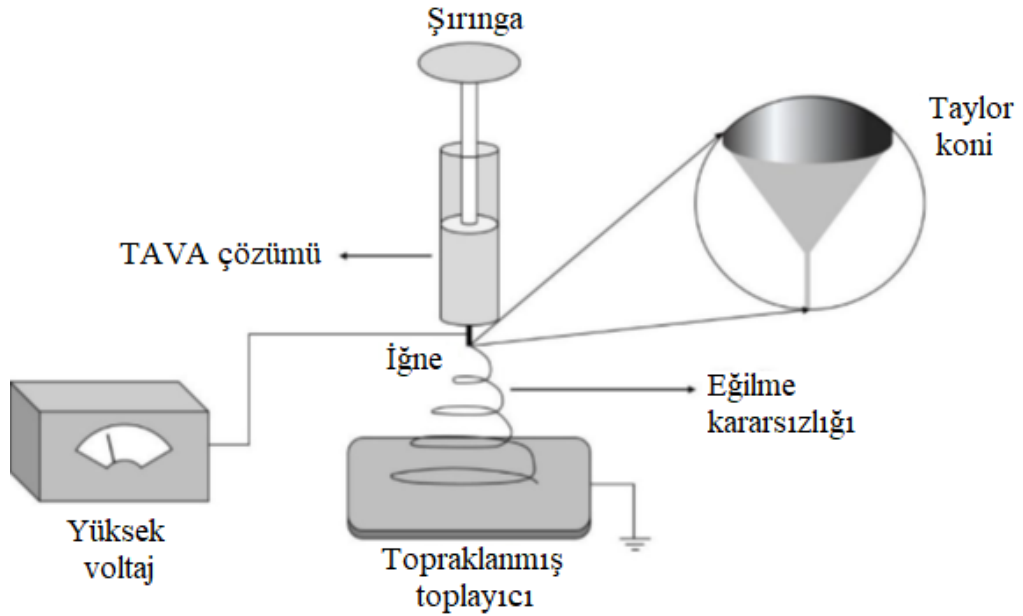
KNF'ler esas olarak iki yöntemle hazırlanabilir. Birincisi elektro lif çekim yöntemi olup bunu ısıl işlem takip eder ve diğeri ise termal kimyasal buhar biriktirme ile katalitik büyütme yöntemidir.

Elektro lif çekim yöntemi, çözeltilere veya eriyiklere elektrostatik kuvvet uygulandığında nanometreden mikrometre boyutlarına kadar değişen çaplarda fiberler üretir. Tipik bir elektro lif çekim işleminde, çözeltilere veya eriyiklere yüksek voltaj uygulanır. Bundan sonra asılı bir damlacık oluşur. Elektrostatik itme sıvının yüzey gerilimini yenmeye başladığında, asılı damlacık, iğnenin ucunda Taylor konisi adı verilen konik bir damlacık şeklinde deforme olacaktır. Elektrostatik kuvvet konik damlacığın yüzey geriliminin üstesinden gelirken, iğnenin ucundan polimer solüsyonu içeren ince, yüklü bir jet atılır. Elektrik alan ve sıvının yüzey gerilimi arasındaki etkileşim jet akımını gerer ve çözücünün buharlaşmasına yol açan bir çırpma hareketine maruz kalmasını sağlar. Bu durum jet akımının uzun ve ince bir filaman olarak sürekli olarak uzamasına neden olur ve daha sonra bu filaman katılaşır ve sonunda topraklanmış bir kolektör üzerinde birikerek üniform bir fiber oluşumu ile sonuçlanır.

PAN elektro lif çekim yöntemi üzerine son 10 yılda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Kirecci vd., 2012). Kuru çekme, yaş çekme veya eriyik çekme gibi geleneksel lif çekme tekniklerinden farklı olarak PAN elektro lif çekimi, mekanik kuvvet yerine elektrik kuvvetiyle gerçekleştirilir ve farklı bir inceltme mekanizması izler.

Bir elektrik alanına maruz kaldığında, bir memeciğin ucundaki PAN çözeltilisinin bir damlası, sadece yüzey gerilimi nedeniyle deforme olur ve bir Taylor konisi oluşturur. Uygulanan elektrik potansiyeli kritik bir değere ulaştığında, PAN çözeltilisinin damlacıklarında oluşan elektriksel kuvvet, yüzey gerilimini ve visko-elastik kuvvetini aşar, Taylor konisinin ucundan bir PAN çözeltisi jeti çıkar ve elektro lif çekimi başlar. Ardından jet, Şekil 3.22'te gösterildiği gibi 3D'de bir bükülme, sarma ve spiral yolu izler ve döngü çevresi arttıkça incelikler. Bu olgu, elektro lif çekimi yönteminde baskın inceltme mekanizması olan “kararsızlık” olarak adlandırılır (Shin vd., 2001).

Tipik olarak, kararsızlığı, bir elektro çekim jetinin uzunluğunun, eşzamanlı fiber incilmesi ile çok kısa bir süre içinde (50 ms veya daha az) 10000 kattan fazla uzamasına neden olur. Bu nedenle, bükülme kararsızlığı sırasında uzama veya çekme hızı son derece büyüktür (1000000 s^{-1} 'e kadar). Diğer yöntemlerde elde edilemeyen böylesine büyük bir çekme hızı, nanofiberlerdeki PAN makromoleküler zincirlerini etkin bir biçimde gerebilir ve bunları nanofiber eksenler boyunca yakın şekilde hizalayabilir (Zussman vd., 2003).



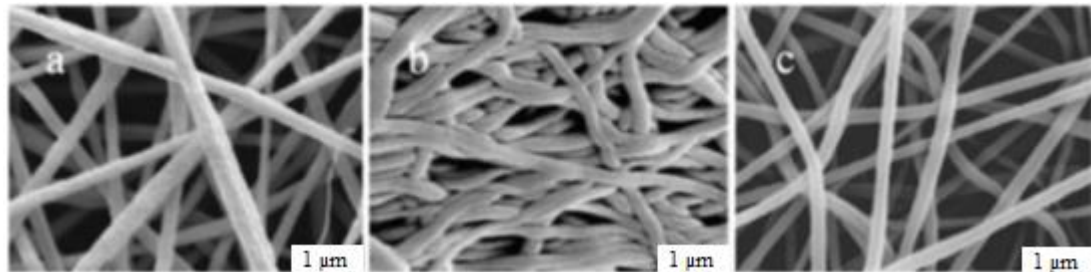
Şekil 3.22 Temel elektro lif çekim düzeni, Taylor konisi ve kararsızlığı dahil olmak üzere PAN elektro lif çekimi şematik diyagramı (Poveda ve Gupta, 2016)

Çözücünün hızlı buharlaşmasına ek olarak (%99'un üzerinde), elektro lif çekimi jetlerindeki çözücü, kararsızlığı sırasında veya kısa bir süre sonra çıkarılabilir, electrospun (elektro lif çekimi ile üretilmiş) PAN nanofiberlerde makromoleküler yönelimin kalması muhtemeldir. Bununla birlikte, elektro lif çekim jetlerinin karmaşık yörüngesi, electrospun PAN nanofiberlerin düzenli ve/veya hizalı düzeneklerde kullanımını oldukça fazla zorlaştırmakta ve doğal olarak, rastgele birikimli PAN nanofiberlerden oluşan örülmemiş matlar ile sonuçlanmaktadır. Beraberindeki yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle, electrospun PAN matları (keçeler, membranlar veya diğer benzer isimlerle de anılırlar) adsorpsiyon/ filtrasyon / ayırma ve kataliz alanlarında geniş kullanım alanı bulmaktadırlar (Li vd., 2012).

Geleneksel karbon fiber yapımına benzer şekilde, karbon nanofiberler elektro lif çekme PAN ve ardından iki aşamalı bir işlemle (stabilizasyon ve karbonizasyon) başarıyla hazırlandı. Karbonizasyon 2800 °C'ye kadar inert bir atmosferde gerçekleştirilirken, stabilizasyonun 200 ila 300 °C arasındaki sıcaklıklarda hava ortamında gerçekleştirildiği elektrospun PAN nanofiberleri için çeşitli stabilizasyon ve karbonizasyon koşulları bildirilmiştir (Wu vd., 2012).

Kütle kaybını ve boyut küçülmesini azaltmak için, stabilizasyon ve karbonizasyonu kapsayacak şekilde ilerlemeli ve çok aşamalı ısıtma prosedürleri geliştirilmiştir (Fotoğraf 3.3). 30 ila 230 °C arasında 5 °C/dakika, 230 ila 270 °C arasında 1 °C/dakika, ardından 270 ila 800 °C arasında 5 °C/dakika olan aşamalı stabilizasyon ve karbonizasyon prosedürü 200 °C'de 30 dakika süreyle stabilizasyonun ve ardından 750 °C'de 1 saat boyunca karbonizasyonun gerçekleştirildiği prosedüre kıyasla fiber paketlemede çok az değişikliğe, çok daha az düzlemsel boyutsal büzülme ve karbon veriminde önemli bir artışa sebep olmuştur (Ko vd., 2003).

Hazırlanmış bir metal katalizör, bir kuvars teknesine eşit şekilde yayıldı, bu daha sonra bir azot atmosferi altında reaktöre yerleştirildi ve reaktör sıcaklığı 12 °C / dakikaya yükseltildi. Sıcaklık 700 °C'ye ulaştığında, bu sıcaklık otuz dakika süreyle muhafaza edildi; azot gazı ve %20 hidrojen (N₂ dengesi) gazı birlikte reaktöre aktı. Üç saatlik süre boyunca, hidrojen (N₂ dengesi) gazı ve %20 etilen (N₂ dengesi) gazı birlikte reaktöre aktı. Etilen ve hidrojen gazlarının akışı, reaksiyon tamamlandıktan sonra kesildi; daha sonra, oda sıcaklığına kadar soğutmak için inaktif bir reaktör atmosferi altındaki azot reaktörden geçirildi.



Fotoğraf 3.3 N, N-dimetilformamid (DMF) içinde %8 PAN çözeltisinden Elektrospun PAN nanofiberlerin temsili SEM görüntüleri (a); iki aşamalı ısıtmadan elde edilen KNF: 30 dakika süreyle 200 °C ve 1 saat süreyle 750 °C (b); çok aşamalı kademeli ısıtmadan türetilen KNF: 30 ila 230 °C arasında 5 °C/dak., 230 ila 270 °C arasında 1 °C/dak., (c) 270 ile 800°C arası 5°C/dak. (Zhang ve Hsieh, 2009)

Karbon nanolifler (KNF'ler) levha (fiber eksenine dikey olarak düzenlenmiş bireysel katmanlar veya balıksırtı (belirli bir açıyla iç içe geçmiş) şeklinde uzun, lifli karbon katmanlarıdır. Düzenleme, kullanılan katalizöre bağlı olarak belirlenir. Karbon nanolifler (KNF'ler), kendilerini lityum iyon bataryalar ve sodyum iyon bataryalar için elektrot malzemelerinde iletken katkı maddeleri olarak mükemmel bir kullanım haline getiren olağanüstü elektronik iletkenliğe sahip tek boyutlu karbonlu malzemeler sınıfındadır. KNF'lerin özellikleri Tablo 3.2'te gösterilmektedir.

Tablo 3.2 KNF'nin özellikleri

Özellik (Birimler)	Büyüdüğü şekliyle	Isıl işlem görmüş
Çekme dayanımı (GPa)	2,7	7,0
Çekme modülleri (GPa)	400	600
Nihai Gerinim (%)	1,5	0,5
Yoğunluk (g/cc)	1,8	2,1
Elektriksel Direnci ($\mu\Omega$ -cm)	1000	55
Isıl iletkenlik (W/m-K)	20	1950

3.7 Korozyon

Korozyon, bir malzemenin özelliklerinin veya kütesinin çevresel etkiler nedeniyle zaman içinde bozulmasıdır. Bir malzemenin bileşim elemanlarının termodinamik açıdan en kararlı durumuna dönmesi doğal bir eğilimdir. Çoğu metalik malzeme için bu, oksitlerin veya sülfidlerin veya genel olarak cevher olarak kabul edilen diğer temel metalik bileşiklerin oluşumu anlamına gelir. Neyse ki, bu işlemlerin çoğunun ilerleme hızı, kullanışlı yapı malzemeleri oluşturmak için yeterince yavaştır. Çoğu metalik malzeme için yalnızca inert atmosferler ve vakum ortamı korozyonsuz kabul edilebilir. Normal koşullar altında, demir ve çelik hem oksijen hem de suda paslanır. Eğer bunlardan herhangi biri yoksa, korozyon genellikle meydana gelmez. Suyun içinde korozyon hızlı şekilde meydana gelebilir, suda korozyon hızı suyun asitliği veya hızı, metalin hareketi, sıcaklık veya havalandırmadaki artış, belirli bakterilerin varlığı veya diğer daha az etkili etkenler artmaktadır. Tersine, korozyon genellikle filmler (veya koruyucu tabakalar) tarafından geciktirilir (Schweitzer, 2006).

Bir dereceye kadar çoğu malzeme, birçok farklı ortamla bir tür etkileşim yaşar. Sıklıkla, bu tür etkileşimler, mekanik özelliklerinin (ör. Süneklik ve mukavemet), diğer fiziksel özelliklerinin veya görünümünün bozulması sonucunda malzemenin kullanılabilirliğini bozar. Zaman zaman, bir tasarım mühendisinin hayal kırıklığı olarak, bazı uygulamalar için bir malzemenin bozulma davranışı, olumsuz sonuçlarıyla birlikte göz ardı edilir. Bozucu mekanizmalar, üç malzeme türü için farklıdır. Metallerde, çözünme (korozyon) veya metalik olmayan ölçeğin oluşumu veya film oluşumu (oksidasyon) nedeniyle gerçek malzeme kaybı vardır. Seramik malzemeler, genellikle yüksek sıcaklıklarda veya oldukça aşırı ortamlarda meydana gelen bozulmaya nispeten dirençlidir, süreç sıklıkla korozyon olarak da adlandırılır. Polimerlerle ilgili mekanizmalar ve sonuçlar metaller ve seramiklerden farklıdır ve bozunma terimi daha sık kullanılır. Polimerler, sıvı bir çözücüye maruz kaldıklarında çözülebilir veya çözücüü emip şişebilirler; ayrıca elektromanyetik radyasyon (öncelikle ultraviyole) ve ısı, moleküler yapılarında değişikliklere neden olabilir.

Bu malzeme türlerinin her birinin bozulması bu bölümde ele alınmış olup mekanizma, çeşitli ortamlara direnç ve bozulmayı önleme veya azaltma önlemlerine önem verilmiştir (Philip ve Schweitzer, 2009).

3.7.1 Metallerin Korozyonu

Korozyon, bir metalin tahrip edici ve kasıtsız saldırısı olarak tanımlanır; elektrokimyasaldır ve normalde yüzeyde başlar. Metalik korozyon sorunu önemli değerlerden biridir; ekonomik açıdan, sanayileşmiş bir ülkenin gelirinin yaklaşık %5'inin korozyonun önlenmesine ve korozyon reaksiyonlarının bir sonucu olarak kaybolan veya kontamine olan ürünlerin bakımına veya değiştirilmesine harcadığı tahmin edilmektedir. Korozyonun sonuçlarının hepsi çok yaygındır. Bilinen örnekler arasında otomotiv gövde panellerinin ve radyatör ve egzoz bileşenlerinin paslanması gösterilebilir. Korozyon süreçleri bazen de avantaj sağlamak için kullanılır. Dağlama işlemleri örnek verilebilir (Young, 2008).

3.7.2 Elektrokimyasal Hususlar

Metalik malzemeler için, korozyon süreci normalde elektrokimyasaldır, yani elektronların bir kimyasal türden diğerine aktarıldığı kimyasal bir reaksiyondur. Metal atomları, oksidasyon (paslanma) reaksiyonu denen olayda karakteristik olarak elektronları kaybederler veya bırakırlar. Örneğin, n valans değeri (veya n valans elektronları) olan varsayımsal metal M, reaksiyona göre oksidasyon yaşayabilir (Mkwizu, 2016).



Burada, M bir n pozitif yüklü iyon haline gelir ve bu süreçte n valans elektronlarını kaybeder ve bir elektronu sembolize etmek için kullanılır.

Genelde, korozyon sonuç olarak malzemenin özelliklerinde bir bozulmaya yol açan, bir malzemenin çevresine karşı reaksiyonudur. Daha spesifik olarak, elektrokimyasal korozyon bir malzemenin veya özelliklerinin, elektriksel (yarı) iletken malzemenin çevresindeki ortama karşı elektrokimyasal reaksiyonları yoluyla parçalanmasıdır.

Korozyonun oluşması için üç temel unsur mevcut olmalıdır: bunlar elektrolit, anot ve katottur. Anot, katot ve elektrolit kombinasyonuna korozyon hücresi denir. Elektrolit, iyonların hareketi ile elektrik akımını iletebilen bir çözeltilidir. Anot ve katot, farklı metallerden veya heterojen yüzey yapısına sahip aynı metalden oluşabilir. Korozyon, elektriksel olarak bağlanması gereken iki elektrot arasındaki elektriksel potansiyel farkının bir sonucu olarak meydana gelir.

3.7.2.1 Anodik reaksiyon

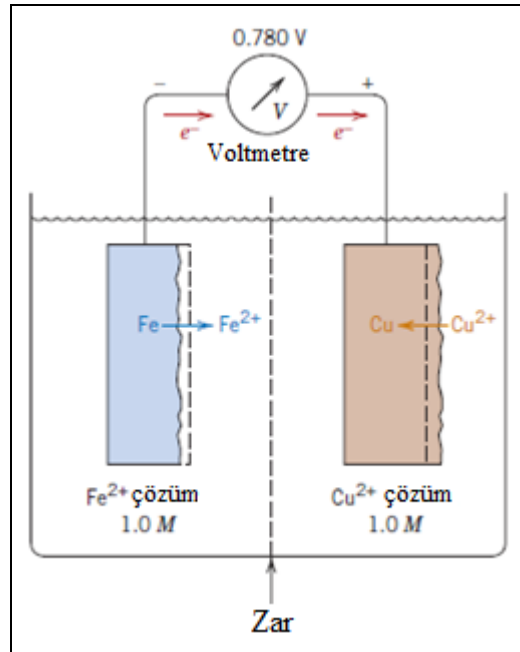
Yalnızca metaller (alaşımlar da dahil) dikkate alındığında, anot, metalin aşındığı, yani metal çözünmesinin gerçekleştiği yerdir. Metal çözülür ve korozyon ortamına bağlı olarak, toplu metal yüzeyinde korozyon ürünleri olarak tekrar biriktirilebilir veya metal iyonları olarak solüsyona aktarılabilir. Bu süreç oksidasyon (paslanma) olarak da bilinir (Schweitzer, 2006).

3.7.2.2 Katodik reaksiyon

Yukarıdaki anodik reaksiyonlar, katotta meydana gelen indirgeme süreçleri ile dengelenmelidir. Yani anotta oksidasyonla üretilen elektronların, katotta meydana gelen bir indirgeme reaksiyonunda tüketilmesi gerekmektedir. Bu “anotlar ve katotlar”ın ya iki farklı metal parçası olabileceği ya da tek bir metal parçanın heterojen yüzeyinde farklı kısımlar olabileceğine dikkat edilmelidir.

3.7.3 Elektrot Potansiyelleri

İyonları oluşturmak için tüm metalik malzemeler aynı kolaylıkta oksitlenmez. Şekil 3.36'da gösterilen elektrokimyasal hücreyi ele alalım. Sol tarafta, $1M$ konsantrasyonunda Fe^{2+} iyonları içeren bir çözelti içine daldırılmış bir parça saf demir bulunmaktadır. Hücrenin diğer tarafı ise, Cu^{2+} iyonları içeren $1M$ çözeltisinde bulunan saf bir bakır elektrottan oluşur (Callister, 2011).



Şekil 3.23 Her biri iyonlarını içeren $1M$ 'lik bir çözeltiye daldırılmış demir ve bakır elektrotlardan oluşan bir elektrokimyasal hücre. Bakır elektro biriktirme yaparken demir korozyona uğrar

Yarım hücreler, iki çözeltinin karışmasını sınırlayan bir zar ile ayrılır. Eğer demir ve bakır elektrotlar elektriksel olarak bağlanırsa, demirin oksidasyonuna karşılık bakır için aşağıdaki gibi bir indirgeme gerçekleşir:



3.7.4 Galvanik Seri

Tablo 3.5, deniz suyundaki bir dizi metal ve ticari alaşımların bağıl reaktivitelerini göstermektedir. Tepeye yakın alaşımlar katodiktir ve reaktif değildir, halbuki alttakiler çoğunlukla anodiktir. Çoğu metal ve alaşım, çok çeşitli ortamlarda bir dereceye kadar oksidasyona veya korozyona maruz kalır (Zhang, 2013).

Tablo 3.3 Galvanik Serisi

	Platin
	Altın
	Grafit
	Titanyum
	Gümüş
	[316 Paslanmaz çelik (pasif)
	[304 Paslanmaz çelik (pasif)
	[Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (Pasif)
	[Nikel (pasif)
	[Monel (70Ni-30Cu)
Giderek artan inert (Katodik)	Bakır-Nikel alaşımları
	Bronzlar (Cu-Sn alaşımları)
	Bakır
	[Pirinçler (Cu-Zn alaşımları)
	[Inconel (aktif)
	[Nikel (aktif)
	Teneke
	Kurşun
Giderek daha aktif (anodik)	[316 Paslanmaz çelik (pasif)
	[304 Paslanmaz çelik (pasif)
	[Dökme demir
	[Demir ve çelik
	Alüminyum alaşım
	Kadmiyum
	Ticari olarak saf alüminyum
	Çinko
	Magnezyum ve magnezyum alaşımları

3.7.5 Korozyon Hızları

Korozyon hızı veya kimyasal etkinin bir sonucu olarak malzeme uzaklaştırma hızı, önemli bir korozyon parametresidir. Bu, korozyon penetrasyon hızı (CPR) veya birim zamanda malzeme kalınlık kaybı olarak da ifade edilebilir.

Bu hesaplamamanın formülü şöyledir:

$$CPR = \frac{KW}{\rho At} \quad (3.6)$$

Burada, W maruz kalma süresi t 'den sonra elde edilen ağırlık kaybı; ρ ve A sırasıyla yoğunluğu ve maruz kalan numune alanını temsil eder ve K bir sabittir ve genliği kullanılan birim sistemine bağlıdır. CPR, genelde yıl başına mil (mpy) veya yıl başına milimetre (mm/yıl) olarak ifade edilir. İlk durumda, CPR'yi mpy olarak vermek için (burada 1 mil = 0,001 in.) $K=534$ ve W , ρ , A , ve t sırasıyla miligram, santimetre küp başına gram, inç kare ve saat cinsinden belirtilir. İkinci durumda, mm/yr için $k=87,6$ ve diğer parametrelerin birimleri ise yıl başına mils ile aynı alınır olanlar ile santimetre kare cinsinden verilen A hariçtir. Çoğu uygulama için, 20 mpy (0,50 mm/yr)'den daha düşük bir korozyon penetrasyon oranı kabul edilebilir seviyedir (McCafferty, 2005).

3.7.6 Korozyon Türleri

3.7.6.1 Konsantrasyon hücre korozyonu

Bir metal yüzeyin iki veya daha fazla alanı aynı çözeltinin farklı konsantrasyonları ile temas halinde olduğunda konsantrasyon hücre korozyonu meydana gelir. Konsantrasyon hücre korozyonunun üç genel türü vardır: bunlar (1) metal iyon konsantrasyon hücreleri, (2) oksijen konsantrasyon hücreleri ve (3) aktif pasif hücreler.

3.7.6.2 Galvanik korozyon

Galvanik korozyon, bir elektrolit ve bir elektron iletken yol söz konusu olduğunda iki farklı metalin elektrokimyasal bir etkisidir. Benzer olmayan metaller temas ettiğinde

oluşur. Birbirine benzemeyen metaller arasında yapılan birleştirme işleminde korozyon oluşumunun varlığı ile fark edilebilir. Örneğin, alüminyum alaşımları veya magnezyum alaşımları çelikle (karbon çelik veya paslanmaz çelik) temas ettiğinde galvanik korozyon meydana gelebilir. Tablo 3.5, farklı metallerin galvanik serilerini göstermektedir.

3.7.6.3 Taneler arası korozyon

Taneler arası korozyon, bir metal veya alaşımın tane sınırlarında gerçekleşir. Herhangi bir ticari alaşımın oldukça büyütülmüş bir kesiti, onun granüler yapısını gösterecektir. Bu yapı, ayrı ayrı tane miktarlarından oluşur ve bu küçük tanelerin her birinin, tane merkezindeki metalden kimyasal olarak farklı olan, açıkça tanımlanmış bir sınırı vardır. Sıklıkla, tane sınırları, tanenin ana gövdesine anodiktir ve tane sınırları bu durumda olduğunda ve bir elektrolit ile temas hali mevcutsa, tane sınırlarında hızlı bir seçici korozyon meydana gelir. Bu tür korozyonun bir örneği, kaynak veya sert lehimleme ile hassaslaştırılan ve ardından şiddetli bir korozyon ortamına maruz kalan kararsız 300 serisi paslanmaz çeliklerdir (Handbook, 1987).

3.7.6.4 Çukur korozyonu

Korozyonun alüminyum ve magnezyum alaşımları üzerindeki en yaygın etkisine çukurlaşma denir. İlk önce, yüzeyi lekeleyen, toza benzer şekilde beyaz veya gri bir toz birikintisi olarak göze çarpar. Tortu temizlendiğinde yüzeyde küçük çukurlar veya delikler görülebilir. Paslanmaz çelik gibi pasif metaller aşındırıcı ortama direnç gösterir ve uzun süre iyi performans gösterebilir. Bununla birlikte, korozyon meydana gelirse, bunlar çukurlar halinde rastgele oluşur. Çukurlaşma, metal bölüme hızla nüfuz etme eğiliminde olduğu için ciddi bir korozyon türü olabilir. Çukurlar, metal yüzeyinde bulunan çekirdeklerdeki pasifliğin bozulmasıyla başlar. Bu bozulmayı takiben anodu çok küçük bir aktif metal alanı ve katodu önemli bir pasif metal alanı olan bir elektrolitik hücre oluşumu gerçekleşir. Bu "pasif-aktif hücre" nin büyük potansiyel farkı özelliği, önemli bir akım akışına ve küçük anotta eşlik eden hızlı korozyona atfedilir. Anodu çevreleyen korozyona dayanıklı pasif metal ve çukur içindeki korozyon ürünlerinin aktive etme (pasifliği yok etme) özelliği, korozyonun

yüzey boyunca yayılmak yerine metale nüfuz etme eğilimini açıklamaktadır. Çukurlaşma, en çok klorür iyonlarının varlığında, oksijen veya oksitleyici tuzlar gibi depolarizatörlerle birlikte meydana gelir. Çukurlaşmayı kontrol etmek için kullanılabilir yöntemler arasında yüzeylerin temiz tutulması, koruyucu bir kaplama uygulanması ve daldırma hizmeti için inhibitörlerin veya katodik korumanın kullanılması yer almaktadır (Burstein vd., 2004).

3.7.6.5 Tekdüze dağlama korozyonu

Çoğu doğrudan kimyasal madde etkisinin yaptığı yüzey etkisi (örneğin, bir asidin yaptığı gibi), metalin düzgün dağlanmasıdır. Parlatılmış bir yüzeyde, bu tür bir korozyon yüzeyin genel bir matlaşması olarak görülür ve eğer devam etmesine izin verilirse yüzey pürüzlü ve muhtemelen buzlu bir görünüm alır. Metalin yüksek sıcaklıklara maruz kalması nedeniyle oluşan renk değişikliği veya genel matlaşma, tekdüze dağlama korozyonu olarak kabul edilmemelidir. Kimyasal olaylara dayanıklı koruyucu kaplamaların veya daha dayanıklı malzemelerin kullanılması bu sorunları kontrol altında tutmayı sağlayacaktır.

3.7.6.6 Gerilme korozyonu çatlaması

Gerilme korozyonu çatlaması (scc), çekme gerilmesi ve korozyonun eş zamanlı etkilerinden kaynaklanır. Gerilme, içerden veya dışarıdan uygulanabilir. İç gerilmeler, soğuk işleme sırasında üniform olmayan deformasyon, yüksek sıcaklıklardan eşit olmayan soğutma ve hacim değişikliklerini içeren iç yapısal yeniden düzenleme ile üretilir. Bir parça deforme olduğunda ortaya çıkan gerilmeler, basma ve büzüşmeli yerleştirmelerden oluşanlar ve perçin ve cıvatalarda oluşanlar iç gerilmelerdir.

3.7.6.7 Yorulma korozyonu

Yorulma korozyonu, döngüsel gerilim ve korozyonun bir araya gelen etkilerinin neden olduğu özel bir gerilim korozyonu durumudur. Eğer metal korozif bir ortamda ise, döngüsel gerilmeye karşı gösterilen direncin bir miktar azalmasından hiçbir madde hasarsız kurtulamaz. Yorulma korozyonundan kaynaklanan hasar, hem döngüsel gerilmelerden hem de korozyondan kaynaklanan hasarın toplamından daha büyüktür.

Yorulma korozyon kırılması iki aşamada meydana gelir. İlk aşama sırasında, korozyon ve döngüsel gerilmelerin aynı anda meydana gelmesi, çukurlaşma ve çatlak oluşumu yoluyla metale zarar verir, öyle ki, korozif ortam tamamen ortadan kaldırılsa bile döngüsel gerilme nedeniyle kırılma nihai olarak meydana gelir. İkinci aşama, esasen, kırılma çatlağın yayılmasıyla ilerlediği ve esas olarak stres konsantrasyon etkileri ve metalin fiziksel özellikleri tarafından kontrol edildiği bir yorgunluk aşamasıdır. Yorulma korozyonu nedeniyle bir metal parçanın kırılması, korozyon miktarı son derece küçük olsa bile, genellikle laboratuvar havasındaki yorgunluk sınırının çok altındaki bir gerilmeye meydana gelir. Bu nedenle, değişen gerilime maruz kalan tüm parçaların korunması, özellikle hafif aşındırıcı ortamlarda bile özellikle pratik olan yerlerde önemlidir (Fleck ve Eifler, 2010).

3.7.6.8 Sürtünme korozyonu

Hafif titreşimli hareketlere maruz kaldığında yüksek yüklü metal yüzeylerin temas eden ara yüzeyinde oluşan hızlı korozyon sürtünme korozyonu olarak bilinir. Bu tür korozyon en çok, bağlantı çubukları, frezeli miller ve yatak destekleri gibi makinelerin yatak yüzeylerinde yaygındır ve genellikle bir yorulma kırılmasına neden olur. Yüksek yüklü cıvataların kullanıldığı ve cıvatalı elemanlar arasında bir miktar nispi hareketin meydana geldiği kafes kirişler gibi yapısal elemanlarda meydana gelebilir. Hava ile doğrudan teması engellemek için, makine yatak yüzeylerinde olduğu gibi, temas eden yüzeyler iyi yağlanabildiğinde sürtünme korozyonu büyük ölçüde geciktirilir.

3.7.6.9 Aralık korozyonu

Aralık veya temas korozyonu, metallerin metallerle veya metallerin ametaller ile temas ettiği bölgede oluşan korozyondur. Pullarda, kışağların altında, kum tanelerinde, uygulanan koruyucu filmlerin altında ve dişli bağlantıların oluşturduğu ceplerde meydana gelebilir. Paslanmaz çelikler çukursuz olsun ya da olmasın, bu tür korozyona karşı her zaman hassastırlar çünkü bunun için çekirdek gerekli değildir. Aralık korozyonu, bir oksijen konsantrasyon hücresinin etkisiyle başlayıp çukur oluşturmaya devam edebilir. Temas veya Aralık korozyonu, metallerin yüzeyleri birbirleriyle veya başka malzemelerle temas halinde kullanıldığında ve yüzeyler korozif ortamlarla

ısladığında veya korozif ortama maruz kalan paslanmaz çelik parçada çatlak veya yarık oluşmasına izin verildiğinde oluşur. Temizlik, sızdırmazlık maddelerinin doğru kullanımı ve koruyucu kaplamalar bu sorunu yönetmenin etkili yoludur.

3.7.7 Korozyon Giderme ve İyileştirme İşlemi

Korozyona karşı optimum koruma sağlamak için, spesifik bir uygulamaya uygun kaplama sistemleri seçilmelidir. Uygun kaplama sisteminin seçimi kaplanacak malzemeye, hizmet koşullarına, gerekli hizmet ömrüne ve mümkün olan yüzey hazırlığına bağlıdır. Metal alaşımlarının korozyon etkisinin türüne bağlı olarak ve belirli koşullar altında, bu alaşımlar taneler arası korozyona, pul pul dökülmeye ve gerilim-korozyon çatlamasına karşı hassastır. Bu nedenle, önce etkilenen yüzeylerden yağ ve kir temizlenerek ve ardından mekanik yöntemlerle veya korozyon giderici kimyasal işlem kullanılarak metal alaşımlarındaki korozyon giderilebilir. Temizlik ve korozyonun giderilmesinden sonra, uygun bir boya sistemi uygulanarak parça daha fazla korozyona karşı korunmalıdır. Kabul edilebilir prosedürler aşağıda açıklanmıştır (Weiss vd., 2006).

3.7.7.1 Yabancı maddeyi çıkarmak için temizleme

Solüsyonu püskürterek veya bir silme bezi, sünger veya fırça ile uygulayın. Bir fırça ile karıştırarak etkilenen yüzeyde birkaç dakika kalmasına izin verin. Su ile iyice durulayın. Kötü bir temizlemeye neden olabileceği için su ile durulamadan önce bileşiğin kurummasına izin vermeyin.

3.7.7.2 Korozyon giderme

Uygun olduğu şekilde tel fırçalama veya aşındırıcı püskürtme gibi mekanik yöntemlerle korozyonu giderin. Tüm kalıntıların yeterince temizlenmemesi, korozyonun devam etmesine sebep olacaktır. Kanallar ve borular gibi ince elemanlardan hafif düzeydeki korozyon giderilebilir.

3.7.7.3 Yüzey işlemleri

Bir kimyasal dönüşüm kaplaması veya koruyucu bir boya sisteminin uygulanmasıyla korozyon koruması sağlanabilir. Mümkünse koruyucu bir boya sistemi kullanılmalıdır çünkü kimyasal dönüşüm kaplamasından daha fazla korozyon koruması sağlar.

3.7.7.4 Benzer olmayan malzemelerle temas

Çelik elemanlarla veya diğer farklı malzemelerle temas eden veya bunlara bağlanan alüminyum alaşımlı parçalar, çelik veya diğer farklı malzemelerle doğrudan temastan uzak tutulmalıdır.

3.7.7.5 Boya sökme (gerektiğinde)

Yüzey temizlendikten sonra artık boya veya astar mekanik veya kimyasal işleme çıkarılabilir.

3.7.7.6 Kimyasal yöntem

Kimyasal korozyon giderme yöntemleri, kullanılan kimyasalın boşluklara hapsolme tehlikesi bulunmadığında ve bitişik malzemelere zarar verme tehlikesi olmadığında kullanılabilir.

3.7.7.7 Asitli temizleme

Isıl işlem tortusunu, akıyı, korozif ortamı, lekeleri ve diğer kirleticileri çıkarmak için asitli temizleme, burada belirtilen sınırlar dahilinde yapılacaktır. Asitli temizleme, malzemenin veya parçanın üretimi veya kullanımına zarar verebilecek taneler arası etkileşime neden olmamalıdır. Taneler arası etkileşim, yüzey tanelerini tamamen çevrelediğinde ve yüzeyle birlikte sürekli veya yarı sürekli birbirine bağlı bir örüntüde olduğunda zararlı olarak değerlendirilecektir.

3.7.7.8 Koruyucu kaplama uygulaması

Paslanmaz elik bileşenler gereksinimlere göre boyanmalıdır. Bazı bölgelerde şiddetli korozif koşullar beklendiğinde koruyucu kaplamalar uygulanmalıdır. Korozif ortamla uyumlu bir koruyucu kaplama seçilmelidir (Knudsen ve Forsgren, 2017).

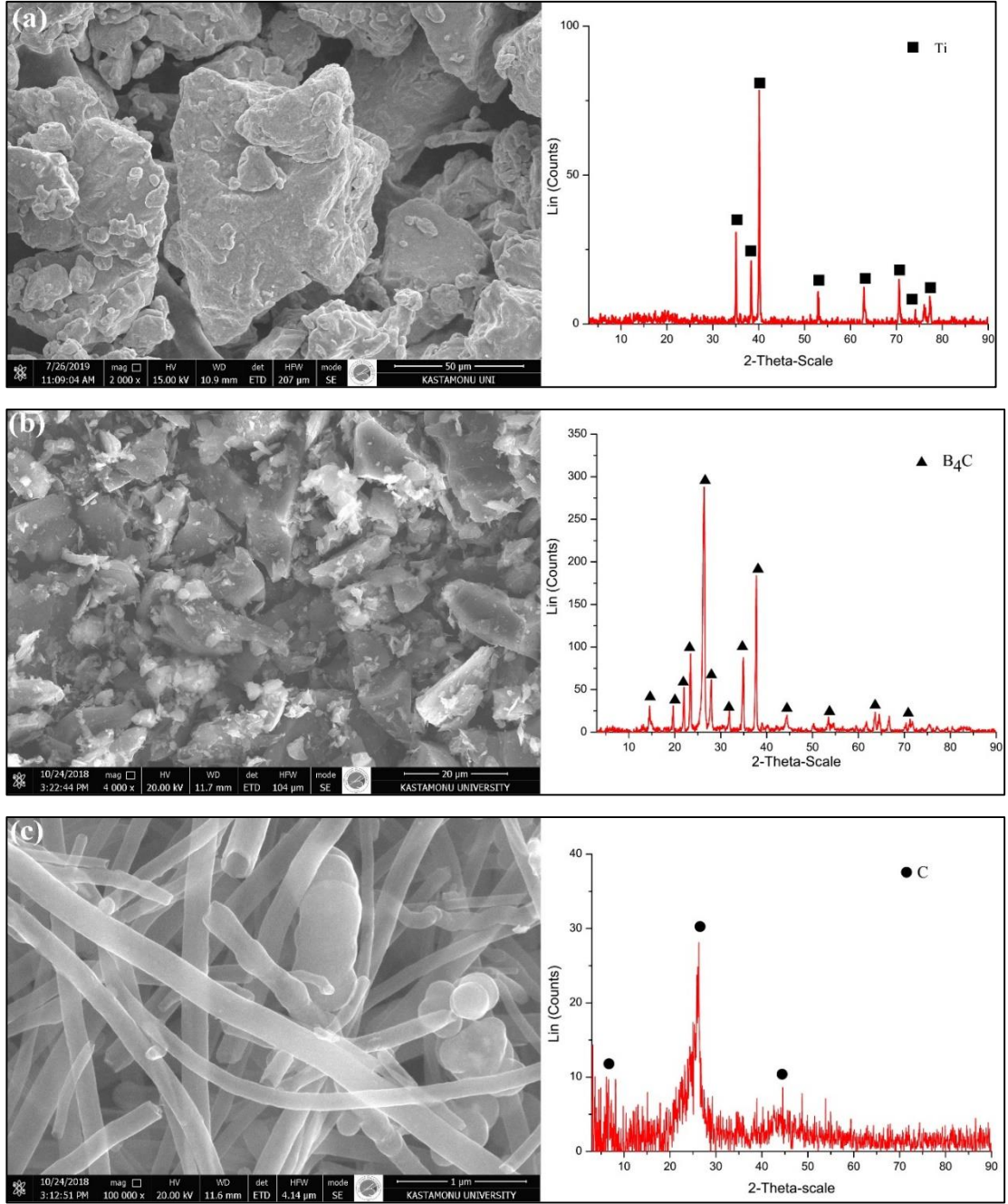
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kompozitlerin Hammaddeleri ve Üretimi

Bu çalışmada, matris olarak titanyum (Ti) ve takviye olarak bor karbür (B₄C) ve karbon nanofiber (KNF) kullanılmıştır. %99 saflıkta ve <45 µm boyut aralığında Ti tozu; %99 saflıkta ve <45 µm boyut aralığında B₄C tozu; ve %98 saflıkta KNF tozu ve 100 nm×20–200 µm boyut aralığında D×L, Sigma- Aldrich Firmasından temin edilmiştir. Kullanılan tozların özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tozların SEM görüntüleri ve XRD desenleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Ti tozu düzensiz (kısmen süngerimsi) şekillidir ve B₄C tozu keskin köşeli bir şekle sahiptir. KNF'nin fiber benzeri bir şekli vardır. XRD desenlerine bakıldığında, tozlarda üretim öncesi oksit oluşumu olmadığı anlaşılabilir.

Tablo 4.1 Tozların saflık ve tane boyutu değerleri

Tozlar	Ti	B ₄ C	CNF
Tane büyüklüğü	<45 µm	<45 µm	D×L 100 nm×20-200 µm
Saflık (%)	99	99	>98



Şekil 4.1 (a) Ti, (b) B₄C ve (c) KNF tozların SEM görüntüleri ve XRD desenleri

Numune hazırlama, aşağıdaki adımlarda özetlenebilecek birkaç aşamadan oluşur:

4.1.1 Hesaplama

Öncelikle numunenin her tabakasının hacmi hesaplanmıştır (V).

$$V = L \times W \times h \quad (4.1)$$

Burada:

W: Numunenin genişliği

L: Numunenin uzunluğu

h: Tabakanın kalınlığı

$$V = 2,4 \times 1 \times 0,15$$

$$V = 0,36 \text{ cm}^3$$

$$\%5 V = 0,36 \times 0,05 = 0,018 \text{ cm}^3$$

$$\%95 V = 0,36 \times 0,95 = 0,342 \text{ cm}^3$$

Ardından yoğunluk ile her tabaka için gereken kütle hesaplanmıştır.

$$\text{Kütle (m)} = \text{Hacim (v)} \times \text{Yoğunluk } (\rho) \quad (4.2)$$

$$m_{(\%100 \text{ Ti})} = v \times \rho_{(\text{Ti})}$$

$$m_{(\%100 \text{ Ti})} = 0,36 \times 4,5$$

$$m_{(\%100 \text{ Ti})} = 1,62 \text{ gr} \text{ (Bu, orta tabakanın net ağırlığıdır.)}$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti})} = v \times \rho_{(\text{Ti})}$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti})} = 0,342 \times 4,5$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti})} = 1,539 \text{ gr}$$

$$m_{(\%5 \text{ B4C})} = \%5 v \times \rho_{(\text{B4C})}$$

$$m_{(\%5 \text{ B4C})} = 0,018 \times 2,52$$

$$m_{(\%5 \text{ B4C})} = 0,04536 \text{ gr}$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti}-\%5 \text{ B4C})} = m_{(\%95 \text{ Ti})} + m_{(\%5 \text{ B4C})}$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti}-\%5 \text{ B4C})} = 1,539 + 0,04536$$

$$m_{(\%95 \text{ Ti}-\%5 \text{ B4C})} = 1,584 \text{ gr} \text{ (Numune için birinci veya üçüncü tabakasının net ağırlığıdır.)}$$

Tablo 4.2 Numunelerin Ağırlığı

Tabakalar	Numune (gr)
1. tabaka	1,584
2. tabaka	1,620
3. tabaka	1,584

Tablo 4.3 Numunelerin toz ağırlıkları

Numuneler	Tabakalar		
	1. Tabaka (g)	2. Tabaka (g)	3. Tabaka (g)
Ti + %5 B ₄ C	1,584	1,62	1,584
Ti + %10 B ₄ C	1,5487	1,62	1,5487
Ti + %15 B ₄ C	1,5130	1,62	1,5130
Ti + %5 B ₄ C+%0,5CNF	1,5796	1,62	1,5796
Ti + %10 B ₄ C+%0,5CNF	1,543	1,62	1,543
Ti + %15 B ₄ C+%0,5CNF	1,508	1,62	1,508
Ti	5,4		
Ti + %5 B ₄ C	5,2812		
Ti + %5 B ₄ C + %0,5CNF	5,2656		

Tozların tartım işlemi Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan 10⁻⁴ hassasiyetindeki AND GR-200 marka hassas bir terazi ile yapılmıştır. Fotoğraf 4.1'de, kullanılan terazinin fotoğrafı görülmektedir.



Fotoğraf 4.1 Hassas terazi

4.1.2 Karıştırma

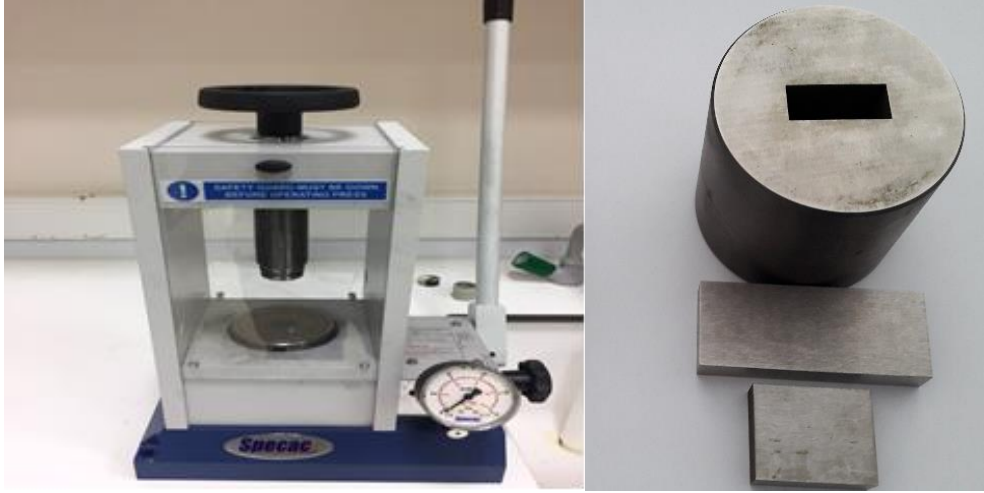
Karıştırma işlemi için tozlar, 20 rpm hızda 45 dakika Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan toz karıştırma turbulasında karıştırılmıştır. Kullanılan toz karıştırma turbulası Fotoğraf 4.2'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 4.2 Toz karıştırma turbulası

4.1.3 Presleme

Presleme işleminde toz, 24 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 1.5 mm kalınlığında tabakaları oluşturmak için bir kalıba yerleştirildi. Takviye tozu, ardından toz matrisi ve tekrar takviye tozu yerleştirildikten sonra kompozit 500 MPa basınçta preslenerek 24 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 4,5 mm kalınlığında FDM numuneler ve FDM'siz numuneler üretilmiştir (her tabaka 1,5 mm olacak şekilde 3 tabaka halinde üretilmiştir). Presleme işlemi, Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Specac marka GS15011 model hidrolik pres ile yapılmıştır. Fotoğrafta gösterilen kalıp kullanılmıştır.



Fotoğraf 4.3 Pres makinesi ve kullanılan kalıp

4.1.4 Sinterleme

Numuneler koruyucu argon gazı atmosferi altında tüp fırında (1800 °C maksimum) sinterlendi. Sinterleme sıcaklığı 1300 °C, sinterleme süresi 60 dakika, ısıtma ve soğutma hızı 10 °C/dk alındı. Numunelerin sinterleme işlemi Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını (Protherm) kullanılarak gerçekleştirildi.(Fotoğraf 4.4)



Fotoğraf 4.5 Tüp fırın

4.2 Uygulanan Testler

- Üç nokta eğme testi

- Yoğunluk ölçümü
- Sertlik testi
- Metalografik Çalışmalar
- Mikroyapı İncelemeleri (Optik mikroskop, SEM-EDS ve XRD)
- Korozyon Testi

4.2.1 Üç Nokta Eğme Testi

Çapraz kırılma dayanımını belirlemek için üç nokta eğme testi, Şekil 4.1’de gösterildiği şekilde, 1 mm/dak test hızında, 50 kN kapasiteli universal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi için 4,5 mm × 10 mm × 24 mm ölçülerinde numuneler kullanılmıştır.

Çapraz kırılma dayanımını belirlemek için;

$$P = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.3)$$

formül kullanıldı. Burada;

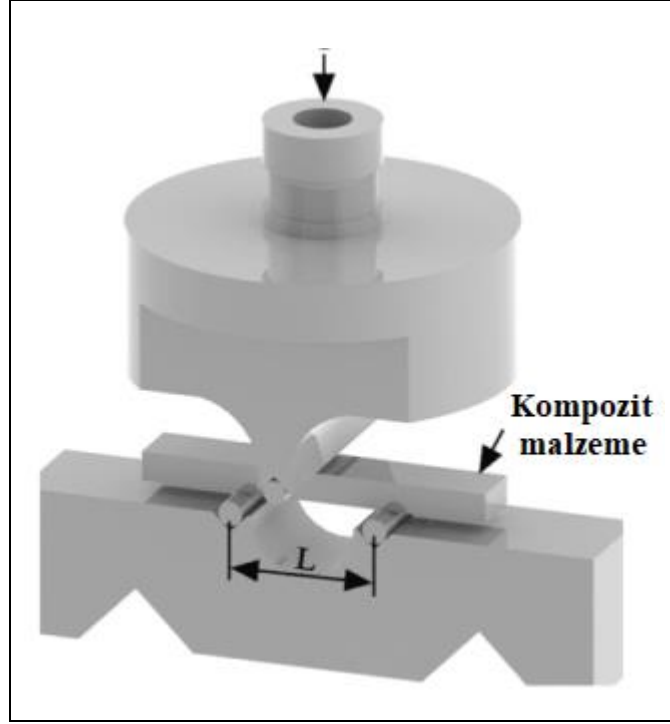
P= Çapraz kırılma mukavemeti (MPa)

F= Kopma zamanında numuneye uygulanan kuvvet (N)

L= Destek noktaları arasındaki mesafe (mm)

b= Numune genişliği (mm)

h= Numune yüksekliği (mm)



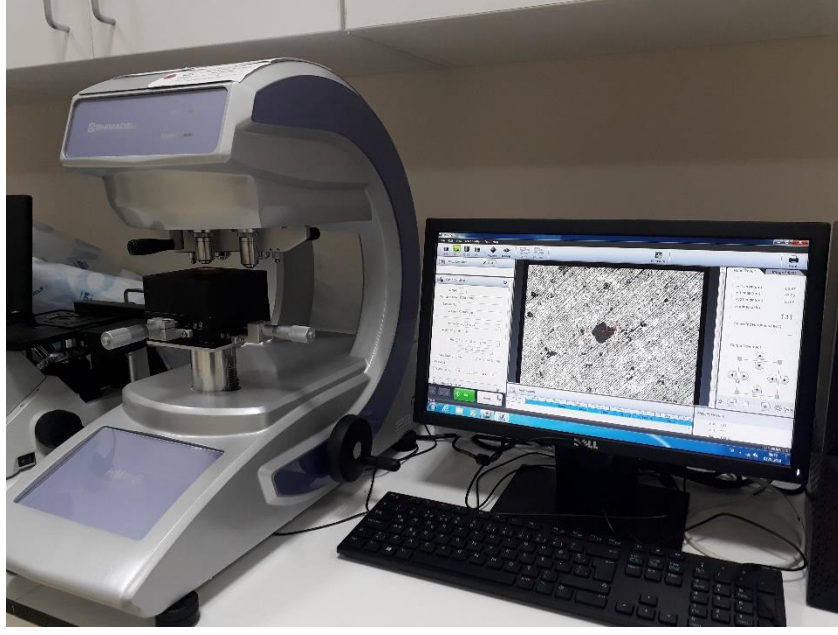
Şekil 4.2 Üç nokta eğme testi düzeneği

4.2.2 Yoğunluk Ölçümü

Her kompozitin deneysel yoğunluğu, kompozit bileşenlerin yoğunluklarına bağlıdır. Bor karbür ($2,52 \text{ g/cm}^3$) ve KNF ($1,9 \text{ g/cm}^3$)'nin yoğunluğu titanyumunkinden ($4,50 \text{ g/cm}^3$) daha düşük olup, tüm numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibi ile ölçülmüştür.

4.2.3 Sertlik Testi

Üretilen numunelerin sertlik seviyesini belirlemek için, 200 gr yükte Vickers sertlik test cihazını kullandık. Sertliğin doğru tespiti için, sertlik değerleri, farklı bölgelerden ölçülmüştür; böylece her numuneden üç sertlik değeri alınmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan “SHIMADZU” marka “HMV-G21” model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Fotoğraf 4.5).



Fotoğraf 4.6 Vickers sertlik test cihazı

4.2.4 Metalografik Çalışmalar

Metalografik incelemeler için, elde edilen metalografi numuneleri 60-1200 mesh zımpara kağıtlarla zımparalanmıştır. Daha sonra, numunelerin yüzeyleri elmas sprej yardımı ile parlatılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için, numuneler 5gr FeCl₃ + 100ml saf su+50ml HCl solüsyonu içinde 20 saniye boyunca dağlanmıştır. Fotoğraf 4.6 Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan Metkon GRIPO 2 marka ve model zımparalama ve parlatma cihazı göstermektedir.



Fotoğraf 4.7 Zımparalama ve parlatma makinesi

4.2.5 Mikroyapı İncelemeleri (SEM-EDS ve XRD)

Numunelerin mikroyapısını ve kırılma yüzeylerini analiz etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (FEI QUANTA 250 FEG) SEM kullanıldı. SEM'in yanı sıra numunenin mikroyapısal kimyasal bileşimini analiz etmek için EDS analizi yapıldı. İlâveten, mikroyapının faz oluşumunu belirlemek için X-ışını difraksiyonu (XRD) gerçekleştirildi. Bu amaçla Bruker D8 Advance XRD marka cihaz kullanılmıştır. Fotoğraf 4.7 mikroyapı görüntüleme ve faz analizinde kullanılan cihazları göstermektedir.



Fotoğraf 4.8 Görüntüleme ve faz analizi tespiti için kullanılan cihazlar: (a) SEM ve (b) XRD

4.2.6 Korozyon Testi

%37'lik konsantre HCl'nin 25 ml'si 75 ml saf su eklenerek 100 ml'ye seyreltilerek koroziv çözelti (elektrolit) hazırlandı. Elektrokimyasal/korozyon hücresi, elektrokimyasal deneylerde uygulanan üç elektrottan oluşuyordu. Grafit, karşı elektrot olarak kullanıldı. Doymuş kalomel elektrot (SCE) referans elektrotu olarak kullanıldı (Sathujoda vd., 2020). Çalışma elektrodu FGM'lerden hazırlandı. Potansiyodinamik polarizasyondan (PDP) oluşan korozyon Testleri 3 M HCl solüsyonunda oda sıcaklığında 30 dk sonra açık devre potansiyelinde (OCP) dengeye ulaşıncaya kadar gerçekleştirilmiştir. Tafel ölçümünü gerçekleştirmek için Gamry Potentiostat / Galvanostat (model Reference 3000) kullanıldı. Korozyon testinde kullanılan korozyon test sistemi Fotoğraf 4.8 'de gösterilmektedir. Polarizasyon taraması çalışma elektrodu ca. -250 mV ila 250 mV'a 1 mVs⁻¹ tarama hızında gerçekleşti. Her deneyden önce, çalışma elektrodu yüzeyi 400, 600, 800 ve 1200 silisyum karbür zımpara kağıdı ile zımparalandı, daha sonra; yüzey ayna benzeri bir yüzey pürüzlülüğü elde etmek için elmas sprej yardımı ile parlatılmış ve ardından saf su ile dikkatlice durulanmıştır. Bundan sonra, elektrot etanol ile yağdan arındırıldı ve sonra sıcak hava ile kurutuldu. Ardından, epoksi reçine, çözelti maruziyetleri için kullanılabilecek 1,4 cm²'lik bir alan bırakarak numuneyi korumak için kullanıldı. Tüm akım ve potansiyel ölçümleri, elektrotun yüzey alanına göre normalize edildi.

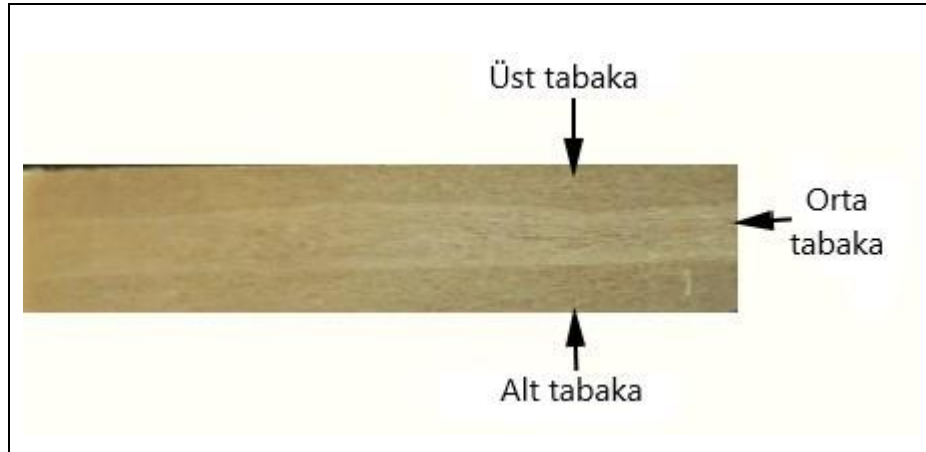


Fotoğraf 4.9 Korozyon Ünitesi

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Sonuçları

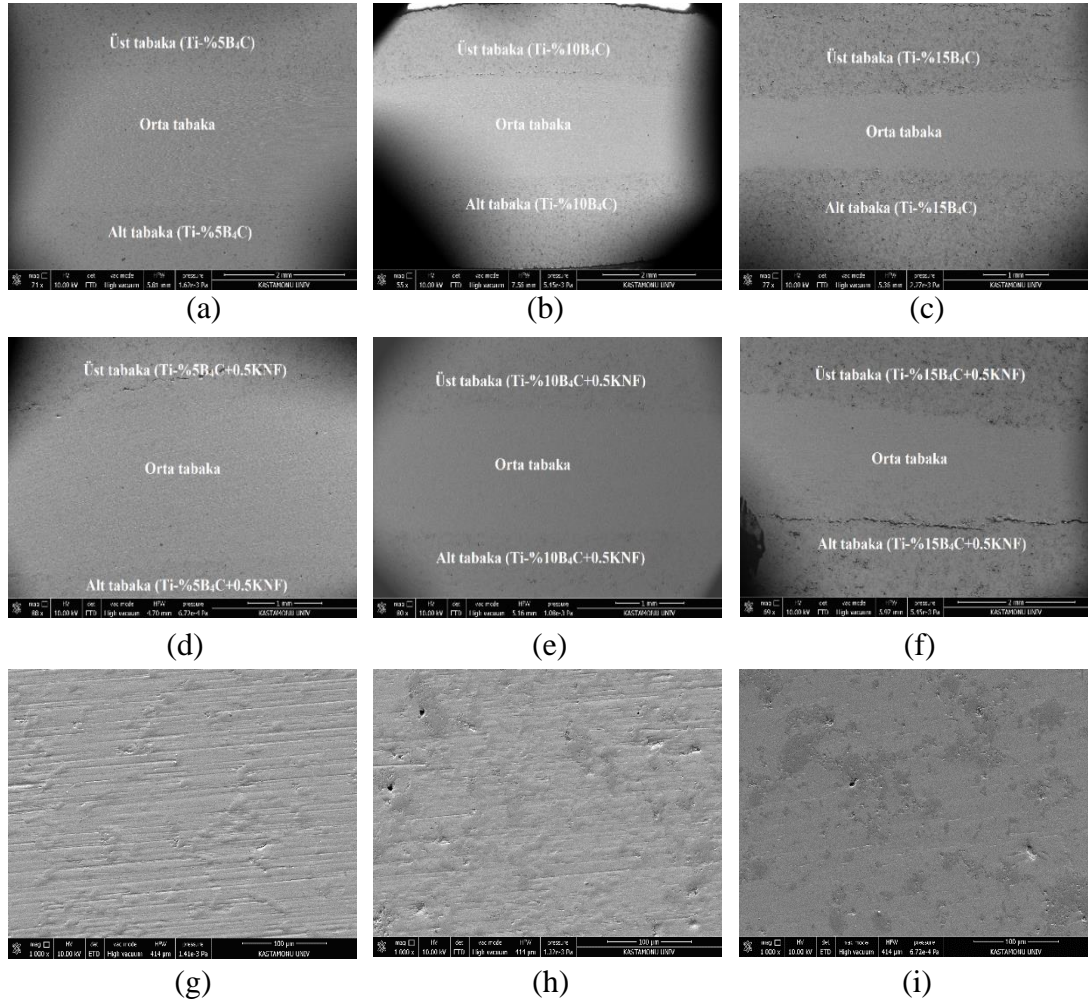
Fotoğraf 5.1’de 1 numaralı FDM’nin makro fotoğrafı bu çalışmadaki FDM’leri temsilen verilmiştir. Herbir katman yaklaşık 1.5 mm olarak üretilmiştir. Üst ve alt tabaka Ti-5 hacim% B₄C kompozit yapısında iken orta tabaka saf titanyumdan oluşmaktadır. Katmanlar arası uyumlu bir bağlanma meydana gelmiştir. Makro fotoğrafta herhangi bir çatlak oluşumu meydana gelmemiştir. Fakat katmanlar arası bileşim çizgisinde dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bunun soğuk presleme esnasında sıkıştırmadan kaynaklandığı düşünülmektedir..



Fotoğraf 5.1 1 nolu FDM numunesinin makro görüntüsü

Titanyum esaslı FDM ve bulk malzemelerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) sonuçlarında bulduğumuz mikroyapı incelemesi Fotoğraf 5.2’de gösterilmiştir. Bu fotoğraflarda üçlü (kompozit-orta-kompozit) tabakalar ve bu bölgelerin büyütülmüş fotoğrafları ve arayüzey kısımları da dahil detaylı olarak görülmektedir. Kompozit tabakalar ve orta kısım açıkça ayırt edilmektedir. B₄C ve KNF taneleri benzer bir şekilde ve titanyum matris içinde nispeten homojen bir şekilde dağılmıştır. Bu seramik partiküller, titanyum tanelerinin topladığı kısımlarda bulunmaktadır. Ara yüzeyde herhangi bir kırılma ve çatlak oluşumu olmadı, ancak mikroyapıda çok az gözenek oluşumu meydana geldi. FDM’siz bulk haldeki saf titanyum numunesi ve B₄C ve KNF tanelerini içeren kompozit numunelerin titanyum matrisi içinde nispeten homojen bir şekilde dağıtılmış olduğu görülmektedir. Takviye tozlarının titanyum matris içinde

homojen bir şekilde dağılması, yoğunlukta ve oluşan kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamıştır.

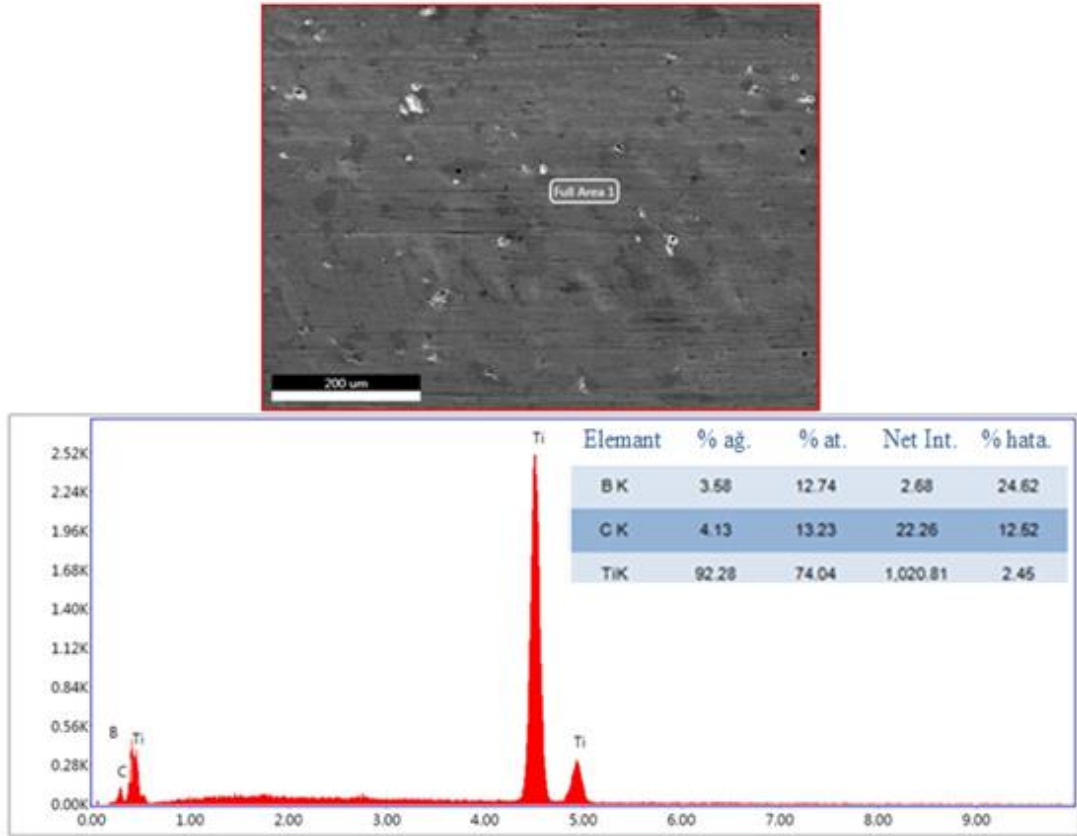


Fotoğraf 5.2 FDM ve bulk numunelerin SEM görüntüleri: (a) (Ti+%5B₄C) FDM. (b) (Ti+%10B₄C) FDM. (c) (Ti+%15B₄C) FDM. (d) (Ti+%5 B₄C+%0,5 KNF) FDM. (e) (Ti+%10B₄C+%0,5 KNF) FDM. (f) (Ti+%15B₄C+%0,5 KNF) FDM. (g) Saf Ti. (h) (Ti+%5B₄C). (i) (Ti+%5 B₄C+%0,5 KNF)

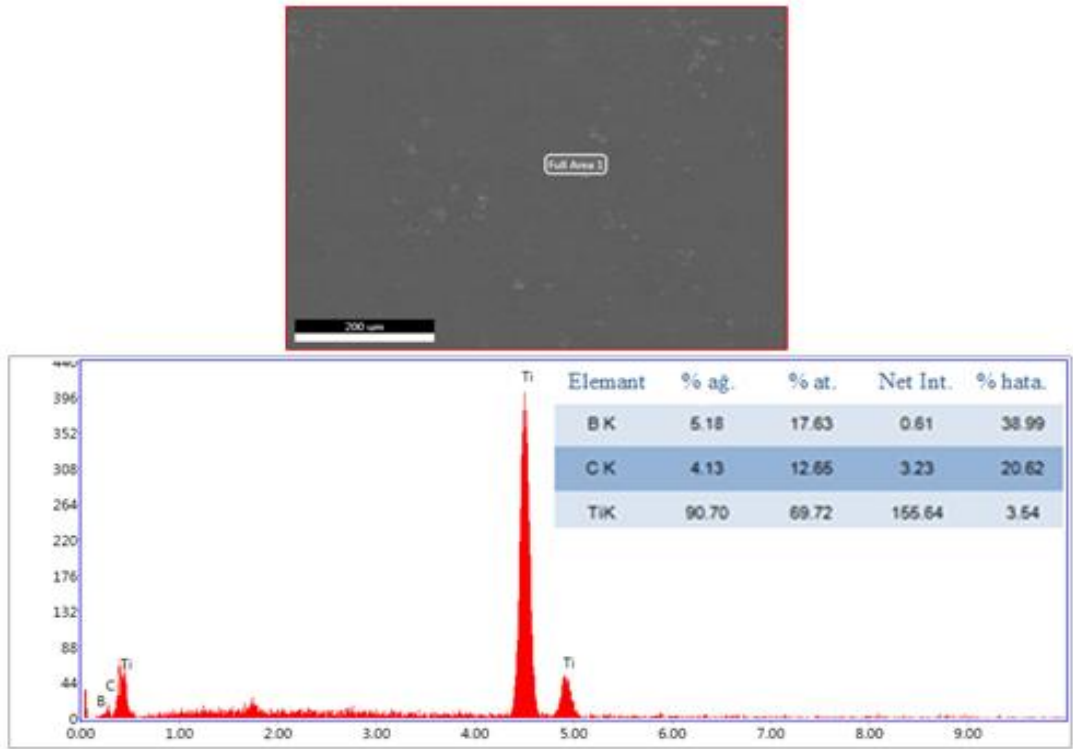
5.2 EDS (Enerji Dağılımlı Spektrometre) Sonuçları

Fonksiyonel derecelendirilmiş titanyum matris bor karbür ve karbon nano fiber takviyeli kompozit malzemelerin numunelerinin matris ve takviyesi, Grafik 5.1'den Grafik 5.3'ye kadar olan grafiklerden gösterilen matris ve takviyelerden farklı noktaları seçtikten sonra oluşan kimyasal bileşimleri belirlemek için EDS (Enerji-Dağılımlı Spektrometre) tekniği kullanılarak analiz edildi. FDM malzemelerinde üst ve alt tabakaların EDS analizlerinde temel elementler Ti, B ve C olarak çıkmıştır. Buda seçilen EDS alanlarının kompozit tabakalar olduğunu desteklemektedir. Ti+%5 B₄C

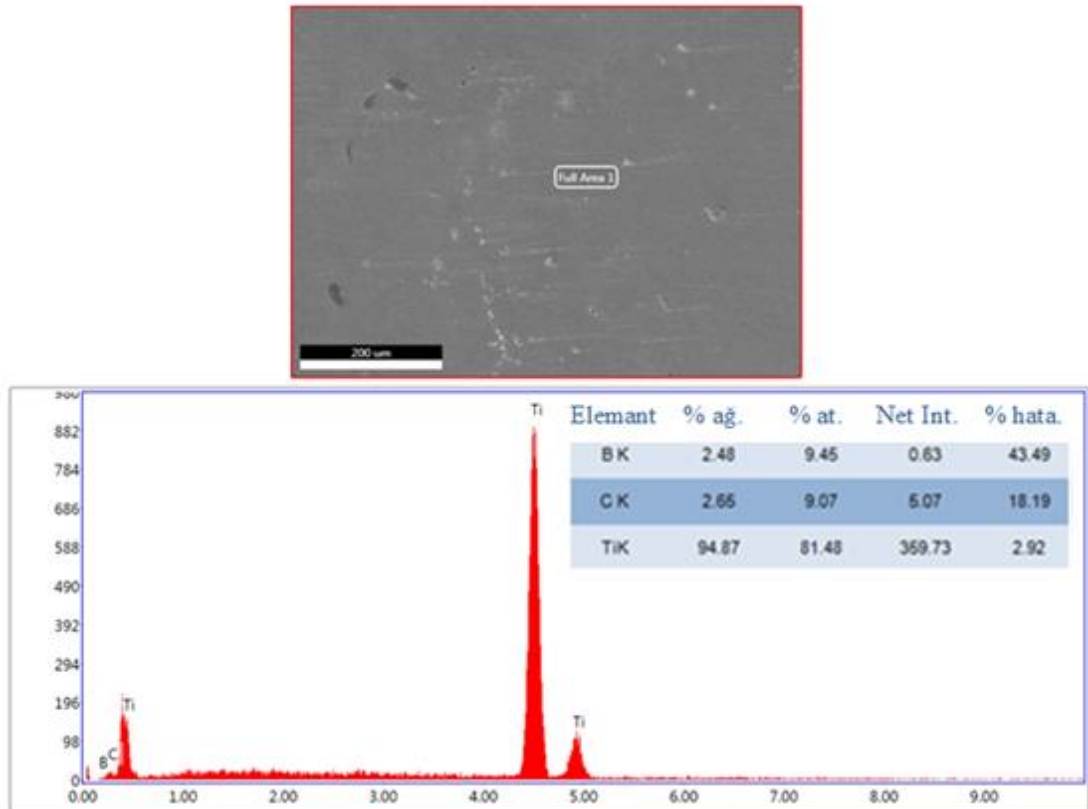
FDM numunesinde Ti, titanyumu, B, bor karbürü ve C ise bor karbürdeki karbonu temsil etmektedir. Ti+%5 B₄C+%0,5 KNF FDM numunesinde ise bir önceki numuneye ilaveten C, ayrıca karbon nano fiberi de temsil etmektedir. FDM'lerin orta bölgesinden alınan EDS analizlerinde de yine Ti, B ve C elementlerine rastlanmıştır. Bu da seçilen alanın arayüzey bölgelerinde içine almasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Grafik 5.1 (Ti+%5 B₄C) kompozit tabakasının EDS analizi



Grafik 5.2 (Ti+%5 B₄C+%0,5 KNF) kompozit tabakasının EDS analizi

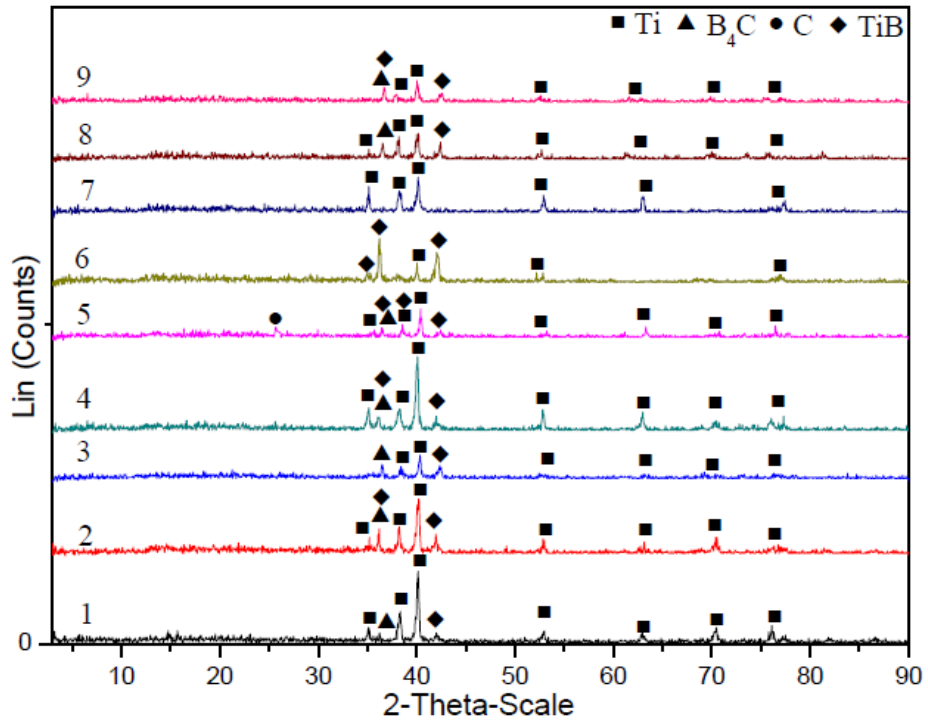


Grafik 5.3 Ti orta tabakasının matris katmanının EDS analizi

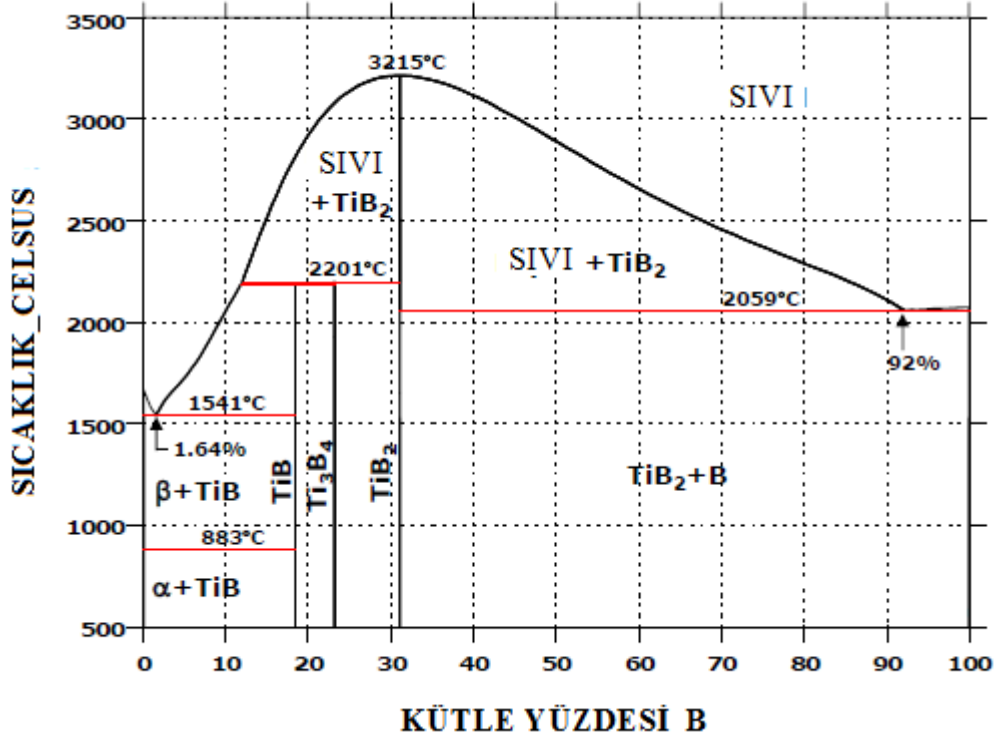
5.3 XRD (X-ışını Kırınımı) Sonuçları

Grafik 5.4'de, verilen numunelerin XRD analiz grafiği verilmiştir. Malzeme üretim aşamasında malzemeyi oluşturan bileşenler arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olup olmadığını belirlemek için XRD analizi yapılmıştır. Çünkü yeni oluşan fazlar bir malzemenin mekanik özelliklerini değiştiren mikro yapısal bir değişikliğe neden olurlar (Shufeng vd., 2015; Namini vd., 2017). Kompozit tabakalarının üst yüzeyleri de analiz edildi. XRD analiz grafiğine göre mikroyapıda Ti, B₄C, C ve TiB fazları oluşmuştur. Ti, B₄C ve C malzeme üretiminde kullanılan bileşenler olmasına rağmen, TiB yeni oluşan bir fazdır. (Li vd., 2016) yaptıkları çalışmada bu yeni fazı (TiC–TiB)/Ti kompozitinde tanımlamışlardır. Yazarlar, bu fazların Ti ve B₄C arasındaki kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak meydana geldiğini bildirmişlerdir. Çalışmamızda kompozitteki B₄C miktarı arttıkça bu fazın pik yoğunluğu artmıştır. Ayrıca, XRD grafiğinden oksit oluşumunun olmadığı açıkça görülebilir. Kompozitteki KNF miktarı çok küçük olduğu için, XRD analizinde 5 numaralı numune dışında, numunelerde KNF tespit edilmedi. Buna ek olarak, grafik incelendiğinde, Ti, TiB, ve B₄C fazlarının baskın olduğu açıktır. Sinterleme işlemi esnasında, TiB ve B₄C fazları Ti, C, ve B elementleri arasında oluşmuştur. Çok az miktarda C fazı da gözlemlendi. Ti ve B₄C miktarı arttıkça, B₄C ve TiB fazlarının yoğunluğu artmıştır (Nazarian-Samani vd., 2010). Saf titanyum grafiğinin 2θ=35, 38, 40°'da üç tane ana tepe noktası vardır. Bu tepe noktalar ilk grafikte de görülebilir, ancak bazı safsızlık pikleri B₄C'ye aittir. Birinci ((Ti+%5 B₄C) FDM) ve yedinci (Ti saf-FDM olmayan) numunelerin XRD desenleri karşılaştırıldığında, artan B₄C ilavesiyle 36 açısında titanyum pikinin yoğunluğunun azaldığı ve 41 açısında pikin arttığı açıkça görülmektedir. İkinci ve üçüncü grafiklerde görüldüğü gibi, B₄C takviye miktarının artması pik yoğunluklarının azalmasına neden olmuştur. Bu, HCP (Hegzagonal sıkı paket) yapının düzlemlerinin azaldığı anlamına gelir. Dördüncü grafik, ilk numuneye eklenen %0,5 KNF'yi temsil eder. Birinci ve dördüncü numuneler, KNF ilavesinin kristal yapıda safsızlıklara neden olduğunu göstermektedir. TiB piki 2θ=38° 'de gözlemlendi. Bu safsızlık, kristal yapıda bazı kusurlara yol açabilir. KNF ilavesi kristal yapıdaki safsızlıkları artırdı, böylece safsızlık pikleri ve piklerin yoğunlukları arttı. Titanyum-bor sisteminin denge fazları Grafik 5.5'da gösterilmektedir. Ti-B ikili sisteminin teknik açıdan önemli titanyum açısından zengin bölümü (sıvı → beta titanyum + TiB)

ağırlıkça %1,64 B (6,88 at. % B) ve 1541°C’de ötektik bir reaksiyona sahiptir. TiB, hızla tane sınırlarına ayrılma eğilimindedir ve borun kendisi, yüksek sıcaklıklı BCC (beta) ve düşük sıcaklıklı HCP (alfa) titanyumda gözardı edilebilir katı çözünebilirliğe sahiptir. Titanyum bazlı alaşımların mukavemeti ve esnemezliği, TiB intermetalik fazın çökmesiyle artırılabilir. Ancak, süneklik ve kırılma tokluğu sadece bor miktarı ötektik bileşimden daha az olduğu zaman korunur (hipo-ötektik Ti-B alaşımları). Diğer alaşım elementleri eklendiğinde ötektik noktanın önemli ölçüde değişebileceğini vurgulamak önemlidir.



Grafik 5.4 Titanyum matris ve B₄C, KNF Takviyesi için XRD desenleri (1-(Ti+%5B₄C)FDM, 2-(Ti+%10B₄C)FDM, 3-(Ti+%15 B₄C)FDM, 4-(Ti+%5 B₄C+0,5KNF)FDM, 5-(Ti+%10 B₄C+0,5KNF)FDM, 6-(Ti+%15 B₄C+0,5KNF)FDM, 7-(Ti saf) FDM’siz, 8-(Ti+%5 B₄C) FDM’siz, 9-(Ti+%5 B₄C+0,5KNF) FDM’siz)



Grafik 5.5 Ti-B faz diyagramı (Gorunov, 2019)

5.4 Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Numunelerin teorik yoğunlukları, deneysel yoğunlukları, bağıl yoğunlukları ve gözeneklilikleri Grafik 5.6’da verilmiştir. Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\rho_T = V_{Ti}\rho_{Ti} + V_{B4C}\rho_{B4C} + V_{KNF}\rho_{KNF} \quad (5.1)$$

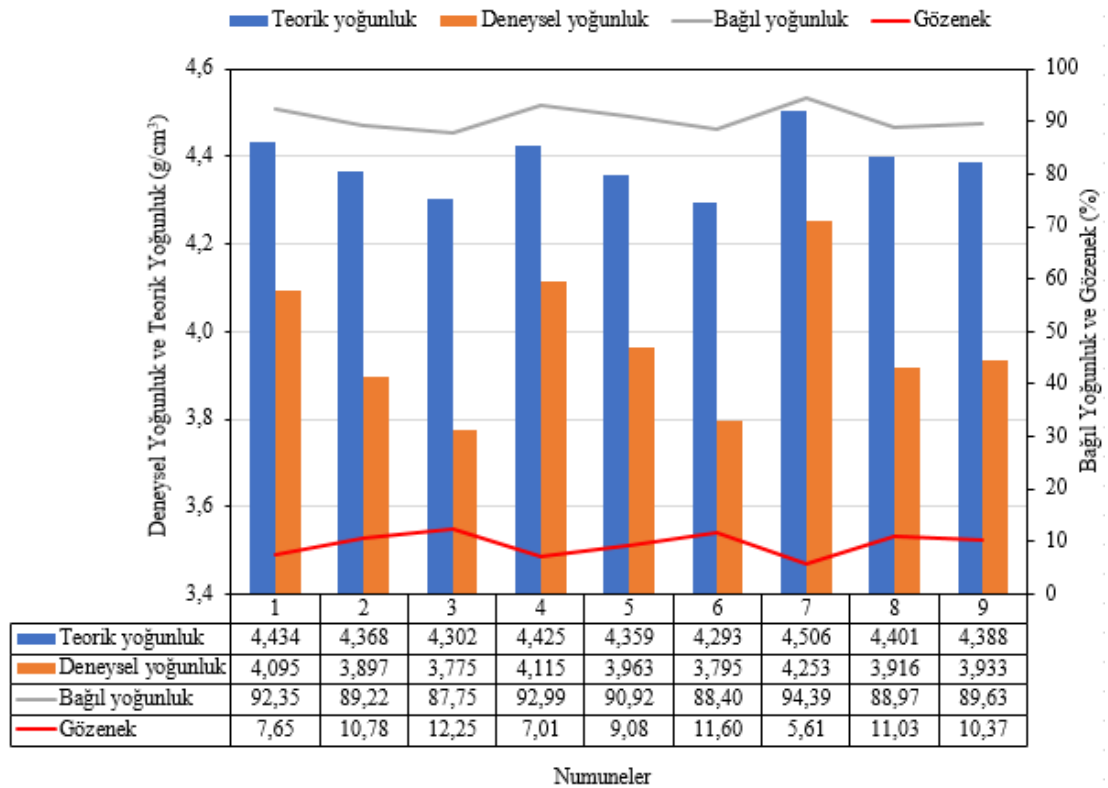
Burada, ρ_T son numunenin teorik yoğunluğudur. ρ_{Ti} Ti’nin teorik yoğunluğu 4,506 g/cm³, ρ_{B4C} B₄C’nin teorik yoğunluğu 2,520 g/cm³ ve ρ_{KNF} KNF’nin teorik yoğunluğu 1,900 g/cm³’dür. V_{Ti} , V_{B4C} ve V_{KNF} ilgili matris ve takviyelerin hacim oranlarıdır (Islak vd., 2012). Numunelerin deneysel yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Numunelerin bağıl yoğunlukları aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\rho_B = \rho_D / \rho_T \times 100 \quad (5.2)$$

Burada ρ_B bağıl yoğunluğu (%), ρ_D deneysel yoğunluğu (g/cm^3) ve ρ_T teorik yoğunluğunu ifade etmektedir (g/cm^3)(Namini vd., 2017). Numunelerin gözenekliliği aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$P = 1 - \rho_B \times 100 \quad (5.3)$$

Burada, P gözenekliliği (%) ve ρ_B bağıl yoğunluğu (%) ifade etmektedir (Popescu vd., 2010). B_4C ve KNF ilavesiyle numunelerin deneysel yoğunluklarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum B_4C ve KNF'nin yoğunluklarının Ti 'dan daha düşük olmasıyla ilgilidir. Teorik ve deneysel yoğunlukların oranlanması sonucu elde edilen bağıl yoğunluklar B_4C ve KNF'nin ilavesiyle azalmıştır. Bu durum artan B_4C oranının sıkıştırılabilirliği olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir (Rahimian vd., 2009). Fakat KNF'ler kısmen mikro boşluklara girdiği için bağıl yoğunlukları düşürme etkisi daha azdır. Bu olayların sonucunda B_4C oranının artışı numunelerin gözenekliliklerinin artmasına neden olurken, KNF ise kısmen gözenekliliği azaltmıştır.



Grafik 5.6 Numunelerin yoğunluğu ve gözenekliliği

5.5 Sertlik Testi Sonuçları

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen FDM ve bulk malzemelerin sertlik değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. FDM'lerde sertlik ölçümü üç tabakadan alınırken, bulk malzemelerde tüm yüzeylerden alınmıştır. Tabakaların ve bulk malzemelerde farklı noktalarından beş ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak sertlik değerleri hakkında değerlendirme yapılmıştır. Orta tabakanın sertliği yaklaşık 191 HV_{0.2} iken, kompozit tabakaların sertlikleri % 5, 10 ve 15 B₄C için sırasıyla 363 HV_{0.2}, 453 HV_{0.2} ve 510 HV_{0.2} olarak ölçülmüştür. Bu üç numuneye hacimce %0,5 KNF ilave edildiğinde sertlikler % 5, 10 ve 15 B₄C için sırasıyla 385 HV_{0.2}, 472 HV_{0.2} ve 522 HV_{0.2} olarak değişim göstermiştir. Bulk halindeki numunelerin sertlikleri de yine FDM'deki benzer bileşime sahip kısımla benzer değerler ölçülmüştür. Bor karbür miktarındaki artış ve karbon nanofiber ilavesiyle malzemelerin sertliklerinde artış olduğu çok açıktır. Bu durum bir kaç yolla açıklanabilir. Birinci olarak, Ti matris içerisine takviye edilen B₄C ve KNF'in sertliklerinin Ti'unkinden yüksek olmasıdır. Böylece sert takviyeler, kompozitin plastik deformasyonunu sınırlandırır ve sertliğini artırır. İkinci olarak, Ti matris içindeki takviyelerin dislokasyonların hareketini engelleyici role sahip olmalarıdır (Rahimian vd., 2010; Sajjadi vd., 2011; Buytoz vd., 2014; Islak, 2019). KNF ilavesiyle değerlerindeki değerindeki artışın diğer bir sebebi de KNF'lerin gözeneklere girerek gözenekliliği azaltmasıdır. Bu durumda sertlikte artış gözlenir (Bastwros vd., 2013; Islak vd., 2017). B₄C ve KNF takviyeli numunelerin sertliği, saf Ti numunesine göre daha yüksektir. Bu artış, karbürlerin varlığı ve sert fazların oluşumu ile ilişkilidir. B₄C ve KNF'nin eklenmesi TiB fazının oluşumuna yol açmış ve sonuç olarak sertliğin artmasına katkıda bulunmuştur (Otsuka ve Ren, 2005).

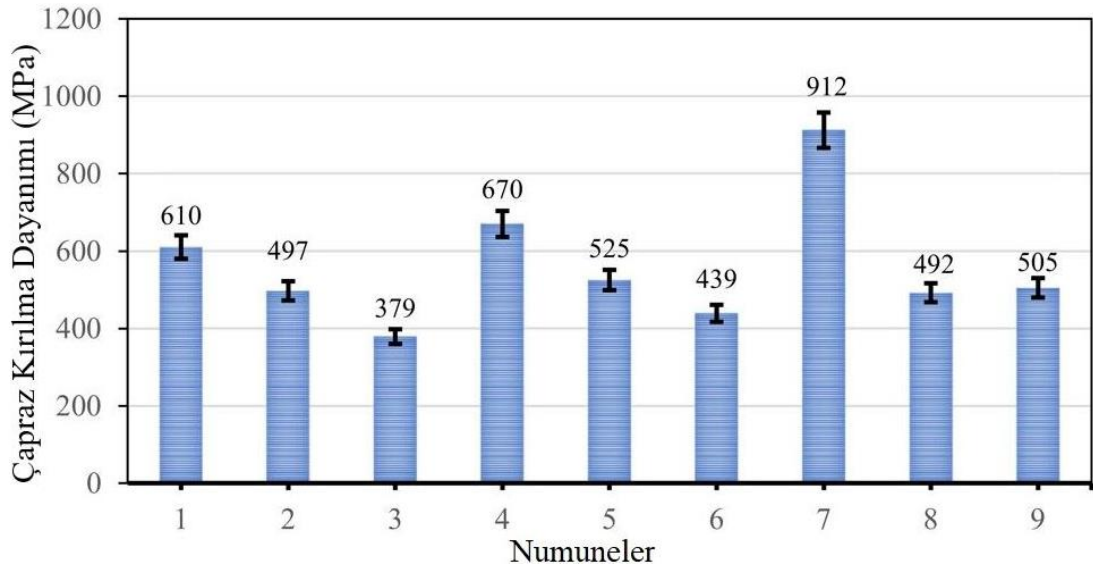
Tablo 5.1 Numunelerin sertlik değerleri

Numuneler		Sertlik (HV _{0.2})		
		Üst tabaka	Orta tabaka	Alt tabaka
1	Ti- hacimce %5 B ₄ C	363	191	367
2	Ti-hacimce %10 B ₄ C	453	185	447
3	Ti- hacimce %15 B ₄ C	510	188	505
4	Ti- hacimce %5 B ₄ C-hacimce %0,5 KNF	385	182	379
5	Ti- hacimce %10 B ₄ C- hacimce %0,5KNF	472	195	475
6	Ti- hacimce %15 B ₄ C- hacimce %0,5 KNF	522	182	519
7	Ti	190		
8	Ti- hacimce %5 B ₄ C	368		
9	Ti- hacimce %5 B ₄ C- hacimce %0,5 KNF	381		

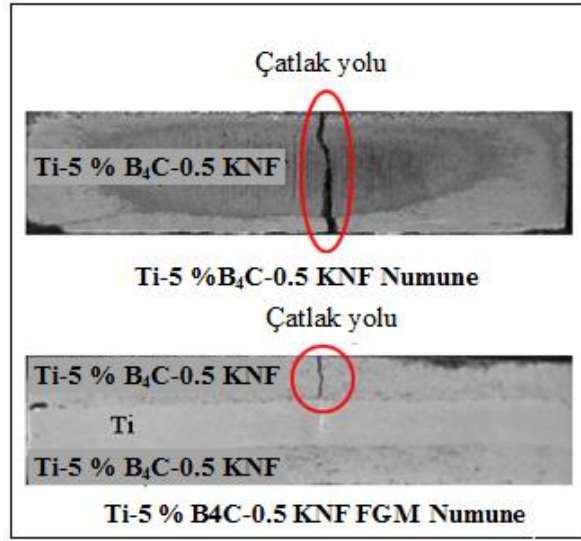
5.6 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Numunelerin üç noktalı eğme testi sonrası elde edilen çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri Grafik 5.7’de verilmiştir. FDM olarak Ti+5%B₄C; Ti+10%B₄C; Ti+15%B₄C; Ti+5%B₄C+0,5KNF; Ti+10%B₄C+0,5KNF ve Ti+15%B₄C+0,5KNF malzemelerinin ÇKD değerleri sırasıyla 610 MPa, 497 MPa, 379 MPa, 670 MPa, 525 MPa ve 439 MPa olarak bulunurken, FDM dışındaki bulk malzemelerin ÇKD değerleri Ti; Ti+5%B₄C ve Ti+5% B₄C+0,5KNF için sırasıyla 910 MPa, 492 MPa ve 505 MPa olarak bulunmuştur. Ti matrisine B₄C’nin ilave miktarı arttıkça hem FDM’lerin ÇKD değerlerinde hem de bulk malzemelerin ÇKD değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebi yüksek sertliğe sahip B₄C’nin matris içerisinde daha fazla yer almasıyla matriste bir kesit zayıflaması meydana gelmiş olması nedeniyledir. Ayrıca B₄C ilavesiyle gözeneklilikte meydana gelen artış ÇKD değerinin düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir (Dwan, 2007; Jin vd., 2009; Islak ve Çelik, 2015). Ti+B₄C bileşimine KNF ilave edildiği zaman ÇKD değerlerinde belirgin artışlar meydana gelmiştir. Bu durum Ti matrisi ile KNF arasındaki kuvvetli bağlanma ile

açıklanabilir. Yani diğer bir deyişle matris ile fiberler arasında fiber köprülenmesi mekanizmasından dolayı ÇKD değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Yükleme yapıldığı zaman, çatlak matriste oluşmakta ve ilerleyerek KNF'e ulaşmaktadır. Yük arttığı zaman KNF yükün büyük bir kısmını taşımakta ve aynı zamanda çatlak KNF'in arkasına geçerek fiber köprülenmesi oluşmaktadır. Yükün daha fazla artmasıyla KNF'ler plastik deformasyona uğramakta ve taneler arasında açılmalar meydana gelmektedir (Chiang, 2000; Chen vd., 2015). Kompozit tabakalar arasında saf titanyum tabakası konularak üretilmiş olan FDM'lerin çapraz kırılma dayanımları bulk haldeki kompozit malzemelerinkine göre daha yüksek çıkmıştır. Örneğin Ti-%5 B₄C bulk kompozit malzemenin çapraz kırılma dayanımı 492 MPa iken, Ti-%5 B₄C FDM'nin çapraz kırılma dayanımı 610 MPa olarak hesaplanmıştır. Kompozit tabakadaki sert partiküller gevrek kırılmayı tetiklerken, saf Ti ara tabakası enerjiyi sönmüleyip çapraz kırılma dayanımının artmasına neden olmuştur. FDM ve bulk haldeki numunelerdeki çatlak ilerlemesini gösteren makro fotoğraflar Fotoğraf 5.3'de görülmektedir. Bulk haldeki kompozitte kesit boyunca çatlak oluşmu ve kırılma gerçekleşmiş olup, FDM numunede ise çatlak kompozit tabakada gerçekleşmiştir. FDM'deki bu çatlak, katmanlar arasında herhangi bir delaminasyon olmadan ilerlemiştir.



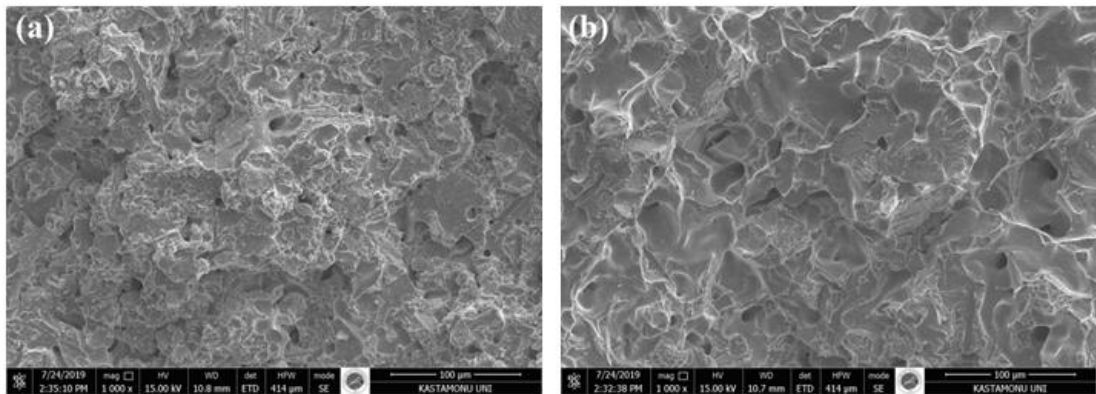
Grafik 5.7 Çapraz kırılma dayanımı değerleri



Fotoğraf 5.3 FDM ve bulk numunelerde çatlak ilerlemesi

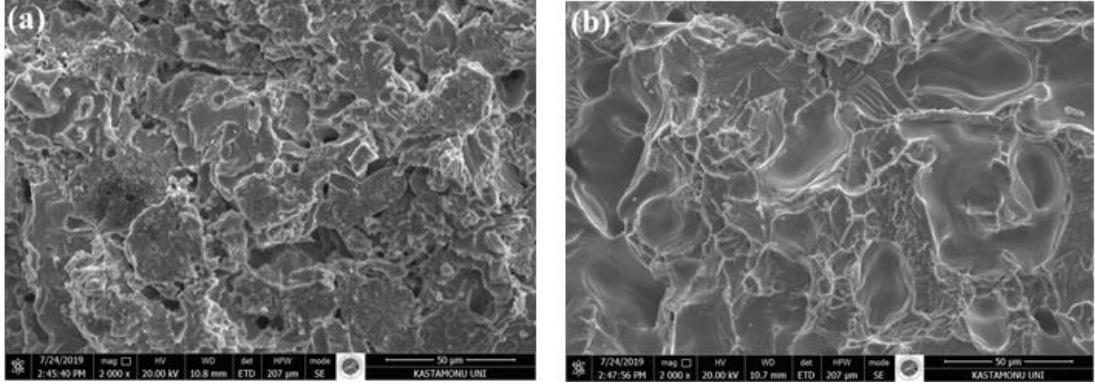
5.6.1 Kırık Yüzey İncelemesi

Fotoğraf 5.4, üç nokta eğme testi sonrasında üç tabakalı (üst-orta-alt) Ti+%5 B₄C FDM numunesinin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüsünü göstermektedir. Üst ve alt tabaka aynı bileşime sahip olduğu için sadece üst tabakanın gösterilmesi tercih edilmiştir. Üst ve alt tabakalar B₄C ile takviye edilmiş kompozit tabakalardır. Orta kısım ise saf titanyum tabakadır. Kompozit tabakada, orta tabakaya göre daha fazla gözenek oluşumu meydana gelmiştir. Yüzeyin kırılma fotoğrafına göre kompozit tabakalarda sünek ve tanelerarası ayrılma kırılması şeklinde kırılma meydana geldiği, orta tabakada ise sünek kırılmanın hakim olduğu düşünülmektedir.

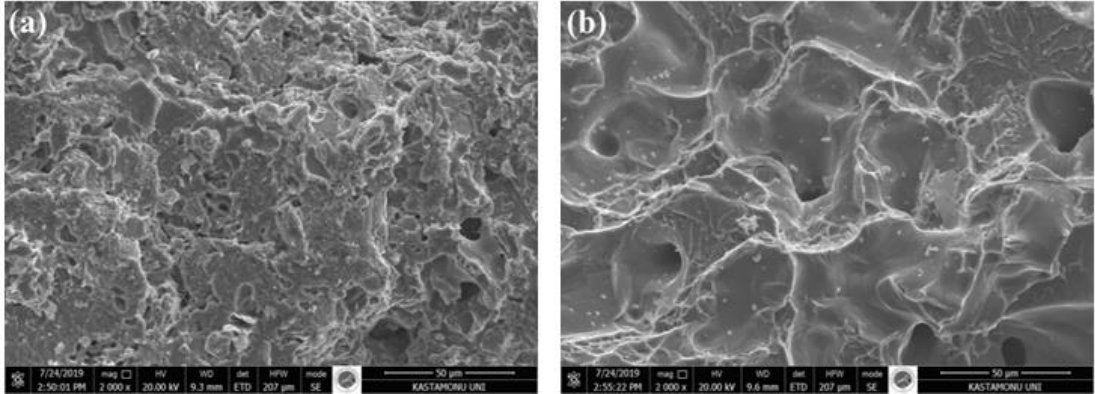


Fotoğraf 5.4 Ti+%5 B₄C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü: (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka

Fotoğraf 5.5 ve Fotoğraf 5.6'de Ti+%10 B₄C ve Ti+%15 B₄C bileşime sahip FDM malzemelerin kırık yüzeylerinin SEM fotoğrafları verilmiştir. Bor karbür miktarının artmasıyla bu SEM fotoğraflarına göre kompozit tabakada gözenekliliğin daha da arttığı ve tanelerarası ayrılma şeklindeki kırılmanın daha fazla olduğu görüşü hakimdir.



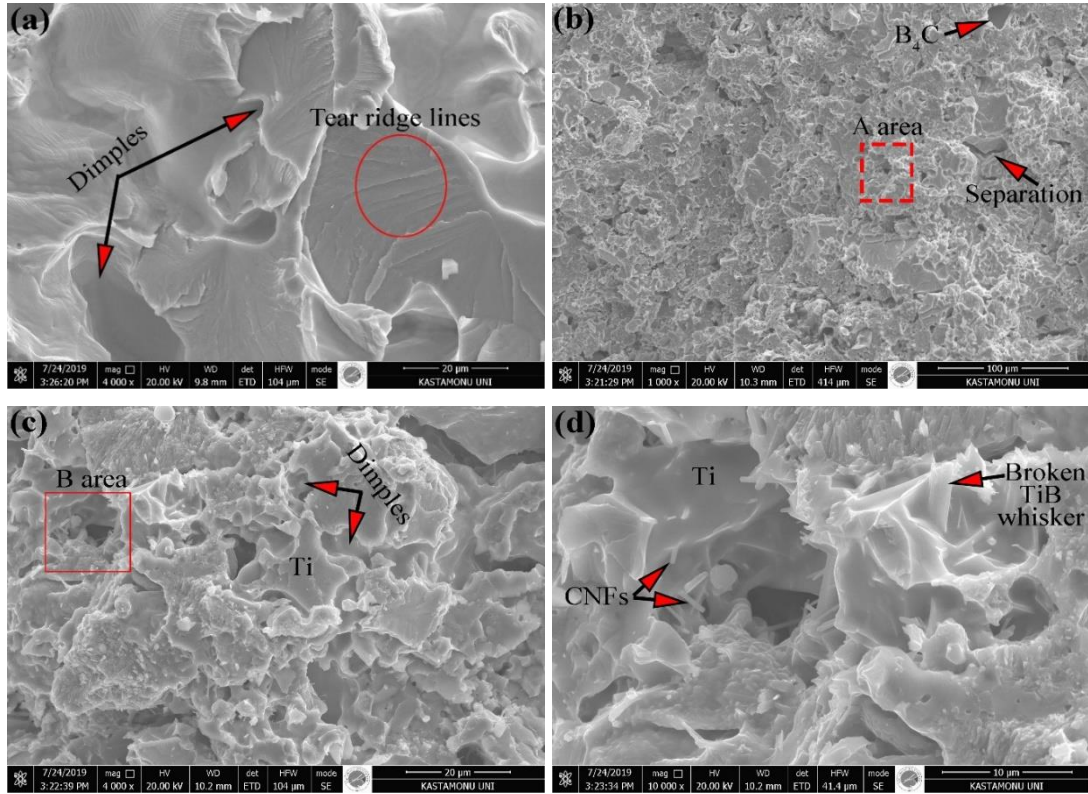
Fotoğraf 5.5 Ti+%10 B₄C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka



Fotoğraf 5.6 Ti+%15B₄C numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) üst tabaka ve (b) orta tabaka

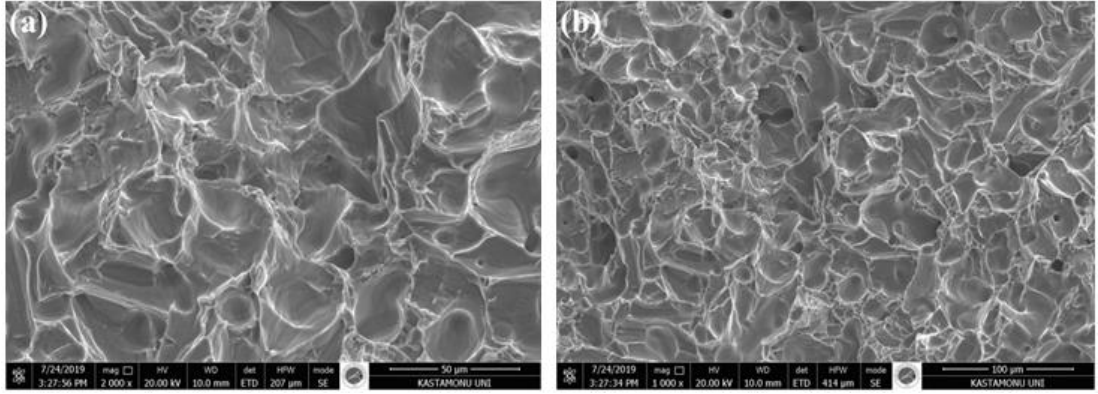
Ti-15%B₄C-0,5%KNF FDM numunesinin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafları Fotoğraf 5.7'da verilmiştir. Fotoğraf 5.7a'daki orta katmanın (Ti) SEM fotoğrafına göre, bu katman gamze çukuru görünümüne sahip bir kırılma morfolojisi sergilemiştir. Ayrıca mikro fotoğrafta yırtılma sırt çizgileri de gözükmemektedir. Bu yapı sayesinde Ti yüksek plastik deformasyon gösterir. Fotoğraf 5.7b-d'de kompozit tabakanın kırık yüzey SEM fotoğrafı görülmektedir. Reaksiyona girmeyen B₄C partikülleri ve taneler arasında ayrılma kırık yüzey mikro fotoğrafında görülmektedir (Fotoğraf 5.7b). Kompozit tabakanın kırık yüzeyinde orta tabakaya göre daha küçük gamze çukuru oluşumları

meydana gelmiştir (Fotoğraf 5.7c). Bu duruma, takviyelerin sabitleme etkisinin neden olduğu literatürde rapor edilmiştir (Li, 2016). Yine kırık yüzeyde Ti tanesi içine girmiş KNF'ler ve yapıda ayrıca kırık haldeki TiB whiskerler görülmektedir (Fotoğraf 5.7d). Bu kırılma olayı Ti ve TiB whiskerleri arasındaki güçlü arayüzey uyumu ile ilgili bir husustur (Singh, 2019)(Yan, 2014).



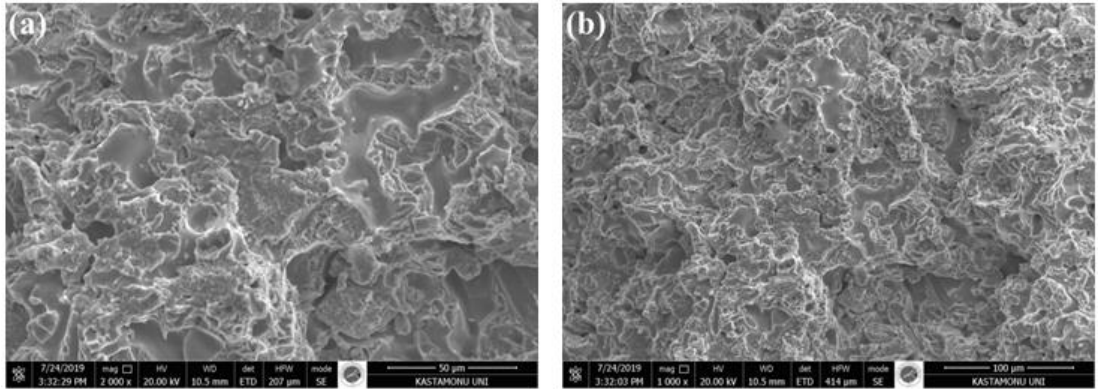
Fotoğraf 5.7 Ti-15%B₄C-0.5%KNF FDM numunesinin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafları: (a) orta katman, (b) kompozit katman, (c) A bölgesi ve (d) B bölgesi

Fotoğraf 5.8, FDM'siz saf titanyum olan numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüsünü göstermektedir. Bu numune önceki numunelerin orta tabakaların kırılma yüzeyine benzer olarak izole ve rastgele dağılmış mikroskobik boşluklar ve transgranüler kırık bölgelerini kaplayan bir sünek çukurcuk oluşumu göstermiştir.



Fotoğraf 5.8 Ti numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) 2000X ve (b) 1000X

Fotoğraf 5.9 Ti+%5B₄C numunesine KNF ekleyerek oluşturulan normal bulk numunenin SEM görüntüsünü göstermektedir. Kırık yüzeyinden KNF partiküllerinin pul şekli nedeniyle ara boşlukları doldurduğu ve böylece bu noktada ÇKD ve sertlikte bir artışa neden olduğu görülmektedir. Ayrıca, fotoğraflar KNF'nin B₄C'ye eklenmesiyle oluşan numunelerde, her iki partikülün kısmen homojen dağıldığı görülmüştür. Bu, mekanik özellikleri de olumlu etkilemiştir.



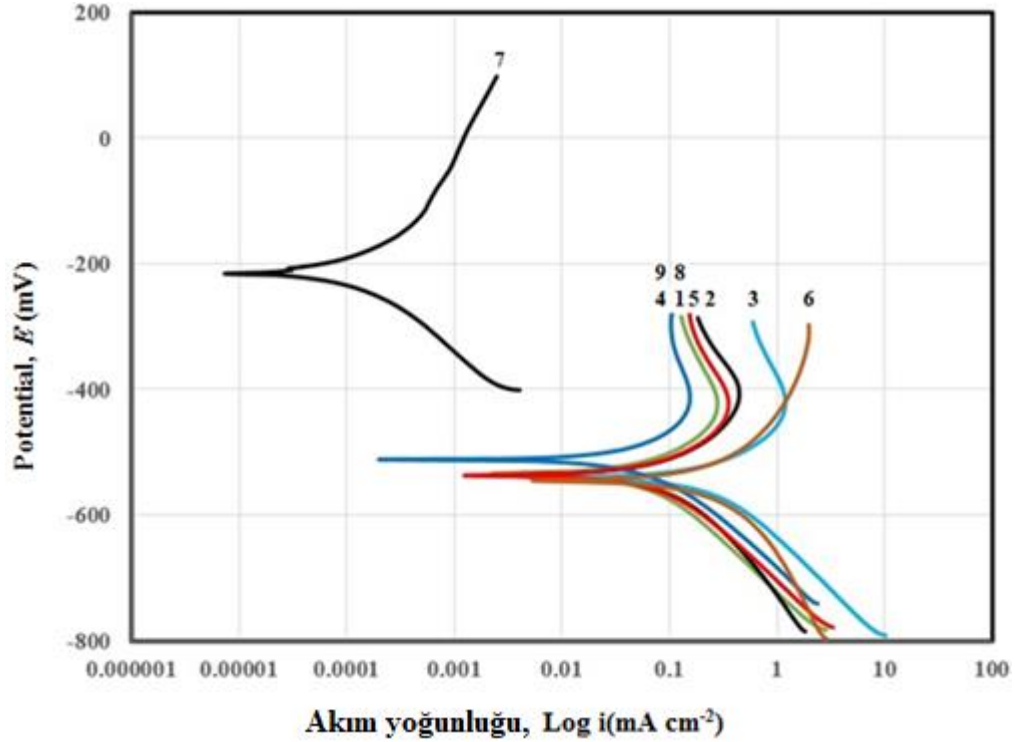
Fotoğraf 5.9 FGM'siz Ti+%5 B₄C+%0,5CNF numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü (a) 2000X ve (b) 1000X

5.7 Korozyon Testi Sonuçları

5.7.1 Tafel Polarizasyon Ölçümleri

3 M HCl korozif ortamda belirlenen B₄C+KNF kompozitlerinin farklı bileşimlerindeki Ti'nin Tafel eğrileri (Grafik 5.8) 'de gösterilmektedir. Tafel ölçümlerinin sonuçları Tablo 5.2'de özetlenmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{corr.}), Anodik

ve katodik Tafel eğimleri (β_a ve β_c), korozyon hızı ve korozyon akımı (CR, i_{corr}) bulunmuştur. Grafik 5.8 ve Tablo 5.2'de görüldüğü gibi kompozitlerin korozyon potansiyelleri, anodik Tafel eğrilerinde daha net olarak gösterildiği gibi birbirinden oldukça farklıdır. Takviyesiz saf Ti'nin Tafel eğrisi, daha düşük korozyon akımı $i_{corr} = 0,164 \mu Acm^{-2}$ gösterirken bu durum daha yüksek bir korozyon direnci gösterir. Ayrıca diğer kompozitlere kıyasla daha olumlu bir potansiyele sahiptir. Saf Ti malzemesine kıyasla, Ti kompoziti için Tafel eğrileri her takviye miktarı için değişir ve 3 M HCl ortamında farklı korozyon direnci davranışı gösterirler. Takviyeli kompozitlerin korozyon direnci, takviyesiz Ti malzemenin korozyon direncinden daha düşüktür. Tablo 5.2'den görüldüğü üzere B_4C+KNF 'nin her iki durumunda kompozit içeriklerinin artışı ile korozyon akım değerleri artar. Korozyon akımı $105 \mu Acm^{-2}$ 'lik en düşük değeri Ti + %5 B_4C konsantrasyonundaki bileşikte bulunurken, $869 \mu Acm^{-2}$ 'lik en yüksek korozyon akımı Ti + %15 B_4C + %0,5 KNF'nin konsantrasyonunda bulunmuştur. Bu durum B_4C+KNF ve Ti arasındaki elektrokimyasal potansiyel farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Korozyon hızı Tablo 5.2'de verilmiştir. B_4C 'nin çok düşük konsantrasyonu (Ti + %5 B_4C)'nin korozyon direncinde büyük bir değişikliğe yol açtığı görülmektedir. Bu durum, şekilde gösterilen verilerde çok daha nettir, çünkü 6 numaralı numunede gösterildiği gibi ekstra B_4C ve KNF ilaveleriyle katlanarak kararlı hale gelen bir korozyon hızı davranışı elde edilebilir. Bu korozyon hızı neredeyse aynı davranışı gösterir ve korozyon akımı ile orantılı olarak artar, yani B_4C+KNF içeriklerinin artması ile korozyon hızı da artar. Bu durum, konsantrasyonların artması ile kompozitlerde B_4C miktarının artmasının kompozit malzemenin daha gözenekli olmasına sebep olduğu şeklinde açıklanabilir. Daha gözenekli bir yapı daha fazla korozyona maruz kalır zira klor iyonları bu gözeneklerden geçerek kompozit malzeme üzerinde korozif bir etki gösterir.



Grafik 5.8 Tafel grafikleri (1-(Ti+%5B₄C)FDM, 2-(Ti+%10B₄C)FDM, 3-(Ti+%15 B₄C)FDM, 4-(Ti+%5B₄C+0,5KNF)FDM, 5-(Ti+%10B₄C+0,5KNF)FDM, 6-(Ti+%15 B₄C+0,5KNF)FDM, 7-(Ti saf) FDM'siz, 8-(Ti+%5 B₄C) FDM'siz, 9-(Ti+%5 B₄C+0,5KNF) FDM'siz)

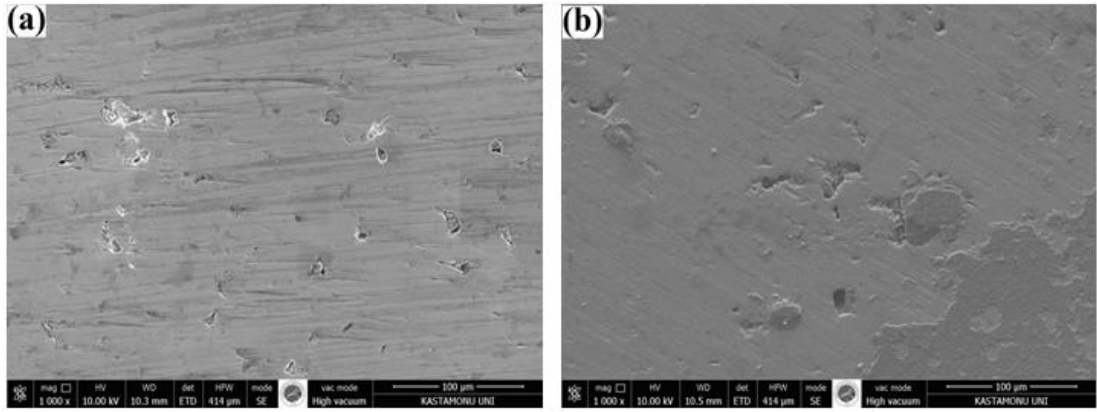
Tablo 5.2 Oda sıcaklığında 3 M HCl'de kaydedilen Ti-B₄C+KNF FDM'lerin hesaplanan korozyon potansiyeli, korozyon akımı, Tafel eğimleri ve korozyon hızı

No.	Numuneler	$E_{corr.}$ (mV)	$i_{corr.}$ (μAcm^{-2})	β_a (mV/ onyıl)	B_c (mV/onyıl)	Korozyon hızı CR (mpy)
1	Ti+%5 B ₄ C	-535	105	162,2	225,4	87,4
2	Ti+%10 B ₄ C	-537	246	274,3	386,9	197,6
3	Ti+%15B ₄ C	-542	517	204	285,7	436,5
4	Ti+%5 B ₄ C+%0,5KNF	-531	152	344,4	506,8	176,2
5	Ti+%10 B ₄ C+%0,5KNF	-537	187	224,8	308,1	220,5
6	Ti+%15B ₄ C+%0,5KNF	-530	869	277,8	317,5	914,2
7	Ti	-277	164	248,9 e ⁻³	177,3 e ⁻³	0,193
8	FDMsiz Ti+%5 B ₄ C	-533	102	152,7	221,3	88,6
9	FDMsiz Ti+%5 B ₄ C+%0,5KNF	-528	149	334,8	498,6	178,5

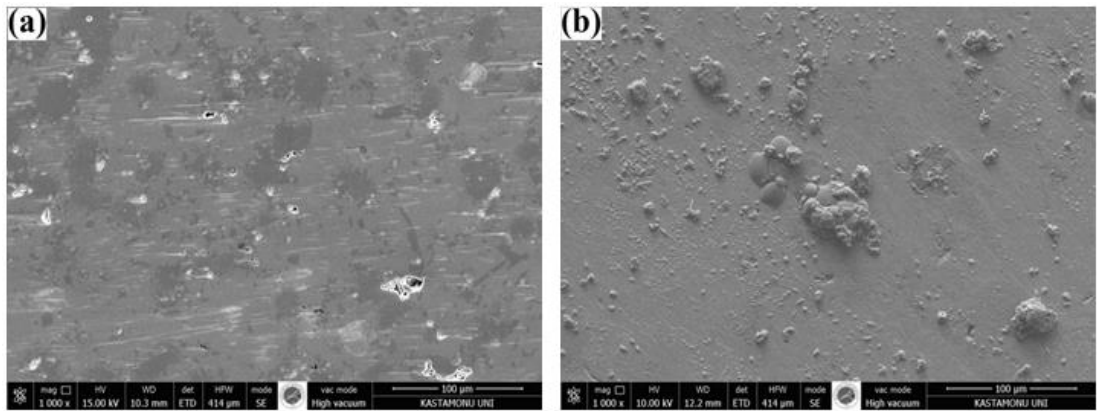
5.7.2 Yüzey Topografyası Analizi

Farklı kompozitlerin yüzey topografyası incelenmiştir. Fotoğraf 5.10, Fotoğraf 5.11 ve Fotoğraf 5.12, 3 M HCl solüsyonunda numunelerin korozyon ölçümü öncesi ve sonrası yapılan SEM-EDS analizinin örneğini göstermektedir. Fotoğraf 5.10a korozyon öncesi Ti+%5 B₄C yüzey topografyasını göstermektedir. Yüzey sadece parlatılmış yüzeyi

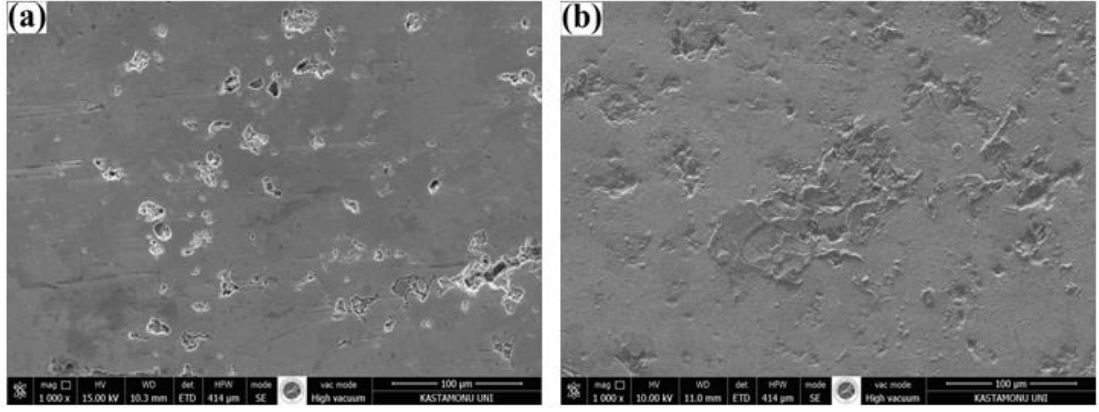
göstermektedir, diğer taraftan Fotoğraf 5.10b'de yüzey daha hafif bir korozyon gösterir. Benzer şekilde sırasıyla Fotoğraf 5.11a ve Fotoğraf 5.11b'de gösterildiği gibi korozyon ve bozulmanın yüzeydeki etkisi diğer Ti +%10B₄C numunesinde de korozyon öncesi ve sonrası daha belirgindir. En kötü korozyon direnci %15 B₄C+%0,5 KNF'li numune için Fotoğraf 5.12a ve Fotoğraf 5.12b'de açıkça görülmektedir. Bu durumda yüzey daha çok korozyona uğramıştır ve bunun en önemli nedeni takviye oranı ve gözeneklilik olabilir. Bununla birlikte farklı takviye miktarı, Fotoğraf 5.12b'de gösterildiği gibi korozyon oranını etkilemektedir. Gözeneklilik nedeniyle korozyonun daha belirgin olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlar dikkate alınarak Tablo 5.2 ile karşılaştırıldığında en iyi korozyon direncinin %5 B₄Cli birinci numunede olduğu ve en kötü korozyon direncinin %15 B₄C + %0,5 KNF'li altıncı numunede olduğu belirlenmiştir. Bunun en önemli nedeni takviye ve gözeneklilik oranı olabilir.



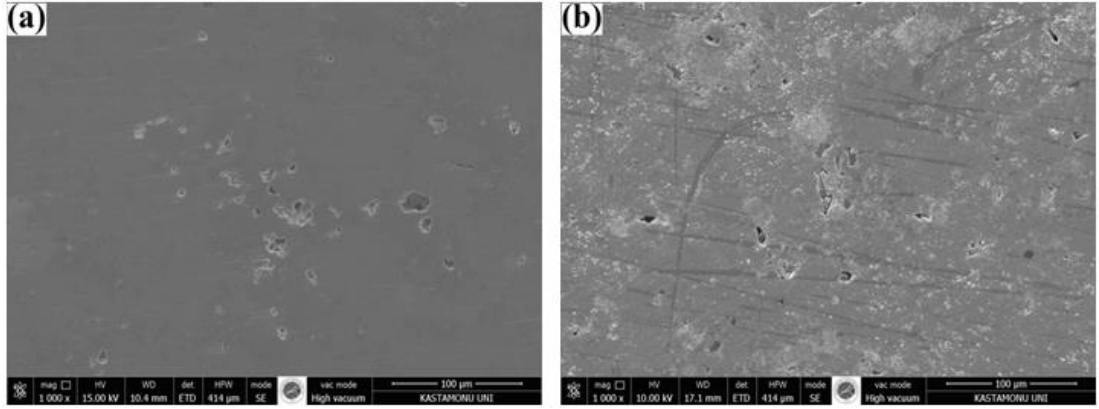
Fotoğraf 5.10 Ti+%5 B₄C numunesinin SEM görüntüleri: (a) korozyondan önce, (b) korozyondan sonra



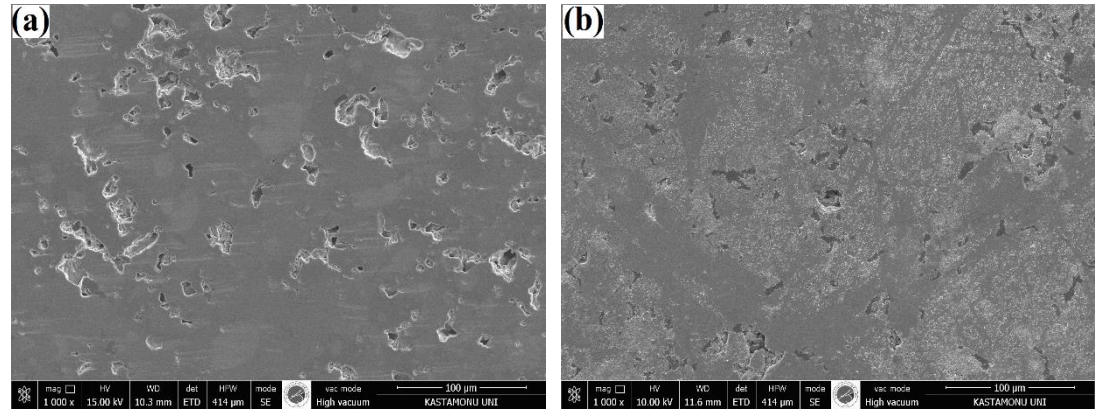
Fotoğraf 5.11 Ti+%10 B₄C numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra



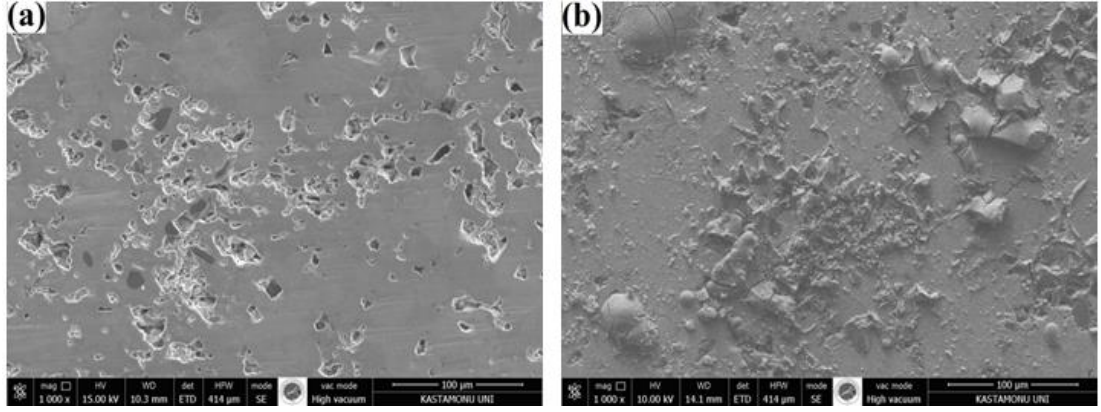
Fotoğraf 5.12 Ti+%15B₄C numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra



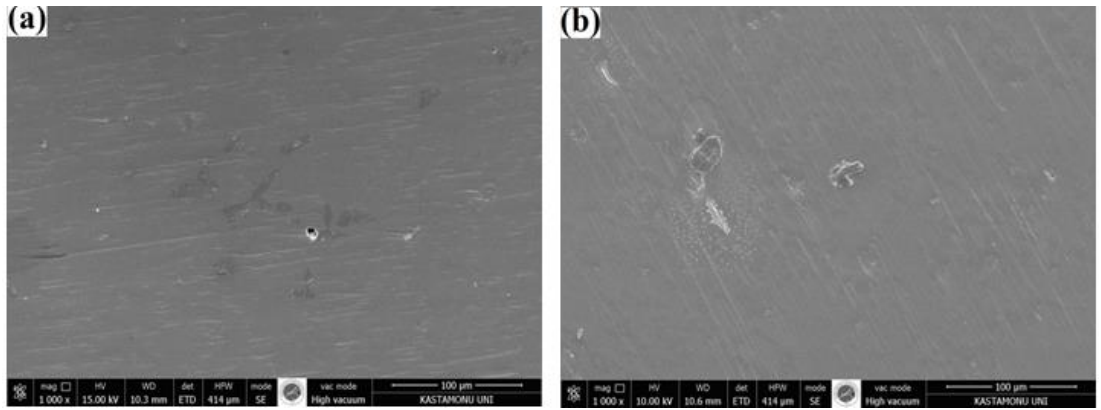
Fotoğraf 5.13 Ti+%5 B₄C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra



Fotoğraf 5.14 Ti+%10 B₄C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra



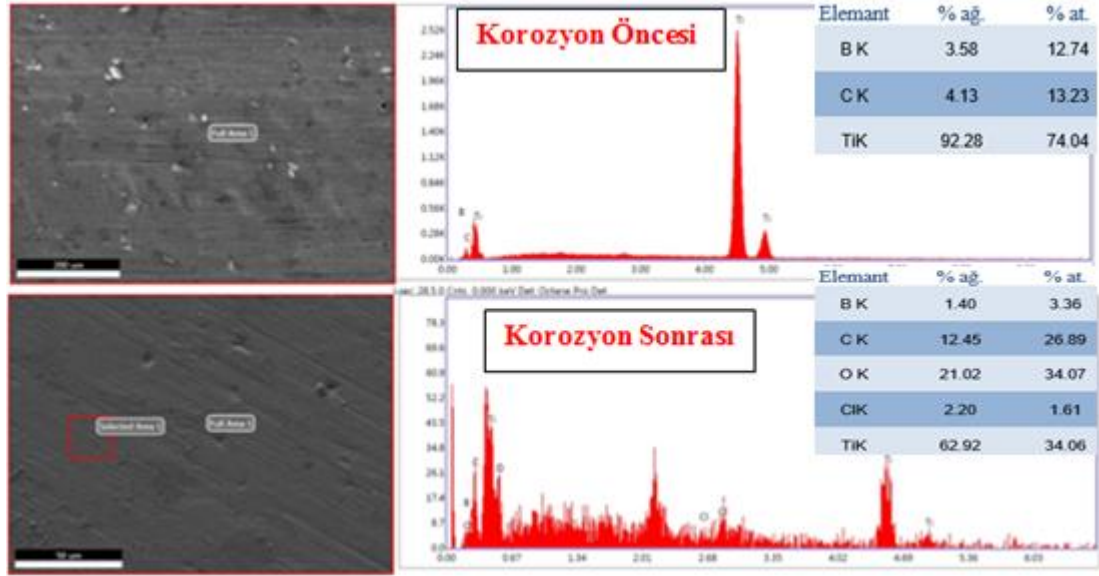
Fotoğraf 5.15 Ti+%15B₄C+%0,5 KNF numunesinin SEM görüntüleri (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra



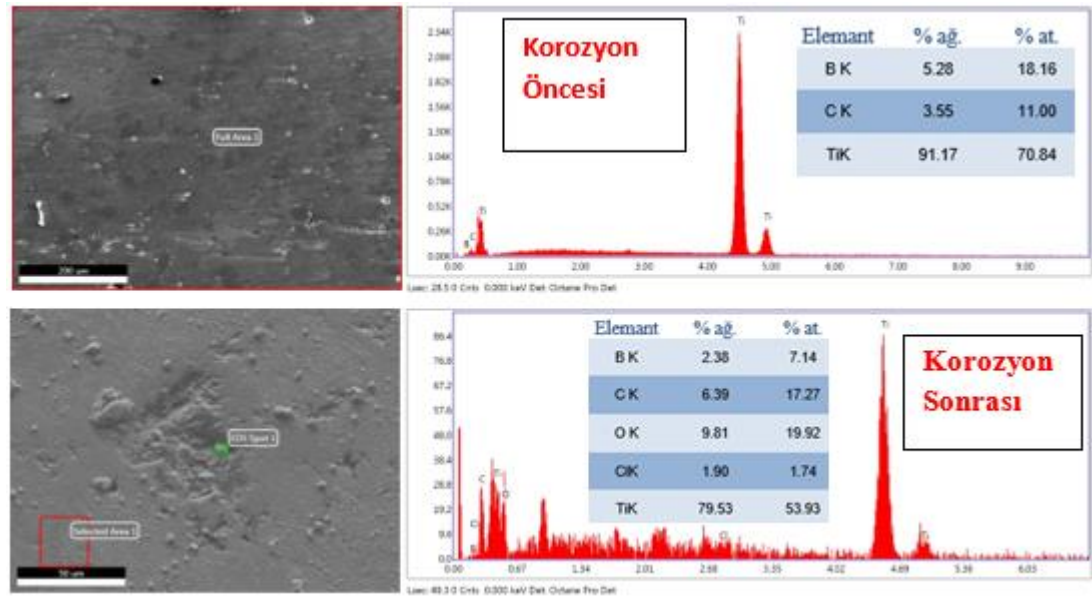
Fotoğraf 5.16 Saf Ti numunesinin SEM görüntüsü (a) korozyondan önce ve (b) korozyondan sonra

Elektrokimyasal korozyon deneylerinden önce ve sonra da SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Bazı seçilmiş kompozitler için bu analizlerin örnekleri Grafik 5.9 - Grafik 5.15'da gösterilmektedir. Korozyon öncesi numuneler ile karşılaştırıldığında, korozyon sonrası numunelerde elementlerin ağırlık oranı ve atom oranının değiştiği görülmüştür. Örneğin Grafik 5.9'te korozyon öncesi numunede ağırlıkça %3,68 Bor bulunurken; korozyondan sonra bu ağırlık yüzdesi %1,4 olmuştur ve bu da korozyon nedeniyle içeriğinin azaldığını göstermektedir. Bu durum, yüzeyin daha fazla bozulmasına neden olan HCl'nin korozif çözeltisinden gelen Klor elementinin ortaya çıkmasıyla da gözlemlenebilir. Benzer bir gözlem, zaten sunulan SEM görüntülerini doğrulayan diğer tüm numunelerde de bulunmuştur. Dahası, numunelerin gözeneklilikleri büyüdüğünden dolayı daha fazla miktarda takviye eklemesi üzerine korozyon hızı artar.

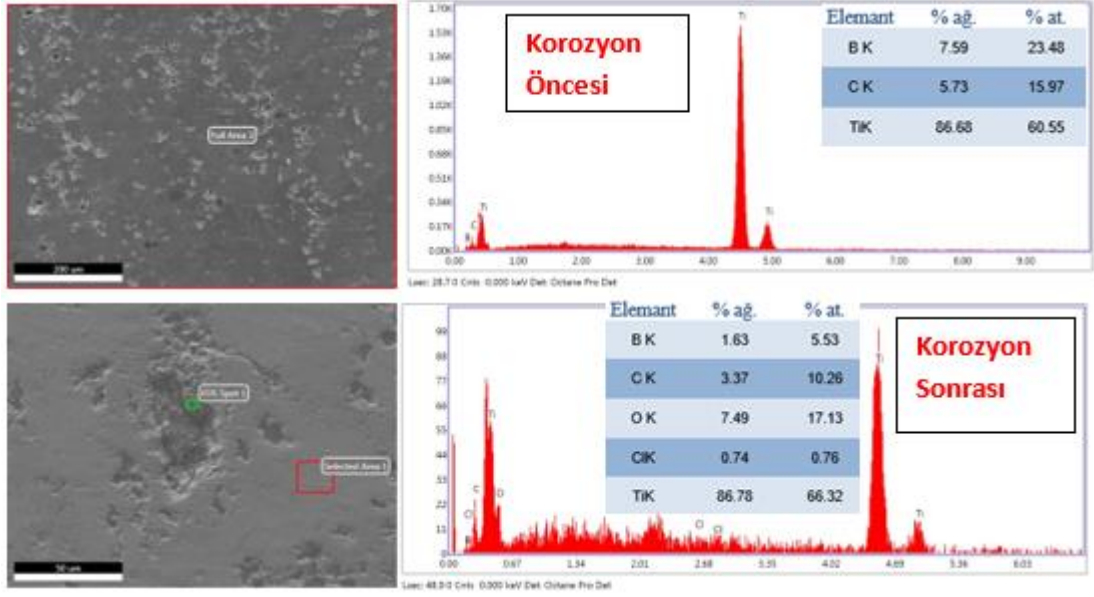
Tüm bu sonuçlar dikkate alınarak Tablo 5.2 ile karşılaştırıldığında en iyi korozyon direncinin %5 B₄C'li ilk numunede olduğu ve en kötü korozyon direncinin ise %15 B₄C ve %0,5 KNF'li altıncı numunede olduğu tespit edilmiştir. Bunun en önemli nedeni takviye oranı ve gözeneklilik olabilir. Ayrıca B₄C oranı arttıkça B elementel düşüşü fazla, Ti elementel düşüşünün ise daha az olduğu görülmektedir. Bu matrisin korozyon direncinin optimum bir orana bağlı olduğunu göstermektedir.



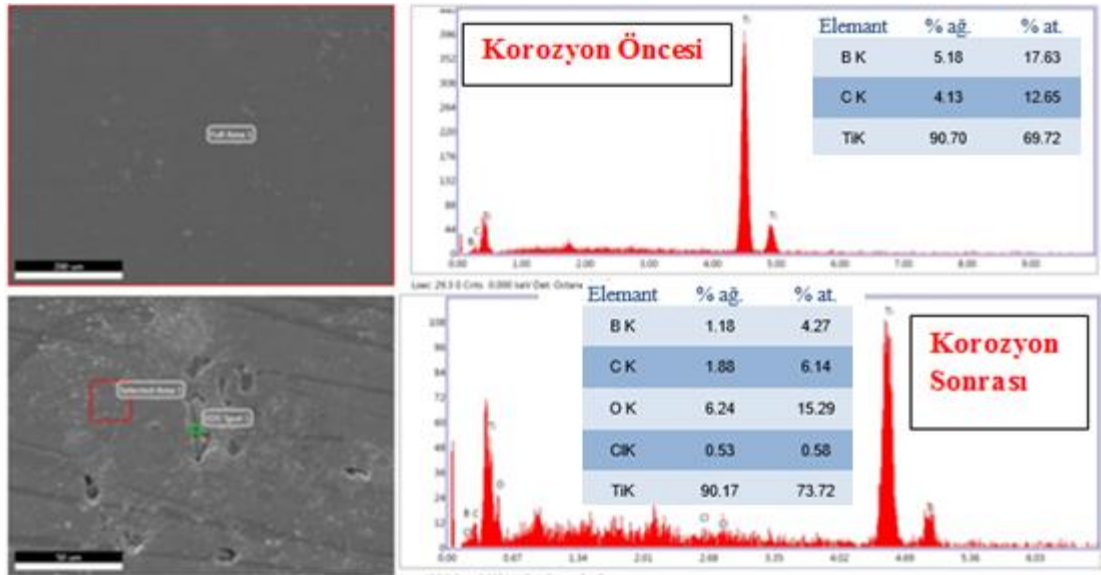
Grafik 5.9 Ti+%5 B₄C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



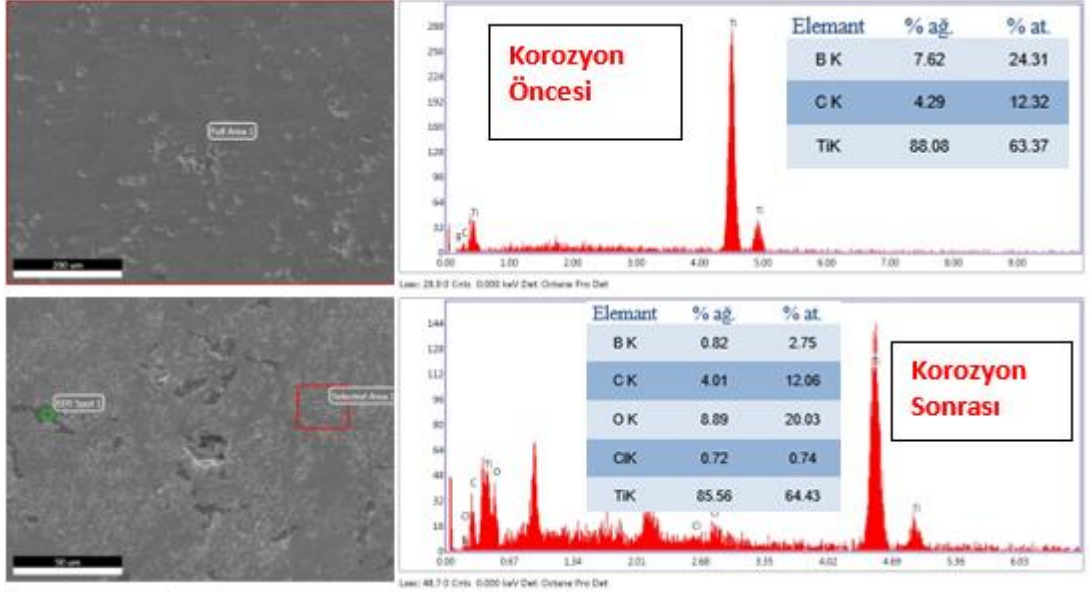
Grafik 5.10 Ti+%10 B₄C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



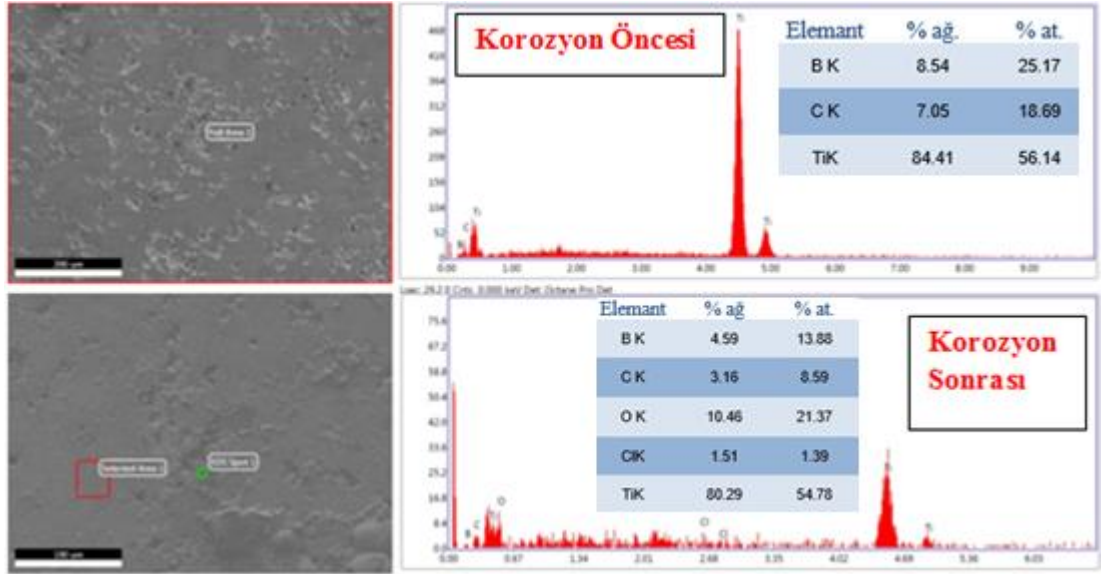
Grafik 5.11 Ti+%15B₄C numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



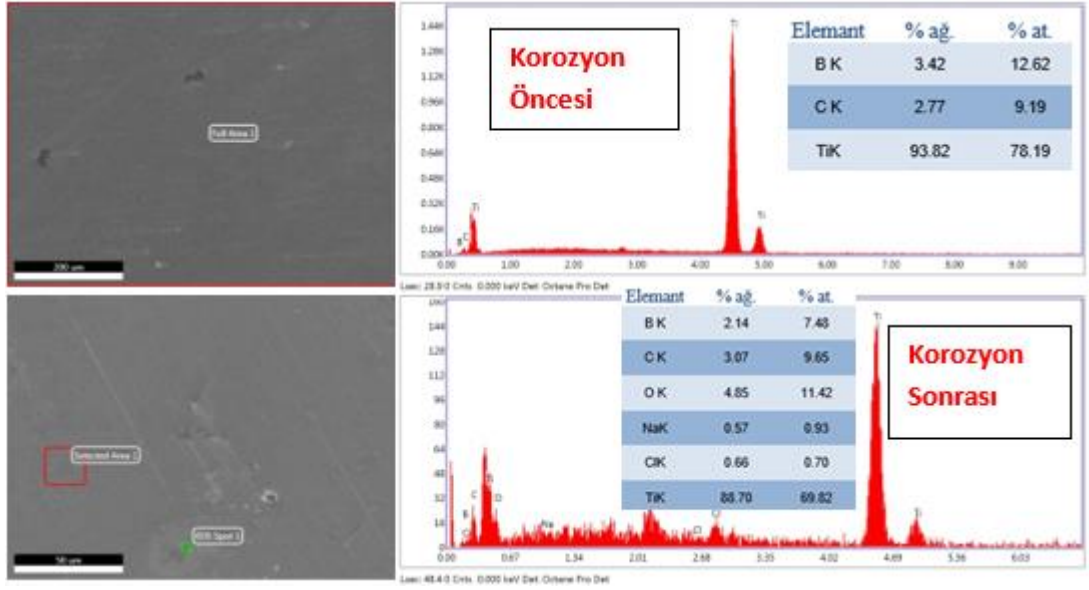
Grafik 5.12 Ti + %5 B₄C + %0,5 KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



Grafik 5.13 Ti+%10 B₄C+%0,5KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



Grafik 5.14 Ti+%15 B₄C+%0,5KNF numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi



Grafik 5.15 Saf Ti numunesinin korozyon öncesi ve sonrası SEM-EDS analizi

6. GENEL SONUÇLAR

Bor karbür ve karbon nanofiber ile takviye edilmiş titanyum malzemesi üzerine yapılan bu araştırma, geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle üretilen titanyum-bor karbür/karbon nanofiber fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) mikroyapı özelliklerini, mekanik özelliklerini ve korozyon özelliklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Aşağıdaki bilgiler, bulgular ve sonuçlar elde edilmiştir.

- Ti esaslı bor karbür ve karbon nanofiber takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Numunelerin kesitlerinden alınan SEM görüntüleri FDM'lerin tabakalarının yeterli derecede bağlandığını göstermektedir. görüntüde hiç çatlak oluşumu görünmemekte ve kompozit tabakalar ve orta kısım birbirlerinden açıkça ayırt edilebilmektedir.
- SEM görüntülerinden takviye partiküllerinin homojen dağıldığı ve mikroyapıların genel olarak tüm kompozitlerde benzer olduğu görülmektedir. Takviye tozlarının titanyum matris içinde homojen bir şekilde dağılması, elde edilen kompozitlerin yoğunluk ve mekanik özelliklerinde iyileştirme sağlamıştır.
- XRD analizine göre mikroyapıda Ti, B₄C, C ve TiB fazları oluşmuştur. Ti, B₄C ve C malzeme üretiminde kullanılan bileşenler olmasına rağmen, TiB yeni oluşan bir fazdır. XRD analizinde herhangi bir oksit oluşumuna rastlanmamıştır.
- Yoğunluk sonuçları numunelerin deneysel ve bağıl yoğunluğunun B₄C ve KNF katılması ile azaldığını göstermiştir. Bu, B₄C ve KNF'nin yoğunluğunun Ti'den düşük olması ve matristeki takviyelerin sinterlemeyi olumsuz etkilemesiyle ilişkilidir. Ayrıca B₄C oranındaki artış, numunelerin gözenekliliğinin artmasına neden olurken, KNF gözenekliliği kısmen azaltmaktadır.

- Fonksiyonel derecelendirilmiş titanyum matris, B₄C ve KNF katkılı kompozit malzemelerin sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik sonuçları katkı miktarı arttıkça sertliklerin arttığını göstermiştir.
- Numunelerin üç nokta eğme testi çapraz kırılma dayanımları (ÇKD) ölçülmüştür. Hem FDM'lerin hem de bulk malzemelerin ÇKD değerleri düşmüştür. Bunun nedeni yüksek sertliğe sahip B₄C matrisine daha fazla katılması ve matriste kesit zayıflamasının meydana gelmesidir. Ti + B₄C bileşimine KNF eklendiği zaman ÇKD değerlerinde önemli artışlar olmuştur. Bu durum Ti matrisi ve CNF arasındaki güçlü bir bağlanma ve KNF'lerin mikro boşlukları doldurmasıyla açıklanabilir. Kırık yüzeylerden alınan SEM fotoğraflarından kompozit tabakada sünek ve tanelerarası ayrılma kırılması şeklinde kırılma meydana geldiği, orta tabakada ise sünek kırılmanın olduğu görülmüştür.
- Numunelerin korozyon testi sonucunda korozyon potansiyeli (E_{corr.}), anodik ve katodik Tafel eğimleri (β_a ve β_c), korozyon hızı (CR) ve korozyon akımı (i_{corr.}) Tafel eğrilerinden bulunmuştur. Tafel ölçümleri, daha düşük korozyon akımı ve korozyon hızının %5 B₄C kompozitte bulunduğunu ve kompozitlerdeki B₄C+KNF konsantrasyonu arttıkça bu oranın da arttığını ortaya koymuştur.
- Korozyon öncesi ve sonrası alınan SEM-EDS analizleri numunelerin daha fazla korozyona maruz kaldığında B₄C+CNF konsantrasyonunun artması ile yüzeyin daha gözenekli bir yapıda olmaya başladığını göstermektedir. Bu durum, klor iyonlarının bu gözeneklere nüfuz edebilmesini ve daha fazla korozyona neden olmasını sağlar.

7. ÖNERİLER

Çalışma sonucunda aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Aşınma ve elektriksel iletkenlik testlerini numuneler üzerinde yaparak aşınma ve elektriksel iletkenlik incelenebilir.
- Sinterleme sıcaklığının bazı özellikler üzerindeki etkisini belirlemek için, farklı sinterleme sıcaklıkları numuneler üzerine uygulanabilir.
- Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri gibi numunelere farklı korozyon testi uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Adrian, P. P., & Gheorghe, B. M. (2010). Manufacturing process and applications of composite materials. *Fascicle of Management and Technological Engineering, IX (XIX)*, 3-1.
- Ait Moussa, A., & Yadav, R. (2017). Optimization of a functionally graded material stem in the femoral component of a cemented hip arthroplasty: Influence of dimensionality of FGM. *Journal of medical engineering, 2017*.
- Altınok, S. (2018). *Thermal plasma synthesis of boron carbide* (Master's thesis).
- Anandharamakrishnan, C. (2015). *Spray drying techniques for food ingredient encapsulation*. John Wiley & Sons.
- Asachi, M., Nourafkan, E., & Hassanpour, A. (2018). A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. *Advanced Powder Technology, 29(7)*, 1525-1549.
- Ashby, M. F., & Johnson, K. (2013). *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Butterworth-Heinemann.
- Bahraminasab, M., Ghaffari, S., & Eslami-Shahed, H. (2017). Al₂O₃-Ti functionally graded material prepared by spark plasma sintering for orthopaedic applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 72*, 82-89.
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). Perspectives on titanium science and technology. *Acta Materialia, 61(3)*, 844-879.
- Bastwros, M. M., Esawi, A. M., & Wifi, A. (2013). Friction and wear behavior of Al-CNT composites. *Wear, 307(1-2)*, 164-173.
- Bayode, A., Akinlabi, E. T., & Pityana, S.L.(2018). "Fabrication of stainless steel based FGM by laser metal deposition." De Gruyter.
- Bohidar, S. K., Sharma, R., & Mishra, P. R. (2014). Functionally graded materials: A critical review. *International Journal of Research, 1(4)*, 289-301.
- Burckhardt, J. (2019). *The civilisation of the Renaissance in Italy*. BoD-Books on Demand.

- Burstein, G. T., Liu, C., Souto, R. M., & Vines, S. P. (2004). Origins of pitting corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 39(1), 25-30.
- Buytoz, S., Dagdelen, F., Islak, S., Kok, M., Kir, D., & Ercan, E. (2014). Effect of the TiC content on microstructure and thermal properties of Cu–TiC composites prepared by powder metallurgy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117(3), 1277-1283.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2006). *Materials Science and Engineering: An Introduction* 8th ed John Wiley & Sons. Inc., New York, USA.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- Carvalho, Ó. S. N. D. (2015). Mechanical, fatigue and wear properties of sintered Carbon Nanotube-based functionally graded materials.
- Carvalho, O., Buciumeanu, M., Madeira, S., Soares, D., Silva, F. S., & Miranda, G. (2015). Optimization of AlSi–CNTs functionally graded material composites for engine piston rings. *Materials & Design*, 80, 163-173.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- Chawla, K. K. (2012). Metal matrix composites. In *Composite Materials* (pp. 197-248). Springer, New York, NY.
- Chen, Y., Wang, S., Liu, B., & Zhang, J. (2015). Effects of geometrical and mechanical properties of fiber and matrix on composite fracture toughness. *Composite Structures*, 122, 496-506.
- Chiang, C. R. (2000). Prediction of the fracture toughness of fibrous composites. *Journal of materials science*, 35(12), 3161-3166.
- Cho, N. (2006). *Processing of boron carbide* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- Chumanov, I. V., Anikeev, A. N., & Chumanov, V. I. (2015). Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure. *Procedia engineering*, 129, 816-820.
- Cirakoglu, M., Bhaduri, S., & Bhaduri, S. B. (2002). Combustion synthesis processing of functionally graded materials in the Ti–B binary system. *Journal of alloys and compounds*, 347(1-2), 259-265.

- Cogswell, F. N. (2013). *Thermoplastic aromatic polymer composites: a study of the structure, processing and properties of carbon fibre reinforced polyetheretherketone and related materials*. Elsevier.
- Collings, E. W. (1984). The physical metallurgy of titanium alloys. *Metals Park Ohio*, 3.
- da Silva, F. S., Cinca, N., Dosta, S., Cano, I. G., Guilemany, J. M., & Benedetti, A. V. (2017). Cold gas spray coatings: basic principles, corrosion protection and applications. *Eclética Química*, 42, 09-32.
- Danninger, H., Calderon, R. D. O., & Gierl-Mayer, C. (2017). Powder metallurgy and sintered materials. *Additive Manufacturing*, 19(4).
- De Jong, K. P., & Geus, J. W. (2000). Carbon nanofibers: catalytic synthesis and applications. *Catalysis Reviews*, 42(4), 481-510.
- Desai, S. H., & Sheth, S. M. (2012). Proposed design of centrifugal casting machine for manufacturing of turbine bearing. In *National Conference on Advances and Challenges in Engineering and Science (NCACES-2012)*.
- Dwan, J. (2007). Fracture toughness determination of diamond impregnated PM cobalt. *IDR. Industrial diamond review*, (1), 33-36.
- El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-23.
- Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. R., Zhang, Y., Xia, Y., ... & Free, M. (2018). Powder metallurgy of titanium—past, present, and future. *International Materials Reviews*, 63(7), 407-459.
- Fleck, C., & Eifler, D. (2010). Corrosion, fatigue and corrosion fatigue behaviour of metal implant materials, especially titanium alloys. *International journal of fatigue*, 32(6), 929-935.
- Frketic, J., Dickens, T., & Ramakrishnan, S. (2017). Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Additive Manufacturing*, 14, 69-86.
- Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., & Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4924-4939.

- Gasik, M. M. (2010). Functionally graded materials: bulk processing techniques. *International Journal of Materials and Product Technology*, 39(1-2), 20-29.
- Góral, M., & Sieniawski, J. (2012). The technology of plasma spray physical vapour deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55(2), 689-693.
- Gorunov, A. I. (2019). Laser pulse alloying the surface of Ti-5.5 Al-2Zr-1Mo-1V by boron carbide particles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1), 719-731.
- Greim, J., & Schwetz, K. A. (2000). Boron carbide, boron nitride, and metal borides. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*.
- Gupta, A., & Talha, M. (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 1-14.
- Handbook, M. (1990). Vol. 2. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 713.
- Handbook, M. (1987). volume 13 Corrosion. ASM International, 9639, 44073-0002.
- He, X., Du, H. Y., Wang, W., Jing, W., & Liu, C. (2008). Fabrication of ZrO₂-SUS functionally graded materials by slip casting. In *Key Engineering Materials* (Vol. 368, pp. 1823-1824). Trans Tech Publications Ltd.
- Islak, S. (2012). Karbür katkılı mermer kesici takımların çalışma performansına sinterleme parametrelerinin etkisi/Effect of sintering parameters on sawing performance of marble cutting tools with carbide.
- Islak, S. (2019). Mechanical and Corrosion Properties of AlCu Matrix Hybrid Composite Materials. *Science of Sintering*, 51(1).
- Islak, S., & Çelik, H. (2015). Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. *Science of Sintering*, 47(2).
- Islak, S., Küçük, Ö., Eski, Ö., Özorak, C., & Akkaş, M. (2017). The Effect of CNT Content and Sintering Temperature on Some Properties of CNT-reinforced MgAl Composites. *Science of Sintering*, 49(4).
- Ivasishin, O. M., Markovsky, P. E., Matviychuk, Y. V., Semiatin, S. L., Ward, C. H., & Fox, S. (2008). A comparative study of the mechanical properties of high-

- strength β -titanium alloys. *Journal of alloys and compounds*, 457(1-2), 296-309.
- Jedidi, I., Saïdi, S., Khemakhem, S., Larbot, A., Elloumi-Ammar, N., Fourati, A., ... & Amar, R. B. (2009). Elaboration of new ceramic microfiltration membranes from mineral coal fly ash applied to waste water treatment. *Journal of hazardous materials*, 172(1), 152-158.
- Jin, X., Wu, L., Sun, Y., & Guo, L. (2009). Microstructure and mechanical properties of ZrO₂/NiCr functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 509(1-2), 63-68.
- Kainer, K. U. (2006). Basics of metal matrix composites. *Metal Matrix Composites*, 1-54.
- Kelly, A. (Ed.). (2012). *Concise encyclopedia of composite materials*. Elsevier.
- Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1-2), 81-106.
- Kilmametov, A. R., Ivanisenko, Y., Mazilkin, A. A., Straumal, B. B., Gornakova, A. S., Fabrichnaya, O. B., ... & Hahn, H. (2018). The $\alpha \rightarrow \omega$ and $\beta \rightarrow \omega$ phase transformations in Ti-Fe alloys under high-pressure torsion. *Acta Materialia*, 144, 337-351.
- Kirecci, A., Özkoç, Ü., & İçoğlu, H. İ. (2012). Determination of optimal production parameters for polyacrylonitrile nanofibers. *Journal of applied polymer science*, 124(6), 4961-4968.
- Knudsen, O. Ø., & Forsgren, A. (2017). *Corrosion control through organic coatings*. CRC Press.
- Ko, F., Gogotsi, Y., Ali, A., Naguib, N., Ye, H., Yang, G. L., ... & Willis, P. (2003). Electrospinning of continuous carbon nanotube-filled nanofiber yarns. *Advanced materials*, 15(14), 1161-1165.
- Leyens, C., & Peters, M. (Eds.). (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Residual stress in metal additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 71, 348-353.
- Li, S., Kondoh, K., Imai, H., Chen, B., Jia, L., Umeda, J., & Fu, Y. (2016). Strengthening behavior of in situ-synthesized (TiC-TiB)/Ti composites by powder metallurgy and hot extrusion. *Materials & Design*, 95, 127-132.

- Li, W., Karnati, S., Kriewall, C., Liou, F., Newkirk, J., Taminger, K. M. B., & Seufzer, W. J. (2017). Fabrication and characterization of a functionally graded material from Ti-6Al-4V to SS316 by laser metal deposition. *Additive Manufacturing*, *14*, 95-104.
- Li, Y., Quan, J., Branford-White, C., Williams, G. R., Wu, J. X., & Zhu, L. M. (2012). Electrospun polyacrylonitrile-glycopolymer nanofibrous membranes for enzyme immobilization. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, *76*, 15-22.
- Liu, H., Wang, Z., Wang, Y., & Li, H. (2016). Self-induced electrical discharge machining of Ni–Al₂O₃ functionally graded materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *83*(1-4), 587-594.
- Lukkassen, D., & Meidell, A. (2003). Advanced materials and structures and their fabrication processes. *Narrik University College, Hin*.
- Lütjering, G., Williams, J. C., & Gysler, A. (2000). Microstructure and mechanical properties of titanium alloys. In *Microstructure And Properties Of Materials: (Volume 2)* (pp. 1-77).
- Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2017). Introduction to functionally graded materials. In *Functionally Graded Materials* (pp. 1-8). Springer, Cham.
- Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. L. (2012). Functionally graded material: an overview.
- Matějček, J., Nevrlá, B., Vilémová, M., & Boldyryeva, H. (2015). Overview of processing technologies for tungsten-steel composites and FGMs for fusion applications. *Nukleonika*, *60*(2), 267-273.
- Mavhungu, S. T., Akinlabi, E. T., Onitiri, M. A., & Varachia, F. M. (2017). Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends. *Procedia Manufacturing*, *7*, 178-182.
- McCafferty, E. (2005). Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method. *Corrosion science*, *47*(12), 3202-3215.
- Miklaszewski, A., Garbiec, D., & Niespodziana, K. (2018). Sintering behavior and microstructure evolution in cp-titanium processed by spark plasma sintering. *Advanced Powder Technology*, *29*(1), 50-57.
- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, *65*(15-16), 2526-2540.

- Mirazimi, J., Abachi, P., & Purazrang, K. (2016). Spark plasma sintering of ultrafine YSZ reinforced Cu matrix functionally graded composite. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29(12), 1169-1176.
- Miyamoto, Y., Kaysser, W. A., Rabin, B. H., Kawasaki, A., & Ford, R. G. (Eds.). (2013). *Functionally graded materials: design, processing and applications* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Mkwizu, S. P. (2015). *Electrochemical Synthesis and Characterisation of Multimetallic Nanostructured Electrocatalysts* (Doctoral dissertation, University of Pretoria).
- Moshtaghion, B. M. (2015). High-temperature plastic deformation of micro and nano-boron carbide and B₄C-based composites prepared by spark plasma sintering (SPS): experimental and modelling.
- Namini, A. S., Azadbeh, M., & Asl, M. S. (2017). Effect of TiB₂ content on the characteristics of spark plasma sintered Ti–TiB_w composites. *Advanced Powder Technology*, 28(6), 1564-1572.
- Nazarian-Samani, M., Kamali, A. R., Mobarra, R., & Nazarian-Samani, M. (2010). Phase transformations of Ni-15 wt.% B powders during mechanical alloying and annealing. *Materials Letters*, 64(3), 309-312.
- Norhasri, M. M., Hamidah, M. S., & Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91-97.
- Okwundu, O. S., Aniekwe, E. U., & Nwanno, C. E. (2018). Unlimited potentials of carbon: different structures and uses (a Review). *Metallurgical and Materials Engineering*, 24(3), 145-171.
- Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., & Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.
- Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in materials science*, 50(5), 511-678.
- Önder, A. (2007). First failure pressure of composite pressure vessels. *Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, Izmir*.
- Paluga, M., Švec, P., Janičkovič, D., Mrafko, P., & Conde, C. F. (2007). Surface morphology in amorphous Fe–Mo–Cu–B ribbon system. *Journal of non-crystalline solids*, 353(18-21), 2039-2044.

- Pastuszak, P. D., & Muc, A. (2013). Application of composite materials in modern constructions. In *Key Engineering Materials* (Vol. 542, pp. 119-129). Trans Tech Publications Ltd.
- Peters, M., Hemptenmacher, J., Kumpfert, J., & Leyens, C. (2003). Structure and properties of titanium and titanium alloys. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*, 1-36.
- Philip, A. S. P. E., & Schweitzer, P. E. (2009). Fundamentals of corrosion: Mechanisms, causes, and preventative methods.
- Popescu, I. N., Zamfir, S., Anghelina, V. F., & Rusanescu, C. O. (2010). Processing by P/M route and characterization of new ecological Aluminum Matrix Composites (AMC). *International journal of mechanics*, 4(3), 43-52.
- Poveda, R. L., & Gupta, N. (2016). Carbon nanofibers: structure and fabrication. In *Carbon Nanofiber Reinforced Polymer Composites* (pp. 11-26). Springer, Cham.
- Qin, X. H., Wan, Y. Q., He, J. H., Zhang, J., Yu, J. Y., & Wang, S. Y. (2004). Effect of LiCl on electrospinning of PAN polymer solution: theoretical analysis and experimental verification. *Polymer*, 45(18), 6409-6413.
- Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., & Baharvandi, H. (2009). The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(14), 5387-5393.
- Rahimian, M., Parvin, N., & Ehsani, N. (2010). Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(4-5), 1031-1038.
- Riesenfeld, R. F., Haimes, R., & Cohen, E. (2015). Initiating a CAD renaissance: Multidisciplinary analysis driven design: Framework for a new generation of advanced computational design, engineering and manufacturing environments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 284, 1054-1072.
- Rodríguez-Lorenzo, L. M., & Ferreira, J. M. F. (2004). Development of porous ceramic bodies for applications in tissue engineering and drug delivery systems. *Materials research bulletin*, 39(1), 83-91.
- Romig Jr, A. D., Dugger, M. T., & McWhorter, P. J. (2003). Materials issues in microelectromechanical devices: science, engineering, manufacturability and reliability. *Acta Materialia*, 51(19), 5837-5866.

- Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., & Beygi, H. (2011). Microstructure and mechanical properties of Al–Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29-30), 8765-8771.
- Sathujoda, P., Obalareddy, B., Batchu, A., Canale, G., Maligno, A., & Citarella, R. (2020). Effect of Corrosion on the Natural and Whirl Frequencies of a Functionally Graded Rotor-Bearing System Subjected to Thermal Gradients. *Materials*, 13(20), 4546.
- Savitskii, E. M. (2012). *Physical metallurgy of refractory metals and alloys*. Springer Science & Business Media.
- Schweitzer, P. A. (2006). *Corrosion of linings & coatings: cathodic and inhibitor protection and corrosion monitoring*. CRC press.
- Shankar, M. R., Rao, B. C., Lee, S., Chandrasekar, S., King, A. H., & Compton, W. D. (2006). Severe plastic deformation (SPD) of titanium at near-ambient temperature. *Acta Materialia*, 54(14), 3691-3700.
- Sharifi, E. M., Karimzadeh, F., & Enayati, M. H. (2011). Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites. *Materials & Design*, 32(6), 3263-3271.
- Shin, Y. M., Hohman, M. M., Brenner, M. P., & Rutledge, G. C. (2001). Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities. *Polymer*, 42(25), 09955-09967.
- Shufeng, L. I., Kondoh, K., Imai, H., Chen, B., Jia, L., & Umeda, J. (2015). Microstructure and mechanical properties of P/M titanium matrix composites reinforced by in-situ synthesized TiC–TiB. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 75-83.
- Shumiya, H., Kato, K., & Okubo, H. (2004, October). Feasibility study on FGM (functionally graded materials) application for gas insulated equipment [solid insulators]. In *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*. (pp. 360-363). IEEE.
- Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). On the texture formation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(6), 2863-2872.
- Singh, H., Sarabjit, N. J., & Tyagi, A. K. (2011). An overview of metal matrix composite: processing and SiC based mechanical properties. *Journal of Engineering Research and Studies*, 2, 72-78.

- Singh, P. K., Kumar, M., & Maurya, P. K. (2017). Fea for WEDM Process of Titanium Alloy.
- Singh, H., Hayat, M., He, Z., Peterson, V. K., Das, R., & Cao, P. (2019). In situ neutron diffraction observations of Ti-TiB composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 124, 105501.
- Tahersima, M. (2018). *Enhancement of Light Matter Interaction of Thin Film Materials in Optoelectronic Devices: Plasmonic Antennas, Electro-Optic Modulators, and Solar Cells* (Doctoral dissertation, The George Washington University).
- Taya, M., & Arsenault, R. J. (2016). *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Elsevier.
- Thieme, M., Wieters, K. P., Bergner, F., Scharnweber, D., Worch, H., Ndop, J., ... & Grill, W. (2001). Titanium powder sintering for preparation of a porous functionally graded material destined for orthopaedic implants. *Journal of materials science: materials in medicine*, 12(3), 225-231.
- Tiley, J., Searles, T., Lee, E., Kar, S., Banerjee, R., Russ, J. C., & Fraser, H. L. (2004). Quantification of microstructural features in α/β titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 372(1-2), 191-198.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.
- Udupa, G., & Gangadharan, K. V. (2012, March). Future applications of carbon nanotube reinforced functionally graded composite materials. In *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM-2012)* (pp. 399-404). IEEE.
- Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). Functionally graded composite materials: an overview. *Procedia Materials Science*, 5, 1291-1299.
- URL-1 (www.electro-polish.com/processes/powder-coating) sitesinde 06/06/2020 tarihinde alınmıştır.
- Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32(2), 133-148.
- Vermesan, O., & Friess, P. (Eds.). (2013). *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*. River publishers.

- Wang, Z. G., Li, C. P., Wang, H. Y., Zhu, J. N., Wang, C., & Jiang, Q. C. (2017). Wear and Corrosion Behavior of Functionally Graded Nano-SiC/2014Al Composites Produced by Powder Metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 729-735.
- Wanhill, R. J. H. (2017). Carbon fibre polymer matrix structural composites. In *Aerospace materials and material technologies* (pp. 309-341). Springer, Singapore.
- Weiss, S., Jakobs, J., & Reemtsma, T. (2006). Discharge of three benzotriazole corrosion inhibitors with municipal wastewater and improvements by membrane bioreactor treatment and ozonation. *Environmental science & technology*, 40(23), 7193-7199.
- Wiley, C. S. (2011). *Synergistic methods for the production of high-strength and low-cost boron carbide* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- Wu, M., Wang, Q., Li, K., Wu, Y., & Liu, H. (2012). Optimization of stabilization conditions for electrospun polyacrylonitrile nanofibers. *Polymer degradation and stability*, 97(8), 1511-1519.
- Yan, Z., Chen, F., Cai, Y., & Zheng, Y. (2014). Microstructure and mechanical properties of in-situ synthesized TiB whiskers reinforced titanium matrix composites by high-velocity compaction. *Powder Technology*, 267, 309-314.
- Yılmaz, T. (2019). *Development of functionally graded aluminum matrix composite materials for defense industry applications* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).
- Young, D. J. (2008). *High temperature oxidation and corrosion of metals* (Vol. 1). Elsevier.
- Yusefi, A., Parvin, N., & Mohammadi, H. (2018). WCu functionally graded material: Low temperature fabrication and mechanical characterization. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 115, 26-35.
- Zhang, G., Wang, F., Huang, Z., Dai, J., & Shi, M. (2016). Improved ablation resistance of silicone rubber composites by introducing montmorillonite and silicon carbide whisker. *Materials*, 9(9), 723.
- Zhang, L., & Hsieh, Y. L. (2009). Carbon nanofibers with nanoporosity and hollow channels from binary polyacrylonitrile systems. *European Polymer Journal*, 45(1), 47-56.
- Zhang, X., Leygraf, C., & Wallinder, I. O. (2013). Atmospheric corrosion of Galvanic coatings on steel in chloride-rich environments. *Corrosion Science*, 73, 62-71.

Zussman, E., Rittel, D., & Yarin, A. L. (2003). Failure modes of electrospun nanofibers. *Applied physics letters*, 82(22), 3958-3960.