

T.C.
BİLECİK ŐEH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

**FARKLI KATKI İLAVELERİ İLE SERAMİK VE METALİK ESASLI
KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMİH KÜÇÜKKÖR

TEZ DANIŐMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ PINAR UYAN

BİLECİK, 2023

10492742

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

**FARKLI KATKI İLAVELERİ İLE SERAMİK VE METALİK ESASLI
KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMİH KÜÇÜKKÖR

TEZ DANIŐMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ PINAR UYAN

BİLECİK, 2023

10492742

BEYAN

“Farklı Katkı İlaveleri İle Seramik ve Metalik Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Semih KÜÇÜKKÖR

.../.../2023

İmza

ÖNSÖZ

Ülkemizi muasır medeniyetler seviyesine çıkarma amacını taşıyan her genç birey gibi bilimsel çalışmalarla ülkemizde üretimi gerçekleştirilemeyen katma değeri yüksek yeni iş alanları açacak bilimsel çalışmalarda bulunma hayalimi gerçekleştirme yolunda bana olan inancını kaybetmeyen engin bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen ve son ana kadar desteğini hissettiğim tez danışman hocam, Dr. Öğr. Üye. Pınar UYAN'a teşekkürü bir borç bilir, ileriki çalışmalarımıla benden sonrakilere aktarmayı kendime vazife bilirim...

Varlığım Türk varlığına armağan olsun.

Semih KÜÇÜKKÖR

2023

ÖZET

FARKLI KATKI İLAVEREİ İLE SERAMİK VE METALİK ESASLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu çalışmada, toz metalurjisi ile üretilen numuneler 1100 °C 'de 120 dak. sinterlenmiş olup, saf titanyuma farklı oranlarda (% 1, %3, %5, %7) zirkonya içeren seramik hammadde toz ilave edilerek üretilen kompozitlerde, ilave miktarının sertlik, termal difüzyon ve mikroyapıya etkileri araştırılmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers mikro sertlik ölçme yöntemi ile gerçekleştirilmiş, yoğunluk ölçümleri Arşimet metoduyla gerçekleştirilmiş mikro yapı analizleri SEM ile yapılmıştır. Mikroyapı, proses, karakterizasyon çalışmaları harmanlanarak ilişkiler ortaya koymuştur.

Üretilen seramik metal kompozitlerin birbiri ile kıyaslanması sonucunda, en yüksek sertlik Ti-%5 Z kodlu numunede 461,3 HV olup, yoğunluk Ti-%3 Z kodlu numunede 4,17 gr/cm³, relatif yoğunluğun %94,2 olduğu görülmüştür. Termal difüzyon ise, katkı miktarıyla azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Saf Titanyum, Seramik-Metal Kompozit, SEM

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CERAMIC AND METALLIC BASED COMPOSITES WITH DIFFERENT ADDITIVES

In this study, the samples produced by powder metallurgy were sintered at 1100 °C for 120 minutes, and the effects of zirconia contained ceramic raw material amount on hardness, thermal diffusivity and microstructure were investigated in composites produced by adding ceramic powder to pure titanium at different rates (1%, 3%, 5%, 7%). Hardness measurements were carried out with Vickers micro hardness measurement method, density measurements were performed with Archimedes method, microstructure analyzes were performed with SEM. Microstructure, process, characterization studies have been blended to reveal relationships.

As a result of the comparison of the produced ceramic metal composites with each other, the highest hardness was 461.3 HV in the Ti-5% Z coded sample, and the density was 4.17 gr/cm³ in the Ti-3% Z coded sample, and the relative density was 94.2%. Thermal diffusivity decreased with the amount of additive.

Keywords: Pure Titanium, Ceramic-Metal Composite, SEM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
1.GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1. Kompozit Nedir?	2
2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	3
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.4. Matris Malzemelere Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.4.1. Metal Matrisli Kompozitler	5
2.4.2. Seramik Matrisli Kompozitler	6
2.4.3. Polimer Matrisli Kompozitler	21
3. TAKVİYE MALZEMELERLE OLUŞTURULAN KOMPOZİTLER	22
3.1. Kompozitlerle Dolgu Malzemeleri Arası Bağdaştırıcılar	23
3.2. Seramik Takviyeli Titanyum Matrisli Kompozitlerle İlgili Çalışmalar	25
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
4.1 Karakterizasyon Çalışmaları	28
4.1.1. Vickers Ölçümü	28
4.1.2. Yoğunluk Ölçümü	30
4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı Karakterizasyonu (SEM) .	30
4.1.4. XRD ile Faz Analizi ve Termal Difüzyon Ölçümü	30
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	31
5.1. Matris ve Takviye Tozların Faz ve Kimyasal Analizi	32
5.2. Tozların Morfolojik Analizi	33

5.3. Sertlik ve Yoğunluk Deney Analizleri	34
5.4 Sinterlenmiş Numunelerin SEM Analizi.....	35
5.5 Sinterlenmiş Numunelerin Termal Analizi.....	36
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	38
KAYNAKÇA	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Takviye Şekilleri (a) Monofilament, (b) Kesikli lifler, (c) Partiküller	2
Şekil 2.2. Çelik, Alüminyum ve Kompozitlerin Kıyaslanması.....	3
Şekil 2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	4
Şekil 2.4. Seramik Matrisli Kompozitlerin Nano Düzeyde İç Yapı Gösterimi	6
Şekil 3.1. Kompozit Malzemelerin Matris ve Takviye Malzemeleri.....	22
Şekil 3.2. Bir Seramik Matris Kompozitin Birim Yapısının Şematik Diyagramı	23
Şekil 3.3. Arayüzlerde Bulunan Bağlanma Türleri: (a) Moleküler Dolaşıklık, (b) Kimyasal Gruplar Arası Reaksiyon, (c) Elektrostatik Çekim, (d) Oluşuma Yol Açan Kimyasal Reaksiyon Yeni Bir Bileşik, (e) Elementlerin Birbirine Difüzyonu, (f) Mekanik Kilitleme.....	25
Şekil 4.1. Vickers Sertlik Deneyi Prensi Şeması	29
Şekil 4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışma Prensi	31
Şekil 5.1. Titanyum Tozun XRD Patterni.....	32
Şekil 5.2. Z Kodlu Takviye Tozun XRD Patterni.....	33
Şekil 5.3. Titanyum Tozun SEM Görüntüsü.....	33
Şekil 5.4. Takviye Seramik Tozun SEM Görüntüsü.....	34
Şekil 5.5. Takviye seramik katkı yüzdesi ile yoğunluk ve sertlik değerlerinin değişimi	35
Şekil 5.6. Kompozitlerin SEM Mikroyapı Görüntüleri	36
a) Ti-%1 Z, b) Ti-%3 Z, c) Ti-%5 Z, d) Ti-%7 Z	36
Şekil 5.7. Kompozitlerin Termal Difüzyon Değerlerinin Değişimi	37

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Shin ve Sun'un Arkadaşlarıyla Yapmış Oldukları Çalışma Sonuçları	26
Tablo 3.2. Han ve arkadaşlarının 2012 Yılında Yapmış Olduğu Çalışmadaki Sermetlerin Bağlı Yoğunlukları.....	26
Tablo 3.3. Tsukamoto ve Arkadaşlarının Yapmış Olduğu Çalışma.....	27
Tablo 4.1. Deney Yapılış Aşamaları	28
Tablo 4.2. Vickers, Rockwell ve Brinel Yöntemlerinde Kullanılan Başlıklar ve Uygulama Alanları	29
Tablo 5.1. Z Kodlu Tozun Kimyasal Analizi	32
Tablo 5.2. Numunelerin Sertlik ve Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	34
Tablo 5.3. Kompozitlerin Oda Sıcaklığında Elde Edilen Termal Difüzyivite Değerleri	36

SEMBOLLER LİSTESİ

AlN: Alüminyum Nitrür

AISI: Östenitik Paslanmaz Çelik

Al: Alüminyum

Al₂O₃: Alüminyum Oksit

Al₄C₃: Alüminyum Karbür

B₄C: Bor Karbür

Be: Berilyum

BN: Bor Nitrür

C: Karbon

Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂: Kalsiyum Hidroksiapatit

CBPC: Kimyasal Olarak Bağlı Fosfat Seramik Kaplamaları

CeO₂: Seryum (IV) Oksit

CFCC: Sürekli Fiber Seramik Kompozit

CGNC: Grafen Katkılı Seramik Nanokompozit

CMC: Seramik Matrisli Kompozit

CNT: Karbon Nanotüp

CO: Karbonmonoksit

Cp-Ti: Saf Titanyum

Cu: Bakır

CVID: Kimyasal Buhar İnfiltrasyonu ve Yer Değiştirmesi

EPD: Elektroferez

FAST: Alan Destekli Sinterleme Tekniği

Fe: Demir

GNP: Grafen Nano Plakaları

GO: Grafen Oksit

GPa: Giga Paskal
HA: Hidroksi Apatit
HEBM: Yüksek Enerjili Değirmen
HIP: Yüksek Sıcaklık İzostatik Pres
HNO₃: Nitrik Asit/ Kezzap
Mg: Magnezyum
MMC: Metal Matrisli Kompozit
MPa: Mega Pascal
MWCNT: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
Na₂O₃: Sodyum Karbonat
Ni: Nikel
NMP: N-Metil-Pirolidon
NPS: Nanoparçacıklar
PAS: Plazma Yardımlı Sentezleme Yöntemi
PEEK: Polieter Eter Keton
PEI: Poli Eter İmid
PES: Poli Eter Sülfon
PIP: Prekürsör İnfiltrasyonu ve Pirolyzi
PMC: Polimer Matrisli Kompozit
PMK: Piperonil Metil Keton
PU: Poliüretan
rGO: İndirgenmiş Grafen Oksit
RMI: Reaktif Eriyik İnfiltrasyonu
SI: Toz İnfiltrasyonu
SIC: Silisyum Karbür
Si₃N₄: Silikon Nitrür

SiO₂: Düşük Silika

SPS: Spark Plazma Sinterleme

Ti: Titanyum

TiB₂: Titanyum Diborür

TiC: Titanyum Karbür

TiO₂: Titanya/ Titanyum Oksit

Y₂O₃: İtiryum (III) Oksit

Y₂SiO₅: İtiryum Monosikilat

Y₂SiO₇: İtiryum Disikilat

XRD: X-Işını Kırınım Yöntemi

ZrO₂: Zirkonya

1. GİRİŞ

Binlerce yıldır insanlık kaybettikleri uzuvlarının yerini alabilecek işlevselliklerini arttırabilecek birçok materyal kullanmıştır. 1900'lerin başlarında 2,2 milyar olan dünya nüfusu günümüzde 7.8 milyara ulaşmıştır. 2045 tarihinde 9 milyar seviyesini aşması öngörülmektedir. Artan ve gelişen nüfusa bağlı hammadde sıkıntısı malzeme mühendisliğine daha güçlü ve dayanıklı malzemelerin daha az enerji harcanarak geri dönüşümü yüksek ve sürdürülebilir malzeme üretme misyonunu yükletmiştir. Kompozit malzemelerin bulunmasıyla ileri teknolojinin isteklerini karşılamakta yetersiz metal malzemelerin, daha yüksek dayanım ve korozyona karşı dirençleri daha düşük yoğunluklara ulaşılabilmesi malzeme tasarımına yeni bir bakış açısı getirmiştir (Deborah Chung, 2017).

Titanyum elementinin çeliğe göre düşük yoğunluğu, elektriksel ve termal iletkenliğinin düşük olması, uzun ömürlü ve kimyasallara ve oksitlenmeye karşı daha kararlı bir yapıya sahip olmasının yanı sıra en pahalı metaller arasında yer alması, işlenebilirliğinin zorluğu yeni kompozit malzemelerin araştırılmasını kaçınılmaz kılmıştır (Callister, 2007).

Zirkonya elementinin titanyuma göre kimyasallara ve oksitlenmeye daha kararlı ve esnek yapısı, daha düşük ısı ve elektrik iletkenliği, maliyetlerinin titanyuma göre daha düşük olması, daha sert ve dayanıklı olması özellikle titanyuma göre daha hipoalerjik yapısı, bakterilerin üremesine daha az elverişli olması, çok düşük toksik etkisi gibi üstün özelliklerinden dolayı tıp alanında özellikle implant üretiminde mühendislere eşsiz özellikler sunmaktadır (Callister, 2007).

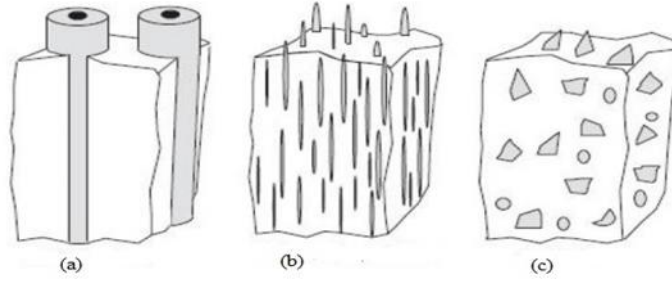
Bu tez çalışmasının amacı, biyomedikal sektöründe implant olarak kullanılacak saf titanyum matrisli, zirkonya takviyeli kompozitlerin üretilmesini ekonomik olarak gerçekleştirebilmek adına yüksek oranda ZrO_2 içeren seramik hammadde toz kullanılması ve üretilen kompozitlerin mekanik, termal ve mikroyapı karakterizasyonlarının yapılması olup, bu çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Nedir?

Genel anlamda kompozitler, farklı ara yüzler ile ayrılmış iki ya da daha fazla fazdan oluşan bir bütün olarak düşünülen malzemelerdir. Kompozitlerin özellikleri, yapıyı oluşturan her bir bileşen malzeme ile farklılaşır. Kompozit malzemeler, matris diye adlandırılan başka bir bileşene gömülmüş olan lifler, partiküller, parçacıklar ya da tabakalar halinde bir takviye eleman katmanından oluşur(Fazeli, Florez, & Simão, 2019; Rani Elhajjar, Valeria La Saponara, 2013; Weber, Shaw, & Petering, 1987).

Liflerin boyutuna (kısa veya uzun) veya lifin türüne (sentetik veya doğal) göre de kategorize edilebilir ve bu yapılar sertliğini artırıcı olarak kullanılırlar. Şekil 2.1 'de çeşitli takviye şekilleri ve Şekil 2.2. 'de matris ve takviye türleri gösterilmektedir. Takviye eklenmesinin amacı, yapının mekanik ya da fiziksel özelliklerinin geliştirilmek istenmesidir (Behera, Sahu, Mohapatra, & Ghadei, 2020).



Şekil 2.1. Takviye Şekilleri (a) Monofilament, (b) Kesikli lifler, (c) Partiküller

Kaynak: (Behera vd., 2020)



Şekil 2.2. Çelik, Alüminyum ve Kompozitlerin Kıyaslanması

Kaynak:(Şardan, 2009)

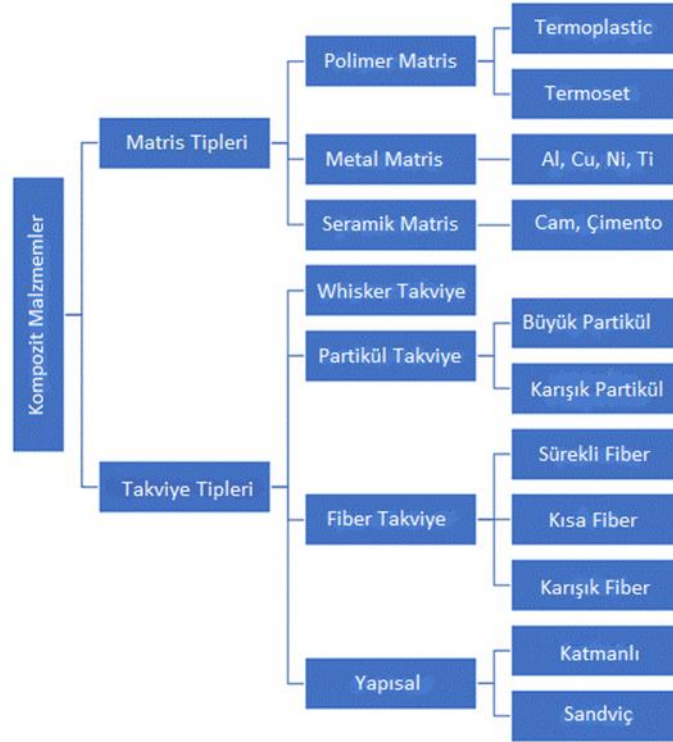
Şekil 2.1 'de kompozitlerin, çelik ve alüminyumla kıyaslanması görülmektedir. Heterojen bir yapıda olan kompozitler, monolitik malzemeler gibi olmayıp genellikle anizotropik özelliklere sahip haddelenmiş alaşımlar gibi istisnalar dışında ilk yaklaşımda genellikle izotropik malzemelere benzerler (Şardan, 2009).

2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemeler, dayanımı yüksek, düşük maliyetli malzeme arayışına bağlı olarak endüstrinin tüm alanlarında talep görmektedir. Özellikle alaşım ya da bileşik olarak monolitik yapıda bir malzeme ile elde edilemeyen ve benzersiz özelliklere sahip yeni bir malzeme sistemi oluşturmayı mümkün kılan kompozit malzemeler günümüzde havacılık endüstrisinde, motor ve makine parçalarında, otomobillerin frenler diskleri gibi mekanik bileşenlerde, spor ekipmanlarında, protez ve implantlar olmak üzere biyo-medikal cihazlarda, tank dış gövde kalkını ve çelik yelek gibi savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Arslan & Tayyar, 2016; Kaya, 2016).

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler kullanılacakları alanlara göre yapısal ve özellik bakımında yüksek performans elde etmek için farklı iç yapısal özellik ve üretim şekilleri bulunmaktadır. Şekil 2.3 'de kompozitlerin sınıflandırılması gösterilmektedir (Priyanka, Dixit, & Mali, 2017).



Şekil 2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kaynak: (Priyanka vd., 2017)

2.4. Matris Malzemelere Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris malzemelerine göre kompozit malzemelerini sınıflandırmak gerekirse kompozit malzemelerde uygulanan kuvvet altında gerilmeleri takviyelere dağıtmak ve takviye katmanlarını yerinde tutmak amacıyla matrisler kullanılmaktadır. Metaller, polimerler ve organik olmayan malzemeler gibi takviye malzemeleri ile birleşebilen, gerilmelere dayanabilen ve güçlü bağ kurabilen malzemeler olası matris malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Al-Oqla & Salit, 2017).

Matrisler hafiflik, değişken sıcaklıklara hızlı tepki, nem hassasiyeti gibi özelliklerinden dolayı belirli bir amaca yönelik kullanılmaktadırlar. Kompozitler üretilirken matris yapısının özelliklerine bakılarak seçilmektedirler. Matrislerle oluşturulan kompozitleri matrislerin türüne

göre; metal matris kompozitler (MMC), seramik matris kompozitler (CMC) ve polimer matris kompozitler (PMC) olmak üzere üç ana başlıkta sınıflandırılır (Al-Oqla & Salit, 2017).

2.4.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal bir matrisle çevrili liflerden ya da partiküllerden oluşan metal matrisli kompozitler çok yüksek sertliğe ve mukavemete sahip olup, sıcaklık dirençleri polimer matrisli kompozitlerden ve saf metallere daha yüksektir. Bir malzemenin sabit bir yük veya gerilme altında uğradığı plastik deformasyonun zamana bağlı değişimini ifade eden yüzde uzama dirençleri, çevresel koşullar altında boyutlarını koruma isteği olan boyutsal kararlılığı yüksek, aşınmaya karşı yüksek dirençli ve yanmazlık gibi üstün özelliklerine dezavantaj olarak ise yüksek yoğunluklarına bağlı olarak kütleli ağırlıkları ve üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanım alanları sınırlıdır. Son yıllarda krank milleri ve pistonlarda fiber takviyeler eklenmek suretiyle yoğunluğu azaltılarak otomotiv endüstrisinde çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Abdullah, Adzali, & Che Daud, 2015; Park & Seo, 2011; Prasad, Suresh, Ratheesh, Wong, & Gupta, 2021).

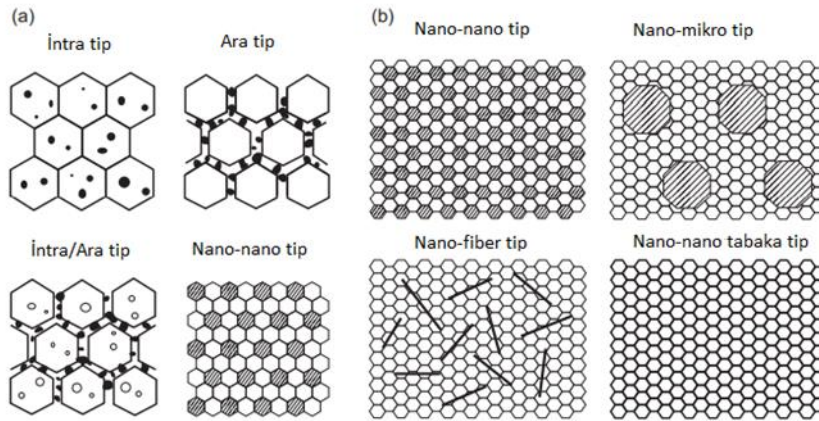
Bu kompozit türünde araştırmaların çoğunda, Al, Be, Co, Fe, Ni, Mg, Ti gibi metaller kullanılsa da, fiyat performans olarak alüminyumun ağır bastığı görülmektedir. Takviye malzemesi olarak SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂ ve grafit gibi seramik esaslı malzemeler de düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek sertlik özellikleri açısından yapı içerisinde kullanılmaktadır (Hunt, 2000).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde katı ve sıvı hal olmak üzere iki üretim yöntemi bulunmaktadır. Sıvı hal üretim yöntemi olarak ergimiş matris malzemesi sıvının içerisine karıştırılarak oluşturulan vortex döküm, basınçsız ergiyiğe nüfuz ettirme, basınçlı ergiyiğe nüfuz ettirme ve parçacıklı ergiyiğin birleştirilmesi gibi üretim yöntemleri kullanılır. Katı hal ise sıvı halden biraz daha farklı olarak yüksek sıcaklık ve basınç altında katılaşma sırasında difüzyon sayesinde katkı malzemeleri arasındaki dağıntı fazların bağlanması sağlanarak nihai ürün oluşturulan bir yöntemdir (Anish, Singh, & Sivapragash, 2012).

2.4.2.Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler son dönemde üstün yapısal özellikleri ve nispeten düşük üretim maliyetlerine bağlı olarak en çok araştırılan kompozitlerden biridir (K K Chawla, 1998; Curtin, 1991).

Seramik endüstrisi bilinen ilk seramik figürün Venus of Dolní Věstonice 25.000BC Çekoslovakya’da keşfinden günümüz nano yapılı seramiklerin kullanımına kadar geçen süre içerisinde hep popüleritesini korumuştur. Nano yapılı seramikler 100 nm ve daha küçük ölçekteki inorganik materyallerden oluşan yapılar olarak tanımlanmaktadır (Ovid’ko & Sheinerman, 2012). Bu nano yapılı seramikler, seramik matrislerin metal seramik nanokompozitlerin sentezinde, mekaniksel mukavemetini, dayanımını, kararlılığını, kopma dayanımını ve aşınma dayanımını arttırmak amacıyla kullanılmasıyla geniş kullanım alanı bulmuştur. Seramik nanokompozitler tane-içsel (intragranular), taneler arası (intergranular) ve nano-nanokompozitler olarak 3 ana kategoriye ayrılır (Abelson, 1987).



Şekil 2.4. Seramik Matrisli Kompozitlerin Nano Düzeyde İç Yapı Gösterimi

Kaynak: (Mantilaka, Wijesinghe, Dissanayake, Mihiri Ekanayake, & Senthilnathan, 2019)

Şekil 2.4 ‘de görünen intra-granular ve inter-granular nanokompozitler, monolit yapılı seramiklere göre yüksek sıcaklıklarda 2-5 kat daha fazla yüzey sertliği, kırılmaya karşı mukavemeti, sürtünme direnci ve termal şok dayanımı özelliklerinin yanı sıra nano-nano yapılı seramikler işlenebilirlik ve süper-plastisite özellikleri de göstermektedir (Mantilaka vd., 2019).

Seramik matrisli kompozit malzemelerin takviyelerine göre sınıflandırılmaları aşağıda anlatılmıştır.

Alüminyum oksit (Al₂O₃), yüksek sıcaklıklarda kararlı yapısı ve aşınma dayanımı sayesinde kompozitlerin güçlendirilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Nano parçacık yapılı alüminyum materyeller seramiklerin yoğunluk, sertlik, Young modülü, kırılma mukavemeti, kırılma gerilimi, aşınma dayanımı ve çatlama mukavemeti gibi özelliklerinin iyileştirilmesinde en çok kullanılan malzemelerdendir. Nano/nano-seramik yapılı nanokompozitlerin otomatik ateşleme tekniği ile Nano kristal Al₂O₃-ZrO₂ 'lerin sentezi yapılmıştır. Bu teknikte hızlı ısıtma ve soğutma adımlarıyla birbiri içerisinde nano düzeyde nüfuz etmesini, 1200 °C gibi yüksek sıcaklık izostatik pres (HIP) kullanarak ergime olmadan teorik yoğunluğunun %99'una ulaşmasını sağlamış. Ortalama sertlik ve yüzey mukavemet değerlerinde konvensiyonel seramik materyallere göre iyileşme sağlanmıştır (Peng, Liu, Dai, Xiao, & Song, 2006).

Yüksek basınç ve düşük sıcaklıkta alümina nano-kristallerinin sentezini tanımlanmış ilk olarak γ fazındaki alümina α fazına sinterlenmiştir. Ayrıca parçacık yapısındaki büyümesinin düşük sinterleme sıcaklıklarında sınırlı kaldığı ve γ fazında çekirdeklenmenin yüksek basınçta nano düzeyde α fazında çekirdek büyüklüğünü torodial tipli yüksek basınç aparatı ile kazandırılmıştır. Dolayısı ile yüksek yüzey alanı sayesinde alümina (Al₂O₃) tozu iyi bir absorb materyali olarak işlev görmüştür (Liao, Chen, Kear, & Mayo, 1998).

Yoğun nano kristal yapıdaki alümina (<100nm) ile itriyum ile stabilize edilmiş tetragonal yapılı zirkonya polikristali yüksek ısıtma hızı ve yüksek enerjili değirmenlerle (HEBM) kimyasal bağları koparılan materyal nano boyutlara indirgenmiş, matris boyutu 96 nm, dövülme fazında 265 nm boyutlarındaki bu kompozit materyalin saf alumina nano kristaline göre sertliği, ferroelastikliğindeki değişim sayesinde 3 kata kadar ZrO₂ nanokristal tetragonal yapısında bozulma olmadan arttırılmıştır (G.-D. Zhan, Kuntz, Wan, Garay, & Mukherjee, 2003).

Nano-kristal yapıdaki alümina-elmas kompozitlerinin hazırlanması hakkında bir metot öne sürülmüş alınan patentte belirtildiği gibi nano boyuttaki alümina ve nano-kristal formundaki elmasların oluşturduğu alümina kompozitlerin yüksek sertlik ve mukavemette yüksek basınç altında sinterlendiklerinde sahip oldukları belirtilmiştir. Kesici ve şekillendirici alet uygulamalarında kullanılan mil yataklarının mekanik özellikleri ve elastisitelerinin geliştirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir (R.S. Mishra, A.K. Mukherjee, 1996).

Wu ve ekibi, nano fazdaki γ -Al₂O₃ tozunu asal gazlarla ilişkilendirildiği metodunda sabit ısıtma hızlarında sinterleme davranışlarının α fazındaki Al₂O₃ 'un mikro düzeydeki kristal yapısındaki yapısal değişikliklere bağlı olduğunu öne sürmüştür. Kurutma prosesindeki

partiküllerin arasındaki güçlü bağların düşük sinterleme sorununun kaynağını oluşturduğunu belirtmiştir. Bunun nedeni olarak, α fazındaki Al_2O_3 partiküllerinin ya da MgO katkılanmasının tozların yoğunlaşması sırasında mikroyapıdaki değişimdeki kontrolde etkisizliğini su ile maruz kalmanın bozucu etkisine bağlamıştır. Asal gazlarla yoğunlaştırma tekniğinde Al_2O_3 partiküllerinin bütün fazlarının α fazına ısıyla birlikte dönüştüğü böylece düşük sıcaklıklarda alüminyum tozunun sinterlenmesinde faydalı olabileceğini göstermiştir (Wu, Jonghe, & Rahaman, 1996).

Ferein γ fazındaki Al_2O_3 nanokristallerinin gazlarla faz değişimlerinin mikrodalga ışıması ile sentezi hakkındaki çalışmada (Freim, McKittrick, Katz, & Sickafus, 1994) materyal 800-1300 °C mertebesine çıkarıldığında polimorfik yapıdaki çekirdeklenme ve büyüme fazında numunenin yüksek birim hacim oranına yükseltilmesinde dikkat çekici engellerin olduğu saptanmıştır. Bu fazlardaki değişimler beraberinde partikül morfolojisinde kristal büyüklüğü, yüzey alanı gibi değişikliklere de neden olduğu ortaya çıkmıştır. Böhmit [γ - $AlO(OH)$] cevherinden kimyasal olarak sentezlenen alümina konvensiyonel olarak ısıtıldığında tamamen aynı çekirdek ve büyüme faz değişimlerini sergilediği görülmüştür. Alümina esaslı monokristal yapıdaki seramiklerin istenilen sertlik seviyesine gelmesini etkileyen mekanizmayı seramiklerin mikroyapısı yönetir. Mikrodalga içeren hibrit hızlı ısıtma prosesi (Menezes & Kiminami, 2008) nanokompozitlerdeki çekirdek büyümesini değişken basınç yardımıyla sinterleme prosesine ihtiyaç duymadan verimli şekilde baskı altında tutmamızı sağlar. HEBM yüksek enerjili öğütme süresince alüminanın γ fazından α fazına dönüşümüne öncülük ederek ve tozlara çok daha fazla içsel enerji iletmesi nedeniyle faz değişim bariyerini aşmasını sağlar. Böylece üstün sertliğe sahip nanokristal yapıdaki nanokompozitlerin nanokristallerin matris çekirdek büyüklükleri ile alakalı olduğu söyleyebiliriz (G.-D. Zhan, Kuntz, Duan, & Mukherjee, 2004).

Plazma yardımcı sentezleme yöntemi (PAS (plasma assisted sintering)) Menedez ve ekibinin yaptığı çalışmada gibi γ -alümina α -alümina 80 nm boyutlarda maksimum teorik birim hacim yoğunluğu %79 olarak hesaplanırken PAS metoduyla nanokristal yapıdaki materyallerin sentezlenmesinde %59 gibi dikkat çekici rakamları ulaşılabilmektedir (R. S. Mishra, Schneider, Shackelford, & Mukherjee, 1995).

Toldsepp ve ekibi SPS (Spark plasma sintering) (FAST (field assisted sintering technique)) özellikle sentezlemesi zor olan nanoyapıdaki, aşırı sıcaklıklara dayanıklı ya da kararlı fazdaki materyallerin sentezinde yüksek şiddetli düşük voltajlı darbeli akımlar kullanılarak oluşturulan SPS metodunun γ -alümina tozunu yüksek yoğunluğa ulaşması için

başlangıçta basınç uygulamasının ve yavaş ısıtma işlemin gerekli olduğu konusunda son sözü söylemiştir (Töldsepp vd., 2016).

Faz değişimlerinde karşılaşılan gözenekli yapının ortadan kaldırılması için 1500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda SPS metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda basınç uygulanması çekirdek büyümesini ve gözenekli yapının seramiklerde artmasını sağlamaktadır. 50 nm boyutlarındaki ticari nanokristal yapının korunmasında düşük sıcaklık ve düşük bekleme süresi şartları oluşturulmaktadır (Morales-Rodríguez, Poyato, Gallardo-López, Muñoz, & Domínguez-Rodríguez, 2013). Buna rağmen mikron altı çekirdekli kaba mikro yapı malzemeler oluşturulmuş ve mikro yapıdaki alüminanın değişik sinterleme şartlarındaki evrimindeki nano çekirdeklerinin yoğunlaştırılması mekanizmasında çekirdek büyümesindeki sorumlu olarak gösterilmektedir (Töldsepp vd., 2016).

TiO₂ (titanyum oksit veya titanya) nanoparçacıklar ve bileşikleri matrisleri güçlendirmek için kullanılır. TiO₂, anatase, rutil ve brookit olarak üç kristal yapıda mevcuttur. Anatase ve rutil çoğunlukla ticari ürünlerde kullanılır (Lan, Lu, & Ren, 2013). TiO₂ nanoparçacıklar (NPS) stabilite, biyouyumluluk, antikorozyon özelliği, benzersiz boyuta bağlı fiziksel, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan nanomaddeler arasındadır (Becker vd., 2014; Tang vd., 2005).

Son yıllarda TiO₂ NPS, takviye malzemeleri olarak ve seramik yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılmıştır (Becker vd., 2014).

Yaxuan Liu ve ekibi kimyasal olarak bağlı fosfat seramik kaplamaların (CBPC'ler) korozyon önleyici özelliğini arttırmak için TiO₂ NPS kullanmışlardır. AISI 304L üzerinde nano-TiO₂ ile güçlendirilmiş kimyasal olarak bağlı fosfat biyoseramikleri Alüminyum, çinko oksit ve nano-TiO₂'nin ağırlık yüzdelerini değiştirerek paslanmaz çelik (25 nm'lik ortalama parçacık boyutu) hazırlanmış ve AP bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu deney, sertleştirme sıcaklığının nano-TiO₂ eklenmesiyle arttığını göstermiştir (Y. Liu, Bian, Zhao, & Wang, 2018).

Ayrıca nanotitanya partikülleri hidrofobiktir ve titanya miktarındaki artış alüminyum fosfatın formasyonunu artırır (Xu, Liu, Liu, Wang, & Chen, 2018). Düşük yoğunluklu alüminyum fosfat parçacıkları seramik parçacıklarının bağlanma gücünü artırabilir ve yüzeydeki boşlukların azalmasını sağlayarak kaplamanın daha kompakt olmasını sağlar. Akademik çalışmalar kaplama yoğunluğunun artmasının hidrofobik özelliğinin artırıcı etkisi olduğunu göstermektedir (S. D. Zhang, Wu, Qi, & Wang, 2016).

Vamshi ve ekibinin nanoparçacıkların Nicalon/KiON CERASET polimer piroliz yöntemi kullanılarak sürekli fiber seramik kompozitlerin (CFCC Continuous fiber ceramic composites) proses ve esneklik performansı üzerindeki etkileri hakkında değerlendirmelerde bulunmuştur. Bir inorganik polimer olan (KiON CERASET); seramik fiber ile güçlendirilmiş (Nicalon), beş değişik boyuttaki nanoparçacıkların (TiO_2 , ZnO, Y_2O_3 , C ve SiC) ve yüzey aktif ajanı olarak (Gliserol monolate) kullanılan homojen nanopartiküllerin kullanıldığı işlemde KiON CERASET silikon karbür KiON CERASET silikon karbür ve silikon karbondioksit seramikler ya da fiber ile güçlendirilmiş kompozitlerin etkinleştirilen madde olarak kullanılmıştır. Sonuçlara göre, NPS ile doldurulmuş seramik nanokompozit kompaktlarının NPS olmadan üretilen seramik kompozitlerden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Seramiklerin 4 noktalı bükme testi sonucunda nanopartiküller ile güçlendirilmiş seramiklerin nanopartikül kullanılmayan seramiklere göre daha yüksek esneklik direnci gösterdiği ortaya çıkmıştır (Gudapati, Veedu, & Ghasemi-Nejhad, 2006).

Hidroksiapatit ile güçlendirilen kompozitler, Hidrofobik CBPC (chemically bonded phosphate ceramic yani kimyasal olarak bağlı fosfat bazlı seramikler) anti korozyon etkisini arttırmada da öncülük etmektedir. Çift katmanlı titanyanın diş minesi, dentin ve kemiklerde de bulunan kimyasal formülü $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ olan kalsiyum apatitin doğada bulunan formu olan hidroksi apatit (HA) ve Al_2O_3 -13 wt% TiO_2 (AT) nanoparçacıklarla plazma sprej kaplama tekniği kullanılarak kaplanan piyasada bulunan saf titanyum (Cp-Ti) implantlar üzerine çalışılmıştır (Esparza-Vázquez, Rocha-Rangel, Rodríguez-García, & Hernández-Bocanegra, 2014).

Nano-yüzey olarak HA ile kaplanan Cp-Ti implantlarda yüzey kaplaması yapılmayan implantlara oranla korozyona karşı daha yüksek mukavemete sahip, micro düzeyde daha sert, daha pürüzsüz ve daha yüksek biyoyuma sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak HA ile kaplanan implantların yüzeyindeki girintili yapı dolayısı ile biyouyumlu olduğu ve zamanla korozyona uğradığı ortaya çıkmıştır. Bu sorunu gidermek için titanya nanopartikülleri eklenmiş ve sertlik, pürüzsüzlük ve korozyon direnci arttırılmıştır. (Esparza-Vázquez vd., 2014).

Karbon ile güçlendirilen kompozitler yüksek sıcaklıklarda saf seramikler yüksek sertlik, yüzey sertliği ve kararlılık gibi ilgi çekici özelliklere sahip olmasına rağmen saf seramikler çabuk dağılmasından dolayı mekaniksel olarak güvenilmezdir. Bu nedenle karbon nanotüp, karbon gibi karbon bazlı nanomalzemeler, Titania (TiO_2), zirkonya (ZrO_2), alumina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), silikon Nitrid (Si_3N_4) ve titanyum karbür (TiC) gibi, matrislere dahil

edilmiştir. Böylece kompozitlerin kırılma ve bükülme dayanımı büyük ölçüde artırılmıştır (Cho, Boccaccini, & Shaffer, 2009).

Ancak seramik karbon nanokompozit oluşumu sırasında karşılaşılabilecek yüksek sıcaklıklarda ayrıştırma nedeniyle seramik karbon bileşikler üretmek için geleneksel sinterleme işlemi kullanılamaması gibi bazı sorunlar vardır. Karbon esaslı nanokompozitlerin yapısal bağlarının zayıf olmasından dolayı karbon nano materyallerin seramik matrislerle birleşme özelliği düşüktür. Bu sorunu çözmek için değişik metotlar kullanılmaktadır (Cho vd., 2009).

Kimyasal buhar yer değiştirme ile öncü madde sızdırması, partikül nüfuzu, in-situ reaksiyonları gibi birkaç karışık işlem kompozit bileşiklerini oluşturmada kullanılırken sıcak pres (Flahaut vd., 2014; Peigney, Laurent, Flahaut, & Rousset, 2000), plazma sprey (Balani, Bakshi, Chen, Laha, & Agarwal, 2007), şablon sentezi (Meriglier vd., 2015; Schneider, Maksimova, Joshi, Schierholz, & Feile, 2008; Sui vd., 2001; X. Y. Zhang, Zhang, Zheng, Li, & Zhao, 2001) gibi işlemler de dağılmayı önlemek için kullanılmaktadır. Hazırlanan kompozitlerin mekanik özellikleri kullanılan sinterleme işlemine de bağlıdır.

Si_3N_4 ve C ile oluşan nanokompozitlerin (gafen, karbon nano tüpler ve karbon karası) mekanik özellikleri, değişik sinterleme işlemleri ile araştırılmıştır. Beklendiği gibi mekanik özelliklerin sinterleme işlemine bağlı olduğunu ortaya çıkarılmıştır (Kidari, Hampshire, & Bala, 2011). Sonuç olarak karbon esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri, sinterleme işlemine ve yüzeyin doldurulması için kullanılan malzemelere bağlıdır. Sıcak presleme ile sinterleme işleminde seramik karbon nanotüpler ile karıştırılıp yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak akma gerilimi düşük seramik karbon nanotüplü nanokompozitler oluşturulmaktadır (Kim, Hiraga, Morita, & Yoshida, 2007; Rajiv S. Mishra, Leshner, & Mukherjee, 1996; Thostenson, Ren, & Chou, 2001; G. Zhan, Kuntz, Wan, Garay, & Mukherjee, 2002).

Karbon nanotüpler ile güçlendirilen kompozitler malzemelerin kopma ve akma mukavemetinin yanı sıra termal ve elektriksel iletkenlik gibi mekaniksel özelliklerin yüksek derecede arttırılar (Thostenson vd., 2001). Karbon nanotüplerin olağan üstü esneklik özelliği sayesinde yüksek sertliğinden dolayı kolay dağılan kompozitlerin dayanımını arttırmıştır. Uzun süreli yüksek sıcaklıklarda sentezlenmesini bu metotların etkisi sınırlı kalmıştır. Sıcak presleme ve plazma kıvılcım ile sinterleme işlemleri karbon nanotüpler ile hazırlanmış seramiklerin hazırlanmasında çokça kullanılmaktadır (Kim vd., 2007; Rajiv S. Mishra vd., 1996; G. Zhan vd., 2002).

Plazma kıvılcımı ile sinterleme işlemi düşük süreli göreceli olarak düşük sıcaklıklarda karbon nanotüplü kompozitlerin yoğunluğunun artırılmasında en etkili yöntemdir (J. L. Li, Bai, Feng, & Jiang, 2005; Shen, Ko, Kiricsi, & Arato, 2006; G.-D. Zhan, Kuntz, Wan, & Mukherjee, 2003).

Zhan ve ekibi karbon nanotüplü alümina kompozitlerin plazma kıvılcım sinterlemesi yöntemini kullanarak sıcaklık ve işlem süresi üzerinde çalışmışlardır. İlk olarak %5,7 karbon nano tüp alüminaya eklenmiş sonradan bu oran %10 a çıkarılmış ve kırılma mukavemetinin arttığı ortaya konsada bu işlem sonucunda saf alüminaya göre kompozitin sertliğinde düşüş yaşanmıştır (G.-D. Zhan, Kuntz, Wan, & Mukherjee, 2003).

Kompozitlerin mekanik dayanımı yüzeyin homojen olarak kaplanmasıyla bağlantılı olduğundan nanotüplerle yüzey kaplamada (Hwang & Hwang, 2001; J. Wang vd., 2007) ek olarak sulu koloitler (J. Fan vd., 2006; Poyato, Vasiliev, Padture, Tanaka, & Nishimura, 2006), moleküler ölçekte karıştırma ve polimer bazlı seramikler mekanik dayanım özelliklerin geliştirilmesinde kullanılmıştır (Cha, Kim, Lee, Mo, & Hong, 2005). Örneğin, Fan ve ekibi Al₂O₃ CNT nanokompozitlerin kırılma sertliği üzerinde çalışmış ve kırılma mukavemeti saf alüminadan daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmışlardır (Cha vd., 2005; J. Fan vd., 2006; Poyato vd., 2006).

Saf seramik matrislerin zayıf noktalarını iyileştirmek için birçok karbon nanotüp bazlı nanokompozitler hazırlanmıştır. Alümina bazlı seramiklerin yüksek kırılma ve yüzey aşınma mukavemet özelliklerine sahip olmasının yanı sıra düşük bükülme mukavemeti ve yüzey çatlamasına karşı zayıflıkları gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu zayıflıkların üstesinden gelmek için birçok akademik çalışma yapılmıştır (Cha vd., 2005; J. Fan vd., 2006; Poyato vd., 2006).

Cha ve ekibi karbon nanotüp bazlı alümina nanokompozitini plazma kıvılcım sinterleme metodunu takiben molekül ölçekte karıştırma yöntemini kullanarak sentezlemeyi başarmışlardır. Karbon nanotüp miktarı %1 olduğunda yapısal dayanım ve kırılmaya karşı dayanımın arttığı karbon nanotüp miktarı %2 'nin üzerine çıktığı durumlarda ise bu özelliklerin kümeleşme yüzünden düştüğü tespit edilmiş olsa da çatlama mukavemetinde artış görülmüştür (Cha vd., 2005).

Inam ve ekibi ise, alümina seramiklerine karbon nanotüp ilavesi ile sinterleme sıcaklığı ve alüminanın tane büyümesi üzerine çalışmalar yapmış ve mikro yapısal düzeyde karbon nanotüplerin mekaniksel nanokompozitlerin sadece mekanik özelliklerini değiştirmekle

kalmadığı ayrıca sinterleme davranışlarında da değişime neden olduklarını ispatlamışlardır (Inam, Yan, Peijs, & Reece, 2010). Bunun yanı sıra, düşük miktarda karbon nanotüplerin ZrO_2 nanokompozitler ile birleştirilerek hazırlanan nanokompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmıştır. Hidrotermal, heterokoagülasyon, sıcak presleme, plazma kıvılcımı ile sinterleme gibi değişik birkaç yöntemle zirkonya (ZrO_2) nanokompozitlerin sentezlenmesi başarılmıştır (Blugan, Kuebler, & Tom, 2008; Lupo, Kamalakaran, Scheu, Grobert, & Rühle, 2004; Shan & Gao, 2005).

Örneğin Mazaheri ve ekibi çok duvarlı karbon nanotüplerle zirkonyayı birleştirmişler ve geniş sıcaklık aralığında kompozitin mekanik özelliklerini geliştirmeyi başarmışlardır. Yapılan çalışmada monolitik zirkonyanın karbon nanotüplü zirkonya nanokompozit içerisindeki rijitlik modülü karbon nanotüp oranı %5 iken 75 GPa dan 107 Gpa'a kadar çıkarılmıştır (Mazaheri, Mari, Hesabi, Schaller, & Fantozzi, 2011). İnorganik ve metalik olmayan seramikler olarak tanımlanan oksitsiz seramikler, termal yalıtkanlık ve yapısal sertlik gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda üstün metaryeller olarak kabul görmektedirler (Chen, Li, & Du, 2008; Heian vd., 2004). Buna rağmen mekanik yüklemelerde kolay kırılabilen gevrek yapıya sahiptirler. Karbon nanotüpler kırılganlığı azaltmanın yanında nanokompozitlerin bükülme ve çatlama mukavemetini arttırmak için kullanılırlar (Balázsi, Kónya, Wéber, Biró, & Arató, 2003; Hirota, Hara, & Kato, 2007).

Sonuç olarak karbon nanotüpler farklı seramik matrislerin yapısını güçlendirmek için kullanılırlar ve karbon nanotüpler bir dereceye kadar kompozitlerin mekanik dayanım özelliklerini kompozitlerin içerisindeki karbon nanotüplerin miktarına bağlı olarak artırılır. Ayrıca seramiklerin düşük, yüksek, çok yüksek gibi sıcaklık tiplerini ve karbon nanotüplü nanokompozitlerin sinterleme ve homojenasyon işlemlerin için önemli olan gereken süreyi belirlerler.

Silisyum karbürün akma dayanımı özelliğinin MWCNT (multi walled carbon nanotubes yani çok duvarlı karbon nanotüpler) ile ve sıcak presleme yöntemiyle sentezlenmesin saf silisyum karbürü oranla %10 daha iyi olduğu ortaya çıkarılsa da, karbon nanotüplerin çekirdek büyümesini inhibe etmesi ve yüksek sıcaklıklarda grafit dönüşmesi sebebiyle basınç ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak nanokompozitin yoğunluğunun belirlenmesi kontrol etme yetisine sahip olduğu belirtilmiştir (Laurent, Peigney, Dumortier, & Rousset, 1998; Ma, Wu, Wei, Liang, & Wu, 1998). Düşük yoğunlukların karbon nanotüp esaslı seramiklerin mekanik dayanıma etki ettiği bilinmektedir. Fe- Al_2O_3 CNT kompozit malzemenin

kırılma mukavemetinde Fe-Al₂O₃'e göre düşüş tespit edilmiştir (Laurent vd., 1998; Peigney, Flahaut, Laurent, Chastel, & Rousset, 2002).

Karbon fiberle güçlendirilmiş seramik kompozitler Al₂O₃, ZrO₂, SiC, Si₃N₄, SiO₂ vd. ile karbon fiberlerin birleştirilmesiyle oluşturulurlar (Song, Wu, & Li, 2002). Karbon fiberle üretilen seramik kompozitler mekanik dayanımda çok iyi olmaları, düşük yoğunluklu ve bu kompozitlerin aşındırıcı ortamlarda korozyona uğramaması gibi özelliklerinden dolayı avantajlıdır (Rocha, Cairo, & Grac, 2006).

Bu tip özelliklerin çok önemli olduğu hava ve uzay endüstrisinde roket nozulları, motor kanatçıkları, termal koruyucu plakalar, uzay araçlarının ısı değişiminden etkilenen kenarları, uçakların fren disklerinde, gaz türbinlerinde ve kimyasal reaktörlerde geniş şekilde kullanılmaktadırlar (Christin, 2002; Heidenreich, Renz, & Krenkel, 2006; Weiss, 2001).

Gaz, sıvı ve katı olmak üzere üç tip karbon kaynağı seramik kompozitlerde prekürsör olarak kullanılmaktadır (Krishan K. Chawla, 2012). Karbon nanofiberlere oranla karbon fiberler üzerine daha fazla çalışma yayınlanmıştır. Karbon nanofiberler, alümina matrislerle sıcak presleme yöntemini kullanılarak birleştirmiş ve karbon nano fiberlerli alümina matrislerinin mekanik özellikleri incelenmiştir (Maensiri, Laokul, & Klinkaewnarong, 2007).

Karbon nanofiberlerin kompozitteki miktarının düşürülmesine bağlı olarak saf alüminaya göre yapısal dayanıklılık ve bükülme dayanımında düşüş görülürken, karbon nanofiber katkılı alümina kompozitlerin kırılma dayanımı saf alüminaya göre %13 kadar iyileştirilmiştir (Maensiri vd., 2007).

Benzer şekilde Kita ve ekibi karbon nanofiber katkılı SiC nanokompozitlerin kırılma dayanımındaki artışı araştırmış ve çalışmalarında mukavemet artışının %6 karbon nanofiber miktarı ile 3,8MPa dan 5,2MPa kadar çıkartmışlardır (Kita, Suemasu, & Davies, 2010).

Grafen elektriksel, mekanik ve termal özellikleri ile karbon nanotüplere çok benzer yapıda olmalarına rağmen yüzey alanı karbon nanotüplere oranla çok daha fazladır ve su bazlı solventlerde yüzey değişimine uğramadan kolayca dağılıbilirler (Lam, James, McCluskey, Arepalli, & Hunter, 2006; Lee, 2008; Schedin vd., 2007). Böylece grafen seramik matrislerde dolgu materyali olarak kullanılırlar. Mekaniksel olarak pul pul ayrılmış grafen nano plakaları (graphene-nanoplate GNP) ve grafen oksit (graphene oxide GO) grafen katkılı seramik nanokompozitlerin (ceramic graphene nanocomposites CGNC) üretilmesinde kullanılırlar (Porwal, Grasso, & Reece, 2013; Shahedi Asl, 2018).

Grafen katkılı seramik nanokompozitler sertlik gibi mekaniksel özelliklerde çok iyi olduklarından seramik kesme araçlarının yapımında kullanılırlar (Yin, Yuan, Xu, Liu, & Yan, 2018). Basitçe grafen, tozları veya seramik tozları ile yüksek enerjili mekanik değirmende öğütüldükten sonra N-metil-pirolidon (N-methyl-pyrrolidone NMP) ve etanol gibi uygun bir çözücü içerisinde karıştırılır ve grafen nano plaka katkılı kompozit tozu oluşturulur (Y. Fan vd., 2010; J. Liu, Yan, & Jiang, 2013; Schimka, Harl, & Kresse, 2011).

Ayrıca grafen nano plakalar direk seramik tozu ile karıştırılarak seramik tozlar oluşturulabilir. Örneğin grafen nano plaka katkılı $Al_2O_3/(W,Ti)C$ -GNP seramik nanokompozit metaryeli seramik toz grafen nano plakası etanol içerisinde karıştırıldıktan sonra çok katmanlı kataliz çatlatma metodu ile üretilmiştir (Cui vd., 2018).

Grafen oksit katkılı seramik ısıtma işleminde grafit oksit modifiye edilmiş hummer yöntemiyle grafit oksidin seramik toz ile ısıtma işlem sırasında karıştırılmasıyla elde edilmiştir (Al, 2011; Asl, Nayebi, Ahmadi, Zamharir, & Shokouhimehr, 2018; X. Liu vd., 2016; Wei, Cao, Wang, & Zou, 2011; Zhu vd., 2010). Örneğin Lui ve ekibi grafen oksit plakaları ile titanyum karbür (TiC) matrisi grafen oksit sulu çözeltisi ile titanyum karbür sulu çözeltisini karıştırarak oluşturmuştur (Tian, Zhao, Wang, & Liu, 2016).

Genel olarak ince asıltılı pelte (sol-gel) (K. Wang, Wang, Fan, Yan, & Wei, 2011), ince çözütsel (collodial)(Al, 2011) ve toz işleme (powder processing)(Y. Fan vd., 2010; Tapasztó vd., 2011; Tapasztó, We, & Bala, 2012) olarak üç ana yöntem ile tüm grafen katkılı seramik nanokompozit (ceramic graphene nanocomposite CGNC) çeşitleri üretilmektedir.

Diğer karbon materyellerle benzer olarak sıcak presleme (hot pres (ceramic graphene nanocomposite CGNC) çeşitleri üretilmektedir. Diğer karbon materyellerle benzer olarak sıcak presleme (hot pressing), sıcak eşbasıncılı presleme (hot isotatic pressing), plazma kıvılcımlı (spark plasma) sinterleme ve mikro dalga kullanılarak sinterleme grafen katkılı seramik nanokompozit hazırlamada kullanılan yöntemlerdir (Porwal vd., 2013; Shahedi Asl, Zamharir, Ahmadi, & Parvizi, 2018).

Karbon nanotüp katkılı seramik nanokompozitlere birkaç tip grafen katkılı seramik nanokompozit materyeller seramik ya da grafen materyellerin değiştirilmesi ile de sentezlenmiştir. Grafen katkılı grafen nano plaka katkılı Si_3N_4 kompozit malzemeler mekanik olarak pul pul ayrılmış çok katmanlı grafeni (14 nm kalınlığında) Si_3N_4 matrisine ekleyerek sentezlenmiş, kompozit malzemenin esneme ve bükülme dayanımını araştırılmıştır. Grafen plakaların yüzeyinin gözenekli yapısının kompozit malzemeye etkisinin araştırılmasıyla çok

katmanlı grafen plakaların oranının %1 den %3'e çıkarılmasının kompozit malzemenin kırılma ve bükülme dayanımını azalttığı belirlenmiştir(Tapaszto vd., 2012).

Buna rağmen Kvetkova ve ekibi Si₃N₄ grafen kompozitlerini mekanik olarak öğütülmüş çok katmanlı grafen ile sentezlemiş ve çok katmanlı grafen eklenmesi ile yapısal dayanımın %1 oranında arttırılmasını ve çatlak köprülenmesi, çatlak yayılması ve çatlak sapması gibi yapısal dayanım mekanizmalarını incelemiştir. Yapılan çalışmada saf silisyum nitrüre göre ortalama %45 yapısal dayanımın arttırıldığını ortaya koymuşlardır (Kvetková vd., 2012).

Grafen silisyum karbür kompoziti, grafen oksidi silisyum karbür içerisine dağıtarak ve plazma kıvılcım yöntemini kullanılarak oluşturulmuş ve kompozit malzemenin yapısal dayanımını monolit yapıdaki silisyum karbür ile karşılaştırmıştır. Yapılan inceleme sonucunda %1,5 grafen ilavesi ile malzemenin tokluğunda %235'e kadar artış gözlemlediğini belirtmiştir (Al, 2011).

Ramirez ve ekibi taramalı elektron mikroskopuyla grafen katkılı silisyum karbürün yapısal dayanım mekanizmalarını gözlemlemiştir. Miktarı azaltılmış grafen oksit ile matrisler arasında kuvvetli bağın oluşumunun dalgalı çatlakların oluşturduğu köprüler ve nanokompozit malzemelerin yapısal dayanım özelliklerinden kaynaklandığını ortaya koymuşlardır (Ramírez vd., 2018).

Grafen katkılı alümina kompozitlerin mekanik dayanımı incelenmiş ve yapısal dayanımın %2 grafen oksit ilavesi ile %3 ila %5 iyileştirilebildiğini belirtilmiştir. Bunun da alümina ve grafen oksidin elektrostatik çekim ile oluşturulan homojenize edilmiş matrislerle elde edilebileceği belirtilmiştir. İçeriğe katılan grafen oksit ayrıca ısı işlem süresince indirgenmiş grafen oksite (reduced graphine oxide rGO) dönüştürülmüştür. Ayrıca grafen miktarının artışı ile çekirdek büyüklüğünün düşürülebileceğini de gözlemlenmiştir(Wei vd., 2011).

Wozniak ve ekibi modifiye edilmiş grafen oksidin alümina matrise eklenmesi ile oluşturulan kompozitin grafen oksit miktarının %5'e çıkarılması ile kırılma dayanımının %60 arttığını kırılma dayanımının artışının yanısıra yapısal sertliğinde normal indirgenmiş grafen oksit katkılı alümina kompozitine oranla %20 arttığını bildirmişlerdir. İlk önce Al₂O₃ matrise daha önceden hazırlanmış Al₂O₃-rGO'e ekleyerek kompozit malzemeyi oluşturmuşlardır. Al₂O₃ -rGOu Al₂O₃ 'e eklemek saf GO eklemeye göre dikkate değer biçimde mekaniksel özelliklerde artışa neden olmaktadır (Wozniak, Jastrzębska, Cygan, & Olszyna, 2017).

Liu ve ekibi, grafen katkılı zirkonyanın alümina nanokompozit malzemelerin güçlenmesini ve kompozit malzemenin kırılma dayanımını incelemiştir. Grafen nano plakaların %0,8 oranında eklenmesinin, kompozit materyalin kırılma dayanımını %40 oranında arttırdığını rapor etmişlerdir (J. Liu, Yan, Reece, & Jiang, 2012).

Llorente ve ekibi, grafen katkılı silisyum karbür kompozit malzemenin hazırlanması ve kompozit malzemenin sürtünme performansını incelemiştir. Yapılan çalışmanın yayınlanan sonucuna göre grafen nano plakaların silisyum karbüre katılması ile oluşturulan kompozitin aşınma dayanımı %20 daha az yükte %35 e kadar arttırıldığını buna rağmen tribofilmdeki zayıflama nedeniyle yüksek yüklerde görece olarak düşüş yaşanmıştır (Llorente & Belmonte, 2018; Wozniak vd., 2017).

Grafen katkılı seramik nanokompozitlerle ilgili literatür taramasının ardından nanokompozitlerin güçlendirilmesinde yüklenme limitini düşürmesine rağmen grafen kullanılabilir. Her türlü seramik materyalle değişik tipte grafen seramik nanokompozit malzeme üretiminde kullanılabilir.

Nadir bulunan toprak nanomateryalleri (rare earth based nanomaterials) katı hal yakıt hücrelerindeki elektrot materyali, seramik malzemelerde katkı maddesi, süper iletkenlerin üretim bileşeni, katalizör, mıknatıs üretimi bileşeni, fosfor üretim malzemesi gibi başarılı uygulama alanlarında araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Bednorz & Müller, 1986; Yan & Yan, 2008).

Nadir toprak materyalleri dünya yerkabuğunda düşük konsantrelerde bulunmazlar. Bu materyaller 15 lantaniti kapsayan atom numarası 57-71 arası değişen elementlerden oluşmaktadır. En çok karşılaşılan nadir toprak elementleri seryum, lantanyum, neomidyum ve itriyumdur. Bu elementler birçok masif kayaç oluşumlarında düşük konsantrasyonlarda dünyanın birçok bölgesinde bulunmaktadır (Alam, Zuga, & Pecht, 2012).

Ekonomik olarak nadir toprak elementleri madenlerinin işletilmesi üstün kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı stratejik öneme sahiptir. Son dönemde ülkemizde de bu alanda yapılan yatırımlarla nadir toprak elementlerin üretimine yatırımlar yapılmakta dünyada Çin'in üretim hegemonyasından kurtulmaya çalışılmaktadır. Seramik materyallerdeki yaygın kullanımı nadir toprak elementlerinin ekonomik değerini her geçen gün arttırmakta ülke ekonomilerine de katkı sağlamaktadır. Nadir toprak elementlerinin alümina veya diğer seramik matrislere katkı olarak kullanılarak seramik kompozit malzemelerin ergime noktasının düşürülmesi, alümina kompozitlerin değişik fazlarının saflaştırılması ve alüminanın tane

çeperinin güçlendirilmesi gibi birçok alanda araştırmalar yapılmaktadır (Rosenflanz vd., 2004; Yang vd., 2009).

Hatta yapılan araştırmalarda nadir toprak elementlerinin oksit olarak seramiklerde kullanılmasının stabilizatör olarak kullanılmasının sinterlemeye yardımcı olduğu sinterleme sıcaklığını düşürdüğu böylece üretim maliyetlerini düşürdüğu kanıtlanmıştır. Ayrıca nadir toprak elementleri yarı iletken sensörlerin, mikrodalga izole malzemelerinin ve piezoelektrik seramiklerinin üretiminde çokça kullanılmaktadır (Guanming vd., 2007).

Zirkonyum oksit (zirkonya ZrO_2) nanoseramik kompozit partiküllerinin yüksek mekanik dayanımı, bükülme dayanımı, yüksek ergime sıcaklığı ve göreceli iyi elektriksel özellik göstermesi alümina (Al_2O_3), katkı maddesi olarak kullanılan nadir toprak elementleri, silisyum karbür (SiC), bakır (Cu) ve TiB_2 gibi bazı diğer seramik materyaller ile birleştirilerek kompozit materyaller oluşturulmasını sağlamıştır (Mirazimi, Abachi, & Purazrag, 2016).

Zirkonyum oksit kristalleri kübik, tetragonal ve monolitik fazlarda bulunurlar. Seramik parçacıklar arasındaki yapısal tutarlılığının azaltılma yeteneği bu fazların yüksek sıcaklıklarda kararlılığının artmasını ve mekanik özelliklerin geliştirilmesini sağladığu için arzulanan bir özelliktir (Abd El-Ghany & Sherief, 2016; Hannink, Kelly, & Muddle, 2004).

Buna rağmen soğuma sürecinde saf zirkonyanın seramiklerin yapısında kullanılmasını tetragonal fazdan monolitik yapıya geçiş yapmasından dolayı sınırlamaktadır. Bu dezavantaj diğer tetragonal ve kübik yapılı oksit kompozitleri ile stabilize edilmiş zirkonyayı saf zirkonya yerine kullanılabilirliği kanıtlanmıştır (P. Liu, Li, Xiao, Luo, & Jiang, 2018).

Zirkonyanın faz değiştirmesini engelleyen ayrıca zirkonya içinde iyi çözünen Y_2O_3 , Nd_2O_3 ve CeO_2 gibi nadir toprak element oksitleri iyi birer zirkonya stabilizatörleri olarak gösterilmektedirler. Zirkonya yapılı seramiklerin yüksek performansı nadir toprak element oksitlerinin tip ve miktarına bağlı olarak değişebilmektedir. Nadir toprak element oksitlerinin zirkonya bazlı seramiklere eklenmesi ayrıca zirkonya seramiklerinin çatlak ilerleme ve mukavemetini arttırmaktadır. Zirkonya bazlı seramikler termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, yüksek yapısal dayanım ve kırılma dayanımı gibi mükemmel özellikler gösterirler (Jones vd., 2005; Kenyon, 2002).

Seramiklerin metal ya da zirkonya veya nadir toprak elementleri gibi materyalleri güçlendirici materyal olarak kullanılmasına dair çalışmalar da mevcuttur. Bu kompozitler genelde seramikleri matris, fiber veya fiber parçacık olarak güçlendirici olarak kullanan

seramiklere Seramik Matrisli Kompozitler (Ceramic Matrix Composite CMC) olarak tanımlanır (Guo, Li, & Kou, 2017).

Bu materyaller yüksek sıcaklığa dayanım, yüksek yapısal sertlik, korozyona karşı dayanım, kimyasal kararlılık ve yüksek sürtünme dayanımı gibi üstün özellikler göstermektedirler. Nanopartiküllerin seramik matrisler içerisinde kullanılması yapısal kırılma dayanımının geliştirilmesi zorlu koşullar ve yüksek sıcaklıklardaki bozunmayı engellemek için kullanılabilir (Guo vd., 2017).

Bu katkılanan güçlendirici materyaller stresle tetiklenen faz değişimi özelliğini, fiberleşme özelliğini, çatlak yön değiştirme özelliğini, çatlak köpürüleme özelliğini, mikro çatlama özelliğini ve dağılma özelliğini güçlendirmede kullanılırlar. Seramik matrisli kompozitler üzerine yapılan araştırmalar sonucunda karbon fiberlerin seramik matrislere eklenmesinin seramik matrislerin toklaşma özelliklerini geliştirebileceği ancak karbon fiberlerin göreceli olarak seramik matrislerle zayıf bir yüzey oluşturabileceği bunun sonucunda ise kompozit materyalin mekanik aşınması sırasında fiberlerin yüzeyden soyularak çatlakların büyümesini sağlayabileceği belirtilmiştir. Bunun yanında fiberlerin soyulması ve çatlakların yön değiştirmesi mekanik enerjiyi tüketerek kompozit materyallere mekanik dayanım sağlamaktadır. Fiberler tarafından kompozit materyale kazandırılan çekme ve bükülme mukavemeti kompozit materyallerin dayanımını arttırmaktadır. Böylece karbon fiber ve matris tabakaları arasındaki bağ kompozit materyalin uygun ortamlarda sentezlenmesi sırasında kontrol edilmelidir. Karbon fiberler katkılı seramik matrisli kompozit materyallerde sertleşme mekanizmaları zirkonya ve diğer nadir toprak element katkılı seramik matrisli kompozit materyallere de uygulanabilir. İtiryum mono silikat (Y_2SiO_5) ya da itiryum disilikat ($Y_2Si_2O_7$) ile kaplama yapılan SiC/C seramik matrisleri üzerine yapılan araştırmalarda düşük elastiklik katsayısı, düşük buharlaşma hızı, düşük oksijen geçirgenliği, düşük silika (SiO_2) etkileşimi ve iyi erozyon dayanımı gibi üstün özellikler gösterdiği ortaya konmuştur (Argirusis, Damjanović, & Borchardt, 2007).

Süspansiyon tozundan elektroforetik depozisyon (electrophoretic deposition) ile elde edilen itiryum silikatın C/C-SiC matrisini 1500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yüz saatten fazla oksidasyona karşı koruması genel kullanımını çekici hale getiren özelliklerindedir (Argirusis vd., 2007).

Sonuç olarak zirkonya ve nadir bulunan toprak elementlerin nanopartiküller olarak ya da nadir toprak element oksitlerinin katkı olarak seramik matrislerine eklenmesini ya da diğer

SiC, C, Al₂O₃ ve TiC gibi matrislere eklenmesinin, seramikleri zorlu koşullara karşı dayanımını arttırdığı kanısına varılabilir.

Hidroksiapatit (HA) doğal oluşumlu bir çeşit kalsiyum apatittir. Hidroksiapatit nanopartiküllerinin sert dokularda kolojen matrisleri içerisine gömölme özelliği sayesinde omurgalılarda kullanılan ana güçlendirici materyallerden biridir (Roohani-Esfahani, Nouri-Khorasani, Lu, Appleyard, & Zreiqat, 2010; Wijesinghe vd., 2016, 2014, 2017).

Biyoseramik olarak da adlandırılan sentetik hidroksiapatit nanopartikülleri mükemmel biyouyumları sayesinde kemik zedelenme onarımlarında sıkça kullanılmaktadır (Roohani-Esfahani vd., 2010; Wijesinghe vd., 2016, 2014, 2017). Bu yüksek biyouyum özelliklerinden dolayı alümina, karbür, nitrür, titanya, zirkonya gibi diğer seramik nanopartikülleri gibi seramik matris olarak yapısal güçlendirici materyal olarak sıkça kullanılmaktadır (Ghazanfari & Zamanian, 2013; Hesaraki, Ebadzadeh, & Ahmadzadeh-Asl, 2010; W. Li & Gao, 2003; Que, Khor, Xu, & Yu, 2008).

Hidroksiapatitlerin yapısal güçlendirici materyal olarak kullanılması üzerine yayınlanan sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Suchanek ve ekibi hidroksiapatit ile güçlendirilen biyouyum özelliği etkilenmeden mekanik özellikleri iyileştirilmiş hidroksiapatit kompozitler sentezlemiştir (Suchanek, Yashima, Kakihana, & Yoshimura, 1996). Hidroksiapatit ile güçlendirilmemiş kompozitlere göre %30 hidroksiapatit ile güçlendirildiğinde sentezlenen kompozit materyalin mukavetinde %40 iyileşme elde edilmiştir (Suchanek vd., 1996). Bunun yanında seramik kompozitlerde kullanılmasa da hidroksiapatit nanopartikülleri yapısal güçlendirici bileşeni olarak biyopolimer kompozitlerde çokça kullanılmaktadır.

Titanyum, gümüş, altın, alüminyum, nikel, demir ve pilatinyum en çok kullanılan nanopartiküller arasındadır (Chaudhari & Singh, 2018; Hariharasakthisudhan & Jose, 2018).

Bu metal nanopartikülleri Si₃N₄, Al₂O₃ ve karbürler gibi seramik materyalleri güçlendirmek için kullanılır. Bu metallerle güçlendirilmiş seramikler düşük ağırlıklı yüksek dayanımlı uçak ve otomobil gövde yapılarının inşasında kullanılan çok önemli materyallerdir (Hariharasakthisudhan & Jose, 2018).

Metal partiküller basitçe kompozitlerin sentezinde ve fabrikasyonu destekleyici güçlendirici materyaller olarak kullanılır. Seramik matrisli kompozit materyallere eklenen metal nanopartiküller kompozitlerin mekaniksel özelliklerine dikkate değer iyileştirmeler kazandırmıştır. Seramik kompozitlerin süneklik ve kırılma tokluğu metal nanopartiküllerin

seramik kompozit materyallerin yapısı içerisine eklenmesi ile iyileştirilebilir (Hariharasakthisudhan & Jose, 2018).

2.4.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler matris olarak organik polimerleri ve takviye malzemesi olarak fiberler kullanılmaktadırlar. Polimer malzemeler tipik yapısal oluşumlarına göre; termosetler, termoplastikler, epoksi ve epoksilerin dışında kalan amorf, yarı kristal polimerler gibi farklı yapılar kullanılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerde termoset türleri ise polyesterler, epoksiler ve yüksek performanslı termosetler, PU (poliüretan), silikon kauçuklar, fenolün gibi doymamış UP'ler bulunmaktadır (Deborah Chung, 2017).

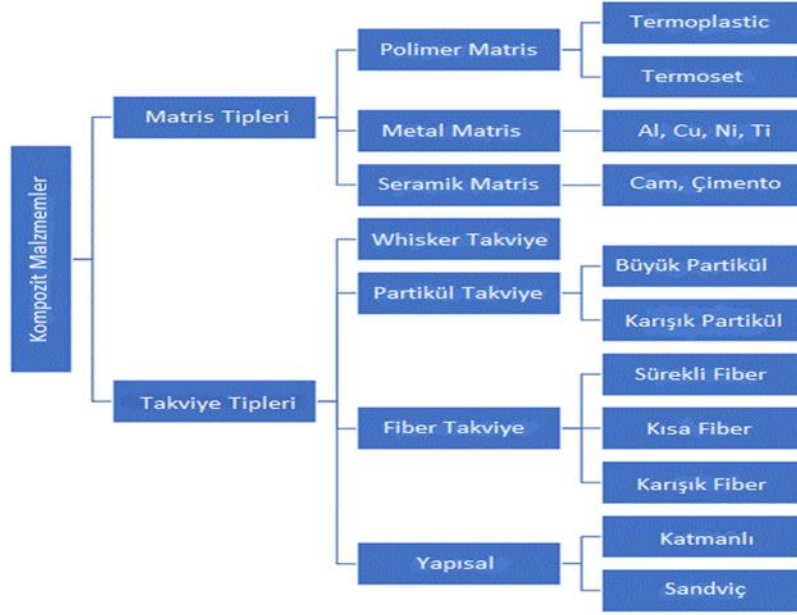
PMK'lerde sertleştirici ile yapılan kütleme yani sıvı termosetin aktive edilmesi ile oluşturulan üç boyutlu yapı, yapmış olduğumuz yapıya çevresel direnç, takviyelerde düşük büzülme ile ara yüzey ve takviye malzemesi arasında mükemmel yapışma sağlamaktadır. Bu kazanımlar kütlemede kullanılan sertleştirici sayesinde çok işlemi ortak bir reaktif ihtiva eder. Bu geleneksel reçinelerin yapıya kazandırdıklarının yanı sıra dezavantaj olarak saya bileceğimiz birkaç özelliklerinde şu şekilde sıralayabilmekteyiz. Bunlar; uzun kütleme süreleri ile nem alımının oluşturduğu yan etkiler ve UP'lerden biraz daha yüksek vizkozite süreleridir (Plummer, Bourban, & Månson, 2016).

Amorf ve yarı kristal camsı yapıda oluşan polimerler, cam geçiş sıcaklığı olan T_g'nin çok üzerinde bir sıcaklık olan işleme sıcaklığı yüzünden vizkoz eriyiği oluşturur. Bu sıcaklık değerlerine T_m denir. Yarı kristal termoplastiler sert, organik çözücülere karşı dirençli olmalarının yanı sıra polietilen gibi ucuz, işlenmesi kolay, T_g sıcaklığı düşük polimerlerle birlikte hem işlevsellik hem de genellikle aşırı sünme ile ilişkili düşük yumuşama sıcaklığından dolayı zayıf yapışma gözlemlenmektedir. Yapışmayı iyileştirmeye yönelik işlevselleştirilmiş katkı maddeleri olarak poli-propilen (PP, T_mE170 1C) kullanımı maliyet ve performans bakımından olumlu sonuçlara ulaşılmıştır (Plummer vd., 2016).

Poli (eter sülfon) (PES, T_gE230 1C) ya da poli (eter imid) (PEI, T_gE215 1C) yüksek performansa sahip olan aromatik amorf termosetler gelişmiş fiber takviyeli plastikler matris malzemeleri olarak kullanımından cezbedici görülmüştür. Polieter eter keton (PEEK) dan daha ucuz ve termosetlere göre daha sert olan bu malzemeler ne kadar cezbedici görülse de çözücülere karşı olan düşük dirençleri halen endişe vericidir (Plummer vd., 2016).

3. TAKVİYE MALZEMELERLE OLUŞTURULAN KOMPOZİTLER

Bilim ve teknolojinin hızlı gelişimi nedeniyle malzeme özelliklerinin yetersizliği geliştirilmelerinin önünü açarak özel araştırmalarının artmasına yol açmıştır. Kompozitler ana bileşenlerin özelliklerini koruyan ve bazı yeni özellikler ortaya koyarak yapı özelliklerinin dezavantajların üstesinden gelerek çeşitli yöntemlerle metal, metal olmayan ve polimer malzemelerden oluşturulurlar.



Şekil 3.1. Kompozit Malzemelerin Matris ve Takviye Malzemeleri

Kaynak: (Priyanka vd., 2017)

Şekil 3.1 'de de görüldüğü üzere kompozitler matris ve takviye malzemelerinde oluşan karmaşık, çok bileşenli bir sistemin bütünüdür. Doğal olan ahşap ve kemik gibi doğal ürünlerde kompozit malzemedir sayılır. Yapı olarak matris malzemesi; metal matris, inorganik yani metal olmayan (seramik) matris ve polimer matristen oluşan sürekli bir faz olarak düşünülürken, güçlendirici malzeme olarak, genellikle lifli malzemelerden oluşan dağınmış bir faz olarak karşımıza çıkmaktadır (Priyanka vd., 2017).

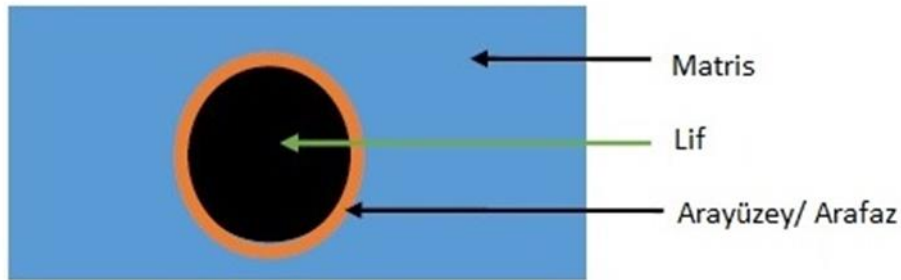
Elyaf malzemeler, mekanik özellikleri artırırken yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır. Doğada pek çok malzemeye bakıldığında lifli bir yapıya sahiptir. Sentetik lifler ile kıyasladığımızda daha düşük mukavemet ve sertliğe sahip olduğunu görürüz. Elyaf, daha düşük mukavemet ve sertliğe sahip olan matris malzemeleriyle birleştirilerek monolitik bir yapı oluşturulup çok sayıda mühendislik uygulamasında kullanılır. Elyaf ve matris malzemelerin işlenebilirliğini arttırmak ve ara yüzey bağlarının iyileştirilebilmesi açısından yüzeylerine son

kat işlemleri uygulanır. Bu uygulama prosesleri asitle yüzey aşındırma ve kaplama gibi kimyasaldır. Kompozit malzemelerin nihai hali imalat yöntemlerinin parametrelerini yöneten matris materyalleri sayesinde verilir. Matris sertliği, liflerin homojen dağılımı için yeterli yoğunlukta olmalıdır (Vasiliev & Morozov, 2018).

Kompozit malzemelerin yoğunluğunu, mukavemetini ve sertliğini etkileyen faktörler olarak bilinen takviye malzemeler, genellikle fiberlerden veya partiküllerden oluşmaktadır. Tek tip ya da parçalı fiberlerle oluşturulabileceği gibi düzensiz geometrilerden oluşan küresel partiküllerden de oluşturulabilir. Partikül takviye malzemeleri sürekli fiber liflerine kıyasla daha zayıf, daha az sertlikte ve maliyeti düşüktür. Sürekli fiber lifleri en-boy, çap oranı ayarlanabilir ve belirlenmiş bir yönetime sahipken parçalı liflerde ise en-boy, çap ve yönelimleri rastgele yönelimlerde (Weber vd., 1987).

3.1. Kompozitlerle Dolgu Malzemeleri Arası Bağdaştırıcılar

Kompozit malzeme üretiminde takviye ve matris arasında bir katman meydana gelir. Bu arayüzün bileşimi, yapısı ve davranışının, kompozitin performansını oldukça etkilediği bilinmektedir. Ara katman genellikle iki yüzeyin (matris ve takviye), Şekil 3.2 'de gösterildiği gibi yerde bulunur. Bazı durumlarda, ara bağdaştırıcı olarak adlandırılan matris ile dolgu maddesi arasında düzgün bir bağ oluşturmak için bir bağdaştırıcı malzeme gereklidir. Çoğunlukla bu bileşen, iki ana bileşen arasında yapıştırıcı görevi görür (Chang, Wang, Liang, & Sun, 2019; Uribe, Chiromito, Carvalho, & Tarpani, 2017).



Şekil 3.2. Bir Seramik Matris Kompozitin Birim Yapısının Şematik Diyagramı

Kaynak: (S. Wang vd., 2017)

Dolgu maddesi ve matris arasındaki arayüz, kompozitin özelliklerini ve genel davranışını kontrol eden önemli bir parametredir. Matrise zayıf bir şekilde bağlanmış bir dolgu maddesi, matris yüzeyi boyunca yayılan çatlaklara neden olabilir ve bu da kompozitin mekanik bütünlüğüne engel olabilir (Ahamed, Asokan, & Aravindan, 2009).

Gelişmiş dolgu takviyeli seramik kompozitlerin mühendisliği yapılırken bağlanma ve mukavemet anahtar faktörlerdir. Ek olarak, arayüz özelliklerini yöneten bağlar, kompozitin çevresel kararlılığını ve dayanıklılığını kontrol eder. Arayüz bağlarının mekanik özelliklerini başarılı bir şekilde belirleyebilecek araçsal tekniklerin eksikliğinden dolayı CMC'lerin karmaşık arayüzlerini incelemek için her zaman girişler olmuştur. Ayrıca, kompozit içindeki bağ kimyası ve mikro yapı arasındaki ilişki tatmin edici bir ölçüde açıklanmamıştır ve bu da performans tahminlerini zorlaştırmaktadır (Zhou, Fan, & Chen, 2016).

Mukavemet sayesinde, arayüzdeki mekanik bir bağ, kimyasal bir bağdan daha zayıftır. Genellikle, arayüz özellikleri hem matrisin hem de dolgunun özelliklerine göre belirlenir, çünkü yapıştırma, imalat sırasında meydana gelen bir dizi işlemin bir sonucu olarak gerçekleşebilir (Zhou vd., 2016).

- Elektrostatik çekim: Arayüzün her iki tarafında elektrostatik yükte bir fark olduğunda, iki yüzey nihayetinde onları bir arada tutarak birbirlerini çekebilir.

- Kimyasal bağ: İki tarafa ait iki fonksiyonel grup içinde bir bağ oluştuğunda.

- Interdiffusion: Arayüz boyunca molekül atomlarının değiş tokuşu ile iki yüzey arasında bir bağ oluştuğunda.

- Reaksiyon bağlama: Arayüzde iki yüzeyi bir arada tutan yeni bir bileşiğin ortaya çıkmasına neden olan bir reaksiyon gerçekleştiğinde. Bu süreç, her iki aşamadaki yayılım ile yönetilir.

- Mekanik bağlama: İki yüzey, iki bileşen arasında mekanik birbirine kenetlenerek bir arada tutulduğunda.

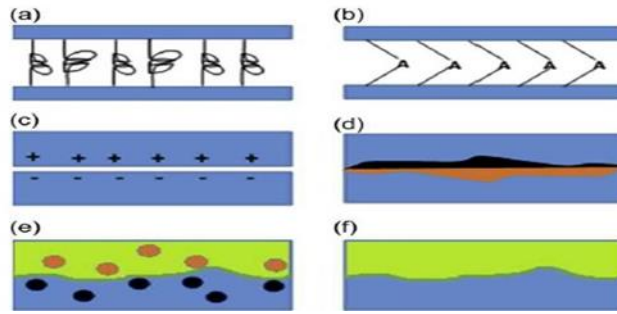
Bu bağlara ek olarak, takviye ile matris arasındaki arayüzlerde hidrojen bağı ve dipol-dipol etkileşimleri bulunur. Bu dolgu matrisi arayüzlerinin doğası, Şekil 2.5 'de gösterildiği gibi şematik olarak tasvir edilebilir. Genel olarak, arayüzey bağlanması, moleküllerin konformasyonları, atomik düzenleme, kimyasal yapı, yayılma ve iki hizalama yüzeyinin çeşitli morfolojik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bir seramik matris kompozitindeki her arayüz benzersizdir ve bu matris güçlendirme sistemine özgüdür (Clau, 2008).

Seramikler iyonik bağlara sahipken aramid, grafit ve cam malzemeler kovalent bağlar içerir. Ek olarak, aramid lifleri hidrojen bağları oluşturabilir (Clau, 2008).

Güçlendirilmiş seramik kompozitler, matris ve dolgu maddesi arasındaki arayüzle ilgili iki tür birleştirme özelliğine sahiptir. Kimyasal bağ, belirli bir kalınlığa sahip bir ara yüzey

reaksiyon zonunun yaratıldığı yerlerde mevcuttur (Lamon, 1993). Karbon fiber takviyeli seramikler söz konusu olduğunda, önemli bir kimyasal bağlanma bildirilmemiştir oysa, yüksek sıcaklıklarda işlenmiş seramik elyaf ve parçacık takviyeli seramik kompozitlerde, ara difüzyon yoluyla kimyasal bir bağ oluşturduğu düşünülmektedir (Chang vd., 2019; Uribe vd., 2017).

Öte yandan, kompozit ısı işleme tabi tutulduğunda mekanik bir bağ oluşur. Soğutulduktan sonra, karbon fiber takviyeli seramik kompozitlerde olduğu gibi, kompozitte bulunan her iki faza da bir artık gerilim uygulanır, termal genişleme uyumsuzluğu, oda sıcaklığında fiber üzerinde radyal bir kavrama kuvveti yaratacaktır. Fazların yüzey pürüzlülüğü bu süreci tamamlayacaktır. Bileşenlerin sayısına ve üretim koşullarına bağlı olarak, yapıştırma türü farklılık gösterecektir. Bu nedenle, kompozitler tasarlanırken arayüz özellikleri dikkate alınmalıdır (Teocoli vd., 2015; Zhao, Duan, & Wang, 2019).



Şekil 3.3. Arayüzlerde Bulunan Bağlanma Türleri: (a) Moleküler Dolaşıklık, (b) Kimyasal Gruplar Arası Reaksiyon, (c) Elektrostatik Çekim, (d) Oluşuma Yol Açan Kimyasal Reaksiyon Yeni Bir Bileşik, (e) Elementlerin Birbirine Difüzyonu, (f) Mekanik Kilitleme

Kaynak: (Teocoli vd., 2015; Zhao vd., 2019)

3.2. Seramik Takviyeli Titanyum Matrisli Kompozitlerle İlgili Çalışmalar

Titanyumun zirkonyadaki martensitik dönüşümleri incelenen çalışmada faz yapıları a-Ti, t-ZrO₂ ve m-ZrO₂ olarak gözlemlenmiştir. Çalışmada Titanyumun hacimce %12,5 ‘den fazla olduğunda t-ZrO₂’den m-ZrO₂’ye olan dönüşümde önemli ölçüde etkilediğini hesaplanmış, Ti içeriğinin artmasıyla m-ZrO₂’nin hacim oranı azaldığı ve doğrusal olarak m-ZrO₂’nin hacim oranında azaldığı, Titanyum içeriği hacimce %12,5’ten fazla olduğunda, Ti içeriği arttıkça Ti-ZrO₂’nin arayüzey alanı arttığı ve bu zamanda artık gerilim etkisi dönüşüm sürecine etkisi olduğunu görülmüştür (Teng, Li, & Wang, 2001).

Bir diğer çalışmada, titanyumun içine ağırlıkça %10 ZrO₂ nanoparçacık katıldığında oluşan kompozitin 570 HV sertliğe kadar ulaştığı, ZrO₂ nanoparçacıklarının eklenmesiyle

kayma aşınma hızının ve sürtünme katsayısını azaldığı gözlemlenmiştir (Abd-Elwahed, Ibrahim, & Reda, 2020).

Shin ve Sun'un Arkadaşlarıyla Yapmış Oldukları Çalışma Sonuçları Tablo 3.1'de (Shi & Liang, 2006; Sun & Gao, 2003). Ti-ZrO₂ çalışmalardan bazıları da Tablo 3.2'de (Han vd., 2012) ve Tablo 3.3'de (Tsukamoto, 2014) özetlenmiştir

Tablo 3.1. Shin ve Sun'un Arkadaşlarıyla Yapmış Oldukları Çalışma Sonuçları

Matris- Takviye		Sinterleme Koşulları (°C/dk)	Sertlik (GPa)	Ref.
ZrO ₂	Çok duvarlı karbon nano tüp 10wt%	Kolloidal işlem	Ağırlıkça %1,7 karbon nano tüplü	(Shi & Liang, 2006)
TiO ₂	Çok duvarlı karbon nano tüp 1.5 wt%	Kolloidal işlem	Fenol bozulmasında fotokatalitik özellikler	(Sun & Gao, 2003)

Kaynak: (Shi & Liang, 2006; Sun & Gao, 2003)

Tablo 3.2. Han ve arkadaşlarının 2012 Yılında Yapmış Olduğu Çalışmadaki Sermetlerin Bağlı Yoğunlukları

Matris-Takviye Referans	Bağlı Yoğunluk
Saf Ti(900 °C)	84
Saf Ti(1000 °C)	88
Saf Ti(1100 °C)	95
Ti+1%ZrO ₂ (900 °C)	85
Ti+1%ZrO ₂ (1000 °C)	90
Ti+1%ZrO ₂ (1100 °C)	96
Ti+2%ZrO ₂ (900 °C)	85
Ti+2%ZrO ₂ (1000 °C)	89
Ti+2%ZrO ₂ (1100 °C)	96
Ti+4%ZrO ₂ (900 °C)	80
Ti+4%ZrO ₂ (1000 °C)	88
Ti+4%ZrO ₂ (1100 °C)	94
Ti+6%ZrO ₂ (900 °C)	78
Ti+6%ZrO ₂ (1000 °C)	87
Ti+6%ZrO ₂ (1100 °C)	93
Ti+10%ZrO ₂ (900 °C)	77
Ti+10%ZrO ₂ (1000 °C)	85
Ti+10%ZrO ₂ (1100 °C)	89

Kaynak: (Han vd., 2012)

Han ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada 1100 °C de presleme yapılan numunelerin yoğunluklarının daha fazla olduğunu ve iç yapısal olarak sermetin daha iyi sonuç verildiğini gözlemlemişlerdir.

Tablo 3.3. Tsukamoto ve Arkadaşlarının Yapmış Olduğu Çalışma

Matris-Takviye Referans	%Uzama	Gerilme/ Gerinim (Mpa)	Kopma Mukavemeti (Mpa)	Sertlik Değeri (HV)	Young 's Modülü (GPa)
Saf Ti	0,135	650	680	210	110
Ti+0,3-ZrO ₂	0,13	740	770	220	110
Ti+0,5-ZrO ₂	0,07	790	780	250	115
Ti+0,7-ZrO ₂	0,03	760	790	230	118
Ti+1-ZrO ₂	0,02	750	795	250	110
Ti+3-ZrO ₂	0	290	180	480	155
Ti+10-ZrO ₂	-	-	-	650	-
Ti+20-ZrO ₂	-	-	-	800	-
Ti+30-ZrO ₂	-	-	-	900	-

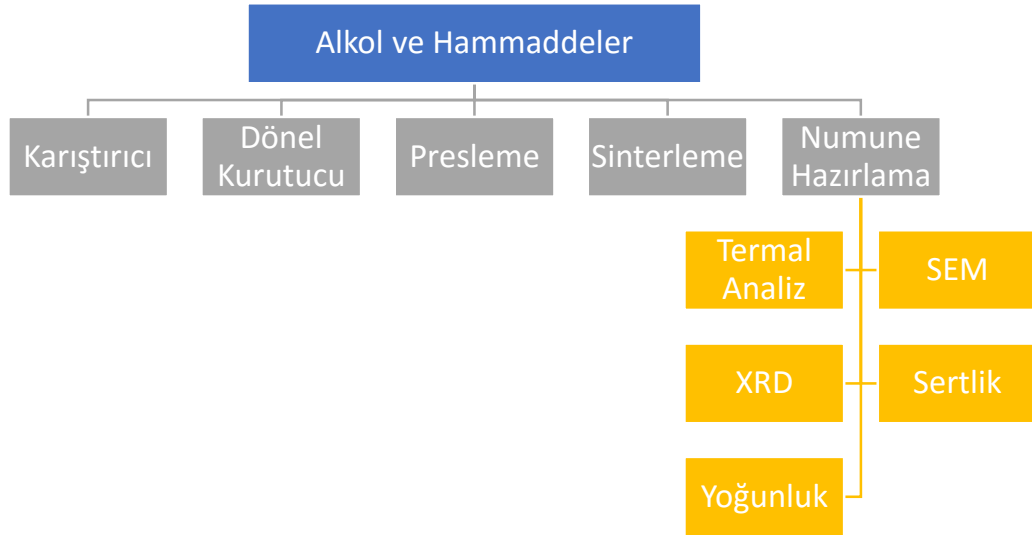
Kaynak: (Tsukamoto, 2014)

Tsukamoto ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada oluşturdukları kompozit malzemelerde yüzde uzama, gerilme gerinim, kopma mukavemeti ve young modülünde düşük miktarlarda zirkonyanın saf titanyumda güzel etkiler oluşturduğunu, zirkonya oranı arttıkça kompozitin sertliğinde arttığını gözlemlemişlerdir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Matris olarak kullanılan titanyumun ve takviye malzemesi olarak kullanılan zirkonya içeren seramik hammadde toz ile takviyelenmesiyle oluşturulan kompozitin, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin değişimini incelenerek hem biyomedikal alanda kullanım alanlarının geliştirilmesi ve farklı alanlar oluşturulması amaçlanmış olan çalışmada, %1, %3, %5, %7 oranlarında seramik hammadde toz eklenerek üretilen titanyum matrisli seramik takviyeli kompozitler üretilmiştir. Etanol solüsyonu ile birleştirilen karışım homojen bir dağılım sergilemesi adına 15 dk boyunca ultrasonik karıştırıcıyla çırpılıp kâğıt süzgeçten geçirilen solüsyon etüvde fırınında kurularak 40 Mpa'da preslenip 1100°C 'de 2 saat sinterlenerek numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Deney Yapılış Aşamaları

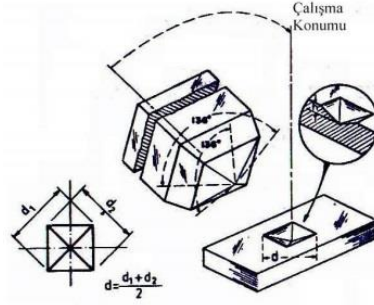


4.1 Karakterizasyon Çalışmaları

4.1.1 Vickers Ölçümü

Malzemeler üzerinde yapılan genel deneyler arasında bulunan sertlik ölçümüyle malzemenin mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki bulunmasından dolayı önemli bir deneydir. En büyük avantajı numuneye az tahribat vermesidir. Sertlik çekme mukavemetiyle doğru orantıda olduğu kadar, izafi bir ölçü olduğundan dolayı malzemelerin ya da numunelerin aşınma, şekil değiştirme ve kesmeye karşı direnç olarak da tanımlanabilmektedir. Genel olarak tarif etmek gerekirse batıcı uç belirli bir F kuvveti ile numuneye batırılır. Batırılan uca karşı numune bir tepki gösterir ve yüzeyinde belirli bir iz oluşur. Oluşan izin büyüklüğü sertlik ile ters orantılı olarak numunenin sertliğini gösterir. Tablo 4.2 'de yaygın ve bilinen ölçüm yöntemleri Brinel, Rockwell, Vickers mikrosertlik ölçme yöntemleri gösterilmektedir.

Vickers sertlik ölçümü ise Şekil 4.1 'de görüldüğü üzere kare tabanlı 136° lik bir prizma açısına sahip 10 kg ila 30 kg kadar F yükü uygulanabilen bir düzenek olup, deneyde batırılma işlemi 15 sn kadar sürmektedir. Numune yüzeyine bırakılan iz Eşitlik 4.1. 'deki gibi iki köşegen uzunluğu toplanıp aritmetik ortalaması hesaplandıktan sonra Eşitlik 4.2. 'den dönüştürüldüğü gibi kg olarak ifade edilen yük mm² olarak hesaplanan izin alanına bölümü sonucunda bulunur.



Şekil 4. 1. Vickers Sertlik Deneyi Prensi Şeması

Kaynak: (Chandler & ASM International., 1999)

Tablo 4. 2. Vickers, Rockwell ve Brinell Yöntemlerinde Kullanılan Başlıklar ve Uygulama Alanları

Sertlik	Simge	Batıcı Uç	İz Şekli		Yük	Sertlik Değeri Formulu	Prensip	Uygulama
			On Görünüş	Ust Görünüş				
Brinell	H _B	10 mm çapında çelik veya tungsten karbür bilya			500-3000 kg	$BHN = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey alanına oranı, birimi genellikle kg/mm ²	Dökme demir, çelikler ve demir dışı alaşımlar
					60 kg 150 kg 100 kg	100-500 t	Batıcı ucun malzemeye batma derinliği	Çok sert malzemeler Yüksek mukavemetli çelikler Yüksek mukavemetli çelikler
Rockwell	A	R _A			100 kg	130-500 t	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey	Sert malzemeler
	C	R _C			60 kg			
	D	R _D			150 kg			
	B	R _B			100 kg			
Rockwell	F	R _F			100 kg	130-500 t	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey	Sert malzemeler
	G	R _G			60 kg			
	E	R _E			150 kg			
Vickers	HV, DPH	Elmas pramit			10-30kg	$VHN = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey	Sert malzemeler

Kaynak:(Chandler & ASM International., 1999)

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4.1)$$

$$d = \frac{d1+d2}{2} \quad (4.2)$$

4.1.2. Yoğunluk Ölçümü

Kompozit numuneler ham yoğunlukları hesaplanmaları için Arşimet yöntemi kullanılarak Arşimed terasizi ile ölçüm yapılmıştır. Numuneler doymuş kütleleri için ısıtıcı manyetik karıştırıcıda 200 °C 'ye ayarlanmış ve kaynatılmış su içerisinde 3 saat bekletilmiş ve hassas terazide suya doymuş kütleleri (w_D) ölçülmüş, ardından su emdirilen numunelerin su içerisinde askıdaki kütlelerini (w_A) Arşimet Kiti ile ölçülmüştür. Numunelerin kuru kütleleri (w_k) ölçülmesi adına 80°C 'de 1 gün etüv fırınında bekletilip ölçüm alınmıştır. Sinterleme öncesi ve sonrası silindirik numunelerin teorik yoğunlukları (p_T) Eşitlik (4.3)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Teorik yoğunluk hesaplamak için ise ($\%p_T$) Eşitlik (4.4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$p_T = \frac{m}{v} \quad (4.3)$$

$$p_D = \frac{p_T}{p_{Ti}} \times 100 \quad (4.4)$$

DeneySEL yoğunluğu (p_D), Eşitlik (4.4.)'te, kompozitin yüzde dENEYSEL yoğunluğu ($\%p_D$) Eşitlik (4.5.)'te bulunan formüller aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$p_D = \frac{w_k}{w_D - w_A} \times 100 \quad (4.5)$$

$$p_D = \frac{w_k}{w_D - w_A} \times p_{su} \quad (4.6)$$

Kuru numunenin havadaki ağırlığı (w_k), sıvı emdirilmiş numunenin su içerisindeki ağırlığı (w_A), sıvı emdirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (w_D), suyun yoğunluğu ya da kullanılan sıvının yoğunluğu (ρ_{su}) olarak formülde gereken yerlere gerekli ölçümler kullanarak dENEYSEL yoğunluk (p_D) Eşitlik (4.6.) 'de ölçülmüştür. Vücut içi kullanılan kompozitlerde porozite yani yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılan değer ($\%G$) Eşitlik (4.7.) deki formülle ölçülmüştür.

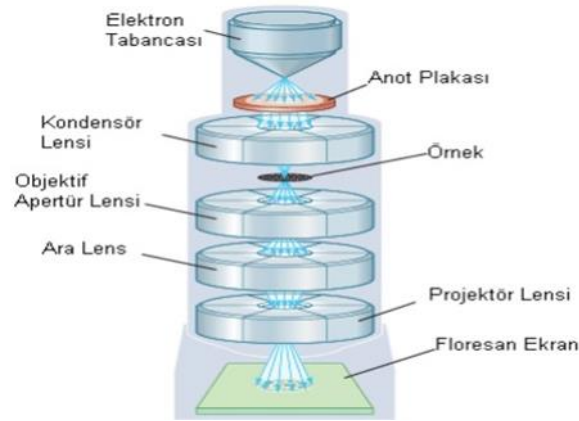
$$\%G = \left(1 - \frac{p_D}{p_{Ti}}\right) \times 100 \quad (4.7)$$

4.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı Karakterizasyonu (SEM)

SEM olarak da adlandırılan taramalı elektron mikroskobu, optik mikroskopların ışık demetlerine nazaran ışık yerine elektron ışınlarını kullanmaktadır. İnsan gözü 0,2 mm ye kadar görüntüleme sağlarken, SEM 0,0000005 mm ye kadar görüntüleme sağlamakta olup taranacak numune hakkında daha derin ve detaylı bir görüntüleme sağlamaktadır. Çalışma prensibi hakkında bilgi vermek gerekirse, makine iç sistemi tamamen geçirimsiz ve vakum

altında elektron tabancası ile gönderilen elektronlar odaklanarak numune üzerinde tarama yapmaktadır.

Elektron demetleri ile uyarılan elektronlar harekete geçerek ikincil elektron, geri saçılan elektronları numune üzerinden saçılım sağlarlar. Geri saçılan elektronların saçılımları sonlandırdığından sonra karakteristik X –ışınları yayılımı sağlanılarak dedektör ve algılayıcılar sayesinde sistem verileri okuyarak numunenin topografik ve kompozisyonu hakkında bilgileri bilgisayar ekranına aktarmaktadır. Şekil 3.6 ‘de çalışma prensibi şematik bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışma Prensibi

Kaynak:(Abbas, 2018)

4.1.4. XRD ile Faz Analizi ve Termal Difüzyon Ölçümü

Hammadde tozların içerdikleri fazlar X-ışını difraksiyonu (XRD) ile analiz edilmiştir (Gazzara & Messier, 1977). Numunelerin Lazer-flaş cihazıyla (Netzsch LFA-457) termal difüzyon ölçümü yapılmıştır (Baba vd., 2001)

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

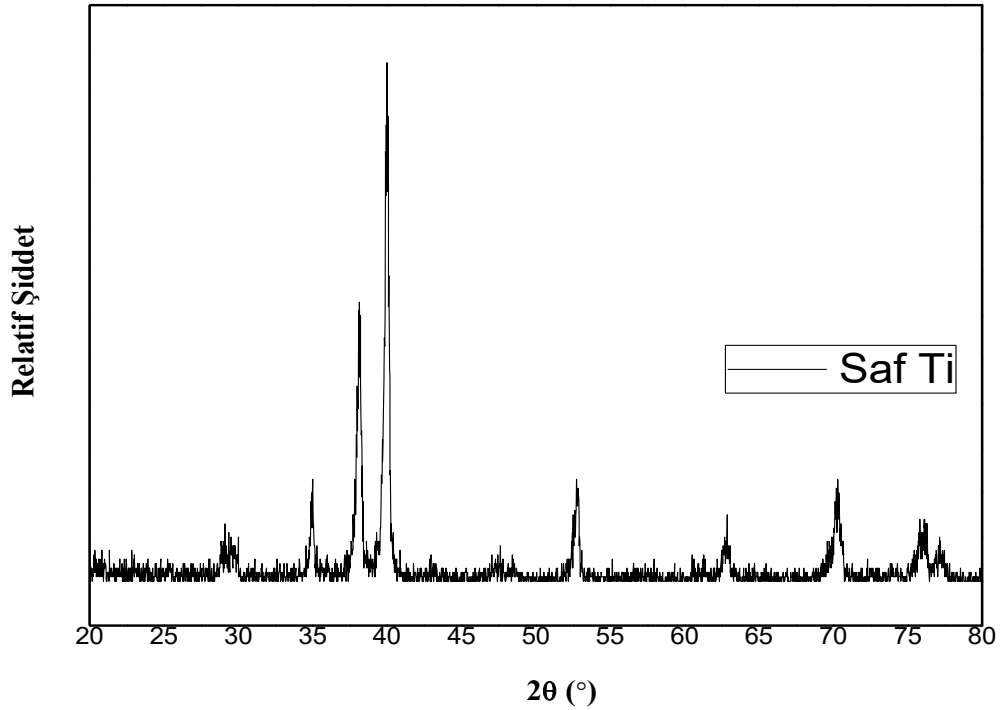
5.1. Matris ve Takviye Tozların Faz ve Kimyasal Analizi

Z kodlu % 60,34 ZrO₂ içeren seramik takviye tozun kimyasal analizi Tablo 5.1 de, Titanyum matris tozunun XRD paterni Şekil 5.1’de, Z Kodlu tozun faz analizi Şekil 5.2’de verilmiştir.

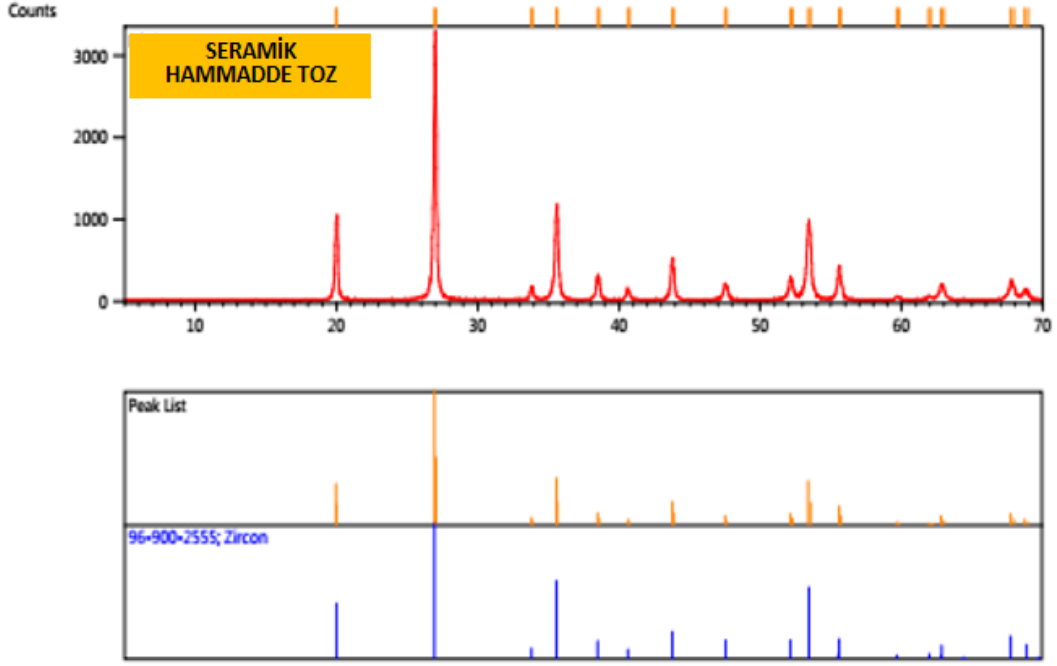
Tablo 5.1. Z Kodlu Tozun Kimyasal Analizi

Numune Kodu	ZrO ₂	SiO ₂	AZ
	%	%	%
Z**	60,34	36,15	3,51

** Z kodu, % 60,34 ZrO₂ içeren seramik takviye toz



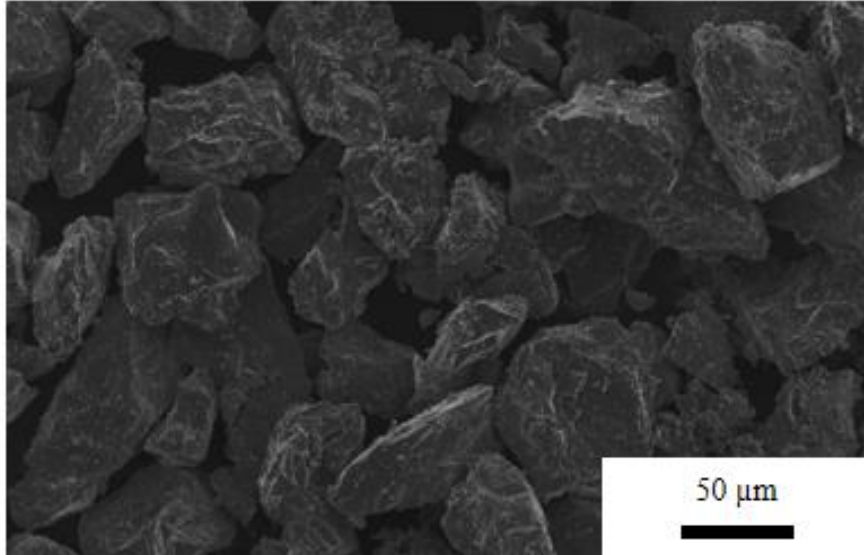
Şekil 5 1. Titanyum Tozun XRD Patterni



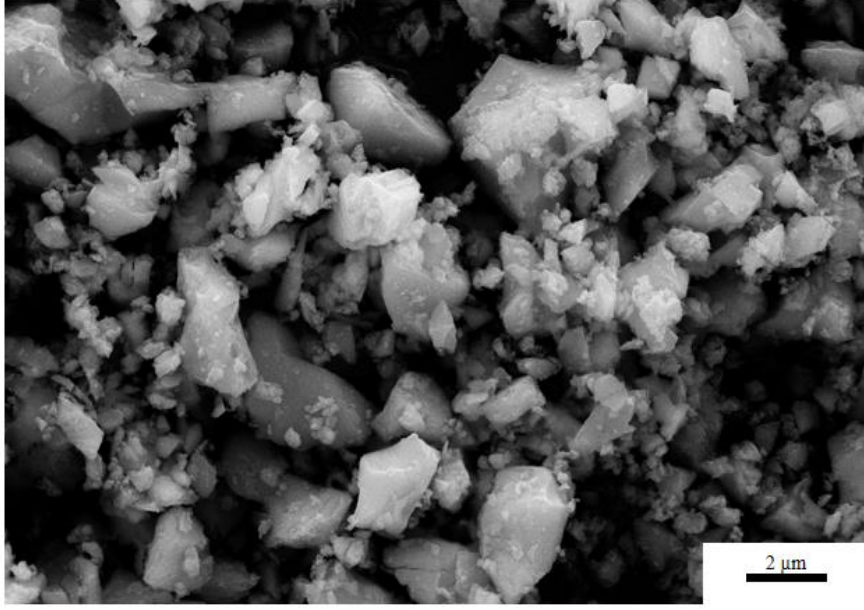
Şekil 5.2. Z Kodlu Takviye Tozun XRD Patterni

5.2. Tozların Morfolojik Analizi

Titanyum tozunun SEM görüntüsü Şekil 5. 3’de, seramik takviye tozun SEM görüntüsü Şekil 5. 4’de verilmiştir.



Şekil 5. 3. Titanyum Tozun SEM Görüntüsü



Şekil 5.4. Takviye Seramik Tozun SEM Görüntüsü

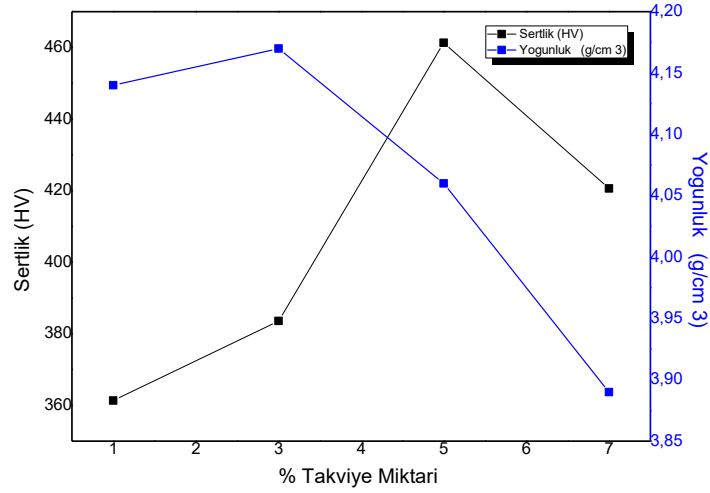
5.3. Sertlik ve Yoğunluk Deney Analizleri

Yapılan yoğunluk ve sertlik deney sonuçları Tablo 5.2’ de verilmektedir. Sertlik deneyi numune üzerinden 3 farklı noktadan alınan sertliklerin aritmetik ortalaması hesaplanarak bulunmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, Ti-%5 Z numunesi dikkate alındığında, saf titanyuma %5 seramik takviye toz ilavesinde sertlik en yüksek değerine (461,3HV) ulaşmıştır. Takviye seramik katkı yüzdesi ile yoğunluk ve sertlik değerlerinin değişim grafiği Şekil 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5. 2. Numunelerinin Sertlik ve Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Numune	HV	Ort. Yoğ. (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
Ti-%1 Z	361,3	93,4	4,14
Ti-%3 Z	383,6	94,2	4,17
Ti-%5 Z	461,3	91,6	4,06
Ti-%7 Z	420,6	87,8	3,89

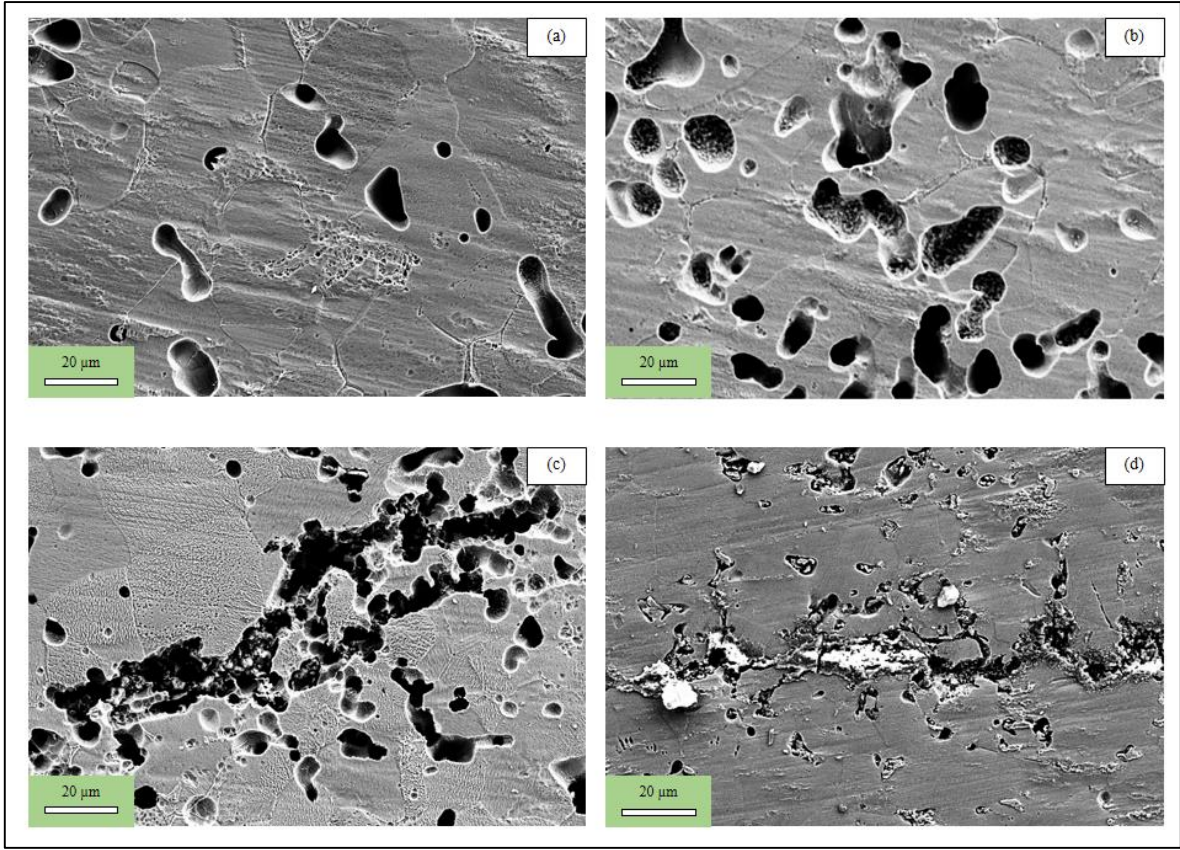
Z kodu, % 60,34 ZrO₂ içeren seramik takviye toz ilavesini ifade etmekte olup, Arşimet deneyi ile ölçülen numunelerin yoğunlukları Tablo 5.2’de verildiği üzere Ti-%3 Z numunesinin en yüksek yoğunlukta olduğu gözlenmiştir (4,17 g/cm³). %3 den daha yüksek miktarda seramik takviye toz katkısının yoğunluğu düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 5.5 Takviye seramik katkı yüzdesi ile yoğunluk ve sertlik değerlerinin değişimi

5.4 Sinterlenmiş Numunelerin SEM Analizi

1100 °C 'de 2 saat sinterlenen kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.6 daki gibidir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde porozif bir yapı olduğu görülmüştür. SEM görüntü analizlerine bakıldığında ilave takviye tozun, titanyum içerisinde dağıldığı saptanmıştır.



Şekil 5.6. Kompozitlerin SEM Mikroyapı Görüntüleri

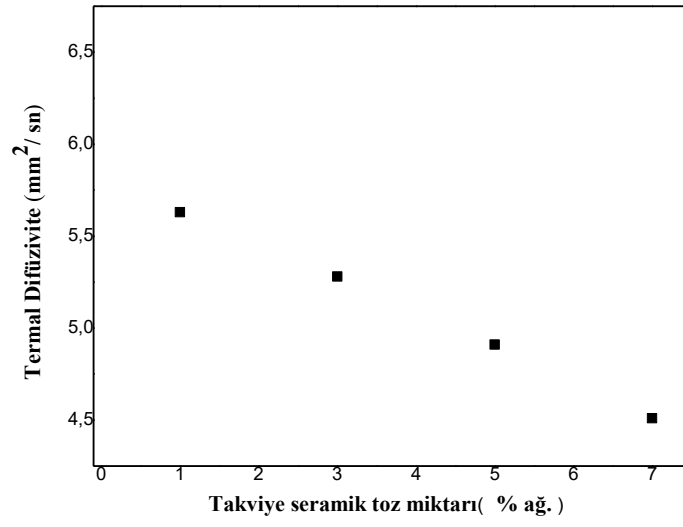
a) Ti-%1 Z, b) Ti-%3 Z, c) Ti-%5 Z, d) Ti-%7 Z

5.5 Sinterlenmiş Numunelerin Termal Analizi

Saf titanyuma farklı miktarlarda seramik hammadde toz ilavesiyle, oda sıcaklığında elde edilen termal difüzyon hızları Tablo 5.3’de, grafikleri ise Şekil 5.7 ‘de verilmiştir.

Tablo 5.3. Kompozitlerin Oda Sıcaklığında Elde Edilen Termal Difüzyon Hızı Değerleri

Numune Kodu	Termal Difüzyon Hızı (mm ² /s)
Ti-%1 Z	5,63
Ti-%3 Z	5,28
Ti-%5 Z	4,91
Ti-%7 Z	4,51



Şekil 5. 7. Kompozitlerin Termal Difüzyivite Değerlerinin Değişimi

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

- Sinterleme metodu ile zirkonya içeren toz takviyeli titanyum matrisli seramik-metal kompozit üretimler başarı ile gerçekleştirilmiştir

- Saf titanyuma %1, %3, %5 ve %7 zirkonya içeren seramik hammadde toz ilave edilerek üretilen numunelerde sertlik değerleri sırasıyla, 361,3 HV, 383,6 HV, 461,3 HV ve 420,6 HV olarak ölçülmüştür. Ti-%5 Z kodlu numunede en yüksek sertlik elde edilmiştir.

- Numunelerin mikroyapı görüntülerine bakıldığında, numunelerin SEM-EDX analizleri incelendiğinde büyük oranda uyumlu bir şekilde yapı oluşumu ve üretim geliştirmeye çok açık bir alan olduğu öngörülmektedir.

- Saf titanyumun termal difüzyivite değeri $6,41 \text{ mm}^2/\text{sn}$ olup ilavelerle %1, %3, %5 ve %7 seramik hammadde toz ilave edilerek üretilen numunelerde termal difüzyivite değerleri sırasıyla, 5,63, 5,28, 4,91, 4,51 mm^2/sn olarak ölçülmüştür. Oda sıcaklığında ölçülen termal difüzyivite sonuçlarında en yüksek difüzyivite değeri, %1 Z kodlu numunelerde elde edilmiş, ilave miktarı arttıkça termal difüzyivite azalmıştır.

- En yüksek difüzyivite değeri %1 Z kodlu numunede elde edilmiş olmasına rağmen ticari yüksek değere ulaşamamış ancak çalışma sonuçları umut vaat edicidir.

KAYNAKÇA

- Abbas, J.** (2018). In vitro antimalarial activity of *Calophyllum bicolor* and hemozoin crystals observed by Transmission Electron Microscope (TEM). *MATEC Web of Conferences*, 154, 04004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815404004>
- Abd El-Ghany, O. S., & Sherief, A. H.** (2016). Zirconia based ceramics, some clinical and biological aspects: Review. *Future Dental Journal*, 2(2), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.fdj.2016.10.002>
- Abd-Elwahed, M. S., Ibrahim, A. F., & Reda, M. M.** (2020). Effects of ZrO₂ nanoparticle content on microstructure and wear behavior of titanium matrix composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8528-8534. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.021>
- Abdullah, R., Adzali, N. M. S., & Che Daud, Z.** (2015). Biomedical applications: Composite metal alloys with additives. *Materials Science Forum*, 819, 337-340. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.819.337>
- Abelson, P. H.** (1987). Materials Research. *Science*, 235(4784), 9-9. <https://doi.org/10.1126/science.235.4784.9>
- Ahamed, A. R., Asokan, P., & Aravindan, S.** (2009). EDM of hybrid Al–SiCp–B₄Cp and Al–SiCp–Glassp MMCs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(5-6), 520-528. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1839-0>
- Al, W. E. T.** (2011). *Toughening in Graphene Ceramic Composites*. (4), 3182-3190.
- Alam, M. A., Zuga, L., & Pecht, M. G.** (2012). Economics of rare earth elements in ceramic capacitors. *Ceramics International*, 38(8), 6091-6098. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.05.068>
- Al-Oqla, F. M., & Salit, M. S.** (2017). Materials Selection for Natural Fiber Composites. *Materials Selection for Natural Fiber Composites*, 1-278. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04877-8>
- Anish, R., Singh, G. R., & Sivapragash, M.** (2012). Techniques for Processing Metal Matrix Composite; A Survey. *Procedia Engineering*, 38, 3846-3854. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.441>

- Argirusis, C., Damjanović, T., & Borchardt, G.** (2007). Yttrium silicate coating system for oxidation protection of C/C–Si–SiC composites: Electrophoretic deposition and oxygen self-diffusion measurements. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1303-1306. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.026>
- Arslan, P., & Tayyar, A. E.** (2016). Kompozit Malzemelerin Ağız, Yüz, Çene Cerrahisinde Kullanımı ve Malzeme Uygunluklarının Belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 227-242.
- Asl, M. S., Nayebi, B., Ahmadi, Z., Zamharir, M. J., & Shokouhimehr, M.** (2018). Effects of carbon additives on the properties of ZrB₂-based composites: A review. *Ceramics International*, 44(7), 7334-7348. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.214>
- Baba, T., Ono, A., Cowan, R. D., E1461, Lucuta, P. G., Matzke, Hj., ... Murabayashi, M.** (2001). Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method 1. *Journal of Applied Physics*, 12(4).
- Balani, K., Bakshi, S. R., Chen, Y., Laha, T., & Agarwal, A.** (2007). Role of Powder Treatment and Carbon Nanotube Dispersion in the Fracture Toughening of Plasma-Sprayed Aluminum Oxide — Carbon Nanotube Nanocomposite. 7(10), 3553-3562. <https://doi.org/10.1166/jnn.2007.851>
- Balázs, Cs., Kónya, Z., Wéber, F., Biró, L. P., & Arató, P.** (2003). Preparation and characterization of carbon nanotube reinforced silicon nitride composites. *Materials Science and Engineering: C*, 23(6-8), 1133-1137. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2003.09.085>
- Becker, K., Schroecksnadel, S., Geisler, S., Carriere, M., Gostner, J. M., Schennach, H., ... Fuchs, D.** (2014). TiO₂ nanoparticles and bulk material stimulate human peripheral blood mononuclear cells. *Food and Chemical Toxicology*, 65, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.12.018>
- Bednorz, J. G., & Müller, K. A.** (1986). Condensed Matt Possible High T_c Superconductivity in the Ba - La - Cu - O System. 193, 189-193.
- Behera, A., Sahu, P., Mohapatra, S. K., & Ghadei, S. K.** (2020). Characterization of carbon based nanofibers in nanocomposites and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 5714-5719. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.531>
- Blugan, G., Kuebler, J., & Tom, K.** (2008). Microstructure and properties of carbon nanotube / zirconia composite. 28, 1023-1027. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.011>

Callister, W. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*, Jr.—7th ed. p. cm.,TA403.C23 2007, John Wiley & Sons. İçinde *Materials Science and Engineering*. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90343-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90343-0)

Cha, S. I., Kim, K. T., Lee, K. H., Mo, C. B., & Hong, S. H. (2005). Strengthening and toughening of carbon nanotube reinforced alumina nanocomposite fabricated by molecular level mixing process. *Scripta Materialia*, 53(7), 793-797. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.06.011>

Chandler, Harry., & ASM International. (1999). *Hardness testing*. 192.

Chang, M., Wang, Z., Liang, W., & Sun, M. (2019). A novel failure analysis of SMA reinforced composite plate based on a strain-rate-dependent model: low-high velocity impact. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 812-826. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.012>

Chaudhari, A. K., & Singh, V. B. (2018). A review of fundamental aspects, characterization and applications of electrodeposited nanocrystalline iron group metals, Ni-Fe alloy and oxide ceramics reinforced nanocomposite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.090>

Chawla, K K. (1998). *Ceramic Matrix Composites*.

Chawla, Krishan K. (2012). *Composite Materials*. İçinde *Solid Mechanics and its Applications* (C. 263). New York, NY: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>

Chen, Y., Li, J., & Du, J. (2008). *Cost effective combustion synthesis of silicon nitride*. 43, 1598-1606. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.06.051>

Cho, J., Boccaccini, A. R., & Shaffer, A. M. S. P. (2009). *Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes*. 1934-1951. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3262-9>

Christin, F. (2002). Design, Fabrication, and Application of Thermostructural Composites (TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC Composites. *Advanced Engineering Materials*, 4(12), 903-912. <https://doi.org/10.1002/adem.200290001>

Clau, B. (2008). *Fibers for Ceramic Matrix Composites*. İçinde *Ceramic Matrix Composites* (ss. 1-20). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527622412.ch1>

- Cui, E., Zhao, J., Wang, X., Sun, J., Huang, X., & Wang, C.** (2018). Microstructure and toughening mechanisms of Al₂O₃ / (W , Ti) C / graphene composite ceramic tool material. *Ceramics International*, (April), 0-1. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.185>
- Curtin, W. A.** (1991). *Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites*. 45, 2837-2845.
- Deborah Chung, D. L.** (2017). 3 - Polymer-Matrix Composites: Structure and Processing. İçinde *Carbon Composites* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804459-9/00003-8>
- Esparza-Vázquez, S. J., Rocha-Rangel, E., Rodríguez-García, J. A., & Hernández-Bocanegra, C. A.** (2014). Strengthening of Alumina-Based Ceramics with Titanium Nanoparticles. *Materials Sciences and Applications*, 05(07), 467-474. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.57050>
- Fan, J., Zhuang, D., Zhao, D., Zhang, G., Wu, M., Wei, F., & Fan, Z.-J.** (2006). Toughening and reinforcing alumina matrix composite with single-wall carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 89(12), 121910. <https://doi.org/10.1063/1.2336623>
- Fan, Y., Wang, L., Li, J., Li, J., Sun, S., Chen, F., ... Jiang, W.** (2010). Preparation and electrical properties of graphene nanosheet/Al₂O₃ composites. *Carbon*, 48(6), 1743-1749. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.017>
- Fazeli, M., Florez, J. P., & Simão, R. A.** (2019). Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification. *Composites Part B: Engineering*, 163, 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.048>
- Flahaut, E., Peigney, A., Laurent, C., Marlière, C., Chastel, F., Rousset, A., ... Chastel, F.** (2014). *Carbon nanotube-metal-oxide nanocomposites : microstructure, electrical conductivity and mechanical properties To cite this version : HAL Id : hal-00938352*. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00147-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00147-6)
- Freim, J., McKittrick, J., Katz, J., & Sickafus, K.** (1994). Microwave sintering of nanocrystalline γ -Al₂O₃. *Nanostructured Materials*, 4(4), 371-385. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(94\)90108-2](https://doi.org/10.1016/0965-9773(94)90108-2)
- Gazzara, C. P., & Messier, D. R.** (1977). Determination of phase content of Si₃N₄ by x-ray diffraction analysis. *American Ceramic Society Bulletin*, 56(9).

- Ghazanfari, S. M. H., & Zamanian, A.** (2013). Phase transformation, microstructural and mechanical properties of hydroxyapatite/alumina nanocomposite scaffolds produced by freeze casting. *Ceramics International*, 39(8), 9835-9844. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.096>
- Guanming, Q., Xikum, L., Tai, Q., Haitao, Z., Honghao, Y., & Ruiting, M.** (2007). Application of Rare Earths in Advanced Ceramic Materials. *Journal of Rare Earths*, 25, 281-286. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60489-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60489-X)
- Gudapati, V. M., Veedu, V. P., & Ghasemi-Nejhad, M. N.** (2006). Polymeric precursor pyrolysis for flexural property evaluation of continuous fiber ceramic nanocomposites with nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 66(16), 3230-3240. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.005>
- Guo, J., Li, J., & Kou, H.** (2017). *Advanced Ceramic Materials*. (Cvd). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63591-4.00017-3>
- Han, C., Li, Y. C., Liang, X. G., Chen, L. P., Zhao, N., & Zhu, X. K.** (2012). Effect of composition and sintering temperature on mechanical properties of ZrO₂ particulate-reinforced titanium-matrix composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(8), 1855-1859. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61397-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61397-6)
- Hannink, R. H. J., Kelly, P. M., & Muddle, B. C.** (2004). Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(3), 461-487. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x>
- Hariharasakthisudhan, P., & Jose, S.** (2018). Influence of metal powder premixing on mechanical behavior of dual reinforcement (Al₂O₃ (μm)/Si₃N₄ (nm)) in AA6061 matrix. *Journal of Alloys and Compounds*, 731, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.002>
- Heian, E. M., Khalsa, S. K., Lee, J. W., Munir, Z. A., Yamamoto, T., & Ohyanagi, M.** (2004). Synthesis of Dense, High-Defect-Concentration B₄C through Mechanical Activation and Field-Assisted Combustion. *Journal of the American Ceramic Society*, 87(5), 779-783. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00779.x>
- Heidenreich, B., Renz, R., & Krenkel, W.** (2006). Short Fibre Reinforced CMC Materials for High Performance Brakes. İçinde *High Temperature Ceramic Matrix Composites* (C. 1, ss. 809-815). Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/3527605622.ch123>

- Hesaraki, S., Ebadzadeh, T., & Ahmadzadeh-Asl, S.** (2010). Nanosilicon carbide/hydroxyapatite nanocomposites: structural, mechanical and in vitro cellular properties. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21(7), 2141-2149. <https://doi.org/10.1007/s10856-010-4068-7>
- Hirota, K., Hara, H., & Kato, M.** (2007). Mechanical properties of simultaneously synthesized and consolidated carbon nanofiber (CNF)-dispersed SiC composites by pulsed electric-current pressure sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 458(1-2), 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.065>
- Hunt, W. H.** (2000). Metal Matrix Composites. İçinde *Comprehensive Composite Materials* (ss. 57-66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00134-0>
- Hwang, G. L., & Hwang, K. C.** (2001). *Carbon nanotube reinforced ceramics*. 1722-1725. <https://doi.org/10.1039/b101294k>
- Inam, F., Yan, H., Peijs, T., & Reece, M. J.** (2010). The sintering and grain growth behaviour of ceramic – carbon nanotube nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 70(6), 947-952. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.02.010>
- Jones, A. C., Aspinall, H. C., Chalker, P. R., Potter, R. J., Kukli, K., Rahtu, A., ... Leskelä, M.** (2005). Recent developments in the MOCVD and ALD of rare earth oxides and silicates. *Materials Science and Engineering: B*, 118(1-3), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.12.081>
- Kaya, A. İ.** (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. *Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 8, 38-45.
- Kenyon, A.** (2002). Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics. *Progress in Quantum Electronics*, 26(4-5), 225-284. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00014-9)
- Kidari, A., Hampshire, S., & Bala, C.** (2011). *Silicon nitride based nanocomposites produced by two different sintering methods*. 37, 3457-3461. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.150>
- Kim, B.-N., Hiraga, K., Morita, K., & Yoshida, H.** (2007). Spark plasma sintering of transparent alumina. *Scripta Materialia*, 57(7), 607-610. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.06.009>

- Kita, J., Suemasu, H., & Davies, I. J.** (2010). *Fabrication of silicon carbide composites with carbon nanofiber addition and their fracture toughness.* 6052-6058. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4690-2>
- Kvetková, L., Duszová, A., Hvizdoš, P., Dusza, J., Kun, P., & Balázs, C.** (2012). Fracture toughness and toughening mechanisms in graphene platelet reinforced Si₃N₄ composites. *Scripta Materialia*, 66(10), 793-796. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.02.009>
- Lam, C., James, J. T., McCluskey, R., Arepalli, S., & Hunter, R. L.** (2006). A Review of Carbon Nanotube Toxicity and Assessment of Potential Occupational and Environmental Health Risks. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(3), 189-217. <https://doi.org/10.1080/10408440600570233>
- Lamon, J.** (1993). Interfaces and interfacial mechanics: influence on the mechanical behavior of ceramic matrix composites (CMC). *Le Journal de Physique IV*, 03(C7), C7-1607-C7-1616. <https://doi.org/10.1051/jp4:19937252>
- Lan, Y., Lu, Y., & Ren, Z.** (2013). Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. *Nano Energy*, 2(5), 1031-1045. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.04.002>
- Laurent, C., Peigney, A., Dumortier, O., & Rousset, A.** (1998). *Carbon Nanotubes ± Fe ± Alumina Nanocomposites. Part II: Microstructure and Mechanical Properties of the Hot-Pressed Composites.* 2219(98).
- Lee, H. K.** (2008). Effects of the cladding parameters on the deposition efficiency in pulsed Nd:YAG laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.024>
- Li, J. L., Bai, G. Z., Feng, J. W., & Jiang, W.** (2005). Microstructure and mechanical properties of hot-pressed carbon nanotubes compacted by spark plasma sintering. *Carbon*, 43(13), 2649-2653. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.04.035>
- Li, W., & Gao, L.** (2003). Fabrication of HAp–ZrO₂ (3Y) nano-composite by SPS. *Biomaterials*, 24(6), 937-940. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00428-3](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00428-3)
- Liao, S. C., Chen, Y. J., Kear, B. H., & Mayo, W. E.** (1998). High pressure/low temperature sintering of nanocrystalline alumina. *Nanostructured Materials*, 10(6), 1063-1079. [https://doi.org/10.1016/S0965-9773\(98\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9773(98)00125-1)

- Liu, J., Yan, H., & Jiang, K.** (2013). Mechanical properties of graphene platelet-reinforced alumina ceramic composites. *Ceramics International*, 39(6), 6215-6221. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.041>
- Liu, J., Yan, H., Reece, M. J., & Jiang, K.** (2012). Toughening of zirconia / alumina composites by the addition of graphene platelets. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(16), 4185-4193. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.07.007>
- Liu, P., Li, Z., Xiao, P., Luo, H., & Jiang, T.** (2018). Microstructure and mechanical properties of in-situ grown mullite toughened 3Y-TZP zirconia ceramics fabricated by gelcasting. *Ceramics International*, 44(2), 1394-1403. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.09.151>
- Liu, X., Li, J., Yu, X., Fan, H., Wang, Q., Yan, S., ... Jiang, W.** (2016). Graphene nanosheet/titanium carbide composites of a fine-grained structure and improved mechanical properties. *Ceramics International*, 42(1), 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.071>
- Liu, Y., Bian, D., Zhao, Y., & Wang, Y.** (2018). Anti-corrosion performance of chemically bonded phosphate ceramic coatings reinforced by nano-TiO₂. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 86, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.06.045>
- Llorente, J., & Belmonte, M.** (2018). Friction and wear behaviour of silicon carbide/graphene composites under isooctane lubrication. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(10), 3441-3446. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.001>
- Lupo, F., Kamalakaran, R., Scheu, C., Grobert, N., & Rühle, M.** (2004). Microstructural investigations on zirconium oxide–carbon nanotube composites synthesized by hydrothermal crystallization. *Carbon*, 42(10), 1995-1999. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.03.037>
- Ma, R. Z., Wu, J., Wei, B. Q., Liang, J., & Wu, D. H.** (1998). *Processing and properties of carbon nanotubes – nano-SiC ceramic*. 3, 5243-5246.
- Maensiri, S., Laokul, P., & Klinkaewnarong, J.** (2007). *Carbon nanofiber-reinforced alumina nanocomposites: Fabrication and mechanical properties*. 447, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.009>
- Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Wijesinghe, W. P. S. L., Dissanayake, D. M. S. N., Mihiri Ekanayake, U. G., & Senthilnathan, A.** (2019). Current review on the utilization of nanoparticles for ceramic matrix reinforcement. *Içinde Interfaces in Particle and Fibre*

Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102665-6.00013-3>

Mazaheri, M., Mari, D., Hesabi, Z. R., Schaller, R., & Fantozzi, G. (2011). Multi-walled carbon nanotube/nanostructured zirconia composites: Outstanding mechanical properties in a wide range of temperature. *Composites Science and Technology*, 71(7), 939-945. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.017>

Meriglier, E., Debouverie, O., Walter-Lepage, A., Brigaud, A., Beuvon, C., & Luca, L. (2015). Stepped carbon nanotubes synthesized in anodic aluminum oxide templates. *Revue Neurologique*, 171(8-9), 674-676. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2015.03.009>

Mishra, R. S., Schneider, J. A., Shackelford, J. F., & Mukherjee, A. K. (1995). Plasma activated sintering of nanocrystalline γ -Al₂O₃. *Nanostructured Materials*, C. 5, ss. 525-544. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00263-E](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00263-E)

Mishra, Rajiv S., Lesher, C. E., & Mukherjee, A. K. (1996). High-Pressure Sintering of Nanocrystalline gammaAl₂O₃. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(11), 2989-2992. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08741.x>

Mirazimi, J., Abachi, P., & Purazrang, K. (2016). Microstructural characterization and dry sliding wear behavior of spark plasma sintered Cu-YSZ composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1745-1754. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64289-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64289-9)

Morales-Rodríguez, A., Poyato, R., Gallardo-López, A., Muñoz, A., & Domínguez-Rodríguez, A. (2013). Evidence of nanograin cluster coalescence in spark plasma sintered α -Al₂O₃. *Scripta Materialia*, 69(7), 529-532. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.06.019>

Ovid'ko, I. A., & Sheinerman, A. G. (2012). Generation and growth of nanocracks near blunt cracks in nanocrystalline solids. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 33, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.11.001>

Park, S.-J., & Seo, M.-K. (2011). Types of Composites. İçinde *Interface Science and Technology* (C. 18, ss. 501-629). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375049-5.00007-4>

Peigney, A., Flahaut, E., Laurent, C., Chastel, F., & Rousset, A. (2002). *Aligned carbon nanotubes in ceramic-matrix nanocomposites prepared by high-temperature extrusion*. 352(January), 20-25.

- Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., & Rousset, A.** (2000). *Carbon nanotubes in novel ceramic matrix nanocomposites*. 26, 677-683.
- Peng, T., Liu, X., Dai, K., Xiao, J., & Song, H.** (2006). Effect of acidity on the glycine-nitrate combustion synthesis of nanocrystalline alumina powder. *Materials Research Bulletin*, 41(9), 1638-1645. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.02.026>
- Plummer, C. J. G., Bourban, P.-E., & Månson, J.-A.** (2016). Polymer Matrix Composites: Matrices and Processing. İçinde *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (ss. 1-9). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02386-9>
- Porwal, H., Grasso, S., & Reece, M. J.** (2013). Review of graphene–ceramic matrix composites. *Advances in Applied Ceramics*, 112(8), 443-454. <https://doi.org/10.1179/174367613X13764308970581>
- Poyato, R., Vasiliev, A. L., Padture, N. P., Tanaka, H., & Nishimura, T.** (2006). Aqueous colloidal processing of single-wall carbon nanotubes and their composites with ceramics. *Nanotechnology*, 17(6), 1770-1777. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/6/038>
- Prasadh, S., Suresh, S., Ratheesh, V., Wong, R., & Gupta, M.** (2021). Biocompatibility of Metal Matrix Composites Used for Biomedical Applications. İçinde *Encyclopedia of Materials: Composites*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11834-x>
- Priyanka, P., Dixit, A., & Mali, H. S.** (2017). High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. A Review. *Mechanics of Composite Materials*, 53(5), 685-704. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9696-2>
- Que, W., Khor, K. A., Xu, J. L., & Yu, L. G.** (2008). Hydroxyapatite/titania nanocomposites derived by combining high-energy ball milling with spark plasma sintering processes. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(16), 3083-3090. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.016>
- Ramírez, C., Wang, Q., Belmonte, M., Miranzo, P., Osendi, M. I., Sheldon, B. W., & Padture, N. P.** (2018). Scripta Materialia Direct in situ observation of toughening mechanisms in nanocomposites of silicon nitride and reduced graphene-oxide. *Scripta Materialia*, 149, 40-43. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.02.004>
- Rani Elhajjar, Valeria La Saponara, A. M.** (2013). Smart Composites. *Mechanics and Design*, 430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b16257>

- Rocha, R. M., Cairo, C. A. A., & Grac, M. L. A.** (2006). *Formation of carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites with polysiloxane / silicon derived matrix*. 437, 268-273. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.102>
- Roohani-Esfahani, S.-I., Nouri-Khorasani, S., Lu, Z., Appleyard, R., & Zreiqat, H.** (2010). The influence hydroxyapatite nanoparticle shape and size on the properties of biphasic calcium phosphate scaffolds coated with hydroxyapatite–PCL composites. *Biomaterials*, 31(21), 5498-5509. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.03.058>
- Rosenflanz, A., Frey, M., Endres, B., Anderson, T., Richards, E., & Schardt, C.** (2004). Bulk glasses and ultrahard nanoceramics based on alumina and rare-earth oxides. *Nature*, 430(7001), 761-764. <https://doi.org/10.1038/nature02729>
- R.S. Mishra, A.K. Mukherjee, C. E. L.** (1996). *Nanocrystalline Alumina-Diamond Composites*.
- Şardan, B.** (2009). *Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi*. 77-84.
- Schedin, F., Geim, A. K., Morozov, S. v, Hill, E. W., Blake, P., Katsnelson, M. I., & Novoselov, K. S.** (2007). *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene*. 6(2), 6-9. <https://doi.org/10.1038/nmat1967>
- Schimka, L., Harl, J., & Kresse, G.** (2011). *Improved hybrid functional for solids : The HSEsol functional*. 024116, 1-12. <https://doi.org/10.1063/1.3524336>
- Schneider, J., Maksimova, N. I., Joshi, R., Schierholz, R., & Feile, R.** (2008). *Catalyst free growth of a carbon nanotube – alumina composite structure*. 361, 1770-1778. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2006.10.025>
- Shahedi Asl, M.** (2018). A statistical approach towards processing optimization of ZrB₂–SiC–graphite nanocomposites. Part I: Relative density. *Ceramics International*, 44(6), 6935-6939. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.122>
- Shahedi Asl, M., Zamharir, M. J., Ahmadi, Z., & Parvizi, S.** (2018). Effects of nano-graphite content on the characteristics of spark plasma sintered ZrB₂–SiC composites. *Materials Science and Engineering A*, 716, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.038>
- Shan, Y., & Gao, L.** (2005). Synthesis and characterization of phase controllable ZrO₂ –carbon nanotube nanocomposites. *Nanotechnology*, 16(6), 625-630. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/6/001>

- Shen, Z., Ko, Z., Kiricsi, I., & Arato, P.** (2006). *Application of carbon nanotubes to silicon nitride matrix reinforcements*. 6, 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2005.07.024>
- Shi, S. L., & Liang, J.** (2006). Effect of multiwall carbon nanotubes on electrical and dielectric properties of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(11), 3533-3535. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01232.x>
- Song, G., Wu, Y., & Li, Q.** (2002). *Elevated temperature strength and thermal shock behavior of hot-pressed carbon fiber reinforced TiC composites*. 22, 559-566.
- Suchanek, W., Yashima, M., Kakihana, M., & Yoshimura, M.** (1996). Processing and mechanical properties of hydroxyapatite reinforced with hydroxyapatite whiskers. *Biomaterials*, 17(17), 1715-1723. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(96\)87652-6](https://doi.org/10.1016/0142-9612(96)87652-6)
- Sui, Y. C., Acosta, D. R., Gonza, J. A., Flores, J. O., Saniger, J. M., & Me, A. P.** (2001). *Structure, Thermal Stability and Deformation of Multibranched Carbon Nanotubes Synthesized by CVD in the AAO Template*. 1523-1527.
- Sun, J., & Gao, L.** (2003). Development of a dispersion process for carbon nanotubes in ceramic matrix by heterocoagulation. *Carbon*, 41(5), 1063-1068. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00441-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00441-4)
- Tang, J., Redl, F., Zhu, Y., Siegrist, T., Brus, L. E., & Steigerwald, M. L.** (2005). An organometallic synthesis of TiO₂ nanoparticles. *Nano Letters*, 5(3), 543-548. <https://doi.org/10.1021/nl047992h>
- Tapasztó, O., Tapasztó, L., Markó, M., Kern, F., Gadow, R., & Balácsi, C.** (2011). *Dispersion patterns of graphene and carbon nanotubes in ceramic matrix composites*. 511, 340-343. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2011.06.047>
- Tapasztó, O., We, F., & Bala, C.** (2012). *Determination of structural and mechanical properties of multilayer graphene added silicon nitride-based composites*. 38, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.051>
- Teng, L., Li, W., & Wang, F.** (2001). Effect of Ti content on the martensitic transformation in zirconia for Ti-ZrO composites 2 a. İçinde *Journal of Alloys and Compounds* (C. 319). Geliş tarihi gönderen www.elsevier.com/locate/jallcom
- Teocoli, F., Ni, D. W., Sanna, S., Thydén, K., Fonseca, F. C., & Esposito, V.** (2015). Fast mass interdiffusion in ceria/alumina composite. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(33), 17135-17143. <https://doi.org/10.1039/C5TA02416A>

- Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T.** (2001). *Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites : a review*. 61, 1899-1912.
- Tian, X., Zhao, J., Wang, Z., & Liu, X.** (2016). Design and fabrication of Si₃N₄/(W, Ti)C graded nano-composite ceramic tool materials. *Ceramics International*, 42(12), 13497-13506. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.142>
- Töldsepp, E., Schoenstein, F., Amamra, M., Saar, R., Feldbach, E., Kanaev, A., & Kirm, M.** (2016). Spark plasma sintering of ultra-porous γ -Al₂O₃. *Ceramics International*, 42(10), 11709-11715. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.089>
- Tsukamoto, H.** (2014). Mechanical Properties of Zirconia-Titanium Composites. *International Journal of Materials Science and Applications*, 3(5), 260. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20140305.28>
- Uribe, B. E. B., Chiromito, E. M. S., Carvalho, A. J. F., & Tarpani, J. R.** (2017). Low-cost, environmentally friendly route for producing CFRP laminates with microfibrillated cellulose interphase. *Express Polymer Letters*, 11(1), 47-59. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.6>
- Vasiliev, V. v., & Morozov, E. v.** (2018). Introduction. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures. İçinde *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures* (ss. xvii-xxv). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102209-2.00022-0>
- Wang, J., Zhou, G., Chen, C., Yu, H., Wang, T., Ma, Y., ... Chai, Z.** (2007). Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration. *Toxicology Letters*, 168(2), 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2006.12.001>
- Wang, K., Wang, Y., Fan, Z., Yan, J., & Wei, T.** (2011). Preparation of graphene nanosheet / alumina composites by spark plasma sintering. *Materials Research Bulletin*, 46(2), 315-318. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.11.005>
- Wang, S., Xu, Y., Zhou, J., Li, H., Chang, J., & Huan, Z.** (2017). In vitro degradation and surface bioactivity of iron-matrix composites containing silicate-based bioceramic. *Bioactive Materials*, 2(1), 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2016.12.001>
- Weber, D. N., Shaw, C. F., & Petering, D. H.** (1987). Euglena gracilis cadmium-binding protein-II contains sulfide ion. *Journal of Biological Chemistry*, 262(15), 6962-6964. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)48186-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)48186-0)

- Wei, Z. J., Cao, L., Wang, H. W., & Zou, C. M.** (2011). Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites processed by in situ casting route. *Materials Science and Technology*, 27(8), 1321-1327. <https://doi.org/10.1179/026708310X12699498462922>
- Weiss, R.** (2001). *Carbon Fibre Reinforced CMCs : Manufacture , Properties , Oxidation Protection*.
- Wijesinghe, W. P. S. L., Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Chathuranga Senarathna, K. G., Herath, H. M. T. U., Premachandra, T. N., Ranasinghe, C. S. K., ... Singh, S.** (2016). Preparation of bone-implants by coating hydroxyapatite nanoparticles on self-formed titanium dioxide thin-layers on titanium metal surfaces. *Materials Science and Engineering: C*, 63, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.02.053>
- Wijesinghe, W. P. S. L., Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Premalal, E. V. A., Herath, H. M. T. U., Mahalingam, S., Edirisinghe, M., ... Rajapakse, R. M. G.** (2014). Facile synthesis of both needle-like and spherical hydroxyapatite nanoparticles: Effect of synthetic temperature and calcination on morphology, crystallite size and crystallinity. *Materials Science and Engineering: C*, 42, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.05.032>
- Wijesinghe, W. P. S. L., Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Rajapakse, R. M. G., Pitawala, H. M. T. G. A., Premachandra, T. N., Herath, H. M. T. U., ... Wijayantha, K. G. U.** (2017). Urea-assisted synthesis of hydroxyapatite nanorods from naturally occurring impure apatite rocks for biomedical applications. *RSC Advances*, 7(40), 24806-24812. <https://doi.org/10.1039/C7RA02166F>
- Wozniak, J., Jastrzębska, A., Cygan, T., & Olszyna, A.** (2017). Surface modification of graphene oxide nanoplatelets and its influence on mechanical properties of alumina matrix composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(4), 1587-1592. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.010>
- Wu, S. J., Jonghe, L. C., & Rahaman, M. N.** (1996). Sintering of Nanophase gamma-Al₂O₃ Powder. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(8), 2207-2211. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08962.x>
- Xu, S. hang, Liu, Y., Liu, B., Wang, X., & Chen, Z. xing.** (2018). Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy by heat treatment with continuous temperature gradient. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 28(2), 273-281. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64660-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64660-6)

- Yan, Z., & Yan, C.** (2008). *Controlled synthesis of rare earth nanostructures*. 5046-5059. <https://doi.org/10.1039/b810586c>
- Yang, Y., Wang, Y., Tian, W., Wang, Z., Zhao, Y., Wang, L., & Bian, H.** (2009). Reinforcing and toughening alumina/titania ceramic composites with nano-dopants from nanostructured composite powders. *Materials Science and Engineering: A*, 508(1-2), 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.040>
- Yin, Z., Yuan, J., Xu, W., Liu, K., & Yan, S.** (2018). Graphene nanosheets toughened TiB₂-based ceramic tool material by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 44(8), 8977-8982. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.098>
- Zhan, G., Kuntz, J., Wan, J., Garay, J., & Mukherjee, A. K.** (2002). *Alumina-based nanocomposites consolidated by spark plasma sintering*. 47, 737-741.
- Zhan, G.-D., Kuntz, J. D., Duan, R.-G., & Mukherjee, A. K.** (2004). Spark-Plasma Sintering of Silicon Carbide Whiskers (SiC_w) Reinforced Nanocrystalline Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 87(12), 2297-2300. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2004.tb07510.x>
- Zhan, G.-D., Kuntz, J. D., Wan, J., & Mukherjee, A. K.** (2003). Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites. *Nature Materials*, 2(1), 38-42. <https://doi.org/10.1038/nmat793>
- Zhan, G.-D., Kuntz, J., Wan, J., Garay, J., & Mukherjee, A. K.** (2003). A Novel Processing Route to Develop a Dense Nanocrystalline Alumina Matrix (<100 nm) Nanocomposite Material. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(1), 200-2002. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03306.x>
- Zhang, S. D., Wu, J., Qi, W. B., & Wang, J. Q.** (2016). Effect of porosity defects on the long-term corrosion behaviour of Fe-based amorphous alloy coated mild steel. *Corrosion Science*, 110, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.021>
- Zhang, X. Y., Zhang, L. D., Zheng, M. J., Li, G. H., & Zhao, L. X.** (2001). *Template synthesis of high-density carbon nanotube arrays*. 223(November 2000), 306-310.
- Zhao, X., Duan, L., & Wang, Y.** (2019). Fast interdiffusion and Kirkendall effects of SiC-coated C/SiC composites joined by a Ti-Nb-Ti interlayer via spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(5), 1757-1765. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.020>

Zhou, Y., Fan, M., & Chen, L. (2016). Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, *101*, 31-45. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Materials*, *22*(35), 3906-3924. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>