

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİC ESASLI B₄C TAKVİYELİ SERAMİKLERİN MEKANİK,
FİZİKSEL VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Talha ÇAVDAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİC ESASLI B₄C TAKVİYELİ SERAMİKLERİN MEKANİK,
FİZİKSEL VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Talha ÇAVDAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şaduman ŞEN

EYLÜL 2024

Talha ÇAVDAR tarafından hazırlanan “SiC Esaslı B₄C Takviyeli Seramiklerin Mekanik, Fiziksel ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi ” adlı tez çalışması 02.09.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SiC ESASLI B₄C TAKVİYELİ SERAMİKLERİN MEKANİK, FİZİKSEL VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(02/09/2024)

Talha ÇAVDAR





Eşime



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans süresi boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, her konuda aynı dikkat ve özenle beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Şaduman ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma ve laboratuvar olanakları konusunda her türlü imkânı sunan şirketim NUROL TEKNOLOJİ SANAYİ VE MADENCİLİK A.Ş.'ne ve deneysel çalışmalarında yardımlarıyla destek olan sevgili çalışma arkadaşlarım Yarengül ÇİÇEK, Gamze YILMAZ, Sena YAŞAR ve Okan EBETÜRK'e teşekkür ederim.

Hem bu çalışma süresince hem de hayatım boyunca desteğini esirgemeyen sevgili eşim Burcu BÜYÜKDOĞAN ÇAVDAR ve sevgili annem, babam ve kardeşlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Talha ÇAVDAR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. BALİSTİK UYGULAMALARDA İLERİ TEKNOLOJİK SERAMİKLER... 7	7
2.1. Zırh Malzemeleri	7
2.1.1. Metalik zırhlar	8
2.1.2. Alüminyum zırhlar	9
2.1.3. Titanyum zırhlar	9
2.1.4. Kompozit zırhlar	10
2.1.5. Saydam zırh malzemeler	11
2.1.6. Seramik zırhlar	12
2.2. İleri Teknolojik Seramik Zırh Malzemeleri	14
2.2.1. Silisyum karbür (SiC)	17
2.2.1.1. Silisyum karbürün kristal yapısı	17
2.2.1.2. Silisyum karbürün fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri	19
2.2.2. Bor karbür (B ₄ C)	19
2.2.2.1. Bor karbürün kristal kafes yapısı	20
2.2.2.2. Bor karbürün fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri	22
2.3. İleri Teknolojik Seramiklerin Üretimi	23
2.3.1. Toz metalürjisi ile üretim, avantajları ve dezavantajları	23
2.3.2. Toz Metalürjisi ile seramiklerin üretim aşamaları	25
2.3.2.1. Toz Üretimi	25
2.3.2.2. Presleme	27
2.3.2.3. Sinterleme	29
2.4. İleri Teknolojik Seramik Zırhların Balistik Uygulamaları	36
2.4.1. Mühimmatlar	38
2.4.2. Balistik test	38
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve sonuçların değerlendirilmesi	45
3.1. Kullanılan Hammaddeler	45
3.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması	50
3.3. Seramik Kompozit Malzemelerin Şekillendirilmesi ve Sinterlenmesi	57
3.4. Sinterleme Sonrası Karakterizasyon İşlemleri	59
3.4.1. Presleme sonrası yaş ürünlerde boyut ölçümü	59

3.4.2. Sinterleme sonrası boyut ölçümleri.....	60
3.4.3. Sinterleme sonrası yoğunluk ölçümleri.....	61
3.4.4. Optik ve SEM Mikroyapı incelemeleri	63
3.4.5. Faz analizleri	66
3.4.6. Sertlik incelemeleri	67
3.4.7. Üç nokta eğme ve kırılma tokluğu ölçümleri.....	69
3.4.8. Balistik testler.....	72
4. GENEL SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	85



KISALTMALAR

SiC	: Silisyum Karbür
B₄C	: Bor Karbür
Si₃N₄	: Silisyum Nitrür
Al₂O₃	: Alümina
BN	: Bor Nitrür
ZrO₂	: Zirkonya
TiC	: Titanyum Karbür
UO₂	: Uranyum Dioksit
AlN	: Alüminyum Nitrür
HF	: Hidroflorik Asit
HNO₃	: Nitrik Asit
H₂SO₄	: Sülfürik Asit
Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
Cu	: Bakır
Sn	: Kalay
Al-Cu	: Alüminyum-Bakır
Mg-Si	: Magnezyum-Silisyum
AlNiCo	: Alüminyum Nikel Kobalt
TiB₂	: Titanyumdiborür
ZrB₂-SiC	: Zirkonyadiborür- Silisyum karbür
BNNP	: Bor Nitrür Nanoplaka
BNNT	: Bor Nitrür Nanotüp
CNT	: Karbon Nanotüp
iGO	: İndirgenmiş Grafen Oksit
M.Ö	: Milattan Önce
M.S	: Milattan Sonra
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
PASGT	: Personnel Armor System for Ground Troops

TÜRKAK	: Türk Akreditasyon Kurumu
TS-EN	: Türk Standartı – European Norm
MKE	: Makine Kimya Endüstrisi
NIJ	: Ulusal Adalet Enstitüsü
GOST	: Avrupa-Asya Standardizasyon
VPAM	: Bıçak ve Darbe Dayanımı Test Standartı
NATO	: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
STANAG	: Standardizasyon Anlaşması
DOP	: Penetrasyon Derinliği
PBL	: Koruma Balistik Limiti
AP	: Zırh Delici
GAE	: Gallik asit eşdeğeri
LDL	: Düşük yoğunluklu lipoprotein
ROT	: Reaktif oksijen türleri
TBARS	: Tiyoobarbutirik asit reaktif maddeleri
TPTZ	: 2,4,6-Tripiridil-s-triazin
TSA	: Tyryptic Soy Agar
TSB	: Tyryptic Soy Broth
ÜÇE	: Üzüm çekirdeği ekstraktı
XRD	: X Işını Difraktometresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop

SİMGELER

g/mol	: Molekül Ağırlığı
g/cm³	: Yoğunluk
t	: Zaman [Birim]
Kg/mm²	: Sertlik (Knoop)
MPa.m^{-1/2}	: Kırılma Tokluğu
W/m°C	: Termal İletkenlik
10⁶Nm⁻²	: Bükme Direnci
kcal/mol	: Entalpi
m/s	: Hız
g/cc	: Gram/ santimetreküp
cm²	: Santimetrekare
°C	: Sıcaklık
α	: Alfa Form (Hegzagonal)
β	: Beta Form (Kübik)
D10	: Tozların %10'unun Dağılımı
D50	: Tozların %50'sinin Dağılımı
D90	: Tozların %90'nının Dağılımı
μm	: Mikron
%	: Yüzde
+	: Artı
-	: Eksi
x	: Çarpı
kN	: kilonewton
rpm	: Revolutions per Minute
Kg	: Kilogram
gr	: gram
dk	: dakika
m	: metre
mm	: milimetre

GPa : Giga Pascal
MPa : Mega Pascal
HV : Vickers Sertlik
HRC : Rockwell Sertlik



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Zırh seramiklerin özellikleri.	13
Tablo 2.2. Silisyum karbürün özellikleri	17
Tablo 2.3. Bazı aşındırıcıların sertlik değerleri	20
Tablo 2.4. Bor karbürün özellikleri	20
Tablo 2.5. Tozların önemli özellikleri ve etkilediği durumlar	28
Tablo 3.1. Silisyum karbür ve bor karbür tozuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler.	48
Tablo 3.2. Fenolik reçine'ye ait kimyasal ve fiziksel özellikler.	48
Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan toz karışımı bileşimleri.	50
Tablo 3.4. Presleme sonrası numunelerin boyutları.	59
Tablo 3.5. Sinterleme sonrası numunelerin boyutları	60
Tablo 3.6. Sinterleme sonrası seramiklere ait yoğunluk değerleri.	62
Tablo 3.7. Sinterleme sonrası sertlik değerleri.	68
Tablo 3.8. Eğme mukavemeti ve kırılma tokluğu değerleri.	70
Tablo 3.9. Balistik test sonuçları.	74



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması	8
Şekil 2.2. Metalik zırh malzemelerin karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.3. Balistik cam yapısı	11
Şekil 2.4. Seramik kompozit zırh koruma mekanizması.....	13
Şekil 2.5. Balistik amaçla kullanılan çeşitli zırh plakalar	14
Şekil 2.6. Silisyum karbürün tetrahedral yapısı	18
Şekil 2.7. β ve α yapıları.	18
Şekil 2.8. Bor karbürün kafes yapısı	21
Şekil 2.9. Bor-Karbon denge diyagramı	21
Şekil 2.10. Toz Metalurjisi ile üretilen bazı parçalar	23
Şekil 2.11. Parça karmaşıklığı ve üretim miktarlarının üretim metoduna göre karşılaştırılması.	25
Şekil 2.12. Parça karmaşıklığı ve maliyet karşılaştırması.....	25
Şekil 2.13. Toz metalurjisi prosesinin adımları	26
Şekil 2.14. (a) Spray dryer prosesi ve (b) Eirich marka toz karıştırıcı makine	27
Şekil 2.15. Toz preslemenin aşamaları	27
Şekil 2.16. Basınç ve diğer parametrelerin birbiriyle ilişkisi	29
Şekil 2.17. CNC eksenli tam otomatik pres	29
Şekil 2.18. Muhtemel sinterleme mekanizmaları 1-Yüzey difüzyonu, 2-Buharlaşma ve yoğunlaşma, 3-Kütle difüzyonu, 4-Tane sınırı difüzyonu	31
Şekil 2.19. a. Alümina yüzeyi (porozitesiz) b. SiO_2 'nin sinterlenmesi sonrası oluşan katı malzeme ve boşluklar	31
Şekil 2.20. Sinterleme sırasında, katı-hal malzeme taşınımı sonrası, boyun oluşumu ile tozların kenetlenmesi	33
Şekil 2.21. Sinterleme ile boyun oluşumuna ait bir SEM görüntüsü	33
Şekil 2.22. Toz partiküllerinin enerjilerini düşürürken izledikleri yollar a. Tane büyümesini takip eden yoğunlaşma: çekilme meydana gelir. b. Küçük tanelerin yerlerini büyük tanelere bırakması	34
Şekil 2.23. Sinterleme fırınına ait bir görsel.	34
Şekil 2.24. Klasik sıvı faz sinterlemesine ait diyagram.	36
Şekil 2.25. Mühimmatlar ve kullanıldıkları silahlar	39
Şekil 2.26. Mühimmat ateşleme mekanizması.....	40
Şekil 2.27. Balistik test paneli.....	40
Şekil 2.28. 7,62x51 AP a) Fişek b) Mermi c) Mermi kesit görüntüsü.....	40
Şekil 2.29. Merminin bölümleri	41
Şekil 2.30. Balistik test düzeneği.	41
Şekil 2.31. Atış sonrası hızlı kamera görüntüsü.....	42
Şekil 2.32. Göğüs plakası numunenin hedefe tutturulmuş görseli.....	43
Şekil 3.1. Çalışmaların akış şeması.....	45
Şekil 3.2. Mastersizer 3000 toz tane boyutu ölçüm cihazı.....	46
Şekil 3.3. SiC tozuna ait elek analizi değerleri	47

Şekil 3.4. B ₄ C tozuna ait elek analizi değerleri.....	47
Şekil 3.5. SiC tozuna ait faz analizi.	48
Şekil 3.6. B ₄ C tozuna ait faz analizi.....	49
Şekil 3.7. (a) SiC ve (b) B ₄ C tozuna ait görseller ve SEM görüntüleri.....	50
Şekil 3.8. Eirich toz karıştırıcı.....	51
Şekil 3.9. Hazırlanan toz karışımı.	51
Şekil 3.10. BA0 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.	52
Şekil 3.11. BA10 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.	52
Şekil 3.12. BA20 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.	53
Şekil 3.13. BA30 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.	53
Şekil 3.14. BA40 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.	54
Şekil 3.15. Hazırlanan numunelere ait faz analizleri.	54
Şekil 3.16. BA0 ve BA10 reçetelerine ait TG/DTA analizleri.....	55
Şekil 3.17. BA20 ve BA30 reçetelerine ait TG/DTA analizlerine ait sonuçlar.	56
Şekil 3.18. BA40 reçetesine ait TG/DTA analizleri.....	56
Şekil 3.19. Farklı bileşimlerle hazırlanan toz numuneleri	57
Şekil 3.20. Otomatik pres.	57
Şekil 3.21. Sinterleme fırını.	58
Şekil 3.22. Sinterleme sonrası üretilen numunelerin görüntüsü.....	58
Şekil 3.23. Sinterleme fırını çevrim grafiği.....	59
Şekil 3.24. Sanayi tipi dijital mikrometre	59
Şekil 3.25. Yüzdesel olarak en (mm) değişimi.	60
Şekil 3.26. Yüzdesel olarak boy (mm) değişimi.	61
Şekil 3.27. Yüzdesel olarak kalınlık (mm) değişimi.	61
Şekil 3.28. Hassas terazi ve Arşimet yoğunluk ölçüm düzeneği	62
Şekil 3.29. Farklı bileşimdeki numunelerin yoğunluk değerleri.....	63
Şekil 3.30. Kesme cihazı.....	64
Şekil 3.31. Bakalitleme cihazı ve kalıplanmış numune.	64
Şekil 3.32. Otomatik zımparalama-parlatma cihazı ve Optik Mikroskop.....	64
Şekil 3.33. (a) BA0, (b) BA10, (c) BA20, (d) BA30 ve (e) BA40 numunelerinin mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 3.34. (a) BA0, (b) BA10, (c) BA20, (d) BA30 ve (e) BA40 numunelerinin SEM mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 3.35. Rigaku marka XRD cihazı.	67
Şekil 3.36. Sinterlenmiş numunelere ait XRD analizi.	67
Şekil 3.37. Emco test durascan sertlik ölçüm cihazı.	68
Şekil 3.38. Sertlik değerlerindeki değişim.	69
Şekil 3.39. Sertlik değerlerindeki % değişim.....	69
Şekil 3.40. Zwick basma ve çekme cihazı.	70
Şekil 3.41. Reçete tipine göre eğme mukaveti değerleri.....	71
Şekil 3.42. Reçete tipine göre eğme mukaveti yüzde değişimi.....	71
Şekil 3.43. Reçete tipine göre kırılma tokluğu değerleri.....	72
Şekil 3.44. Kırılma tokluğu yüzde değişimi.....	72
Şekil 3.45. Balistik test düzeneği.	73
Şekil 3.46. Balistik test Laboratuvarı.	73
Şekil 3.47. Atış temas öncesi kamera görüntüsü.....	74
Şekil 3.48. BA40 numunesi hızlı kamera görüntüsü.....	74
Şekil 3.49. BA0 numunesi hızlı kamera görüntüsü.....	75

SiC ESASLI B₄C TAKVİYELİ SERAMİKLERİN FİZİKSEL, MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, silisyum karbür (SiC) esaslı bor karbür (B₄C) katkılı kompozit seramiklerin üretimi ve kimyasal kompozisyon etkisinin seramiklerde meydana getirdiği fiziksel, mekanik ve balistik özellikleri incelenmiştir.

SiC, yüksek sertlik, aşınma direnci ve termal stabilite gibi özelliklere sahip bir malzemedir. B₄C ise sahip olduğu mükemmel sertlik ve düşük yoğunluk özelliğiyle bilinmektedir. Bu iki malzemeden elde edilen bileşim ile üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip kompozit seramiklerin eldesi mümkün olmaktadır.

Çalışma kapsamında kütlece %0-40 oranlarında B₄C katkısı ile hazırlanacak olan SiC-B₄C kompozit tozu farklı bağlayıcılar kullanılarak sulu yöntem ile hazırlanmıştır. Uygun nem ve tane boyut aralığına getirilen olan toz, 110 MPa/cm² teorik basınç kullanılarak soğuk pres yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirme işlemi yapılan malzemeler, bünyesindeki bağlayıcıların uçurulmasını ve sinterlenmesini içeren ısıtıl proseslere tabii tutulmuşlardır.

Üretilen seramikler numuneler üzerinde, su emme, pişme küçülmesi, bulk yoğunluk, relatif yoğunluk, sertlik, üç nokta eğme mukavemeti, kırılma tokluğu gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelemeleri yapılarak bu incelemelere ait değerler tespit edilmiştir. Mikro yapı analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) ile yapılmış ve ayrıca sinterleme sonrası oluşan fazların karakterizasyonu X- Işınları Difraksiyonu (XRD) ile gerçekleştirilmiştir.

Yapılan mekanik ve kimyasal testlerin yanı sıra üretilen seramiklerin balistik uygulamadaki performansları da değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen balistik testler, yüksek hızda çarpan mühimmatlara karşı malzemenin dayanımını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda, B₄C takviyesi ile SiC esaslı seramiklerin balistik dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir.

Sonuçlar, B₄C ilavesi ile SiC esaslı seramiklerin, sertlik, kırılma tokluğu ve balistik dayanım gibi özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Bu tip kompozit seramik malzemeler, özellikle zırh uygulamaları gibi yüksek performans gerektiren alanlarda büyük bir potansiyel barındırmaktadır.

Bu çalışma yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve balistik karakteristiklere sahip zırh seramiklerinin üretimini, mekanik, fiziksel ve balistik testlerinin gerçekleştirilmesini ve sonuçların tartışılmasını kapsar. Çalışma sonucunda SiC ve B₄C kompozit malzemelerinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için veriler sunulmakta ve endüstriyel uygulamalarda geliştirme amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Seramik zırh kompozitler, silisyum karbür, bor karbür, toz metalurjisi, kompozit, zırh, balistik uygulama



INVESTIGATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND BALLISTIC PROPERTIES OF SiC BASED B₄C REINFORCED CERAMICS

SUMMARY

This study investigates the production and the effects of chemical composition on the physical, mechanical, and ballistic properties of silicon carbide (SiC) based composite ceramics reinforced with boron carbide (B₄C). SiC is known for its high hardness, wear resistance, and thermal stability, making it a valuable material in various industrial applications. B₄C, on the other hand, is renowned for its exceptional hardness and low density. Combining these two materials can yield composite ceramics with superior mechanical and physical properties, which are highly desirable in applications requiring robust performance and durability.

The primary objective of this study is to develop SiC-based composite ceramics with varying proportions of B₄C and to examine the influence of these compositions on the resulting material properties. Specifically, the research focuses on understanding how B₄C addition affects the physical, mechanical, and ballistic characteristics of the SiC matrix. The goal is to determine the optimal B₄C content that maximizes the desired properties while maintaining the structural integrity of the composite.

In this study, composite powders were prepared with B₄C additions of 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by weight. Different binders were used to prepare these powders via an aqueous method. The powders were then conditioned to achieve appropriate moisture and particle size ranges. The conditioned powders were shaped using a cold press method at a theoretical pressure of 110 MPa/cm². These shaped materials underwent thermal processes that included binder removal and sintering to achieve the final ceramic structure.

The preparation of the SiC-B₄C composite powders involved meticulous processes to ensure homogeneity and uniform particle distribution. The powders were mixed with binders in an aqueous solution to form a slurry, which was then dried to obtain granules with the desired particle size. These granules were sieved to ensure uniformity before being subjected to the cold press method.

The shaping process involved compressing the granules into green bodies using a cold press under high pressure. The green bodies were then subjected to thermal treatments to remove the binders and to sintering the composite materials. The sintering process was carefully controlled to avoid excessive grain growth and to ensure the formation of a dense and uniform microstructure.

The produced ceramic samples were subjected to various tests to determine their physical and mechanical properties. The evaluations included water absorption, firing shrinkage, bulk density, relative density, hardness, three-point bending strength, and

fracture toughness. Microstructural analyses were conducted using scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM), and the phases formed after sintering were characterized using X-ray diffraction (XRD).

The physical properties of the composites, such as water absorption and bulk density, were measured to evaluate the effectiveness of the sintering process and the integrity of the composite structure. Low water absorption and high bulk density are indicative of a well-sintered, dense material with minimal porosity.

The mechanical properties, including hardness, three-point bending strength, and fracture toughness, were assessed to determine the load-bearing capacity and the resistance to crack propagation of the composites. These properties are critical for applications where mechanical durability and resistance to mechanical stresses are required.

In addition to mechanical and chemical testing, the ballistic performance of the produced ceramics was evaluated. Ballistic tests were performed to assess the material's resistance to high-velocity impacts. These tests involved subjecting the ceramics to impacts from projectiles at various speeds and angles to simulate real-world ballistic threats. The performance was measured in terms of the material's ability to absorb and dissipate the energy of the impacts without catastrophic failure.

The results demonstrated that the addition of B_4C significantly enhances the properties of SiC-based ceramics. The findings indicated improvements in hardness, fracture toughness, and ballistic resistance. The microstructural analyses showed a uniform distribution of B_4C within the SiC matrix, contributing to the observed property enhancements.

The SEM and OM analyses revealed that the addition of B_4C to the SiC matrix led to the formation of a well-distributed secondary phase within the composite. This distribution was crucial in improving the mechanical properties, as the B_4C particles acted as reinforcement agents that impeded crack propagation and enhanced the overall toughness of the material.

The XRD analysis confirmed the presence of distinct phases in the sintered composites. The formation of these phases was consistent with the expected chemical reactions during sintering and indicated successful incorporation of B_4C into the SiC matrix. The phase composition was correlated with the observed improvements in mechanical and ballistic properties.

The increase in B_4C content led to a noticeable improvement in the mechanical properties. Specifically, the hardness and fracture toughness of the composites increased with higher B_4C additions. The enhanced hardness was attributed to the intrinsic hardness of B_4C , while the improved fracture toughness was due to the effective load transfer between the SiC matrix and the B_4C reinforcements.

The ballistic tests further confirmed that the B_4C -reinforced SiC ceramics exhibited superior performance against high-velocity impacts, making them suitable for armor applications. The ceramics demonstrated the ability to absorb and dissipate the energy from the impacts, thereby preventing penetration and minimizing damage. The

performance was evaluated based on the residual strength of the materials and their ability to maintain structural integrity after impact.

This study concludes that the addition of B₄C to SiC-based ceramics significantly improves their mechanical and ballistic properties. These composite ceramics exhibit high hardness, enhanced fracture toughness, and excellent ballistic resistance, making them ideal candidates for high-performance applications, particularly in armor systems. The data obtained from this research provide valuable insights for the development and optimization of SiC-B₄C composite materials for industrial applications.

Future research could focus on further optimizing the production processes and exploring additional applications for these advanced composite materials. Potential areas of investigation include the use of alternative sintering techniques, the incorporation of additional reinforcement phases, and the development of new composite formulations with tailored properties for specific applications. The insights gained from this study lay the groundwork for continued advancements in the field of composite ceramics and their industrial applications.

Keywords: Silicon carbide, boron carbide, composite ceramics, mechanical properties, ballistic properties, microstructure, high-velocity impacts, armor applications.



1. GİRİŞ

Tarihin tüm devirlerinde malzemelerin ve malzeme biliminin gelişmesi, toplumların kalkınmasında ve gelişmesinde kilit rol oynamıştır. Taş devri, maden devri, sanayi devri, nükleer çağ, elektronik devrim, uzay çağı ve yapay zekâ çağında meydana gelen devrim malzeme teknolojisinde meydana gelen değişimlerden ve sonuçlarından etkilenmiştir.

Bugün ileri teknoloji ürünü kompozit malzemeler farklı özellikteki bileşenlerin bir araya gelerek, tek olarak kullanılan elementlerin sunmuş olduğu teknik özelliklerden üstün özellikleri sağlamalarıyla endüstride köklü bir değişim sağlamışlardır. İhtiva ettikleri üstün mekanik özellikler sayesinde vazgeçilmez malzemeler haline gelmişlerdir. Üstün özellikleri sayesinde kullanım alanlarında performansın yanı sıra ekonomik olarakta büyük katkı sunmaktadırlar. Tarihin ilk dönemlerinden itibaren kullanılmakta olan seramik malzemeler ilk olarak ateşinde yardımıyla yapılan çanak, çömlek ve çeşitli mutfak aletlerinin yapımında kullanıldı. Sanayi devrimine kadar daha çok basit kullanım alanlarında kendine yer bulan seramik malzemeler özellikle 19.yy ikinci yarısından itibaren büyük oranda gelişen demir-çelik sanayisinin de etkisiyle yüksek sıcaklıklar altında refrakter ürün olarakta kendine kullanım alanı edinmiştir[1].

İkinci dünya savaşı bitiminden sonra gelişim gösteren teknolojiler, düşük yoğunlukta, kimyasal ve fiziksel koşullara karşı dayanım gösteren ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalındığında da kullanım sağlanabilecek malzeme gruplarına bir ihtiyaç olduğunu ortaya çıkarmıştır. Oluşan bu ihtiyaç sonucunda, geleneksel metal malzemelerden daha yüksek sıcaklık altında kullanılan ayrıca aşınma direnci ve sertlik avantajı sağlayan seramik malzemeler ön plana çıkmıştır [2]. İleri teknolojik seramikler, özellikle 20. yüzyılın sonlarında geliştirilerek kullanıma alınabilmiştir. Geleneksel seramiklerle kıyaslandığında hammadde, üretim yöntemi ve mikro yapı olarak farklılığa sahiptirler. Çok ince tane boyutlu tozlarla imal edilen ileri teknolojik seramikler yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler [3].

Bu seramik malzemeler, karbürlü, nitrürlü veya oksî-karbür/nitrürlü gibi farklı katkı maddeleri ile üretilen SiC, B₄C, Si₃N₄ vb. Kovalent bağ yapısı içeren ileri teknoloji ürünü seramiklerdir.

Silisyum karbür, sahip olduğu mekanik özellikleri ile ileri teknoloji seramik malzemelerin en önemlilerinden bir tanesi olarak yerini almış durumdadır. SiC, düşük termal iletkenlik, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal şok dayanımına sahip olduğu gibi, sert, yarı iletken ve en sert malzeme olan elmastan daha yüksek refraktif indeks değeriinde bir malzemedir. Barındırdığı sertlik (31 GPa) ile aşındırıcı takım malzemeleri imalatında ve parlatma işlemlerinde kullanım görmektedir. Silisyum karbür sertlik karşılaştırmasında bor karbür ve elmasa kıyasla düşük seviyede bir sertliğe sahip olması nedeniyle metal dışı malzemelerin öğütülmesi işleminde, sert malzemelerin son işleme adımında ve seramik parçalarda üretim maliyetinin ön plana çıktığı durumlarda dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca, seramik kaplama işlemlerinde, aşınma parçalarında; seramik pompalarda, seramik ve metal matrisli kompozit malzemelerde; seramik conta ve halkalarda ve harici hafıza disklerinde kullanılmaktadır [4]. Ek olarak savunma sanayinde personel ve araç zırhlamalarında kullanılan SiC, sahip olduğu kovalent yapı nedeniyle tek basına sinterlenmesi zor bir teknolojik seramiktir. Bu nedenle sinterleme sonrasında istenilen yoğunlukta bir yapı eldesi için, prosese sıvı ya da katı faz sinterleme mekanizmasını hızlandırabilecek katkı maddeleri ilave edilir. Bunlar; örnek verecek olursak Silisyum Karbür'ün sinterlenebilme kabiliyetini katı difüzyon prosesi sayesinde hızlandırabilen karbon ve bordur [5].

Bor karbür, malzeme grupları içerisinde elmas ile kübik bor nitrüre nazaran daha düşük seviyedeki sertliğiyle bu malzemelerden sonra gelen en sert malzemedir ve sertliğini 1800°C'ye kadar korur [6]. Sertlik, malzemelerin elastik ve plastik deformasyonu, çatlak başlangıcı ve yeni yüzeylerin gelişimi gibi karmaşık mekanik özelliklerini etkileyen bir özelliktir. Bu, bağ enerjisi, kovalent bağ düzeyi, atom aralığı ve çatlak oluşumu ile deformasyon özelliklerinin parametreleri bakımından tanımlanabilir. Sertlik, üretim sürecine, bileşime ve safsızlıkların varlığına bağlıdır [7]. İçeriğinde takriben %80 bor ihtiva etmesi, bileşimin yüksek ergime sıcaklığı ve kimyasal ve fiziksel kararlılığının iyi olması nedeniyle nötronların absorbesinde B₄C daha etkili ve ekonomik bir malzemedir [8]. Bor karbürün olağanüstü sertliği, olağanüstü elastik özellikleri ve düşük teorik yoğunluğu sayesinde hafif zırh

uygulaması olarak kullanılmasına büyük ilgi vardır. Balistik bakış açısından, bor karbürün şok yüklemeye verdiği tepki özellikle ilgi çekicidir [9]. Askeri ve sivil balistik koruma, esnek hafif koruma ve masif, sert zırh olarak ikiye ayrılır. Personel korumasının yanı sıra uçak ve araçların korunması için sadece hafif ve esnek malzemeler kullanılabilir [10]. İleri teknolojik ürün geliştirmede hafif mühendislik malzemeleri esas olarak kompozit teknolojilerine dayanmaktadır [11]. Yüksek sertlik, bir malzemenin balistik potansiyeli için çok önemli gerekli göstergelerden biri olsada, malzemenin sahip olduğu tokluk değeride önemli bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır. Yalnızca hem yüksek sertliğe hem de yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemelerin istenen yüksek balistik performansı vermesi beklenir. Malzeme bilimcilerin çoğu, 10-15 yıl içinde hafif ve orta araç zırhlarının neredeyse tamamının seramik olacağı ve sonunda ağır araçlardaki metal zırhların yerini alabileceği konusunda aynı görüştedir [12]. Bunların ışığında, bor karbür matrisli kompozitler balistik koruma için çok iyi adaylardır ve bir zırh malzemesi olarak bor karbür için yeni geliştirme ve araştırmalar şarttır. Literatür taraması yapıldığı zaman zırh ekipmanlarının kullanılmaya başlandığı ilk zamanlardan itibaren zırh malzemeleri sürekli araştırma ve geliştirmeye açık malzemeler olmuştur. Ağırlıklı olarak kullanılan zırh çeliklerinden sonra yapılan çalışmalarda çelik ve türevlerine eklenen ilave malzemeler ve seramiklerin kullanıma alınmasıyla kompozit zırh yapıları meydana getirilmiştir [13].

Büyükuncu'nun 2000'de gerçekleştirdiği çalışmasında farklı yüzdesel oranlarda B₄C ve SiC ihtiva eden seramik kompozit malzemelerin sıcaklıkla sertleşen fenolik reçine ilavesiyle preslenerek şekillendirilmesi akabinde gerçekleşen düşük sıcaklık sinterlemesi ile imal edilen numunelerin mekanik özellikleri irdelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ince taneli toz kullanımının yüksek oranlı silisyum karbür bulunduran numunelerde daha yüksek yoğunluk ve sertlik değeri gösterdiği gözlenmiştir [14].

Afşar'ın 2022'de gerçekleştirdiği çalışmada yüksek sertlikteki B₄C ve yüksek kırılma tokluğundaki TiB₂ ilave edilen SiC, zırh uygulaması olarak kullanılmak için üretilmiştir. Çalışmada farklı sinterleme parametrelerinde üretilen SiC, B₄C ve TiB₂ kompozit malzemesinin mekanik özellikleri ve başlangıç malzemesinin TiC ya da TiB₂ farkı olması durumunda ne derece etkilendiği araştırılmıştır [15].

Akgünlü' nün 2021'de gerçekleştirdiği araştırmada, Silisyum Karbür seramiklerin granülizasyon prosesini etkileyen parametreler incelenmiştir. Bu çalışma amacının gözetilmesinin nedeni ise SiC seramiklerin düşük sıcaklık ve yüksek yoğunlukta sinterlenememesi olarak ifade edilmiştir. Çalışmada bağlayıcı tipi, bağlayıcı oranı ve tozların karıştırma parametrelerinde oluşturulan farklılıkların SiC seramiklerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerindeki artış bildirilmiştir [16].

Evc'i'nin 2009'da gerçekleştirdiği araştırmada, kompozit seramik zırh malzemelerinin balistik ve darbe özellikleri üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada, seramik kompozit zırhın darbeye bağlı hasar şekilleri ve darbe karakteristiği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmada, seramik kompozitlerin düşük enerjili darbe testi, ağırlık düşme testi ile yüksek enerjili darbe davranışları olmak üzere çeşitli testler gerçekleştirilmiştir [17].

Yue ve arkadaşları çalışmasında incelenen, bor nitrür nanoplaka (BNNP) ve bor nitrür nanotüp (BNNT) ilavesinin ZrB_2 -SiC kompozitlerinin kırılma tokluğu ve toklaştırma mekanizmaları üzerindeki etkileri üzerine odaklanmıştır. ZrB_2 -SiC tozu, hacimce %20 SiC içeren bir karışım oluşturmak üzere, Si_3N_4 bilyelerle etanol ortamında 300 rpm hızında 12 saat boyunca öğütülmüştür. Ardından, ağırlıkça %0,5 ve %1,0 oranında BNNT-BNNP toz karışımı solüsyona eklenerek öğütme işlemi sürdürülmüştür. Sağlanan toz karışımları, grafit kalıp içine yerleştirilerek, 1550°C sıcaklıkta, 40 MPa basınç uygulanarak 8 dakika sürede SPS yöntemi kullanılarak sinterlenmiştir. Sinterleme sürecinde ısıtma hızı optimize edilmiş olup, XRD ve Raman spektroskopisi ile Bor Nitrür Nano Tüp ve Bor Nitrür Nanoplaka spektrumları karakterize edilmiştir. Elde edilen numunelerin relatif yoğunluğu Archimedes methodu ile ölçülmüş, kırık yüzey iç yapı karakterizasyonları, sertlik ve kırılma tokluğu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Faz analizi sonuçlarına göre, BNNP ve BNNT ilaveleri ZrB_2 ve SiC piklerini göstermeyen ZrB_2 -SiC-(BNNT-BNNP) kompozitlerini oluşturmuştur. Sinterlenmiş numunelerin Raman spektroskopisi, BNNP ve BNNT'nin varlığını doğrulamıştır. Yoğunlaşma davranışı açısından, BN ilaveleri ZrB_2 -SiC kompozitinin yoğunlaşma davranışında gözle görülür şekilde artışa neden olmamıştır ve tüm numuneler için relatif yoğunluk değeri yaklaşık %98 olarak ölçülmüştür. Vickers sertlik değerlerinde, kütlece %0,5 BNNP ve BNNT eklenmesiyle yaklaşık %5'lik bir azalma gözlenmiştir, ancak artan ilave miktarı sertlikte bir iyileşme sağlamıştır. Ağırlıkça %1,0 BNNP-BNNT ilavesi, kırılma tokluğunu ~%24,4 oranında artırmıştır.

Artan kırılma tokluğu, mikroyapıda gözlenen BNNP ve BNNT'nin çıkma (pull-out), BNNP'nin çatlaklardaki köprüleme, dallanma, sapma ve BNNP bükülmesi gibi toklaştırma mekanizmalarından meydana geldiği bildirilmiştir [18].

Yılmaz 2020 yılında yaptığı çalışmasında, basınçsız sinterlediği silisyum karbür seramiklerde kırılma tokluğunu artırmaya yönelik indirgenmiş grafen oksiti katkı malzemesi olarak kullanarak eklenen malzeme oranının sertlik, mukavemet, kırılma tokluğu ile mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri inceleyerek silisyum karbür seramiklerde indirgenmiş grafen oksit katkısının yapı ve balistik özelliklerdeki etkisini incelemiştir [19].

Apak Gülsever 2018 yılında yapmış olduğu çalışmasında, balistik kullanıma uygun boyutlarda, hegzagonal geometride B₄C zırh plakaları üretmiştir. Bu geometrideki zırh malzemelerin mozaik gibi çoklu atışlarda daha iyi dayanım gösterdiğini inceleyen Gülsever ürünlerini üretirken spark plazma sinterleme metodunu kullanmıştır. Ayrıca B₄C ürününün kırılma tokluğunda iyileştirme sağlayabilmek adına reçetesine belirli miktarlarda CNT (karbon nano tüp), Al, Si, Ti ve TiO₂ ilavesi yapmıştır. Daha sonrasında ürün üzerinde çeşitli karakterizasyonlar uygulayan Gülsever çalışmasının balistik kullanıma uygunluğunu araştırmıştır [20].

Kim ve arkadaşları silisyum karbür seramiklerin özgül rijitliğini artırmak için yaptıkları çalışmada silisyum karbür'e bor karbür ilavesi ile termal iletkenlik, mukavemet, eğilme mukavemeti ve rijitlikteki değişimleri gözlemleyerek %0.7 bor karbür oranını %10 ve %25 olarak değiştirerek mekanik özelliklerdeki değişimi araştırmışlardır [21].

Balistik uygulamalar için zırh malzemesi elde edebilmek amacıyla yapılan bu çalışma, farklı yüzdesel miktarlarda B₄C ve SiC ihtiva eden kompozit malzemelerin soğuk pres ortamında şekillendirilmesi ve vakum ortamında sinterlenmesiyle imal edilen numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu saptanmaya çalışılmıştır. Üretilen kompozitlerin Arşimet yöntemiyle yoğunluk, Vickers metoduyla sertlik, SEM ve Optik mikroskop ile iç yapı, kırılma tokluğu ve XRD ile faz davranışları incelenmiş olup, balistik testlere tabi tutularak kullanılabilirliği araştırılmıştır.



2. BALİSTİK UYGULAMALARDA İLERİ TEKNOLOJİK SERAMİKLER

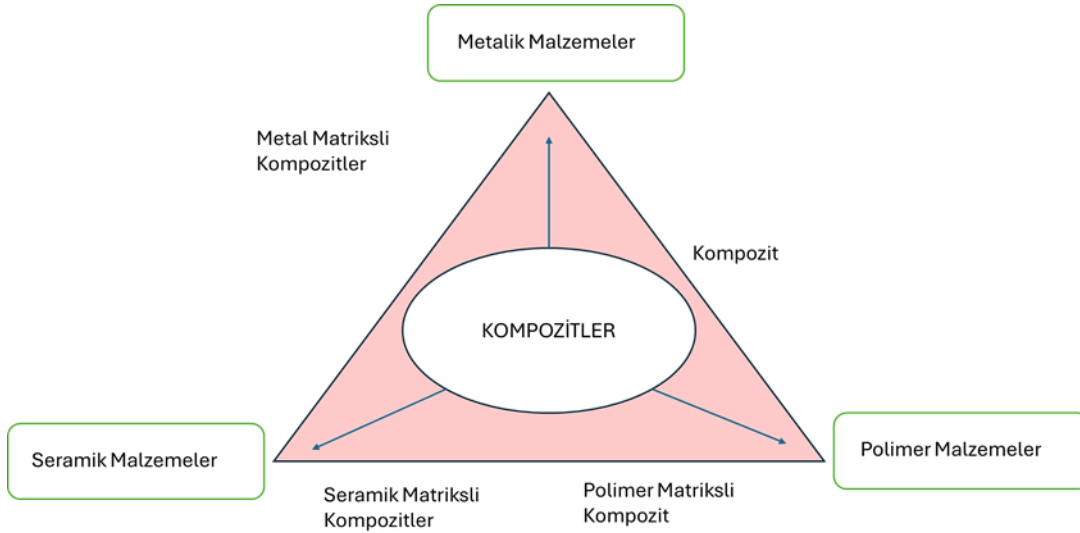
2.1. Zırh Malzemeleri

Zırh uygulamaları karşılaşılabilecek belirli tehdit ve risklere karşı koruma amacıyla, birden çok malzeme grubunun oluşturduğu kompleks uygulamalardır [22]. Zırh malzemelerinin temel amacı, verimli koruma sağlamak için karşılaşılabilecek her tip tehdide karşı üstün olmaktır [23]. Zırh uygulamaları karşılaşılabilecek tüm tehditlere karşı mühimmat tipi, tasarım şekli ve diğer konfigürasyonlarla birlikte kullanım kolaylığı sağlayıp amacına hizmet edebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu tasarlama süreci asla bitmez, çünkü etkili ve hafif bir zırh keşfedilse bile araştırmacılar bu zırhı etkisiz hale getirebilecek yeni silahlar araştırmaya devam edeceklerdir. Bu nedenle amaç bir sonraki nesil silah ve mühimmatlara bile dayanım gösterebilecek bir ürün ortaya koyabilmektir [24]. Genel olarak zırh uygulamalarının ana ilkesi, korunan obje ve/veya yapıyla ilgilidir. Zırh sistemlerinde korunması hedeflenen yapılar genel olarak şu şekilde sınıflanır;

- Kişisel vücut koruması
- Araç, platform koruması
- Mekan, kulübe ve tesis koruması

Bu koruma hedeflerinde tehdit ve riskler yapının tasarımını meydana getirir [25,26].

Günümüzde yaygın olarak halen “çelik yelek” olarak tanımlanan personel koruma yelekleri modern tabirle “Balistik Koruma Yelekleri” olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak mühimmat etkisinin yanı sıra aynı zamanda kesici, delici etkilere, yanmaya ve düşmeye karşı koruma görevi sağlar [27]. Zırh malzemesi olarak beklenen en iyi yapı, yüksek sertlik ve az kırılabilirliğe sahip bir yapıdır. Bu özelliklerin yanı sıra ağırlıkta önemli bir özelliktir. Zırh malzemesi olarak kullanılan malzeme grupları içinde metaller, polimer malzemeler, seramik malzemeler ve kompozit malzemeler Şekil 2.1’de gösterildiği şekilde gruplandırılmıştır.



Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması [28]

Günümüzde kullanılmakta olan zırh malzemeleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Metalik zırh malzemeleri
- Kompozit zırh malzemeleri
- Saydam zırh malzemeleri
- Seramik esaslı zırh malzemeleri

2.1.1. Metalik zırhlar

Metalik zırhlar, kolay bulunabilmeleri, kolay üretilebilirliği, ucuz olmaları ve uygun malzeme özellikleri nedeniyle yüzyıllardır zırh malzemesi olarak kullanılmaktadırlar.

Genel olarak kullanılan metalik zırhlar;

- Çelik alaşımları
- Alüminyum alaşımları
- Titanyum alaşımlarıdır

Yüksek sertlik ve iyi dayanım özelliklerine sahip malzemeler arasında en yüksek tercih oranı metal zırhlardadır. Süneklik özelliği sayesinde çarpışma enerjisini soğurma bakımından önemlidir. Kırılma dayanımları çatlak ilerlemesinde önemli rol oynar. Başka malzeme gruplarıyla birlikte kullanılabildikleri gibi monolitik (tek başına) olarakta kullanılırlar. Metalik zırh malzemeleri aynı zamanda yapısal yükleri de taşıyabildikleri için bu oldukça yaygın kullanılan bir tasarım şeklidir.

Metalik zırh malzemelerinin avantajları aşağıdaki gibidir;

- Düşük üretim maliyeti, düşük malzeme fiyatı
- Büyük miktarlarda üretim kapasitesi
- Ortam koşullarına dayanım
- Birçok tehdide karşı başarılı dayanım
- Çoklu darbe kapasitesi

Haddelenmiş çelik malzeme zırh gruplarında en yaygın olarak kullanılmakta olan türdür. Günümüzde en yaygın kullanılan çelik zırhlar haddelenmiş homojen zırhlardır (RHA) [29].

2.1.2. Alüminyum zırhlar

Alüminyum, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliği ile balistik sektöründe yaygın olarak kullanılan malzeme gruplarından bir tanesidir. Yüksek enerji emme kapasitesi sayesinde seramik plaka gruplarının arkasında destek plaka olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu nedeniyle çeliğe oranla tercih sebebidir. 7039, 5083, 2519 ve 5059 Alüminyum alaşımları zırh malzeme gruplarında yaygın olarak kullanılan alaşımlardır. Alaşım gruplarının gösterdiği farklı mekanik özellikler kullanılacağı araç tipinin seçiminde önemlidir [30].

2.1.3. Titanyum zırhlar

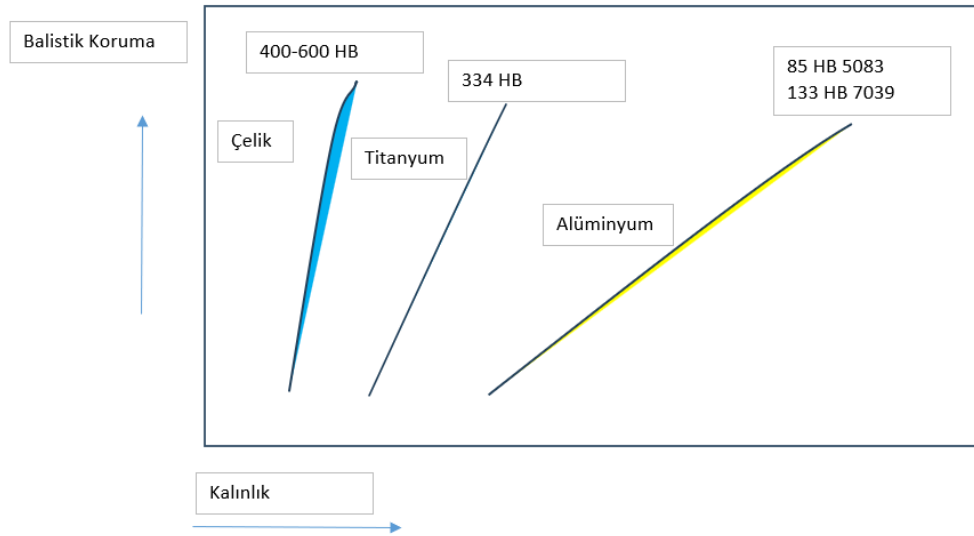
Yüksek imalat maliyetleri nedeniyle ağırlık- performans oranı yüksek olan titanyum genel olarak havacılık sanayinde kullanılmaktaydı. Fakat günümüzde imalat yöntemlerindeki ilerleme sayesinde düşen maliyetler nedeniyle hafif taktik araçlarda zırh olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımlı malzeme (MIL DTL 46077) ısıl işlem uygulanarak kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının başta gelen önemli özellikleri ise;

- Yüksek sıcaklık performansları,
- Düşük yoğunlukları,
- Çeliklere göre aynı balistik özelliği daha hafif olarak sağlamaları

Dezavantajları;

- Yüksek maliyet
- İşleme ve kaynak kabiliyetinin zorluğu

Metalik zırh malzemelerin karşılaştırılması Şekil 2.2’de verilmiştir [31].



Şekil 2.2. Metalik zırh malzemelerin karşılaştırılması.

2.1.4. Kompozit zırhlar

Kompozitler en az iki farklı malzemenin bir araya gelmesiyle oluşturulan malzeme gruplarıdır. Kompozit bileşimin iki ana yapısından bir tanesi takviye fazı olarak fiber, tabaka, parçacık formlarda uygulanmaktadır. Diğer ana unsur ise matriks fazdır. Takviye faz genellikle yüksek mukavemetli düşük yoğunluğa sahip malzemelerden meydana gelir. Matriks faz ise genellikle daha sünek ve tok malzeme gruplarından oluşur. Kompozit zırh malzemeler hafif olmaları, dayanım, darbe mukavemeti ve kırılma gibi durumlarda parçalanma davranışı göstermemektedir. Bu durum bu malzeme grubu özelinde büyük avantajdır. Matriks ve takviye faz olarak kullanılabilecek birçok malzeme olması nedeniyle farklı tipte ihtiyaca yönelik tasarım konusunda tasarımcıya büyük seçenekler sunan bir malzeme grubudur. Kompozit malzemeler özellikle son yıllarda uzay, havacılık, denizcilik, otomotiv, sağlık, inşaat ve savunma sanayisinde kullanılan ana malzeme gruplarından bir tanesidir.

Dört tip kompozit yapı vardır;

- Fiber kompozitler,
- Lamine kompozitler,
- Parçacıklı kompozitler,
- Yukarıdaki yapıların farklı kombinasyonlarıyla oluşturulan kompozitler,

Genel olarak kompozitler üç ana başlıkta tanımlanır;

- Metal matrikste kompozit malzemeler (MMK),
- Seramik matrikste kompozit malzemeler (SMK),
- Polimer matrikste kompozit malzemeler (PMK) [32]

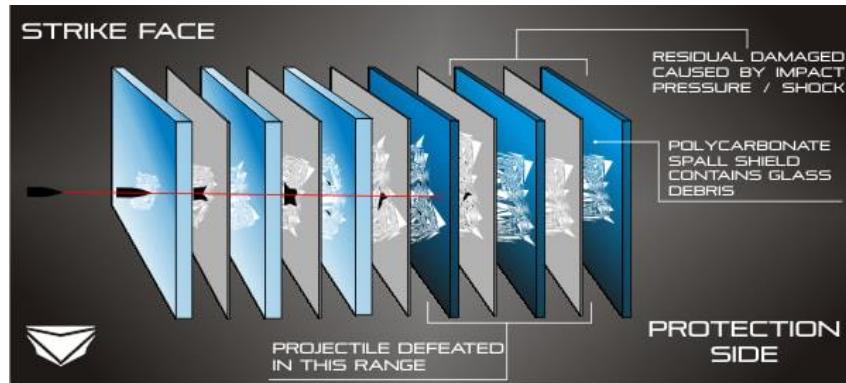
2.1.5. Saydam zırh malzemeler

Askeri araç camları, hava keşif araçlarının camları, binek araçlara ait camlar, koruma kabinleri, askeri personellerin kullandığı kalkanlara ait camlar optik olarak belirli bir dalga boyuna sahip ışığı geçirme zorunluluğu olduğu gibi balistik bir koruma özelliği de sağlamak zorundadır. Saydam zırhlar deyince akla gelen ilk malzeme cam'dır. Camlar katman katman bir yapıda ve katmanların arasında yapıştırıcı uygulamalarıyla birleştirilerek polikarbonat bir arka katmanla takviyelenir. Isıl ve kimyasal yöntemlerle yüzeylerde bir basma gerilimi oluşturularak mikroçatlaklar baskılanır ve kırılmazlık önlenmiş olur. Sağlanan yüksek darbe sönümleme yeteneği ve katman sayısının artırılması daha iyi bir balistik koruma özelliği gösterilmesinde önemli bir etkidir.

Saydam zırh malzemeleri grubunda en yaygın kullanılan malzemeler aşağıdaki gibidir;

- Cam/ Polikarbonat lamineleri
- Alüminyum oksinitrat
- Magnezyum alüminat

Katmanların birbirine bağlanmak için iyi mukavemet özellikleri gösteren poliüretan tercih edilir. Katmanları birbirine bağlamak için iyi mukavemet özellikleri gösteren poliüretan tercih edilir. Uygulamalara ve seçilen malzemelere göre bağlayıcı madde seçimi değişebilir [33]. Balistik camlara ait bir platform Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Balistik cam yapısı [34]

En sert saydam polimer malzemelerden bir tanesi olan polikarbonat, sahip olduğu esneklik ve ayrıca cam malzeme gruplarına nazaran darbeye 250 kat daha fazla dayanım göstermesi nedeniyle, kurşun geçirmeye karşı başarılı bir performans gösteren polikarbonlu camlar, merminin enerjisini emerek yapının arkasına geçmesini önler. Polikarbonlu kurşungeçirmez camlar, temas sonrasında cam kırıntılarının dağılmasını ve yapı dışına çıkmasına izin vermemekle birlikte, çizilmeye karşı sahip oldukları dayanıklı kaplamalarından dolayı yıllar süren net görüş özelliğini kullanıcısına sunar. Polikarbonlu camlar, farklı üretim teknolojileri ile üretilen diğer zırhlı cam gruplarıyla benzer balistik özellikler gösterirken, sahip olduğu özellik sayesinde büyük oranda ağırlık avantajı sağlamasının yanı sıra (yaklaşık %40) daha fazla ışık geçirgenliği ile kullanıcının görüş kalitesini artırır.

2.1.6. Seramik zırhlar

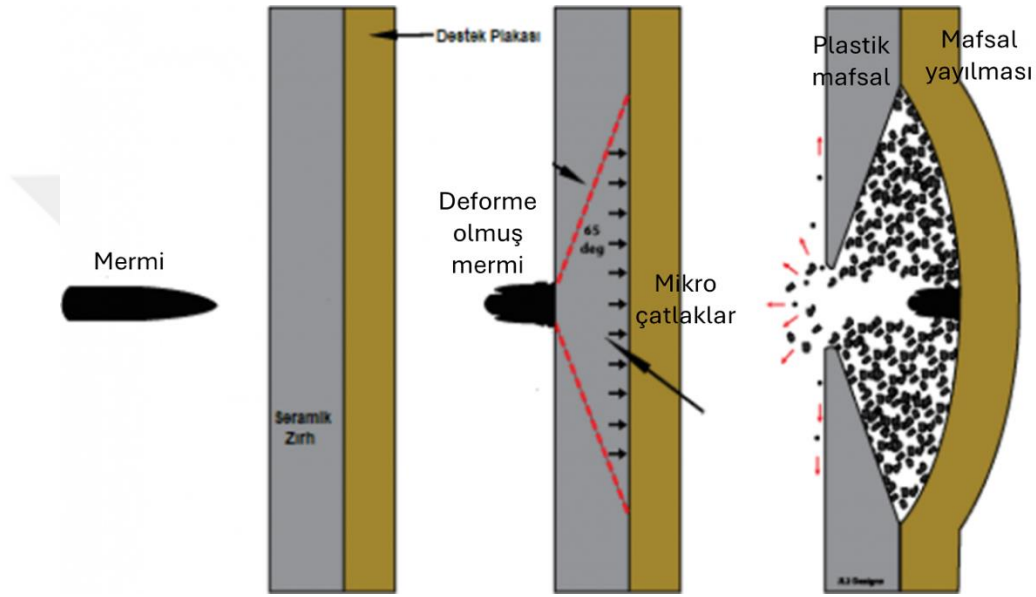
Çelik, zırh malzemeleri arasında ön plana çıksada seramikler zırh malzemesi olarak onlarca yıldır kullanılmaktadır [35]. Seramik malzemeler çelikler başta olmak üzere metalik malzeme gruplarına göre daha hafif olmaya birlikte üstün darbe emilimi ile ön plana çıkmaktadır. Genellikle balistik malzeme olarak kullanılan seramik gruplarında malzeme yoğunluğu 2,5- 4,0 gm/cm³ mertebesindeir. Bu tip seramikler, özellikle kinetik enerjili mermilere karşı metal zırh malzemelere nazaran daha farklı şekilde davranış sergilerler. Zırh çeliklerinde plastik deformasyona bağı olarak enerji soğuram ve nüfuz direnci ön plana çıkarken seramik zırhlarda ise merminin ihtiva ettiğı kinetik enerji mermi çekirdeğinin kırılması ile sönümlenir. Bu nedenle seramik zırhlar yüksek sertlik, basma dayanımı ve yüksek elastik modül özellikleri sayesinde nüfuziyet direnci sağlarlar. 1962 yılında yapılan denemelerde doron ile desteklenmiş bir Al₂O₃ plakanın 0.30 kalibre bir zırh delici mermiyi çeliğın yarı ağırlığı ile durdurabildiğı gözlenmiştir [36].

Seramik zırh malzemeleri yüksek sertlik ve diğ er mekanik özellikleri nedeniyle tek başına zırh malzemesi olarak kullanılamamakta olup bir back-up ile desteklenerek kullanılabilir. Seramik zırhların başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Mermi aşındırmada ve kırmada etkinlik,
- Metaller mermi kinetik enerjisini plastik deformasyonla soğururken, seramikler kırılma ile yapar,

- Kırılmandır fakat basma yükü uygulanan seramikler, kırılma davranışı sonrasında da yüksek dayanım gösterebilmektedirler,
- Yoğunlukları düşüktür,
- Monolitik metallere göre hafiftirler.

Bu özellikler sayesinde seramikler iyi zırh malzemeleri olup yaklaşık 40 yıldır yaygın bir zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.4'te seramik kompozit zırh malzemesine ait koruma mekanizması gösterilmiştir [37].



Şekil 2.4. Seramik kompozit zırh koruma mekanizması.

Balistik amaçlı olarak kullanılan seramik zırh malzemelerin davranış özellikleri Tablo 2.1'de görülmektedir [36].

Tablo 2.1. Zırh seramiklerin özellikleri.

Malzeme Adı	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastik Modül (Gpa)	Eğme dayanımı, (Mpa)	Kırılma Tokluğu (MPam ^{1/2})	Sertlik HK-Knoop	Alansal Yoğunluk
Al ₂ O ₃	3,90	370	379	4,5	1440	20,2
B ₄ C	2,52	450	415	3,0	2800	13,0
SiC	3,03-3,25	450	450	4,0	2800	16,7
Rb SiC	3,02-3,12	359-407	260	4,0	1757	15,7
SiC/B ₄ C	2,56	380	271	4,0	-	13,3
TiB ₂	4,5	390	265	5,5	-	23,4

Ayrıca balistik amaçla kullanılan zırh seramiklerinin yer aldığı bir görsel Şekil 2.5.'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Balistik amaçla kullanılan çeşitli zırh plakalar [38]

2.2. İleri Teknolojik Seramik Zırh Malzemeleri

Teknolojik seramikler bir diğer isimle ileri teknoloji seramikleri olarak da adlandırılabilir. Bu seramikler, üretim şekli, mikroyapı ve özellikler bakımından geleneksel seramiklere göre değişiklik göstermektedir. Doğal hammaddeler ile üretilirse geleneksel seramik, bu hammaddelere işlem gördürür veya yapay olanları kullanılır ise ileri teknoloji seramikleri oluşturulmaktadır. İleri teknoloji seramiklerinin en önemli özelliği toz boyutunun çok ince olarak üretilmesidir. 1 µm veya bu boyuttan da düşük tane boyutlarında tozlar kullanılırsa yoğunluğu ve mukavemeti daha yüksek malzeme üretebilmektedir. Daha ince tane boyutuna sahip hammaddeler kullanılarak son ürünün mekanik özellikleri daha da geliştirilebilmektedir.

İleri teknolojik seramikler birden fazla gruba ayrılmaktadır. Bunlardan başlıcaları; nitrürler, oksitler, karbürler, borürler, silisidler vb. İleri teknoloji seramiklerin kullanım alanları fazlaca geniştir. Üretim yöntemine göre üstün mekanik özellikler içeren seramikler üretilmektedir. Kullanım yerine göre mekanik, elektrik-elektronik ve biyolojik özelliklere sahip seramik yapmak mümkündür.

Bu tip seramikler yapısal kullanım alanına göre;

- Biyo seramikler,
- Aşınmaya maruz kalan malzemeler (Al_2O_3 , ZrO_2 , B_4C vb.),

- Kesici uçlar ve parçalar (Al_2O_3 , TiC vb.),
- Farklı makine parçaları,

Elektriksel kullanım alanına göre;

- İzolatörler,
- Kapasitörler,
- Entegre devre parçaları,
- Altlıklar,
- Piezoelektrik seramikler,
- Mıknatıs ve süper iletkenlerde,

Kaplama kullanımı amacıyla;

- Makine parçaları,
- Kesici alet edavatlar,
- Makinelerin aşınmaya maruz bırakılan yerlerinde,

Nükleer özellik göstermesi amacıyla;

- Nükleer yakıtlar (UO_2 vb.),
- Nötronlara karşı koruyucu kalkanlar (SiC , Al_2O_3 vb.),

Kimyasal kullanım alanı olarak;

- Filtreler,
- Katalizör ve katalizör yatakları vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [39].

İleri teknolojik veya bir diğer adıyla endüstriyel seramikler katma değeri fazla olan malzeme gruplarını oluşturmaktadır. Birden farklı yöntemler sınıflandırma yapmak mümkündür. Ama genellikle iki başlıkta incelenebilir. Bunlar oksit esaslı ve oksit esaslı olmayan seramik malzemelerdir. Oksit esaslı seramikler, bir adet metal oksitten oluşmuş tek fazlı veya karışım oksitlerden oluşmuş birden fazla fazlı seramik malzemelerdir. Oksitlerin üretimlerinde çoğunlukla yüksek saflıkta doğal olmayan hammaddeler kullanılmaktadır. Oksitler yüksek sıcaklıklarda sinterlenme becerisine sahip ve mikroyapıları homojendir. Bunlar çoğunlukla tıp ve diş hekimliği sektöründe kesici aletler yapımında, elektrotlarda, ve çelik endüstrisinde kullanılmaktadır. Aşınma dayanımları ve erime noktası yüksek olması ve nötronları hapsedme

kabiliyetinden dolayı nükleer sektöründe de reaktör tasarımlarında oldukça fazla tercih edilmektedirler.

Oksit esaslı olmayan seramikler ise genellikle karbürler ve nitrürler olarak bilinir. Yine doğal olmayan sentetik hammadde kullanılması oksit seramiklerle benzer tarafta olmasına yol açmaktadır. Bu iki türü ayıran kristal yapılarıdır. Karbür ve nitrürlerin kristal yapıları kovalent bağ iken; oksitlerin kristal yapısı ise iyonik bağdan oluşur. Bu sebeple oksit olmayan seramikler oldukça fazla özelliktedir. Hammaddelerinin tane boyutunun çok ince olması sinterleme atmosferinin inert gaz olması ve sinterleme sıcaklığının da yüksek derecelere çıkması oksitlere göre daha pahalıya mal olmaktadır. Oksit dışı seramikler içinde bulunan malzemelerin en önemli temsilcisi silisyum karbür (SiC)'dür. Silisyum karbürler sertlikleri yüksek, korozyon direnci fazla, aşınmaya karşı dirençli, oksidasyona dirençli, termal genleşmesi düşük ve termal iletkenliği yüksektir.

Karbürlerin bir diğer önemli bileşeni bor karbür seramiklerdir. Üretim yöntemi olarak silisyum karbür seramiklerle hemen hemen aynı aynı şekilde üretilmektedirler. Tane boyutu çok ince olan tozlar presleme yöntemiyle şekillendirildikten sonra inert ortamda yüksek sıcaklıkta (2000°C) sinterlenir. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert malzeme bor karbürdür. Silisyum karbürlere benzemekle birlikte aşınma dirençleri çok daha iyidir. Sertliğinin ve elastite modülünü yüksek olması zırh malzemesi olarak da kullanılmaktadır [14].

Oksit dışı seramik grubunda bulunan diğer malzemede nitrürlerdir. Burada başlıcaları bor nitrür, silisyum nitrür ve alüminyum nitrürdür. Silisyum nitrür (Si₃N₄) nitrürlerin arasında en önemlisidir. Diğerlerinden ayrı olan üstün özellikleri yüksek tokluk, termal şok direnci, yüksek mekanik dayanım, düşük termal genleşme, aşınmaya direnç, orta derecede termal iletim ve kimyasal malzemelere karşı iyi direnç gibi önemli özellikler ihtiva etmektedir. Bu seramikler, kırılma davranışının istenmediği ve tokluk özelliğinin önemli olduğu alanlarda özellikle tercih edilmektedirler. Bir diğer nitrür çeşidi ise bor nitrürdür. Bor nitrür kimyasal etkilere karşı direnci yüksek ve hacimsel direnci iyidir. Kimyasallara karşı inerttir. Isıl iletkenliği ve aşınma direnci çok yüksek olmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü, aşındırıcı ve kesici uç olarak, yüksek voltajla çalışan elektronik cihazlarda altlık olarak, kullanılmaktadırlar. Nitrür seramiklerden olan alüminyum nitrür de ısı iletimi yüksek olmakla birlikte çok iyi elektriksel

izolasyona sahiptir. Bu sebeple elektrik sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

2.2.1. Silisyum karbür (SiC)

Silisyum karbürün tarihi 1891 yılında Edward Acheson'un üretmesine dayanmaktadır. İleri teknolojik yapısal seramik olan silisyum karbür kullanım yeri ve özellikler açısından çok zengindir. 1970'li yıllardan bugüne dek çokça mühendislik alanlarından denenmiş, aşınmaya olan yüksek direnci karşısında oldukça fazla kullanım yeri bulmuştur. Üretim maliyetleri de görece daha düşük olduğundan rekabet özelliği oldukça fazladır [41].

Silisyum karbürün kristal yapısı izotropiktir. İzotropik malzemeler çoğu özellik bakımından aynı davranışı göstermektedir. Bu sebeple incelemek için oldukça kolay bir malzeme olarak bilinir. Silisyum karbürün mekanik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

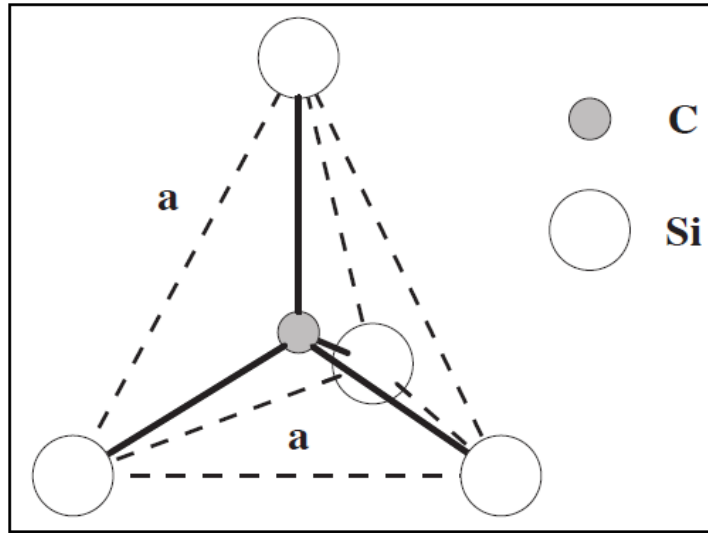
Tablo 2.2. Silisyum karbürün özellikleri [41]

Karakteristik	Birimi	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	3,1-3,3
Vickers Sertliği	MPa	2000-2600
Kırılma tokluğu	Mpa.m ^{-1/2}	2-5
Eğme mukavemeti (25°C)	MPa	345
Elastite Modülü	GPa	380-450
Molekül Ağırlığı	g/mol	40,097

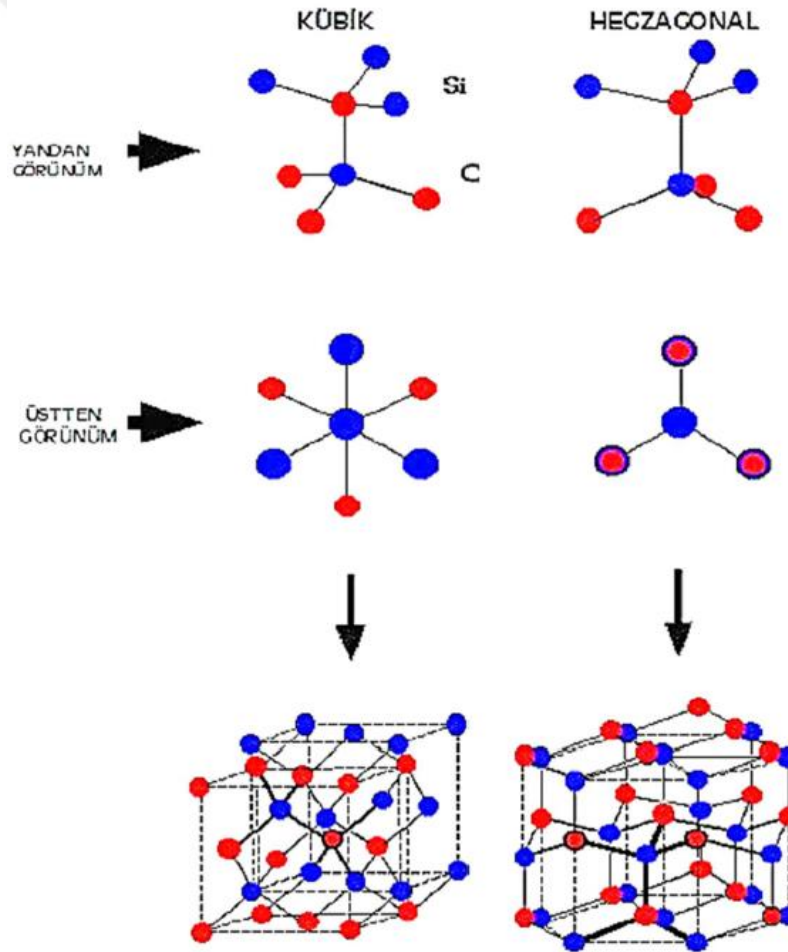
Silisyum karbür doğada bileşik halinde bulunmamaktadır. Aşınma değeri çok yüksek ve sürünme mukavemeti de oldukça fazladır. Erozyon ve kimyasal etkilere karşı koymada çok başarılıdır. Yüksek ısıl dayanım gösterip, kimyasallara karşı da tepkisizdir. Organik çözeltiler silisyum karbür için tehlike göstermemektedir [41].

2.2.1.1. Silisyum karbürün kristal yapısı

Silisyum ve karbon atomlarından meydana gelen Silisyum Karbür (SiC) ayrıca kovalent bağa sahip ve yarı iletkenidir. Kristal yapı bakımından izotropiktir. Ana birim hücresinde her bir atom, diğer elemente ait dört atom içeren bir tetrahedron tarafından çevrelenmiştir ve her bir element, diğer elementle elektron çifti paylaşmaktadır. Farklı sıcaklıklarda, 1400-1800°C aralığında “β” formundaki kübik yapıya sahipken, 2000°C’de oluşan “α” formunda hegzagonal kristal bir yapı sergiler. Silisyum karbürün tetrahedron yapısı ve β ve α yapıları Şekil 2.6 ve 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.6. Silisyum karbürün tetrahedral yapısı [5]



Şekil 2.7. β ve α yapıları. [5]

2.2.1.2. Silisyum karbürün fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri

Silisyum karbür yüksek aşınma ve sürünme mukavemetine sahiptir. Ayrıca indirgeyici atmosfer altında erozyon ve kimyasallara karşı oldukça iyi direnç gösterir. Bazik ve asidik ortamlardan etkilenmemektedir. Organik çözeltiler dahi herhangi bir etki gösterememektedir. Ayrıca yüksek ısı şok dayanımı vardır. Silisyum karbür eğer sinterlenmiş ise seramikler arasında en dayanıklısıdır. Mukavemeti yüksek, eğer ki Silisyum karbür yüksek aşınma ve sürünme mukavemetine sahip bir malzemedir. Ayrıca indirgeyici atmosfer altında erozyon ve kimyasal direnci oldukça iyidir. Bazik ve asidik ortamlardan etkilenmemektedir. Organik çözeltiler dahi herhangi bir etki gösterememektedir. Ayrıca yüksek ısı şok dayanımı vardır. Silisyum karbür eğer sinterlenmiş ise seramikler arasından en dayanıklısıdır. Mukavemeti yüksek, eğer ki mukavemette herhangi bir sıkıntı olur ise yapısında karşılaşılan hatalara bağlı olmaktadır.

Silisyum karbürün termal sok direnci oldukça yüksektir. Silisyum karbür gaz türbin motorlarında, yanma kovanları, stator kanatları, rotorlarda kullanılabilmektedir.

SiC'nin aşınma davranışının mükemmel oluşu ve korozyona direnci sebebiyle mekanik parçalar, pompa ve valfler gibi aşınma yerlerinde kullanılabilir.

Bu gibi özelliklerinden dolayı silisyum karbürler zırh yapımında savunma sanayii sektöründe de kullanılmaktadır. Özellikle destek olarak yapılan kompozitlerle birleştirildiğinde çok iyi basma dayanımı, sertliği ve elastik modülü ile tahribe karşı oldukça dayanıklıdır [42].

2.2.2. Bor karbür (B₄C)

İleri teknoloji seramiklerin en önemli üyesidir. Keşfedilmesi 1858 yılında olmuştur. Ama bor karbür üzerine en fazla çalışmalar, 1950 yılından sonra yapılmaya başlanmıştır [43].

Borun kristal yapısının değişmiş hali ile bor karbür kristal yapısı oluşmaktadır. Bu yapı B₁₂C₃ ya da B₄C ile ifade edilir.

Elmas ve kübik bor nitrürden sonra mohs sertlik skalasına göre dünyadaki en sert üçüncü malzemedir [44]. Aşağıdaki Tablo 2.3'te bazı aşındırıcılar için sertlik değerleri verilmektedir.

Tablo 2.3. Bazı aşındırıcıların sertlik değerleri [43].

Malzeme	Knoop sertliği (100 gr), kg/mm ²
Safir (Alümina)	2000-2050
Tungsten Karbür	2050-2150
Silisyum Karbür	2150-2950
Bor Karbür	2900-3100
Kübik Bor Nitrür	4500-4600
Elmas	8000-8500

Bor karbürün, yoğunluğu düşük, mekanik özellikleri yüksek, kimyasal dayanımı iyi ve güçlü nükleer özellikler gibi avantajları bulunmaktadır. Fakat bunun yanında kırılma tokluğu düşük ve sinterleme koşullarının zor olması gibi de dezavantajları vardır. Tablo 2.4'te bor karbüre ait genel özellikler belirtilmektedir.

Tablo 2.4. Bor karbürün özellikleri [43].

Karakteristik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	2,52
Ergime sıcaklığı	°C	2445
Kaynama sıcaklığı	°C	>3500
Molekül ağırlığı	Gr	54,17-58,50
Sertlik (Knoop)	Kg/mm ²	2900-3100
Kırılma tokluğu	Mpa.m ^{1/2}	2,9-3,2
Eğme mukavemeti (25°C)	MPa	345
Çekme mukavemeti	MPa	155
Termal iletkenlik	W/m°C	4,3
Bükme Direnci	10 ⁶ Nm ⁻²	323-346

Bor karbür fiziksel ve kimyasal olarak oldukça karardır. Bu sebeple nötronları absorbe etme de fazlaca etkili olmakla birlikte ayrıca ekonomik olmaktadır [4].

2.2.2.1. Bor karbürün kristal kafes yapısı

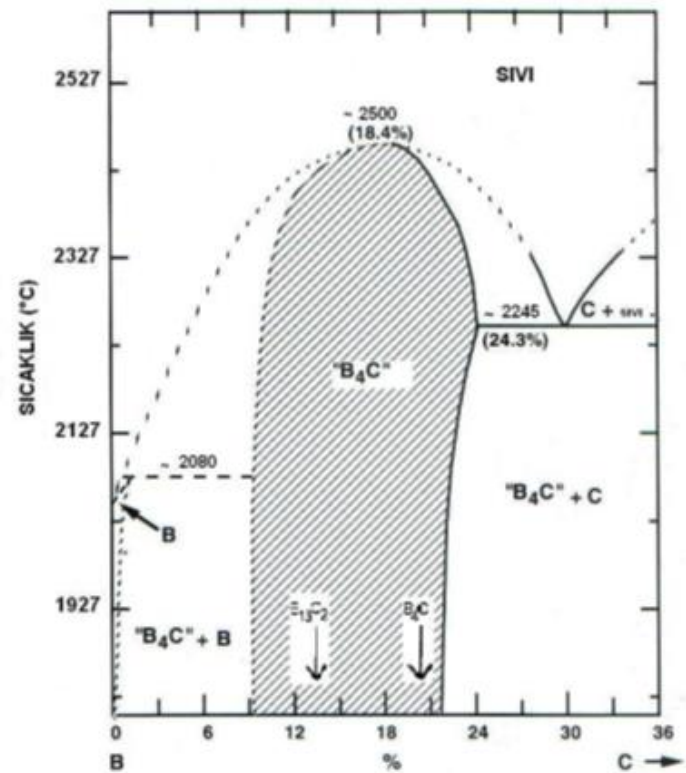
Bor karbürün kristal kafes yapısını rombohedral birim hücreler oluşturmaktadır. Köşelerinde 12 atom bulunan ikozahedraer bulunur. Her bir ikozahedron diğer ikozahedro yapılarla bağlanarak rombohedral bir yapı oluşturur ve içinde altı atomdan meydana gelen polar (p) ve ekvatarol (e) kısımlar bulundurur [5]. Şekil 2.8'de bor karbürün kafes yapısına ait görsel verilmiştir. Bor karbür %8,8-20 aralığında karbon içerir ve katı bir çözelti olarak bilinmektedir. Bor-karbon faz diyagramına baktığımız zaman %13,3 oranla karbon içeren bor karbürün yaklaşık olarak 2490°C'de eridiği görülmektedir. Karbon oranı arttıkça teorik yoğunluğu da artmaktadır. Teorik olarak



The diagram illustrates the crystal structure of Boron Carbide. It features a chain of red spheres representing boron atoms, connected by green lines. A specific segment of this chain is highlighted with a dashed line and labeled "Birim Hücre Köşegeni" (Unit Cell Edge). To the right, a complex polyhedral structure is shown, labeled "Ikozahedra" (Icosahedra), which is a key structural component of the material.

Şekil 2.8. Bor karbürün kafes yapısı [5].

Şekil 2.8. Bor karbürün kafes yapısı [5].



Şekil 2.9. Bor-Karbon denge diyagramı [44].

Bor karbür asit ve bazlarla tepkimeye girmemektedir. Bu tip karbür ve nitrürler ergimeden buharlaşarak bozulma göstermektedir. Ama bor karbür yüksek sıcaklıkta ergiyip sıvı faz oluşturduğu için kolaylıkla bozulmazlar.

2.2.2.2. Bor karbürün fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri

Bor karbür kolay bir şekilde şekillendirilememektedir. Genellikle basınç altında şekillendirilip kullanılabilir. Manyetik özelliği bulunmamakta ve statik elektrikte taşımamaktadır.

Aynı zamanda bor karbür bilinen en kararlı bileşiktir. Standart oluşum entalpisi 9,34 kcal/mol ile 17,12 kcal/mol'dür. Asit ve bazlar ile reaksiyon vermemektedir. Yalnızca hidroflorik asit (HF), nitrik asit (HNO₃) ve sülfürik asit (H₂SO₄) karışımlarında çözünme ihtimali bulunmaktadır. Bor karbürün oksitlenmesi genellikle tane boyutu ve sıcaklıkla bağlantılıdır. Oksitlenme 650°C'den düşük olan sıcaklıklarda kimyasal reaksiyona bağlı 650°C'den yüksek sıcaklıklarda ise difüzyona bağlı olarak gerçekleşmektedir [45].

Malzemenin tane boyutuna ve porozlu yapı göstermesine bağlı olarak eğme dayanımı değişmektedir. Eğer ince tane boyutlu ve düşük poroziteli olursa çok daha yüksek teorik yoğunluğa ulaşabilmektedir. Bor karbür hem sert bir malzeme hem de kırılgan bir malzemedir. Bu sebeple kırılma tokluğu düşüktür. Kırılma tokluğu sinterleme yoğunluğuna bağlıdır. Artıkça kırılma tokluğu azalır. Diğer bir yandan yoğunluk değeri arttıkça sertlikte de artış gözlemlenebilir.

Bor karbürün young modülü 450-470 GPa aralığında değişebilmektedir. Ortam ısısı, porozite miktarı elastite modülünü değiştirebilir. Bunlar artarsa elastite modülü düşme eğilimi gösterebilir.

Bor karbür, p-tipi yarı iletken bir malzemedir. Bor Karbür'ün elektrik iletkenliği 25°C'de 0,1-10 ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ değerindedir ve düşük termal iletkenliğe sahiptir. Aynı zamanda yüksek kararlılığa sahip olduğu ve nötronları absorblayabildiği için nükleer sektörde de kullanım alanları bulunmaktadır. Dedektör ve kalorimetrelerde kullanılabilir [22].

2.3. İleri Teknolojik Seramiklerin Üretimi

2.3.1. Toz metalürjisi ile üretim, avantajları ve dezavantajları

Toz Metalürjisi geleneksel üretim metodlarına alternatif bir metod olarak geliştirilmiş olmakla birlikte üretimi zor malzemelerin toz hammaddelerle düşük maliyet, yüksek mekanik özelliklere sahip ve kullanılan kalıplarla istenilen ölçülerde ürün elde etmemizi sağlayan bir üretim metodudur. Günümüzde otomotiv sektörü başta olmak üzere savunma, beyaz eşya, elektronik ve birçok sektörde kullanılan parçaların imalatında kullanılan bir yöntemdir. Seri üretime uygunluğu, düzgün yüzeye sahip parçaların imal edilebilirliği, diğer üretim yöntemleriyle üretilmesi zor ya da mümkün olmayan kompozitlerin veya alaşımların üretimi, talaş kaldırmanın az ya da gereksiz olmasından dolayı fire kayıplarının az olması gibi sağladığı bazı üstünlükleri, toz metalürjisi yöntemini öne çıkararak tercih sebebi yapmaktadır [46]. Toz metalürjisi, metal matriksli kompozit malzemelerin imalatında en yaygın tercih edilen yöntemlerden biridir. Toz metalürjisi ile üretilen bazı seramik kompozit parçalar Şekil 2.10'da verilmiştir. Sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatmasındaki zorluk nedeniyle toz metalürjisi yöntemiyle kompozit üretimi, geliştirilen ilk metodlardan birisidir. Bu metodda, genel olarak parçacık ya da whisker formdaki takviye malzemesi ve toz formda bulunan metalle, metal matriksli kompozit malzemeler imal edilebilmektedir. En fazla tercih edilen takviye malzemeleri grafit, silisyum karbür, ve titanyum karbürdür. En çok tercih edilen matriksler ise alüminyum, titanyum ve bakırdır [47].



Şekil 2.10. Toz Metalürjisi ile üretilen bazı parçalar [48].

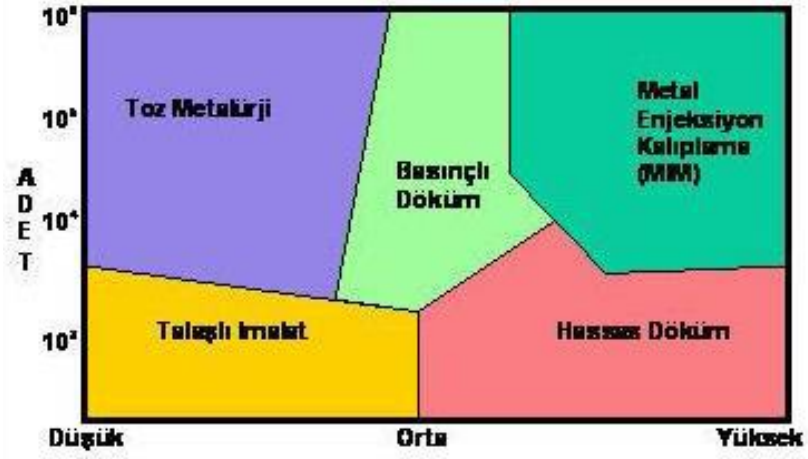
Toz metalurjisi yüzey özellikleri, zor geometrilere sahip parçalar ve minimum toleransta parça elde edilmesinde büyük kolaylıklar sağlar. Toz metalurjisinin diğer avantajları aşağıdaki gibidir.

- Üretim hızı
- Düşük işgücü ihtiyacı
- Düşük maliyet
- Karmaşık geometrili parçaların eldesi
- Düşük fire
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin imalat kolaylığı
- Yüksek yoğunluklu malzemelerin imali

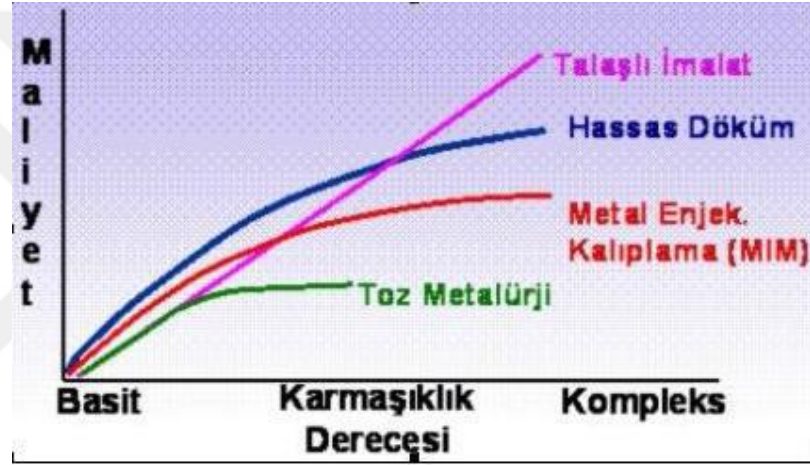
Toz metalurjisi yönteminin avantajlarının yanında birtakım dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar;

- Boyut olarak büyük parça imalinde çok yüksek basınç ihtiyacı olması nedeniyle yüksek maliyetler
- Basım sonrası kalıptan ayrılan ürünlerin kırılma riski
- Toza karışabilen yabancı cisimler
- Ürüne uygulanan basınçta meydana gelebilecek bölgesel farklar nedeniyle ürünün homojen olmaması
- Sinterleme öncesi yaş ürünün dayanımının düşük olması [48]

Parça karmaşıklığı üretim adedi karşılaştırılması ve üretim maliyetleri Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'deki gibidir.



Şekil 2.11. Parça karmaşıklığı ve üretim miktarlarının üretim metoduna göre karşılaştırılması.



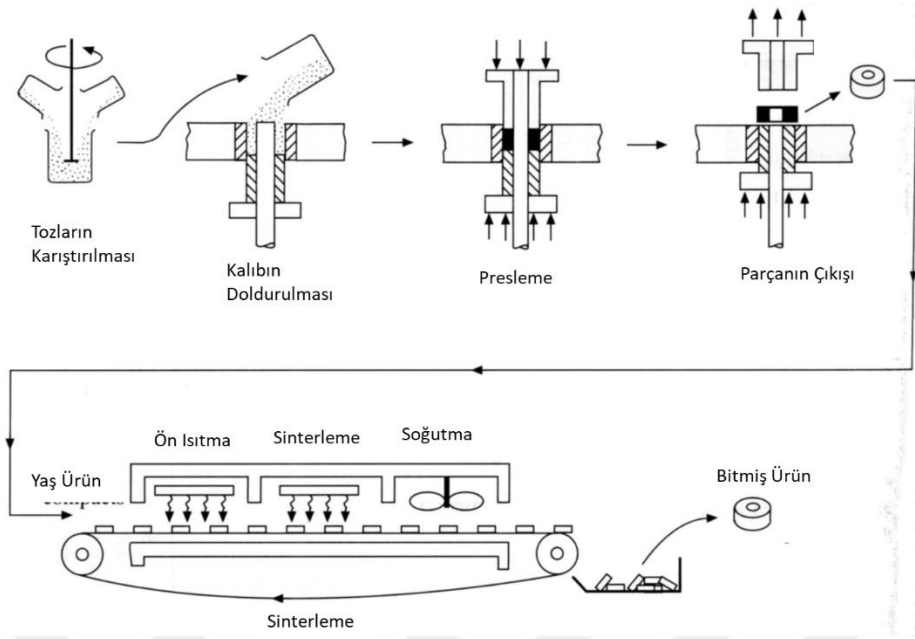
Şekil 2.12. Parça karmaşıklığı ve maliyet karşılaştırması.

2.3.2. Toz Metalurjisi ile seramiklerin üretim aşamaları

Toz metalurji imalat prosesi basit olarak dört ana başlıkta incelenebilir. Bu başlıklar toz hazırlama, presleme işlemi, sinterleme ve sinterleme sonrası yüzey işlemleridir. Toz metalurjisinin imalat aşamaları Şekil 2.13’de verilmiştir.

2.3.2.1. Toz Üretimi

T/M metodu ile imalat yaparken farklı metodlarla hazırlanmış olan tozlar kullanılmaktadır. Metal tozlarının üretiminde tercih edilen teknikler, tozların birçok karakteristiğini belirlediği için toz hazırlama yöntemi önemli bir yer tutar. Tozun içerdiği özellikler doğrudan preslenebilme davranışını, sinterlenebilirliğini ve sinterleme sonrası son ürün özelliklerini etkilemektedir [50]. Üretilcek olan tozlar saf halde kullanılmak yerine daha çok diğer tozlar ile karıştırılır.

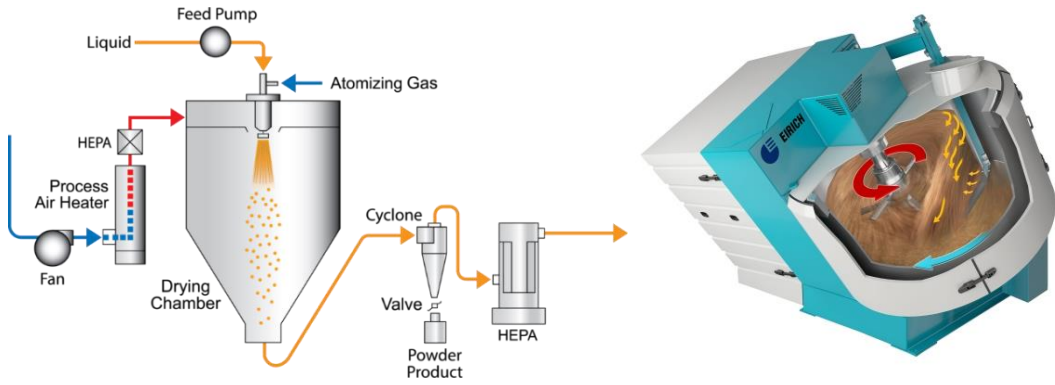


Şekil 2.13. Toz metalurjisi prosesinin adımları [49].

Presleme sırasında beklenen kaliteli ürünü sorunsuz elde edebilmek için, toz üretimi; uygun tane boyutunda elenmesi, uygun miktarda bağlayıcı ile karıştırılması ve istenen nem değerlerinin sağlanabilmesi için bazı ön işlemlerden geçmektedir.

Üretimi yapılacak ürün grubuna göre birbirinden farklı tozlar karıştırıldıkları sırada, tozların bir arada kalabilmesi ve preslenebilirlik kabiliyetini kazanması adına, karıştırma işlemi sırasında bazı kimyasal bağlayıcılar eklenir. Bu kimyasal bağlayıcıların toza eklenmediği hallerde, toz istenen/belirlenen nem değerlerine ulaşamayacağı için kuru bir şekilde üretilir ve pres altında bu toza şekil verebilme kabiliyeti oldukça düşüktür. Tozun bu şekilde kuru olduğu durumlarda fire miktarı istenenin çok üstünde olacaktır. Kimyasal bağlayıcıların reçeteye eklenmesi ile üretilen tozların nem oranları yükselir. Presleme prosesinden alınacak verimin maksimum seviyeye çıkarılabilmesi için, bağlayıcı eklenmiş yüksek nemli tozlar belirli sıcaklıklardaki kurutucu fırınlarda bir işleme daha tabi tutulur ve tozların nem oranları belirlenen seviyelere düşürülür. Nem oranları standardize edilen tozlar, pres işlemi için paketleme işlemine tabi tutulur. Yapılan paketleme sonrası dışarıdan toz yapısını bozabilecek herhangi bir hava, yabancı madde teması nem ve toz özelliklerinde değişime sebep olacaktır. Bu durumda tozun preslenebilirliği ve sinterleme sonrası davranışında değişiklikler gözlenecektir. Toz hazırlama prosesinde

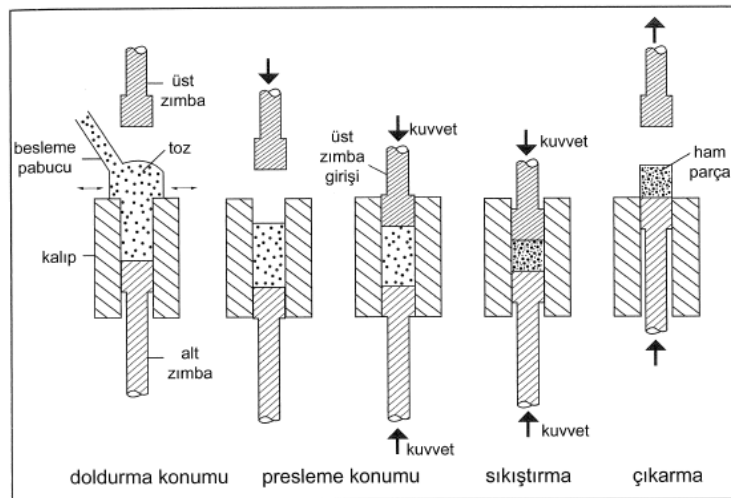
kullanılan cihazlar Şekil 2.14'te gösterilen (a)Sprey Dryer ve (b)Toz karıştırıcısıdır [48].



Şekil 2.14. (a) Spray dryer prosesi ve (b) Eirich marka toz karıştırıcı makine [51,52].

2.3.2.2. Presleme

Toz Metalurjisi ile üretim yönteminde toz hazırlama prosesinden sonra gelen adım hazırlanan tozların preslenmesi işlemidir. Tozların preslenmesindeki esas amaç istenen yoğunluk ve mekanik özelliklerin elde edilmesidir. Farklı sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın kullanılan metod tek eksenli bir kalıpla yapılan basım metodudur. Bu metod seri üretim olan hatlarda özellikle seramik ve ilaç sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz Metalurjisi metoduyla üretilen parçalarda dayanım presleme ve sinterleme proseslerinde malzemenin maruz kaldığı durumlarla direkt olarak bağlantılıdır. Sinterleme sonrası elde edilen üründe bütünlük ve teorik yoğunluğa %100 oranında ulaşılması en önemli beklentidir. Presleme prosesi; tozun kalıba yayılması, pres üst bölgesinin kalıba hizalanması, presleme ve preslenen ürünün kalıptan ayrılması olarak sıralanabilir. Prosese ait görsel Şekil 2.15'de gösterilmiştir[53].



Şekil 2.15. Toz preslemenin aşamaları [54].

Tozların preslenebilirliğini etkileyen bazı nedenler bulunur. Bunlar;

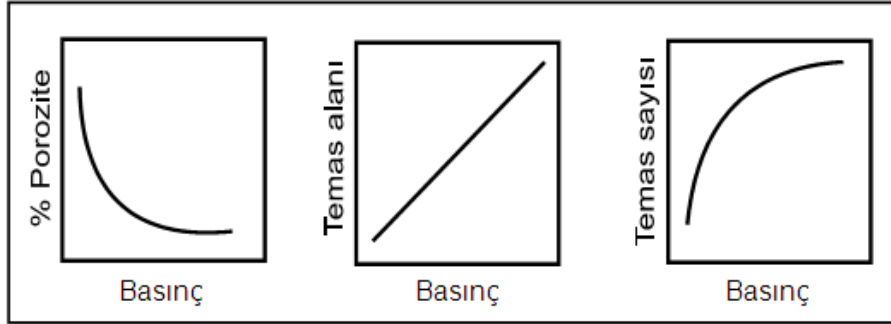
- Tozun sertliği; bazı tozların yüksek sertliklere sahip olması preslenebilirliği için ihtiyaç duyulan basınç kuvvetinin daha yüksek olmasına ihtiyaç duymaktadır.
- Preslenecek tozun şekli; toz geometrisinin karmaşıklığı preslenebilirliği olumsuz yönde etkiler.
- Tozun gözenekli oluşu; tozun ihtiva ettiği küçük poroziteler preslenme sırasında sıkışan hava nedeniyle tozların birbirine bağlanmasını etkilemektedir.
- Toz tane boyutlarının dağılımı; toz tane boyutlarının aynı olması tozların preslenebilirliğini olumsuz etkiler. Farklı boyutlardaki tozlar basım sırasında aralarında oluşacak boşluk azaldığı için daha iyi bir basım gerçekleşecektir.
- Alaşım elementlerinin eklenmesi; Grafit, sülfür ya da çeşitli yağlayıcıların eklenmesi preslenebilirliği arttıran diğer seçeneklerdir [55].

Genel olarak tozların yüzey şekilleri akıcılıklarını etkilemektedir. Yapılan incelemelerde tozların yüzey şekillerinin çoğunlukla düzensiz olduğu görülmüştür. Küresel ya da küresele en yakın yüzey yapısına sahip tozların kalıp içindeki akışları ve paketlenme davranışları daha başarılı sonuçlar göstermektedir. Ayrıca aynı tip tozda küresel şekle sahip tozların yaprak levha şeklinde olanlara kıyasla basma gerilimini daha iyi ilettiklerinden bahsedilebilir. Bunun dışında tozların mekanik ve fiziksel özelliklerinin de sıkıştırılabilirliğine etkisi vardır. Tablo 2.5.'te tozların özellikleri ve etkilediği durumlar gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Tozların önemli özellikleri ve etkilediği durumlar [56].

Önemli Özellikler	Etkilediği Durum
Toz Tane Boyutu	Görünür Yoğunluk
Tane Boyut Dağılımı	Akış Davranışı
Tozun Şekli	Görünür Yoğunluk ve Dayanım
Kimyasal Bileşim	Sinterleme Sonrası Mukavemet
Toz Yüzey Özellikleri	Sinterleme
Toz Mikro Yapısı	Şekillendirilebilirlik, Tokluk

Preslenen tozun bütünlüğündeki en önemli faktör basınç olup bu durum presin tonajı ile orantılıdır. Basıncın etki ettiği diğer parametreler Şekil 2.16.'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Basınç ve diğer parametrelerin birbiriyle ilişkisi [57].

Basımı yapılan tozlar, daha iyi sıkışması ve bütünlüğünü kaybetmemesi için yüksek tonajlı preslerle üretilmektedir. Ve sonrasında sinterleme işlemine tabi tutulmaktadır. Şekil 2.17.'de toz metalurjisinde kullanılan preslere bir örnek görülmektedir.



Şekil 2.17. CNC eksenli tam otomatik pres [58]

2.3.2.3. Sinterleme

Sinterleme, pres altında sıkıştırılmış olan ürünleri yüksek sıcaklık ortamında toz yığınlarını birleştirmek ve yapıdaki poroziteleri gidermek için uygulanan bir metoddur. Sinterleme metodu, tarihin başlangıcından itibaren kullanılan özellikle

mutfak araç gereçleri yapımında tercih edilmiş bir yöntemdir. Günümüzde sinterleme geleneksel seramik ürünler ve toz metalurjisi ile hazırlanan parçaların imalinde seçilen bir yöntemdir [59].

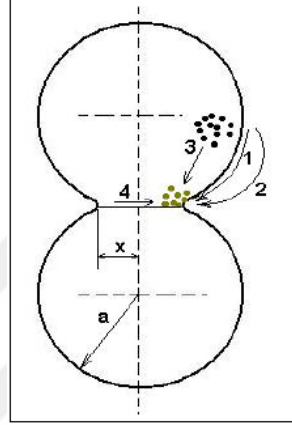
Sinterleme sonrasında hazırlanan malzemenin mukavemet ve yoğunluk değerlerinde artış beklenir. Proseste genel olarak difüzyon mekanizmaları etki gösterir. Kullanılan tozların sinterleme öncesindeki yaş yoğunlukları (green density) sinterlemede geçen süreyi etkiler. Sinterleme işlemi öncesi presleme esnasında daha iyi paketlenerek yoğunluğu daha yüksek olan parçalar daha düşük yoğunluklu olan parçalara göre daha hızlı teorik yoğunluğa ulaşırlar. Fakat sinterleme öncesinde daha sıkı paketlenen ve daha yüksek yoğunluğa ulaşan parçalar son üründe istenilen ürüne her seferinde ulaşamayabilir ve bu durum ekipman dayanımı ve kullanımı açısından ekonomik sonuçlar doğurmayabilir. Genel olarak sinterleme işlemi toz metalurjisi yönteminin son adımıdır. Gerektiği durumlarda sinterleme sonrasında yüzey temizleme işlemleri yapılabilir [60, 61].

Sinterlemeye tabi tutulan malzemenin yüksek mekanik özellikler ihtiva edebilmesi, yapıda bulunan boşlukların minimum seviyede olması beklenir. Isı ve kütle taşınımı, sinterleme prosesinin temelini meydana getirir. Kütle taşınımı olayını hızlandırabilmek ve işlemin sorunsuz olabilmesi için prosesin olabildiğince yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi gerekmektedir. Geri dönülemez proseslerin mekanizmalarında olduğu gibi sinterleme prosesi de sistemdeki serbest enerjinin düşmesi ile gerçekleşir. Bu serbest enerjinin düşmesini arttıran faktörlere sinterlemenin itici gücü denir. Olası itici güçler şu şekildedir;

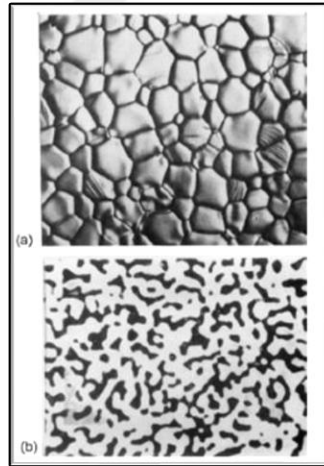
- Toz partikül yüzeylerindeki kavislenme,
- Dış kaynaklı basınç,
- Kimyasal reaksiyonlar

Sinterleme işleminde itici güç parça yüzeyindeki birleşmiş parçacıkların mevcut serbest enerjisinin düşmesidir. Serbest enerjideki bu düşüş, parça gövdesinin yoğunlaşmasını gerçekleştiren atomik difüzyon veya mikroyapıda meydana gelen irileşmelerle tamamlanır. Yoğunlaşma ve mikroyapıdaki tane büyümeleri için difüzyonun gerçekleşme yönü Şekil 2.18’de birbiriyle temas halinde bulunan iki küresel tipte partikül için örneklenmiştir. Sinterleme esnasında yüksek yoğunluklara çıkabilmek açısından, önemli problem kaynaklarından biri mikroyapıdaki tane

büyümesinin yoğunlaşmadaki itici gücü düşürmesinden kaynaklıdır. Bu ilişki bazı durumlarda sinterleme işleminin yoğunlaşma ve tane büyümesi ikilisi arasındaki bir yarış/çekişme olduğu şeklinde belirtilir. Yoğunlaşmayı gerçekleştirecek olan difüzyonun baskın halde bulunduğu sistem yüksek yoğunluğa sahip bir parçanın üretimini destekleyecektir (Şekil 2.19a). Fakat tane büyümesinin baskın olduğu bir durumda yüksek poroziteye sahip bir yapının imali desteklenmiş olacaktır (Şekil 2.19b) [48].



Şekil 2.18. Muhtemel sinterleme mekanizmaları 1-Yüzey difüzyonu, 2-Buharlaşma ve yoğunlaşma, 3-Kütle difüzyonu, 4-Tane sınırı difüzyonu [61]



Şekil 2.19. a. Alümina yüzeyi (porozitesiz) b. SiO₂'nin sinterlenmesi sonrası oluşan katı malzeme ve boşluklar [59].

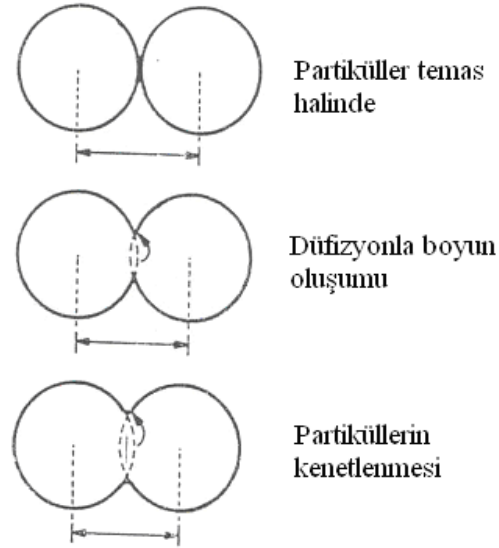
a. Sinterlemeyi etkileyen durumlar: Sinterleme işlemini ve tozun sinterleme sonrası mikroyapısına etki eden en önemli değişkenlikler, malzeme faktörü ve proses değişkenlikleri olarak iki farklı şekilde gruplandırılabilir. Malzemeye bağlı durumdaki değişkenler kullanılan tozun kimyasal bileşimi, toz tane boyutu, toz tane şekli, toz tane boyutunun dağılımı, tozun aglomerasyon derecesi ile benzer karakteristiklerdir. Bu

değişkenlikler tozun preslenebilirliğini ve sinterlenme kabiliyetini etkiler. Özellikle ikiden daha fazla toz içeren preslenmiş yapılarda, toz karışımındaki homojenlik en önemli faktördür. Tozun homojenliği arttırmak için mekanik karıştırmanın yanı sıra, birlikte çöktürme ve sol-jel gibi metodlar incelenerek kullanıma alınmıştır. Sinterlemeye etki eden diğer değişkenliklerse genel olarak termodinamik etkenler başta olmak üzere, sıcaklık, zaman, ortam atmosferi, basınç ve son olarak ısınma ve soğuma hızıdır. Geçmişteki sinterleme araştırmalarının birçoğunda sinterleme sıcaklığı ile süresinin sinterlenme kapasitesi üzerine etkileri incelenmiş ve yorumlanmıştır. Fakat, esas olarak sinterlemenin gerçekleştiği atmosfer ve basınç etkisi proses üzerinde daha komplike ve önemli olduğu sonucuna varılmıştır [62].

Ortam sıcaklığı, toz tane boyutu, uygulanan basınç, yoğunlaşma ile tane büyümesi sırasındaki ortam atmosferi, anahtar malzeme ve proses parametreleri yapılan çalışmalar sonrasında anlaşılmıştır. Prosesin hızı, çok yüksek sıcaklık ve ince toz tane boyutu ile daha iyi bir hale getirilebilir. Yoğunlaşma adımı da dışarıdan uygulanabilen harici basınç sayesinde daha da yükseltilebilir. Son günlerde dikkat çeken başlıklardan biriyse mikro yapıda bulunan safsızlıkların yapıya etkisidir. Yapılan çalışmalar sonucu, malzeme içerisinde bulunan istenmeyen yapı ve safsızlıklar istenen yoğunluk seviyelerine ulaşmayı engelleyeceği gibi yoğunluk dışındaki mekanik özellikleri de etkilemektedir. Önceki kısımlarda da anlatıldığı üzere, toz kalitesi sinterlemenin en can alıcı noktalarından birisidir.

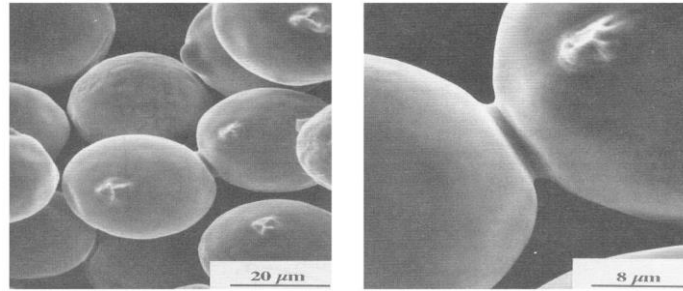
b. Sinterlemenin mekanizmaları: Sinterlemenin mekanizmaları yaygın olarak katı faz, sıvı faz ve geçici faz sinterleme olarak üçe ayrılır [48].

- 1. Katı faz sinterlemesi:** Bu durumda proses, yayınma esası ile malzeme taşınımına dayanmaktadır. Bu prosesin gerçekleşmesi için gereken mekanizma, boyun bölgesi ve toz yüzeyi arasında oluşan serbest enerji veya kimyasal potansiyel fark sonucu ortaya çıkmaktadır. Gerçekleşen difüzyon etkisiyle meydana gelen değişimler Şekil 2.20’de gösterilmektedir. Tozların birbirine gerçekleştirdikleri difüzyon neticesinde meydana gelen boyun bölgesindeki buhar basıncı düşük olmakta ve bu bölgeye doğru yayılım hız kazanmaktadır.



Şekil 2.20. Sinterleme sırasında, katı-hal malzeme taşınımı sonrası, boyun oluşumu ile tozların kenetlenmesi [63].

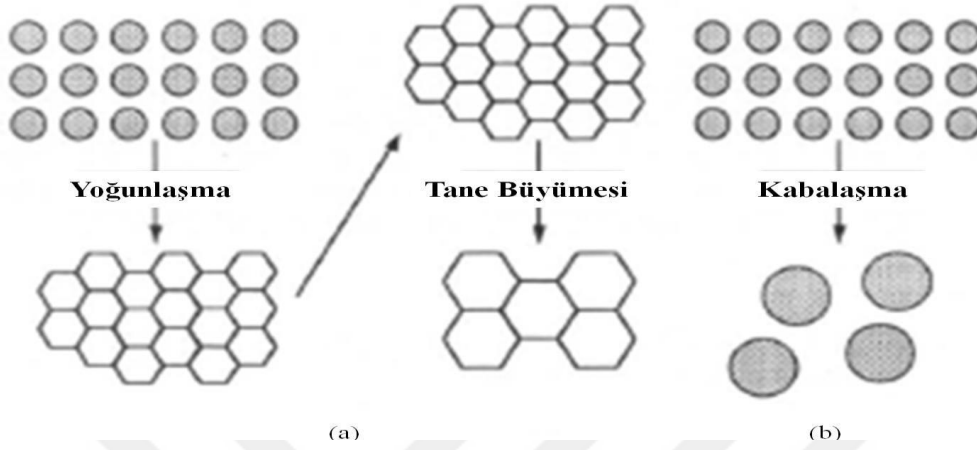
Boyun oluşumu gerçekleşmeye başladıktan ve bir miktar oluşumdan sonra yapı, Şekil 2.21’de görüldüğü gibi bağlardan meydana gelen bir ağ yapısına ulaşır ve mukavim bir hale gelir. Gerçekte her bir toz partikülü üzerinde birden fazla temas noktası bulunur ve bu noktaların tümü daha sonra genişleyerek izole porları meydana getirir. Kristal bir malzeme için her bir temas noktasında bir tane sınırı büyüyerek önceden orada yer alan katı-buhar ara yüzeyinin yerine geçer. İki küre teorisinde uzun süre devam eden sinterlemede tane sınırları ötelenerek tanelerin birleşmesiyle orijinal çapın $2^{1/3}$ katı çapta olan bir küre meydana getirir [64].



Şekil 2.21. Sinterleme ile boyun oluşumuna ait bir SEM görüntüsü [4].

Sinterleme esnasındaki etkin itici güç, yüzeylerdeki fazla enerjinin düşmesidir. Bu durumun ilk yolu ortaleme toz tane boyutundaki artış nedeniyle ortaya çıkan ve tane büyümesine neden olan toplam yüzey alanındaki azalıştır. (Şekil 2.22-a) veya katı buhar ara yüzünün ortadan kaybolması sonucu oluşan sınırlardaki alan ve bunu takip edip yoğunlaşmaya neden olan tane büyümesidir (Şekil 2.22-b) İki mekanizma genel olarak birbirini harekete geçirir. Bu durumda yoğunlaşmaya neden olan atomik

etkileşimler baskın gelirse porlarda küçülme görülür ve zaman içerisinde yok olarak yapı çekilir. Fakat tane büyümesine neden olan atomik etkileşimler daha süratli gerçekleşmesi durumunda hem porlarda hem de tanelerde zaman içerisinde büyüme gözlemleriz [65].



Şekil 2.22. Toz partiküllerinin enerjilerini düşürürken izledikleri yollar a. Tane büyümesini takip eden yoğunlaşma: çekilme meydana gelir. b. Küçük tanelerin yerlerini büyük tanelere bırakması [65].

Katı hâl sinterlemesi, yüzey alanındaki küçülmeye sebep olurken, malzemedeki çekilme artarak daha yüksek mukavemete sahip bir ürün elde edilir [54]. Şekil 2.23.'te bir sinterleme fırını görseli verilmiştir [66].

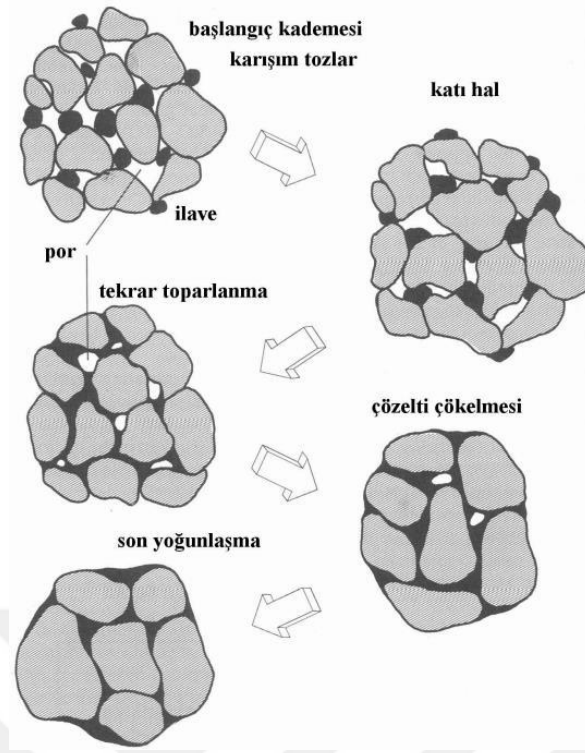


Şekil 2.23. Sinterleme fırınına ait bir görsel.

2. Sıvı faz sinterlemesi: Sistemdeki fazlardan en az bir tanesi sinterleme sıcaklığı esnasında sıvı hale geçtiğinden dolayı elde edilen malzemenin sahip olduğu kullanım sıcaklığı malzemenin sinterlendiği sıcaklığın altında olmalıdır. Sinterleme sıcaklığına ulaşınca, sıvı faz, tozları ıslatarak, tozların birbiri arasındaki ince kanallarda kapiler tüp etkisi oluşturarak tozların kolay bir şekilde sinterlenmeleri sağlanır. Hızlı bir şekilde sinterleme ve basınç ihtiyacı olmadan yoğunlaşmanın sağlanabilmesi nedeniyle sıvı hâl sinterlemesi yaygın olarak seçilen bir sinterleme türüdür. Prosesin başlangıcında karıştırılan tozlar sıvı hâlin meydana geleceği bir sıcaklığa çıkarılır. Sıcaklığa ulaşım esnasında, malzemenin mikro yapısında olan kimyasal konsantrasyonun da etkisiyle, katı hâl sinterlemesi oluşur. Çeşitli sistemlerde, katı hal difüzyonu bir sıvının ilk olduğu aşamaya kadar önemli ölçüde yoğunlaşmaya yol açar. Bu yoğunlaşmanın daha fazla olup olmaması meydana gelen sıvı miktarına bağlıdır. Bağlayıcı metal molekülü sıvı fazına geçtikten sonra, sıvı fazın sinterlenmesi, yoğunlaşma sürecini üç temel aşamada gerçekleştirir ki bunlar Şekil 2.24'te gösterilmiştir:

- a. Sıvı akışının başladığı ve moleküllerin tekrar düzenlendiği başlangıç aşaması,
- b. Çözelti çökmesinin geliştiği ara aşama, daha sıkı bir paketlenme sağlayarak,
- c. Yoğunlaşma hızının katı faz sinterlemesi ile eşitlendiği ve nihai birleşmenin gerçekleştiği son aşama.

Sıvı-faz sinterleme sürecinde, sinterleme sıcaklığındaki fazlardan biri viskoz bir halde bulunmaktadır. Bu tip bir durum bilhassa ergime sıcaklıkları birbirlerinden büyük farklılık gösteren malzemelerin sinterlenmesinde ortaya çıkar. Sıvı hal, katı haldeki molekülleri ıslatarak taneler arasındaki ince kanallarda daha fazla basınç oluşturur. Sıvı-faz sinterlemesi sırasında, sıvı fazın miktarı genellikle %20'yi geçmez. Bu süreçte, tozlar daha düşük sıcaklık altında ve daha kısa bir sinterleme süresinde sinterlenebilir. Ancak, sıvı hal sinterlemesi ile imal edilen malzemeler genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun değildir [48].



Şekil 2.24. Klasik sıvı faz sinterlemesine ait diyagram.

3. **Geçici Faz Sinterleme:** Sıvı faz sinterlemenin alternatiflerinden bir tanesi, geçici sıvı hal sinterlemesidir. Bu mekanizma, yüksek erime sıcaklığına sahip katı halin çözünme oranının yüksek olduğu durumlarda geçerlidir. Preslenmiş kompakt, sinterleme sıcaklığına çıkartıldığında sıvı faz oluşarak kompakt sinterleme sıcaklığına ulaşıldığında, sıvı faz iç yayınımla katı eriyiğe geçerek ortadan kaybolur. Bu sıcaklıkta bekleme sürecinin sonucunda, homojen yapıda katı bir eriyik ya da birden fazla katı faz içeren heterojen bir alaşım meydana gelebilir. Sinterleme işlemi sırasında homojen bir katı alaşımın oluşmasına örnek olarak, alaşımın katılaşma sıcaklığının altında sinterlenen %90 Cu, %10 Sn bileşiminden meydana gelen kendinden yağlamalı yataklar, Mg-Si ve Al-Cu alaşımları ve bazı AlNiCo mıknatısları gösterilebilir. Ayrıca diş hekimlerinin kullandığı oda koşullarında sinterlenen Au, Sn ve Hg amalgamları da değişik katı fazlardan oluşan heterojen alaşımlara örnek olarak verilebilir [48].

2.4. İleri Teknolojik Seramik Zırhların Balistik Uygulamaları

Balistik, yer çekimi ve atmosferik koşullar altında ateşlenen veya itilen malzemelerin hareket davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilimiyle özellikle

şarapnellerin, mermilerin ve roketlerin göstermiş oldukları davranış ve hareketleri ele alır. Balistik, merminin ateşlenerek namlu ucundan çıkıp hedef bölgesine ulaşana kadar olan yolculuğunu ve hedef bölgesindeki etkisini detaylıca inceler. Bu bağlamda, balistik bilimi, mermilerin ateşlendikleri andan itibaren içinde bulundukları namlu ve hava ortamında nasıl hareket ettiklerini araştırır ve hedef üzerindeki deformasyonları analiz eder [67-69].

Balistik, merminin namlu içinden hedefe ulaşana kadar geçirdiği süreci, bulunduğu ortama göre üç farklı alan üzerinden inceler. Bunlar;

- İç Balistik; Merminin ateşlenmesiyle birlikte kimyasal enerji kaynaklarını, gazın genişlemesini ve enerjinin kontrolünü ele alır, yani merminin ateşlendiği anda namlu içindeki hareketini detaylı bir şekilde analiz eder.
- Dış balistik; Mermi ve yanmış barut gazlarının namludan çıkışından itibaren hedefe ulaşana kadar olan süreçteki uçuş hareketini ve bu hareketi etkileyen faktörleri araştırır. Merminin namludan çıktıktan sonra hedefe kadar izlediği yol, genellikle mermi yolu olarak adlandırılır. Mermi, namlunun ağzından çıktıktan sonra üç farklı kuvvetin etkisi altında hareketini sürdürür. Bu kuvvetler şunlardır:
 - Barutta bulunan gazın mermiye verdiği itme kuvveti, mermiyi ileriye hareket ettirir.
 - Merminin kendi kütlesi ve yerçekimi kuvveti, mermiyi aşağı yöne doğru çeker.
 - Hava direnci adı verilen kuvvet, mermiyi ilerleme yönüne karşı iterek hızını azaltır. Bu nedenle, merminin namlu ağzından çıktıktan sonra uzaklaştıkça hızında azalma meydana gelir [70].
- Hedef balistiği; Mermi ile hedef arasındaki etkileşimi inceler ve özellikle hedef üzerinde veya hedefin üzerinde merminin yarattığı etkileri analiz eder. Hedef balistiği dendiğinde akla ilk olarak hedef noktanın imhası gelmektedir. Mermi çekirdeğinin hedef noktada oluşturduğu deformasyona hedef balistiği denmektedir.

Koruma gerekliliği ortaya çıktığında, uygun malzemenin seçimi, tehdit oluşturan kinetik enerjili parçacıkların hızlarına referans alınarak gerçekleştirilir. Başka bir deyişle, tehdidin türüne bağlı olarak malzeme seçimi, bu potansiyel tehlikeli parçacıkların hızlarına göre belirlenir [71].

Zırh malzemelerinin seçiminde ve tasarımında, sadece koruma sağlama yeteneği değil, eş zamanlı olarak hafif olması da önemlidir. Zırh malzemelerinde seçim yapılırken, fiyat, kullanılacak yer ve balistik performans gibi çeşitli kriterler önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzeme grupları, hem etkin bir koruma sağlama yeteneğine sahip olmalarıyla hem de hafif olmalarıyla dikkat çekerler, bu da taşıyan kişi veya aracın hareketliliğinde artış sağlarken aynı zamanda koruma işlevini yerine getirir. Bundan dolayı, modern zırh tasarımlarında bu tür malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır, çünkü hem koruma hem de hareketlilik açısından optimal bir denge sağlamaktadırlar.

2.4.1. Mühimmatlar

Ateşli silahların kullanımında temel rol oynayan unsurlardan biri mühimmat olarak adlandırılır. Mühimmat, barut tozu, falya, fişek kovani ve içerdikleri kurşun veya mermiler gibi bileşenleri içerir.

Avrupa standartlarına göre, mühimmatlar genellikle metrik ölçüm sistemini kullanarak tanımlanırken, Amerikan standartlarında ise kalibre olarak ifade edilir. Örneğin, 1 kalibre, Amerikan standartlarına göre 0,01 inç ve metrik sistemde ise 0,254 mm'ye denk gelir. Mühimmatların adlandırılmasında genellikle mermi çapı ve kovan boyu gibi ölçüler esas alınır. Bu standartlar, mühimmatın yapısını ve özelliklerini tanımlamakta ve sınıflandırmakta önemli bir rol oynar, böylece kullanıcılar için uygun ve uyumlu seçimler yapmalarına yardımcı olur. Bu açıdan, mühimmatın doğru biçimde tanımlanması, ateşli silahların etkili ve güvenli olarak kullanılmasını sağlayan kritik bir unsurdur.

Mühimmatlar ve kullanıldıkları silahlara ait görsel Şekil 2.25'de gösterilmiştir.

2.4.2. Balistik test

Balistik testler, malzemelerin balistik özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen testlerdir. Bu testler arasında, malzemelerin balistik karakteristiklerini tespit etmek için kullanılan önemli iki test metodu bulunmaktadır. Penetrasyon derinliği (DOP) testi, özellikle 80'li yılların ikinci çeyreğinden günümüze kadar iletici teknolojik kompozit seramik malzemeler üzerinde yoğun bir şekilde gerçekleştirilmektedir. V50 testleri ise her çeşit malzemeye uygulanabilen bir balistik dayanım ölçüm testidir [48].



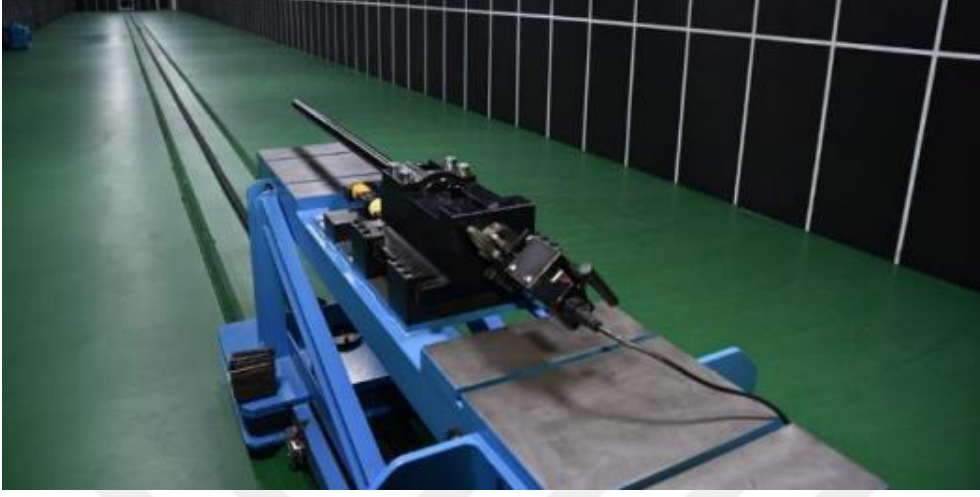
Şekil 2.25. Mühimmatlar ve kullandıkları silahlar [48].

Balistik testler, mühimmatlar kısmında belirtilen ve genellikle referans alınan balistik standartlara uygun olarak gerçekleştirilir. Bu testler, genellikle standartlarda belirtilen çevresel koşulların simüle edildiği kapalı bir alanda, uzaktan kumanda veya insansız ölçümler olarak yapılır. Balistik testlerin yapıldığı odalar, balistik test sehpa ve düzenekleri (silah simülasyonu), mermi hız ölçümlerinin yapıldığı hız sensörleri ve teste tabi tutulacak malzemenin hedef alındığı alan olacak şekilde üç ana kısımdan meydana gelir.

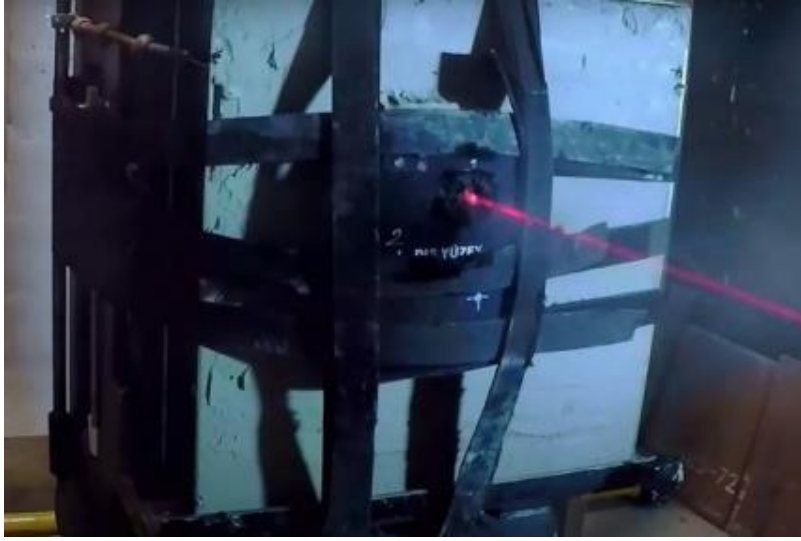
Gerçekleştirilen balistik testler, Nurol Teknoloji bünyesinde bulunan balistik test laboratuvarında TÜRKAK tarafından EN ISO IEC 17025:2017 standardına uygun olarak akredite bir şekilde yapılmıştır. Şekil 2.26'da balistik test laboratuvarı içerisindeki mühimmat ateşleme mekanizması görülmektedir. Şekil 2.27'de ise TS EN 1522 Standardına göre denetlenen ortam koşullarında bulunan bir seramik ürünü görmekteyiz. Bu standart, test ortamının sıcaklık koşullarının 18 ± 5 °C olması gerektiğini belirtmektedir.

Numunelerin balistik testinde, 7,62 mm x 51 zırh delici (AP) mühimmat kullanılmıştır; bu mühimmat MKE tarafından üretilmiştir. Mermi, bakır kaplamalı çelik gömlek, çelik çekirdek ve kurşun çekirdek içermektedir (MKE, 2021). Mühimmatın çekirdek malzemesinde kullanılan çelik, Stewart ve Netherton (2020) tarafından belirtilen sertleştirilmiş çeliktir. Şekil 2.28 mermi tam ve kesit görüntüsü, Şekil 2.29 ise mermi

bölümleri görülebilir. Fişek ağırlığı yaklaşık olarak 24 gramdır (MKE, 2021); çelik çekirdek ise yaklaşık 5 gram ağırlığındadır ve çelik çekirdek boyu yaklaşık olarak 27 mm'dir. Mühimmatın hız aralığı ise $838 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir (MKE, 2021).



Şekil 2.26. Mühimmat ateşleme mekanizması.



Şekil 2.27. Balistik test paneli.

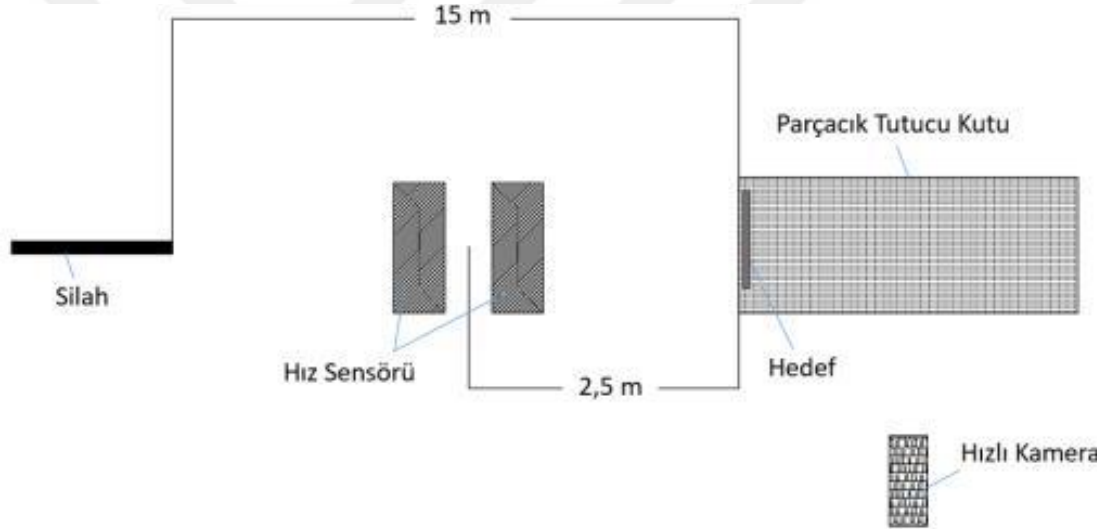


Şekil 2.28. 7,62x51 AP a) Fişek b) Mermi c) Mermi kesit görüntüsü



Şekil 2.29. Merminin bölümleri

Balistik test düzenek şeması, Şekil 2.30’da görsel olarak sunulmuştur. Atış mesafesi, vücut zırhlarına uygulanacak balistik test faaliyetleri için kullanılan uluslararası standart olan NIJ 0101.06’ya (Ballistic Resistance of Body Armor) uygun olarak belirlenmiştir.



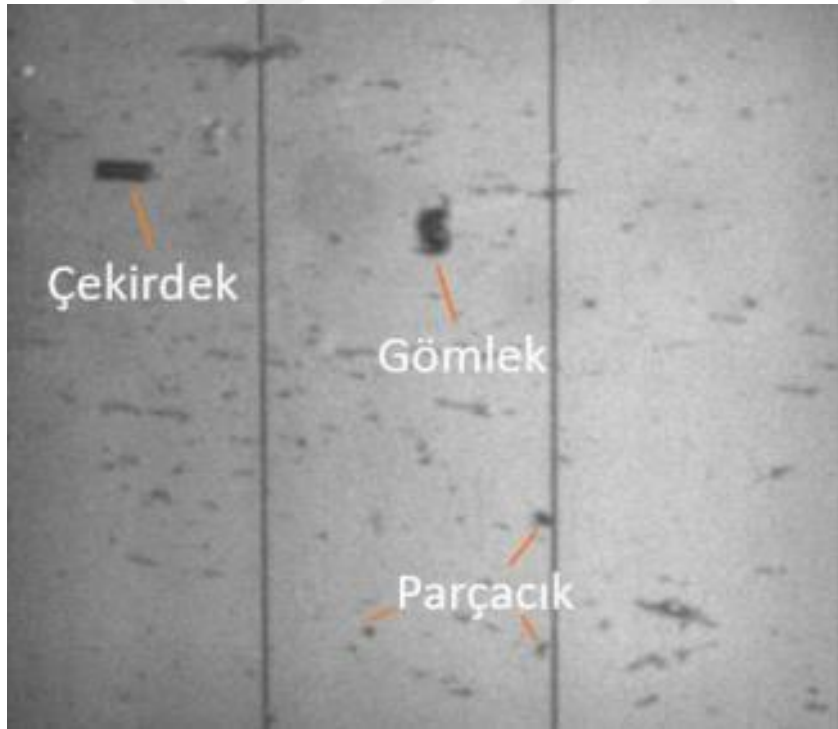
Şekil 2.30. Balistik test düzeneği.

Nurol Teknoloji'nin olanakları kullanılarak özel bir parçacık tutucu geliştirilmiştir. Bu tutucu, balistik test sırasında hedeften çıkan mühimmatın görüntüsünün hızlı bir kamera ile 90 derecelik bir açıyla kolayca yakalanmasını sağlamıştır. Aynı zamanda, hedeften çıkan çekirdek de bu tutucu ile güvenli bir şekilde yakalanarak analizler için kullanılmıştır. Görüntünün dik bir şekilde alınması, hızlı kamera ile elde edilen görüntüler kullanılarak elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmaktadır. Parçacık tutucu kullanılmadığında ise saçılan parçacıkların kameraya zarar vermemesi için görüntü ayna kullanılarak yansıtma metoduyla alınacaktı. Ancak bu durum, görüntünün açılı alınmasına neden olduğundan dolayı, kameradan elde edilen verilere ek hata payları eklenmesine sebep olacaktı. Çekirdeklerin güvenli bir şekilde

yakalanabilmesi önemlidir, çünkü hızlı kameradan elde edilen ölçümler, çekirdeklerin gerçek ölçümleriyle karşılaştırılarak doğruluğun artırılmasına katkı sağlar.

NOVA S9 modeli FASTCAM marka kamerası kullanılarak elde edilen hızlı kamera görüntüleri, atış sırasında seramikten çıkan püskürükler nedeniyle numunenin hemen arkasındaki görüntüyü bulanık hale getirmiştir. Bu durum, numuneye yakın bir bölgede çekirdeği gözlemlemeyi zorlaştırmış olup, numuneden uzaklaşıldıkça püskürükler seyrekleşmiş ve bu sayede mühimmatın daha net bir görüntüsü elde edilebilmiştir. Kamera, hedefin arkasında belirli bir mesafeden görüntü alacak şekilde özenle konumlandırılmış ve tüm test sürecinde sabit bir pozisyonda tutulmuştur.

Şekil 2.31.'de, atış sonrasında numunenin arka tarafından elde edilen bir hızlı kamera görüntüsü örneği bulunmaktadır. Bu görüntüde, çekirdek ve gömleğin (ceketi) yanı sıra, mühimmatın ve seramikten kaynaklanan parçacıkların detaylı bir şekilde gözlemlenebildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.31. Atış sonrası hızlı kamera görüntüsü.

Her bir numune için, sınırlı olmayan çıplak seramik dışında, üç atış gerçekleştirilmiş ve üçgen formunda sabit bir desen kullanılmıştır. Şekil 2.32'de hedefe tutturulmuş bir numune görseli görünmektedir.

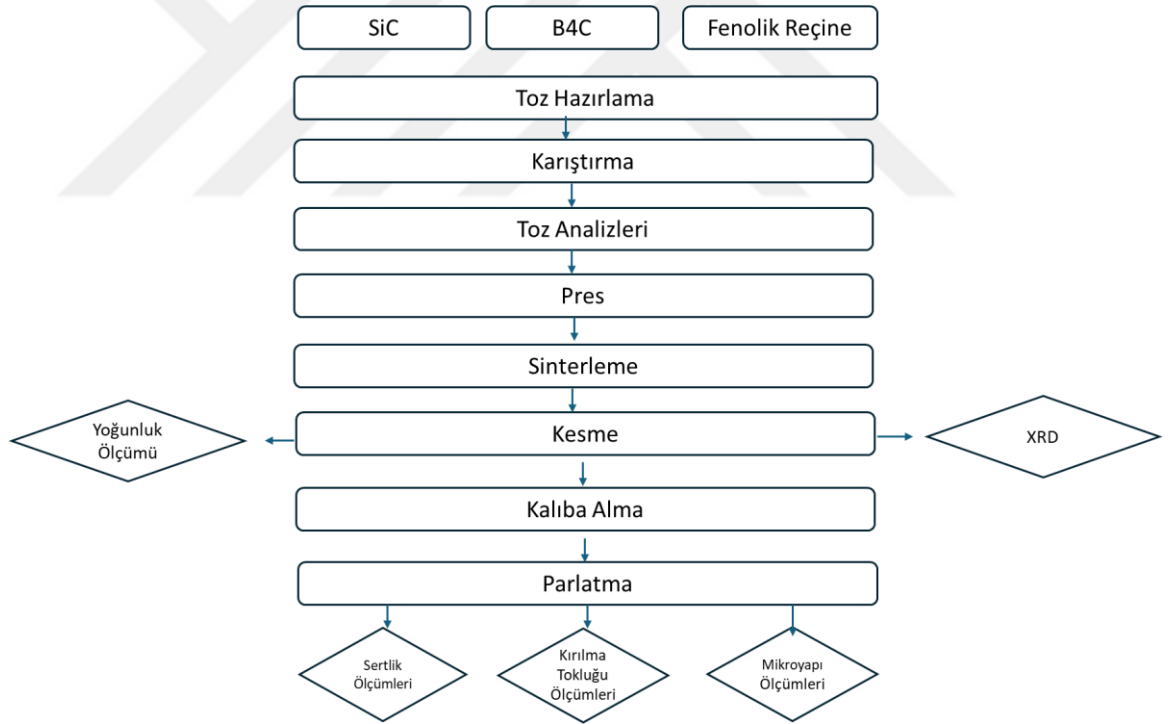


Şekil 2.32. Göğüs plakası numunenin hedefe tutturulmuş görseli.



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez kapsamında SiC esaslı B₄C takviyeli seramiklerin mekanik, fiziksel ve balistik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda öncelikle tane boyutu ve faz analizleri yapılan SiC ve B₄C tozlarının farklı oranlarda fenolik reçine ile karıştırılarak toz hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akabinde hazırlanan tozlar soğuk presleme yöntemiyle şekillendirilerek vakum ortamında sinterleme işlemi yapılmış ve sinterleme sonrası yüzey temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen numunelerin yoğunluk, sertlik, mikro yapı ve XRD analizleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda izlenen proses adımları Şekil 3.1 'de şematik olarak görülmektedir.

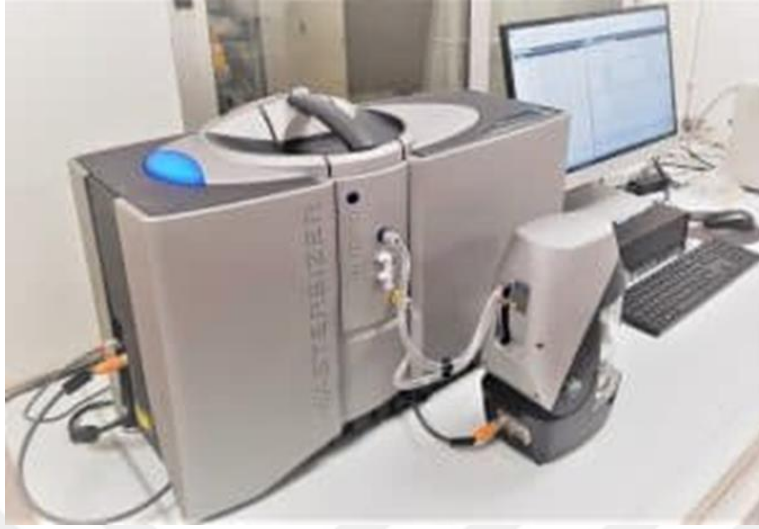


Şekil 3.1. Çalışmaların akış şeması.

3.1. Kullanılan Hammaddeler

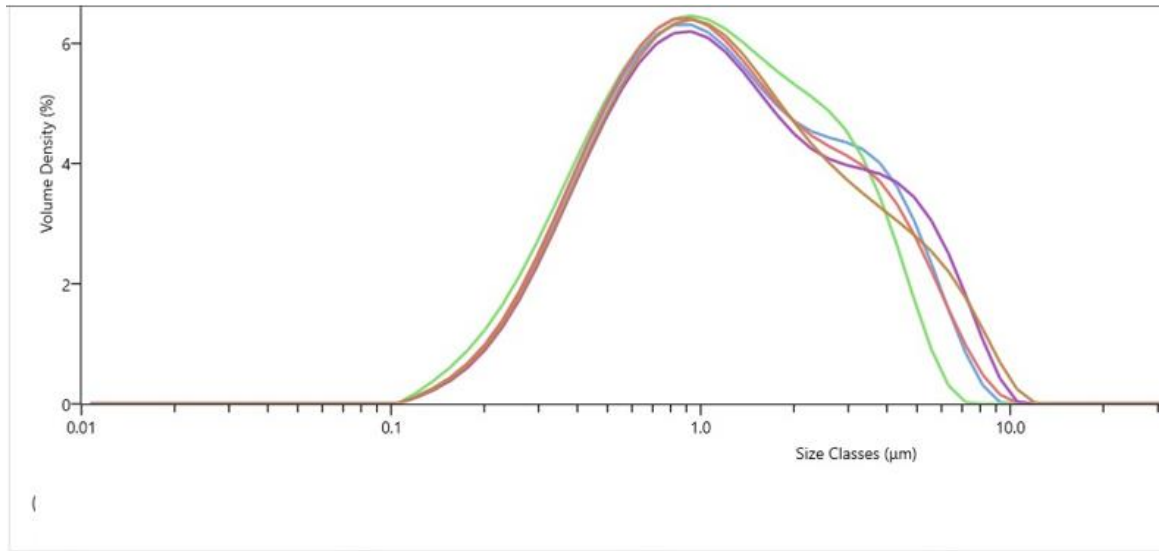
Seramik kompozit malzemelerin üretiminde hammadde olarak SiC, B₄C ve fenolik reçine kullanılmıştır. Silisyum karbür ve bor karbür tozları karıştırılmadan önce ve sonra tane boyut analizlerinin yapılması için endüstriyel elekten geçirilmiştir.

Elekten geçirilen tozların daha sonra Mastersizer 3000 otomatik tane boyutu lme cihazı ile boyut analizleri yapılmıştır (şekil 3.2.)



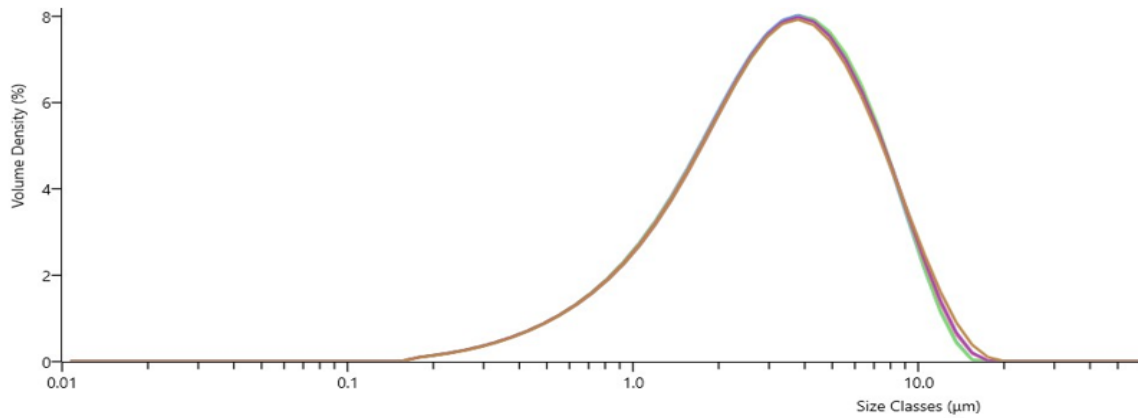
şekil 3.2. Mastersizer 3000 toz tane boyutu ölçüm cihazı.

SiC ve B₄C tozları kullanılmadan önce elek analizi ve faz analizi işlemlerine tabi tutulmuştur. Elek analizi sonucunda SiC tozuna ait tane boyutu değerleri seramik kompozit üretiminde değerlendirilen D50 tane boyutu kriterine göre min. 1,05 μm ve max. 1,17 μm olacak şekilde ortalama tane boyutu 1,12 μm olarak ölçülmüştür. Bu lmlerde taneler arasındaki standart sapma 0,0451 olarak hesaplanmıştır (şekil 3.3). B₄C tozuna ait elek analizi sonucuna göre ise tozun tane boyutu seramik kompozit üretiminde değerlendirilen D50 tane boyutu kriterine göre maksimum kabul edilebilir seviyenin altındadır. Sonuçlarda B₄C tozuna ait tane boyutu min. 3,20 μm , max. 3,26 μm ölçülmüş olup, ortalama tane boyutu ise 3,23 μm olarak belirlenmiştir. Taneler boyut aralığında standart sapma 0,021 olarak ölçülmüştür (şekil 3.4). Kullanılan tozlar ve fenolik reçine en yüksek safiyette olup tozlara ait zellikler Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.



Trend								
	Record Number	Sample Name	Dx (3) (μm)	Dx (10) (μm)	Dx (50) (μm)	Dx (90) (μm)	Dx (94) (μm)	Dx (97) (μm)
	1	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,240	0,369	1,12	4,00	4,75	5,62
	2	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,220	0,344	1,05	3,23	3,79	4,43
	3	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,238	0,367	1,10	3,97	4,79	5,76
	4	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,246	0,379	1,17	4,63	5,58	6,61
	5	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,243	0,375	1,14	4,48	5,60	6,88
	Mean		0,237	0,367	1,12	4,06	4,90	5,86
	1xStd Dev		0,0103	0,0139	0,0451	0,548	0,744	0,962
	1xRSD (%)		4,35	3,80	4,04	13,5	15,2	16,4

Şekil 3.3. SiC tozuna ait elek analizi değerleri



end								
	Record Number	Sample Name	Dx (3) (μm)	Dx (10) (μm)	Dx (50) (μm)	Dx (90) (μm)	Dx (94) (μm)	Dx (97) (μm)
	1	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,519	0,994	3,20	7,50	8,60	9,91
	2	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,514	0,990	3,23	7,53	8,61	9,89
	3	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,520	0,998	3,24	7,67	8,85	10,3
	4	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,516	0,998	3,25	7,71	8,92	10,4
	5	TALHA ÇAVDAR YL TEZ	0,522	1,00	3,26	7,90	9,21	10,8
	Mean		0,518	0,997	3,23	7,66	8,84	10,3

Şekil 3.4. B₄C tozuna ait elek analizi değerleri.

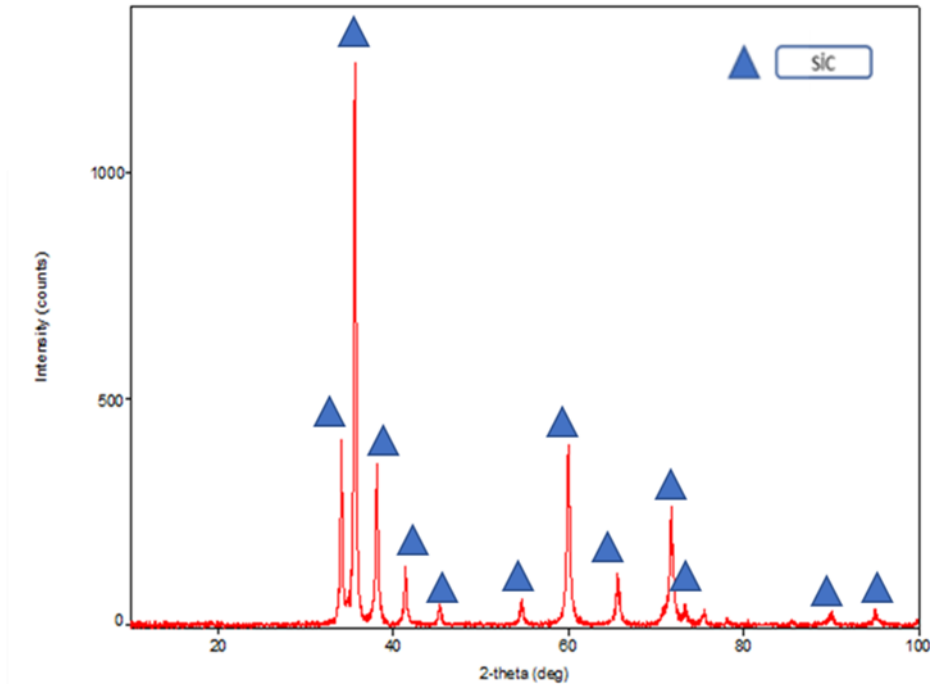
Tablo 3.1. Silisyum karbür ve bor karbür tozuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler.

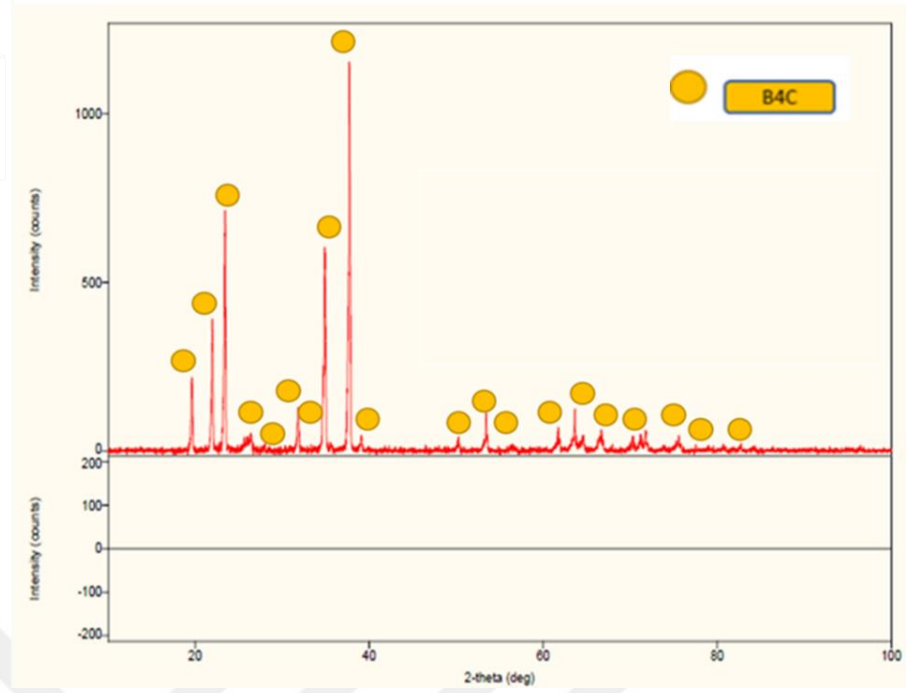
Toz	Tane Boyutu (μm)	Yoğunluk (g/cc)	Safılık
SiC	D10:0,56 D50: 1,24 D90:5,90	3,13 $\pm$ 0,04	%100
B ₄ C	D10:0,924 D50:2,86 D90:5,49	2,55 $\pm$ 0,3	%98 (%2 Serbest C)

Tablo 3.2. Fenolik reçine'ye ait kimyasal ve fiziksel özellikler.

Yumuşama Noktası °C	85
Erime Noktası °C	82
Hekzamin Miktarı, %	8,9
Akma Mesafesi, 125 °C, mm	42-52
Serbest Fenol, %	≤ 0.5
Elek Analizi -63 μm	90 μm
Elek Analizi -45 μm	80 μm

Hazırlanacak reçetelerde kullanılmak üzere tane boyut analizleri gerçekleştirilen tozların faz analizleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Yapılan x-ışını difraksiyon paternine göre yapılarda SiC ve B₄C piklerine rastlanılmış olup herhangi bir safsızlık görülmemiştir. Faz analizleri Rigaku marka x-ışını difraktometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 3.5.** SiC tozuna ait faz analizi.



Şekil 3.6. B₄C tozuna ait faz analizi.

Hazırlanacak reçetelerde kullanılacak olan tozlara ait görsel ve SEM görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir. Bu görselde, iki farklı toz örneği yer almaktadır: bir tanesi silisyum karbür (SiC), diğeri ise bor karbür (B₄C) tozuna aittir. Görselde, her iki tozun da yanında bu malzemelere ait elektron mikroskobu görüntüleri bulunmaktadır. Bu mikroskop görüntüleri, tozların mikro yapısını ve partikül morfolojisini ayrıntılı bir şekilde inceleme imkanı sunmaktadır, bu da malzemelerin farklı fiziksel özelliklerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.



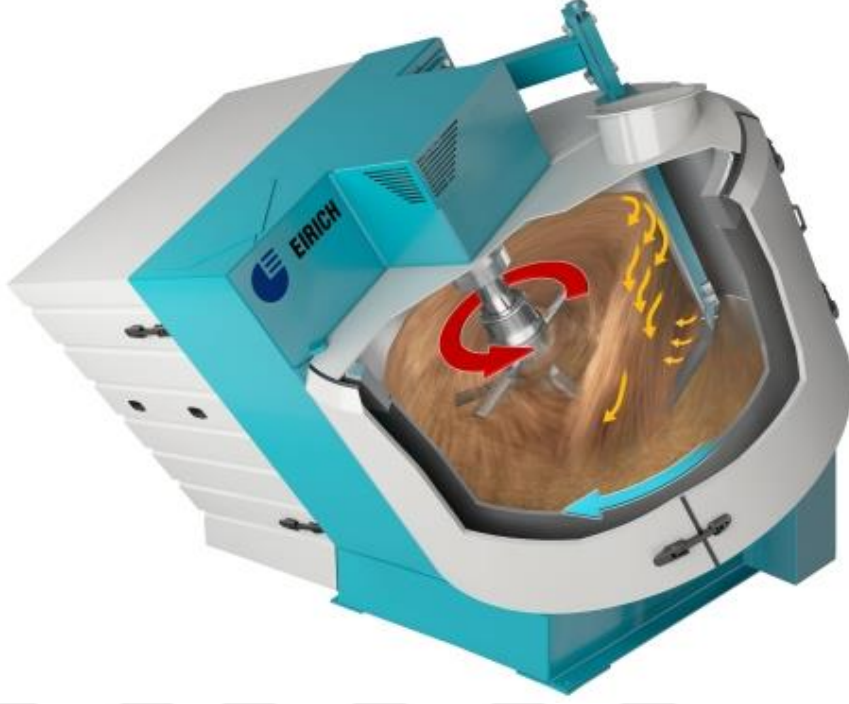
Şekil 3.7. (a) SiC ve (b) B₄C tozuna ait görseller ve SEM görüntüleri.

3.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması

Seramik kompozit malzemelerin üretiminde Tablo 3.3'te oranları verilen SiC, B₄C tozlarıyla birlikte bağlayıcı olarak ilave edilen Fenolik reçinenin homojen bir şekilde karıştırılması için Eirich marka (Şekil 3.8) endüstriyel toz karıştırıcısı kullanılmış ve tane boyut ölçüm cihazında (Şekil 3.2) tekrar elek analizi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan toz karışımı Şekil 3.9'da görülmektedir. B0-B40 bileşim aralığına sahip tozların elek analizi sonuçları kompozit seramik malzemelerin üretiminde esas alınan D50 tane boyutu değerine göre 200- 253 µm aralığında tespit edilmiştir. Yapılan elek analizlerine ait toz boyut dağılım grafikleri Şekil 3.10-3.14'de görülmektedir.

Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan toz karışımı bileşimleri.

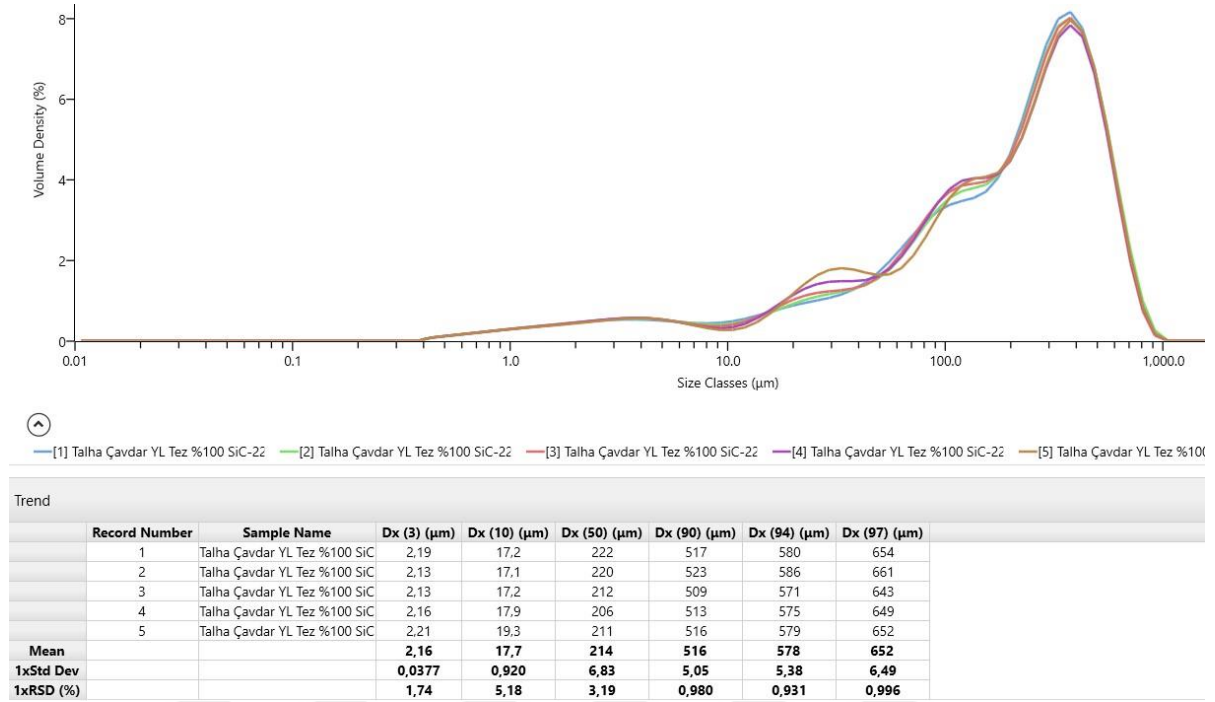
Numune Adı	Malzeme İçeriği
BA 0	%100 SiC
BA 10	%90 SiC- %10 B ₄ C
BA 20	%80 SiC- %20 B ₄ C
BA 30	%70 SiC- %30 B ₄ C
BA 40	%60 SiC- %40 B ₄ C



Şekil 3.8. Eirich toz karıştırıcı.

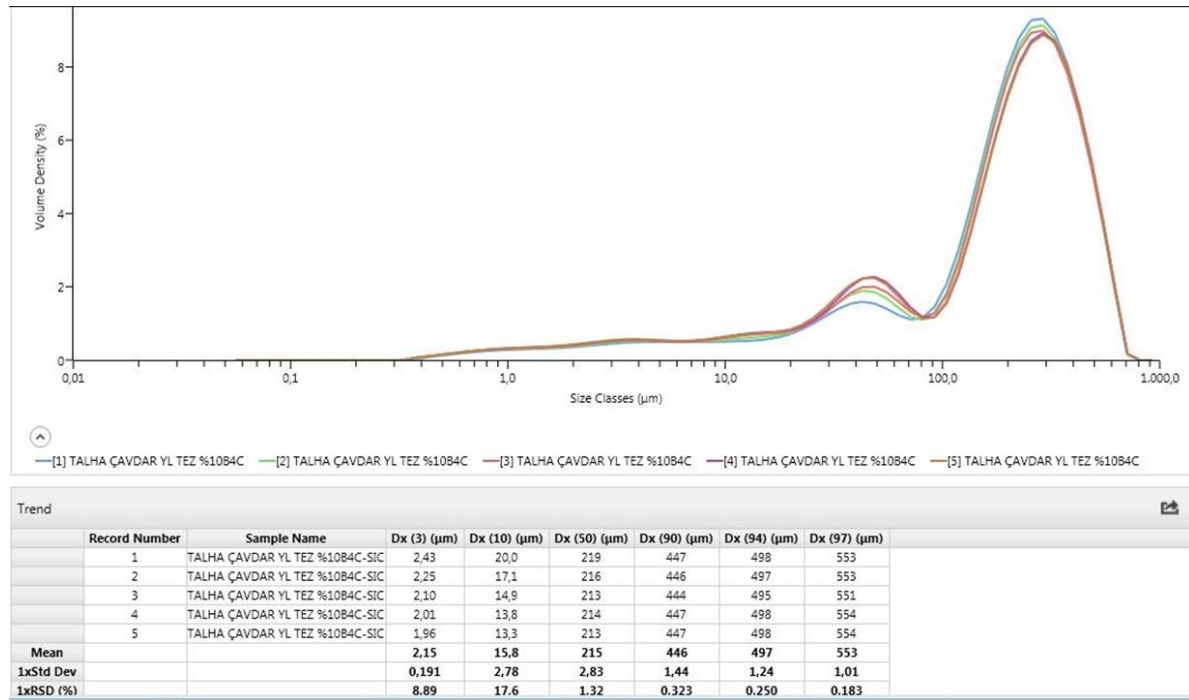


Şekil 3.9. Hazırlanan toz karışımı.

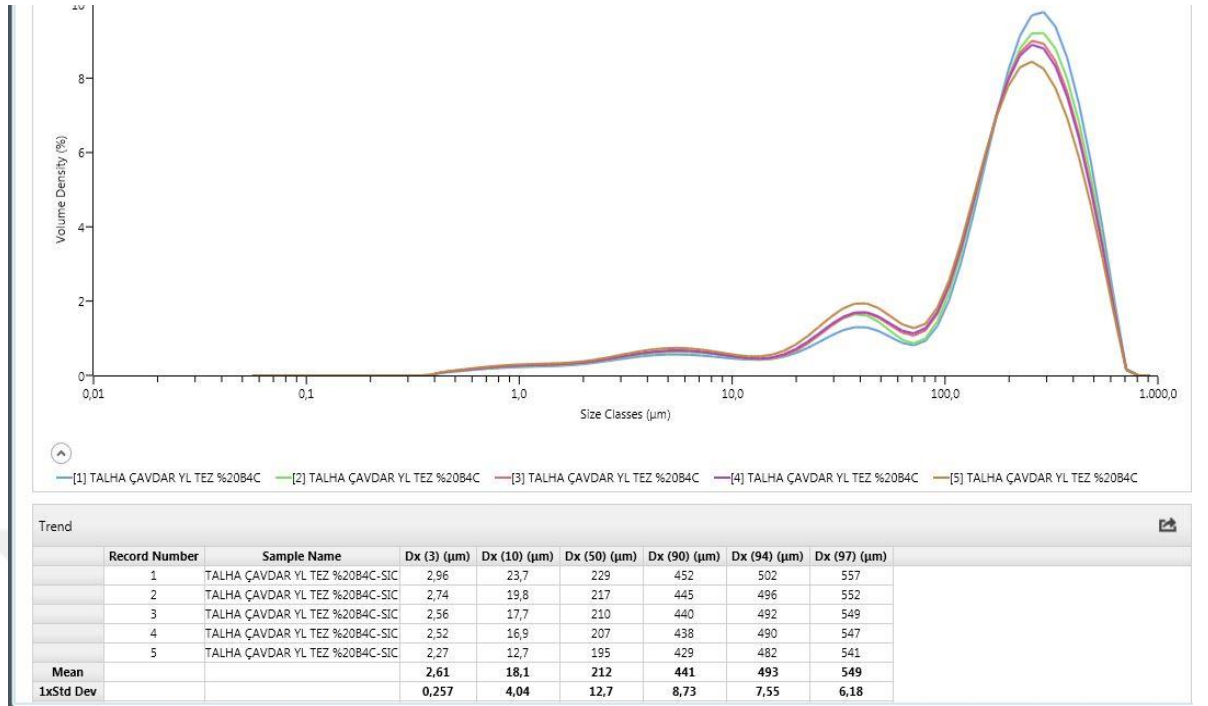


Şekil 3.10. BA0 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.

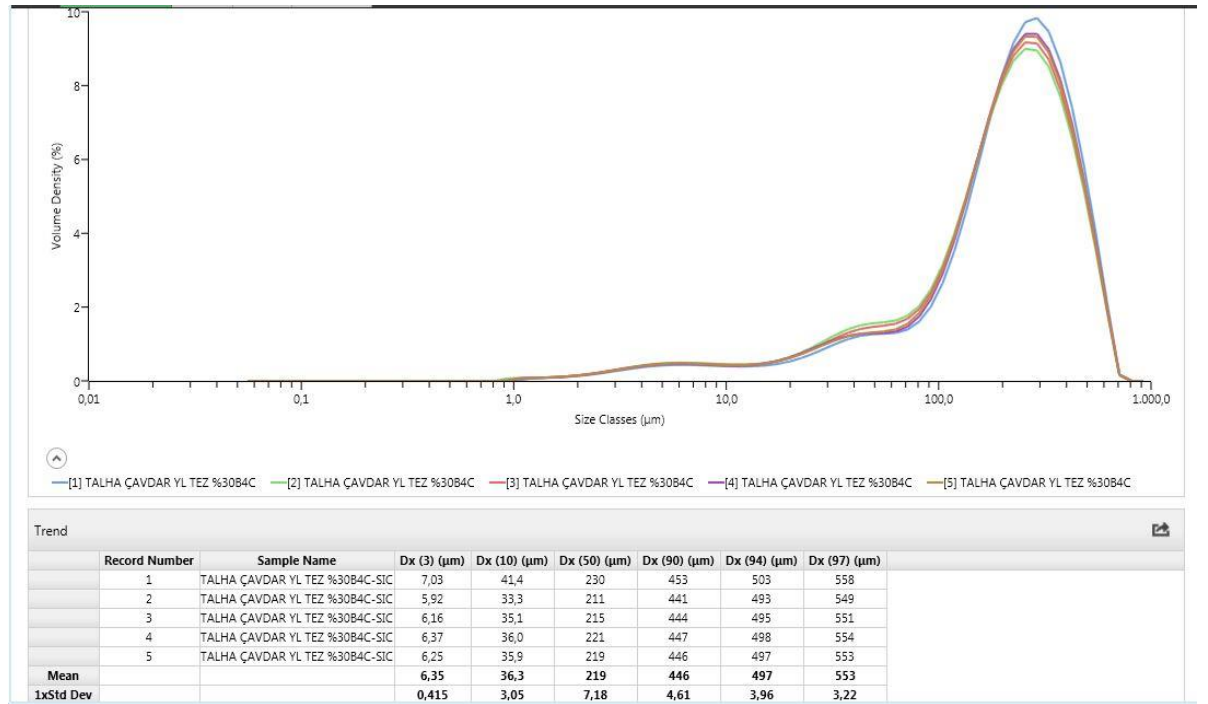
BA0, BA10, BA20, BA30 ve BA40 numunelerine ait tozların elek analizi ölçümlerine göre D50 tane boyutları sırasıyla 206-222 μm (ort. 214± 6,83 μm), 213-219 μm (ort.215± 2,83 μm), 195-229 μm (ort. 212± 12,7 μm), 211-230 μm (ort. 219± 7,18 μm) ve 213-242 μm (ort. 225± 11,2 μm) aralığında değişmekte olup presleme ve sinterleme öncesinde istenen boyut aralıklarında elde edilmiştir.



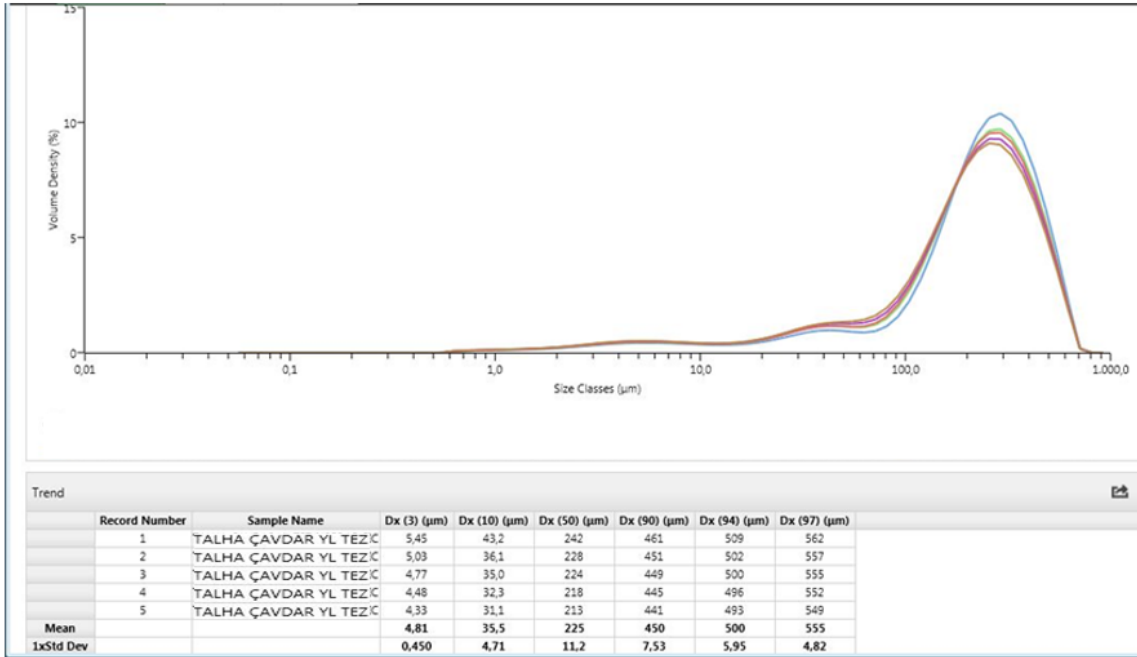
Şekil 3.11. BA10 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.



Şekil 3.12. BA20 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.

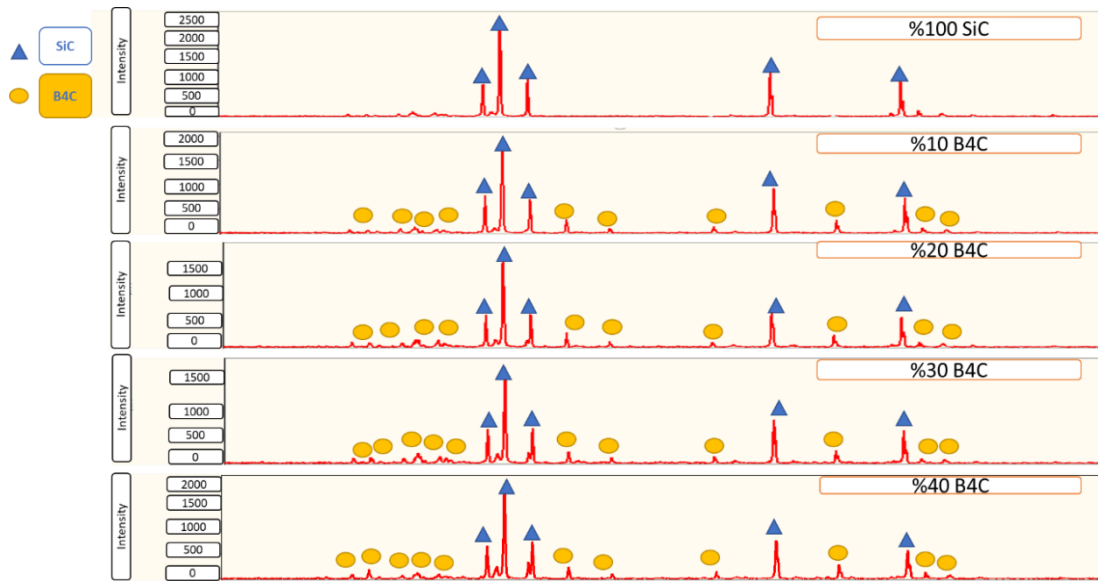


Şekil 3.13. BA30 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.



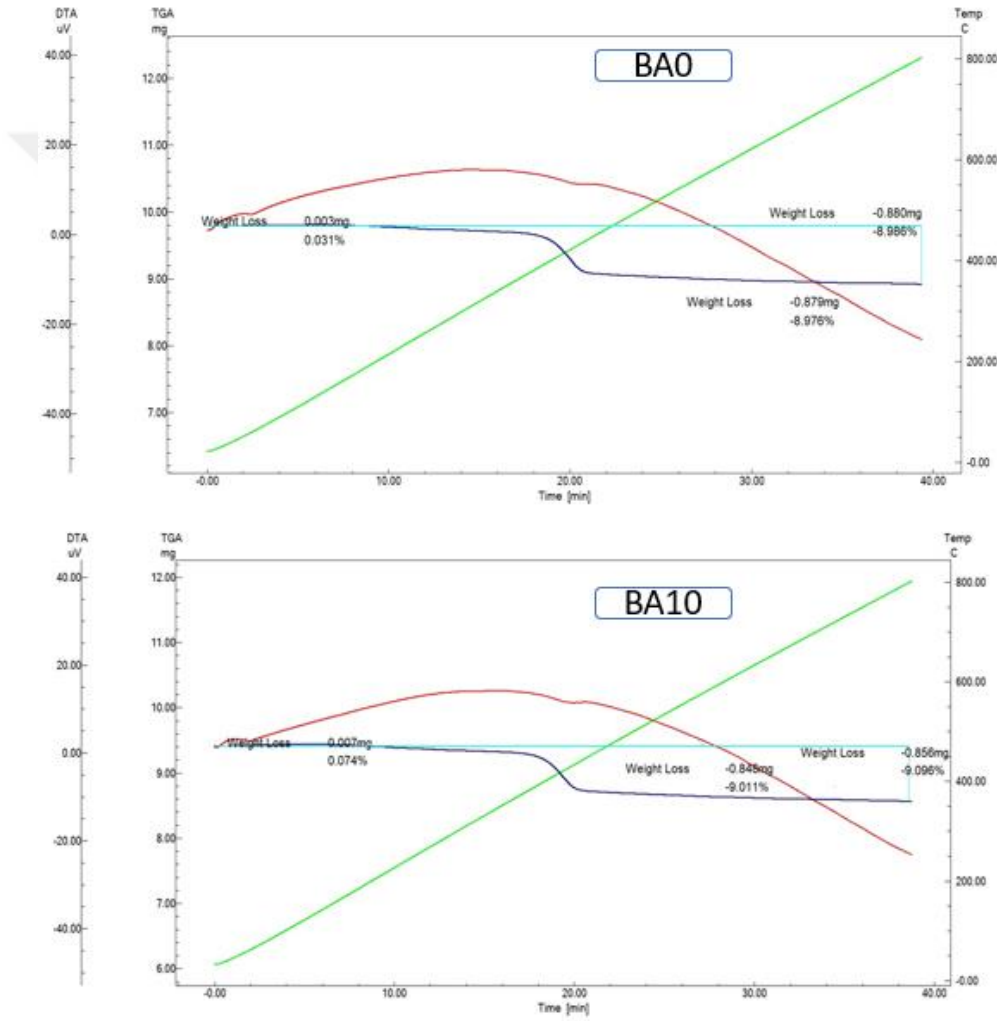
Şekil 3.14. BA40 numunesine ait toz tane boyutu analiz sonucu.

Ayrıca harmanlama işlemi yapılan toz bileşimlerinin x-ışını difraksiyon analizleri gerçekleştirilerek karışımda bulunan paternler belirlenmiş olup, analiz sonuçları Şekil 3.15’de verilmiştir. x-ışını difraksiyon analizi sonucunda toz içeriklerinde SiC, B₄C fazlarının bulunduğu görülmektedir. Aynı şekilde toz karışımlarının termal analizleri gerçekleştirilmiş olup tozlara ait analiz sonuçları Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18’de verilmiştir.

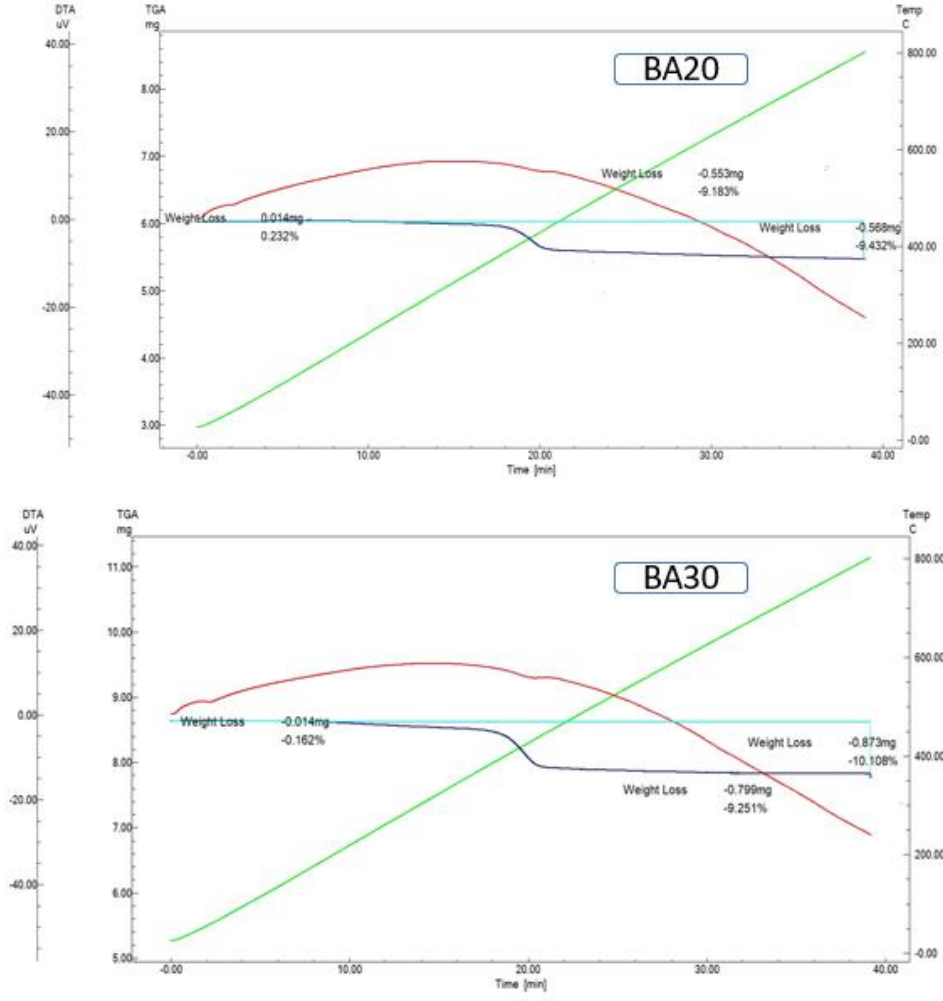


Şekil 3.15. Hazırlanan numunelere ait faz analizleri.

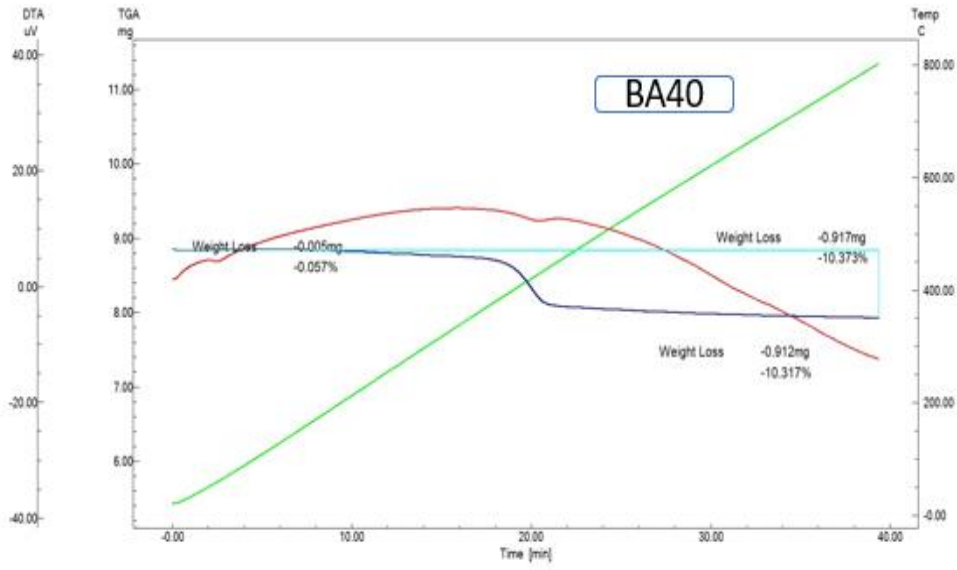
Hazırlanan toz karışımları TG/DTA analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analiz hazırlanan tozlar özelinde 0°C-800°C aralığında 20°C/dk ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda BA0 ve BA10 reçetelerine sahip tozlarda reçete bileşimine göre bağlayıcıların beklenen oranda uçması sonrasında %8,985 ve %9,095 kütle kaybı gerçekleşmiştir. BA20 ve BA30 reçetelerine sahip tozlarda ise beklenen oranda uçan bağlayıcıların kaybı sonrasında kütle kayıpları %9,432 ve %10,106 olarak belirlenmiştir. BA40 bileşimine ait tozlarda ise %10,373 kütle kaybı gerçekleşmiştir.



Şekil 3.16. BA0 ve BA10 reçetelerine ait TG/DTA analizleri.



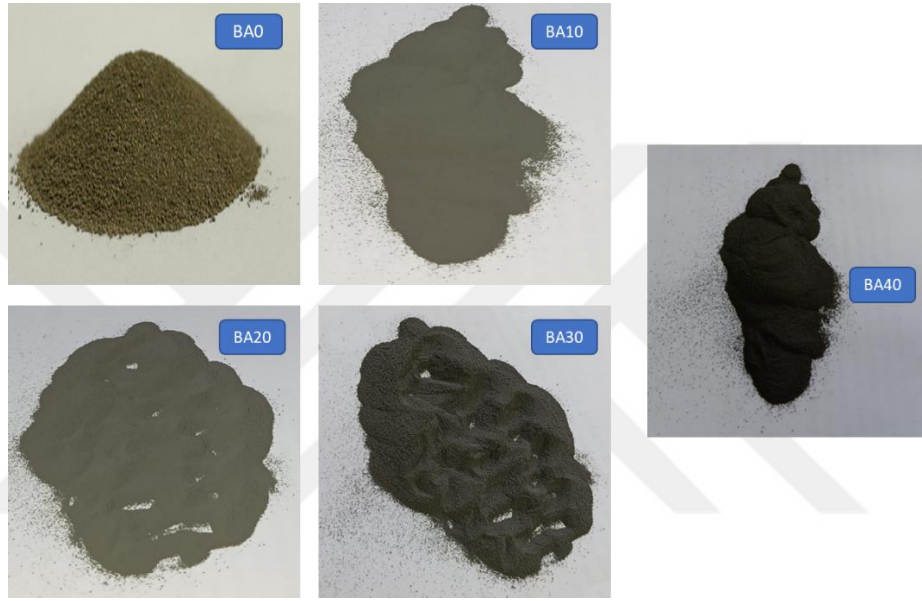
Şekil 3.17. BA20 ve BA30 reçetelerine ait TG/DTA analizlerine ait sonuçlar.



Şekil 3.18. BA40 reçetesine ait TG/DTA analizleri.

3.3. Seramik Kompozit Malzemelerin Şekillendirilmesi ve Sinterlenmesi

5 farklı bileşimde hazırlanan ve Şekil 3.19’da son halleri görülen tozlar, 0,09 kg olarak miktarının ayarlandığı ve 50x50x10 mm boyutlarında elde edilmek üzere otomatik dozaj sistemine sahip preste 62x62 mm çelik kalıplarda soğuk presleme yöntemine göre şekillendirilerek sinterleme işlemi öncesi hazırlanmıştır. Presleme işlemi, Şekil 3.20’de verilen otomatik pres cihazında yukarıda belirtilen boyutlarda numune üretimi için kalıpta 400 kN yük altında cm^2 'ye 115 Mpa olacak şekilde 10 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Farklı bileşimlerle hazırlanan toz numuneleri



Şekil 3.20. Otomatik pres. [66]

Otomatik preste şekillendirilen 62,5x62,5mm boyuttaki seramikler sinterleme işlemi gerçekleştirilmek üzere tablalara dizilerek Şekil 3.21’de gösterilen vakum tipi sinterleme fırınına beslenerek yaklaşık 48 saat bekletilmiştir.



Şekil 3.21. Sinterleme fırını.

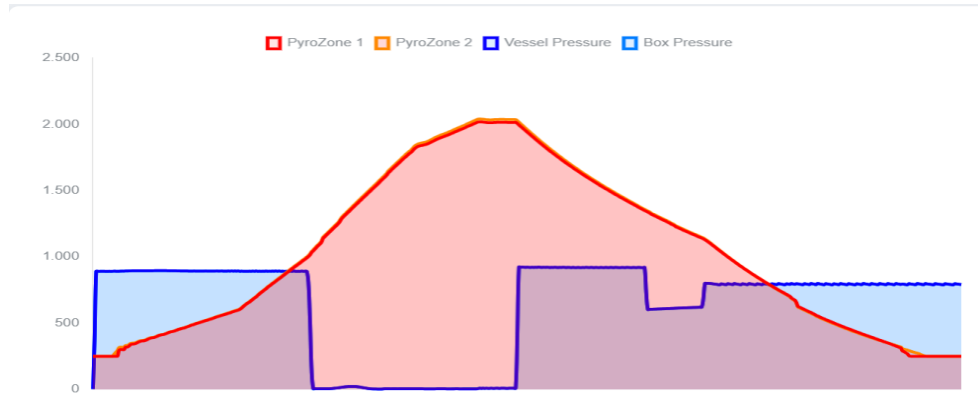
Sinterleme işleminde farklı bileşimlerde hazırlanan ve şekillendirilen numuneler,

- 0°C’den 1000°C’ye 15 saatte getirilmiş,
- 1000°C’den 1800°C’ye 6 saatte getirilmiş,
- 1800°C’den 2030°C’ye 6 saatte getirilmiş, ardından soğuma evresine geçerek kademeli olarak soğumaya bırakılmıştır.

27 saatlik ısınma süresi sonrasında ve 21 saat süren soğuma adımlarıyla birlikte yaklaşık 48 saatlik bir çevrim süresi sonrasında ürünler sinterlenerek fırından çıkarılmıştır. Sinterleme işlemi sonrasında elde edilen 5 farklı bileşime ait bor karbür katkılı silisyum karbür seramik malzemelerin görüntüleri Şekil 3.22’de verilmiştir. Sinterleme süresi boyunca fırın parametreleri kontrol altında tutularak yaşanabilecek olası problemler izlenmiştir. Sinterleme işleminin akım şeması Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Sinterleme sonrası üretilen numunelerin görüntüsü



Şekil 3.23. Sinterleme fırını çevrim grafiği

3.4. Sinterleme Sonrası Karakterizasyon İşlemleri

Bu kısımda üretimi gerçekleştirilen 5 farklı bileşime sahip ürünler için yapılan testler, ölçüm sonuçları ve ürünler üzerinde gerçekleştirilen balistik testlerden bahsedilmiştir.

3.4.1. Presleme sonrası yaş ürünlerde boyut ölçümü

62,5x62,5 mm çelik kalıplarda preslemesi gerçekleştirilen 15 adet numuneye 400 kN yük altında 10 saniye süreyle baskı uygulanmıştır. Presleme işlemi sonrası elde edilen numune ürünlerin boyutsal ölçümleri tek noktadan mikrometre (Şekil 3.24) kullanılarak ölçülmüştür. 5 farklı bileşime ait ürünlerin en-boy ve kalınlık ölçümleri Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Sanayi tipi dijital mikrometre

Tablo 3.4. Presleme sonrası numunelerin boyutları.

Numune Adı	En (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)
BA0	61,41±0,006	61,40±0,010	12,69±0,025
BA10	61,40±0,006	61,41±0,006	12,58±0,006
BA20	61,43±0,012	61,41±0,015	12,61±0,017
BA30	61,44±0,010	61,42±0,021	12,61±0,010
BA40	61,44±0,017	61,42±0,015	12,62±0,021

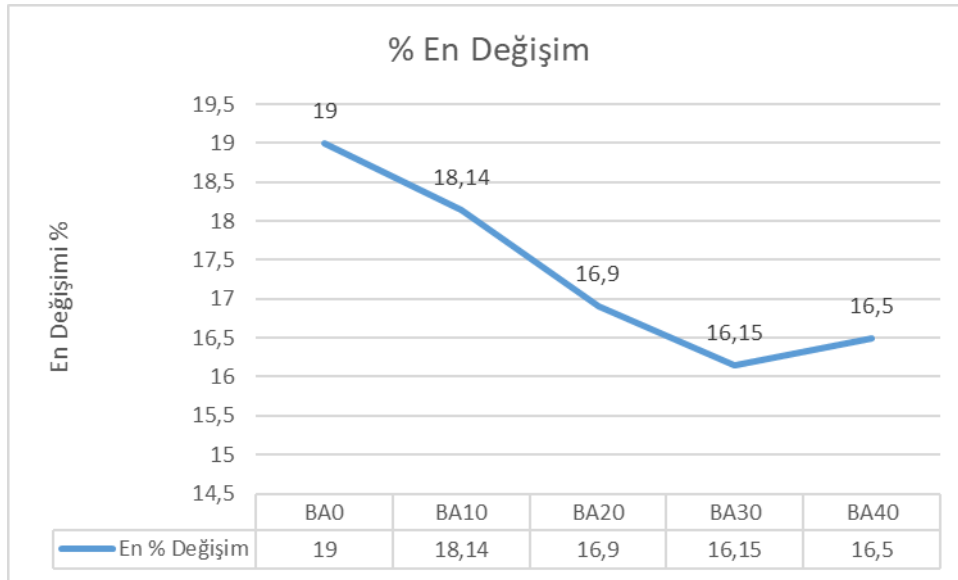
3.4.2. Sinterleme sonrası boyut ölçümleri

Preslenen ve 2030°C sıcaklıkta 48 saatlik çevrim sonucunda sinterleme işlemine tabi tutulan 5 farklı reçeteye sahip ürünlerin mikrometre ile 3 farklı numuneden yapılan en, boy ve kalınlık ölçüm boyutları Tablo 3.5'te verilmiştir. Sinterleme işlemi sonrasında yaş haldeki ürünlerde büzülme nedeniyle ürünler yaklaşık olarak 50x50x10 mm ebatlarında ölçülmüştür.

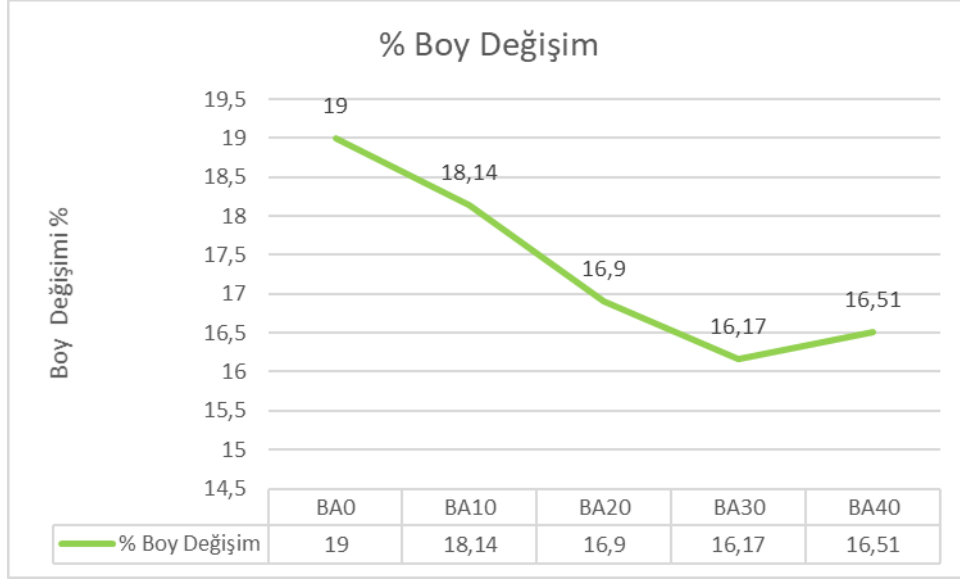
Tablo 3.5. Sinterleme sonrası numunelerin boyutları.

Numune Numarası	En (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)
BA0	49,74±0,006	49,73±0,010	10,28±0,026
BA10	50,26±0,006	50,27±0,001	10,29±0,006
BA20	51,04±0,006	51,03±0,010	10,48±0,012
BA30	51,51±0,010	51,49±0,012	10,57±0,010
BA40	51,30 ±0,017	51,28±0,015	10,53±0,017

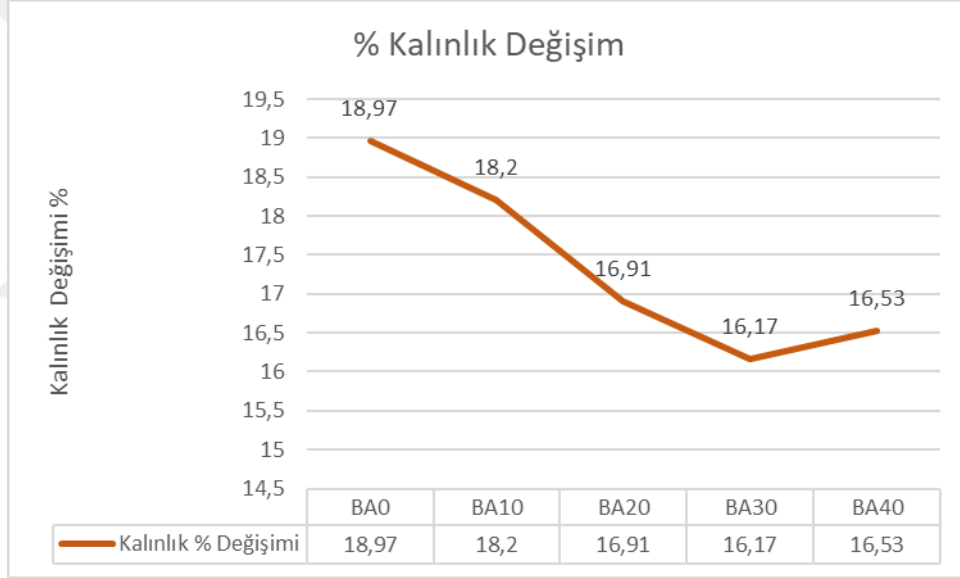
Sinterleme sonrası tüm numunelerin ölçülen boyutlarındaki % küçülme miktarlarının bileşime bağlı olarak değişimi Şekil 3.25.-3.27'de verilen grafiklerde görülmektedir.



Şekil 3.25. Yüzdesel olarak en (mm) değişimi.



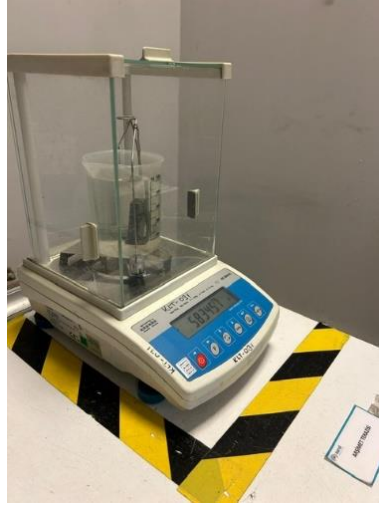
Şekil 3.26. Yüzdesel olarak boy (mm) değişimi.



Şekil 3.27. Yüzdesel olarak kalınlık (mm) değişimi.

3.4.3. Sinterleme sonrası yoğunluk ölçümleri

Hazırlanan ürünlerin yoğunluk ölçümleri Arşimet metodu kullanılarak Şekil 3.28’de görülen terazi ve düzenekte gerçekleştirilmiştir. Numunelerin öncelikli olarak havadaki ağırlığı alınmış, akabinde metal cımbızla suya daldırılarak sudaki ağırlığı alınmıştır. Arşimet yönteminde sıvının sıcaklığı ve tipi önem arz etmesinden dolayı saf su kullanılmış olup saf suyun sıcaklığı 20°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.28. Hassas terazi ve Arşimet yoğunluk ölçüm düzeneği

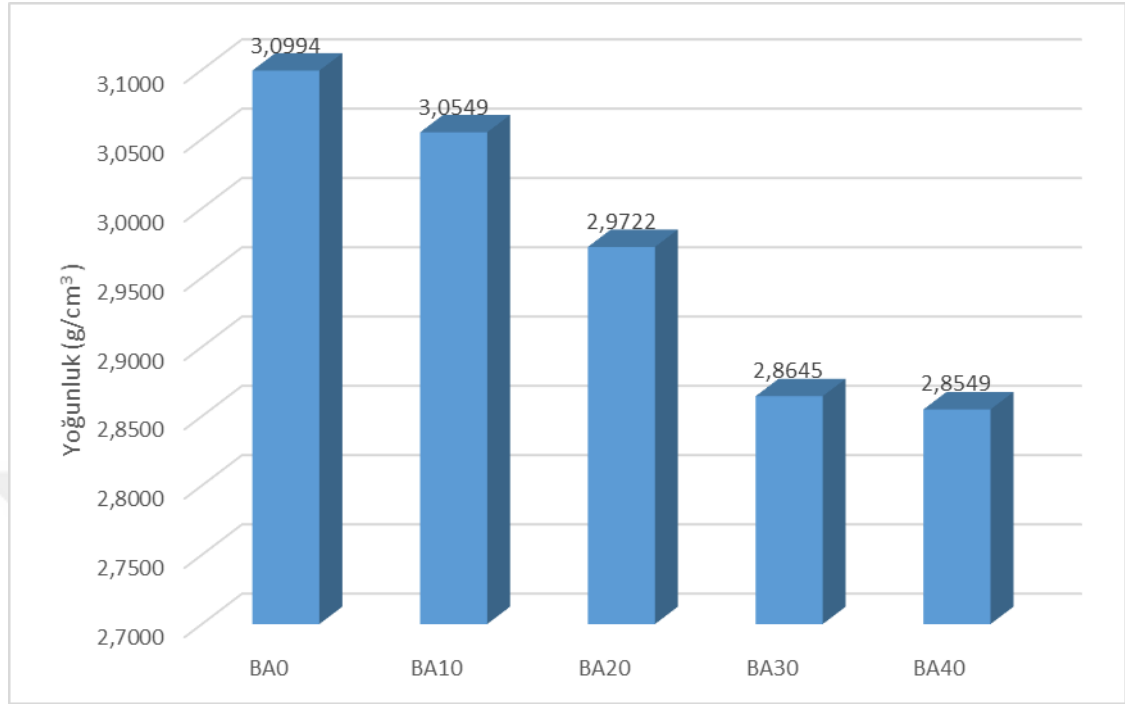
5 farklı bileşimde hazırlanarak preslenen ve sinterlenen numunelerin yoğunluk ölçümleri sonrasında elde edilen değerleri Tablo 3.6.'da görülmektedir.

Tablo 3.6. Sinterleme sonrası seramiklere ait yoğunluk değerleri.

Numune Numarası	Yoğunluk (g/cm ³)
BA0	3,0994±0,001
BA 10	3,0549±0,001
BA 20	2,9722±0,001
BA 30	2,8645±0,001
BA 40	2,8549±0,006

BA0-BA40 reçetelerine sahip numunelerin ortalama yoğunluk değerleri 2,8549±0,006-3,0994±0,001 g/cm³ arasında değişmektedir. Turatti ve arkadaşlarının [72] yapmış olduğu çalışmalarda bor karbürün yoğunluğunun 2,52 g/cm³ değerinde olduğu, aynı şekilde Büyük ve arkadaşlarının [73] ve Vargas ve arkadaşlarının [74] çalışmalarında B₄C-SiC esaslı kompozitlerle ilgili olarak yaptıkları yoğunluk değerlerinin sırasıyla 2,3934-2,4961 g/cm³ ve 2,5-3,2 g/cm³ aralıklarında olduğu görülmektedir. Tablo 3.6.'da da görüldüğü üzere deneysel çalışmalarda elde edilen yoğunluk değerlerinin literatürde yer alan çalışmalarla uyum içerisinde olduğu

görülmektedir. 5 farklı bileşime ait reçeteye ait numunelerin yoğunluk değerleri Şekil 3.29’da görülmektedir.



Şekil 3.29. Farklı bileşimdeki numunelerin yoğunluk değerleri.

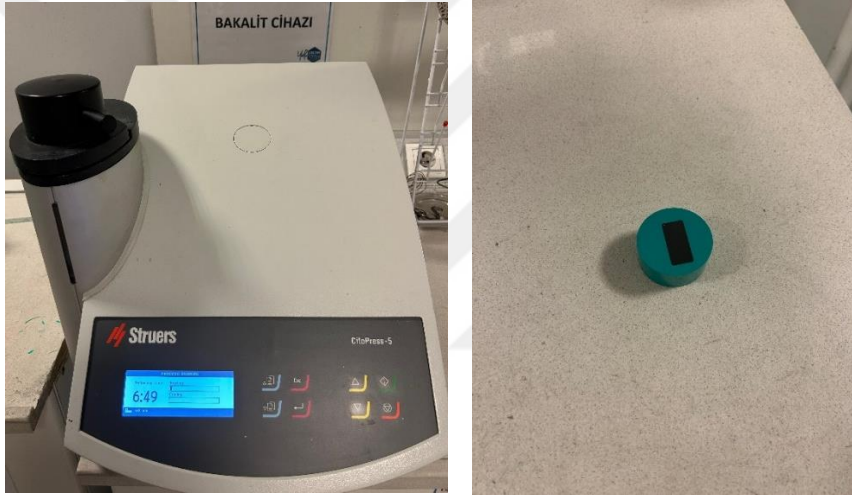
3.4.4. Optik ve SEM Mikroyapı incelemeleri

Sinterleme sonrasında elde edilen 5 farklı reçeteye sahip ürünlerin mikroyapı incelemelerini gerçekleştirmek için numuneler öncelikle metalografik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin ilk aşamada kesme işlemi Şekil 3.30’de verilen cihazda yapılarak incelemeleri kolaylaştırmak için bakalite alma cihazında (Şekil 3.31) kalıplanmıştır. Ardından numuneler otomatik zımpara cihazı (Şekil 3.32) ile zımparalama ve parlatma aşamalarından geçirilerek optik mikroskop (Şekil 3.32) ve SEM kullanılarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin optik mikroyapı incelemelerinde sinterleme işleminin büyük oranda gerçekleştiği görülmüş olup, mikroyapılarda çeşitli ebatlarda porozitelere (mikro) de rastlanmıştır. Görülen porozite miktarları balistik uygulamalarda kullanılmaya uygun değerlerde kabul edilebilir seviyededir. Mikroyapı incelemelerinde çatlak ve delaminasyon problemleri görülmemiştir. Numunelerin bileşime göre optik mikroyapıları Şekil 3.33’de ayrıca Şekil 3.34’te SEM mikroyapıları görülmektedir.



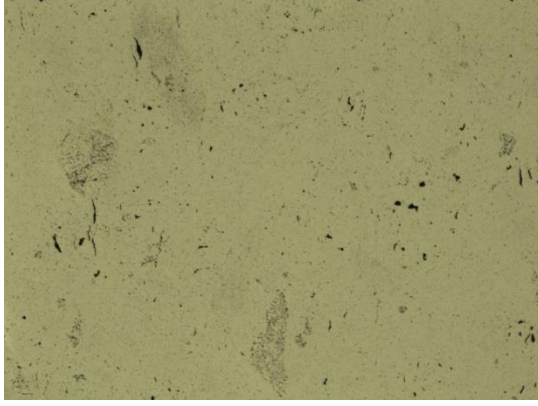
Şekil 3.30. Kesme cihazı.



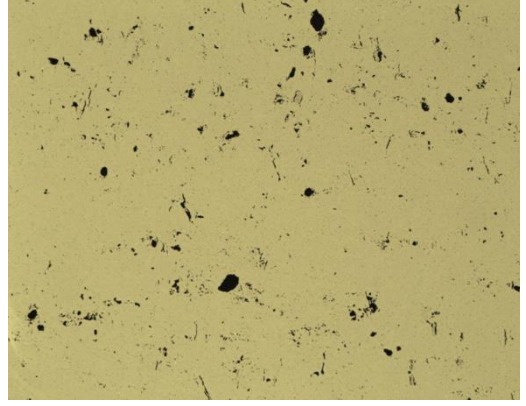
Şekil 3.31. Bakalitleme cihazı ve kalıplanmış numune.



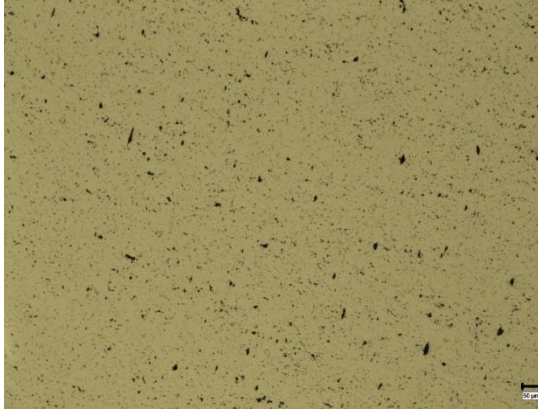
Şekil 3.32. Otomatik zımparalama-parlatma cihazı ve Optik Mikroskop.



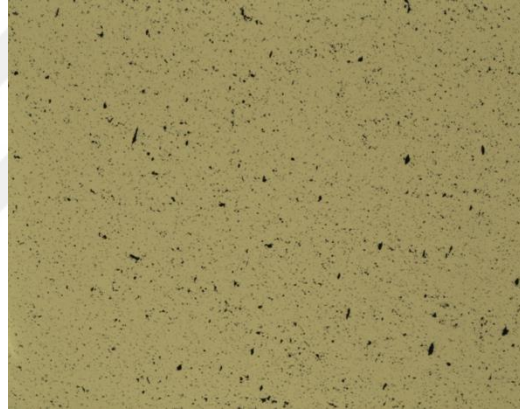
(a)



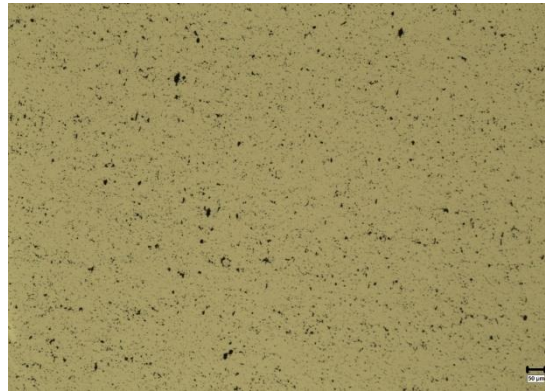
(b)



(c)

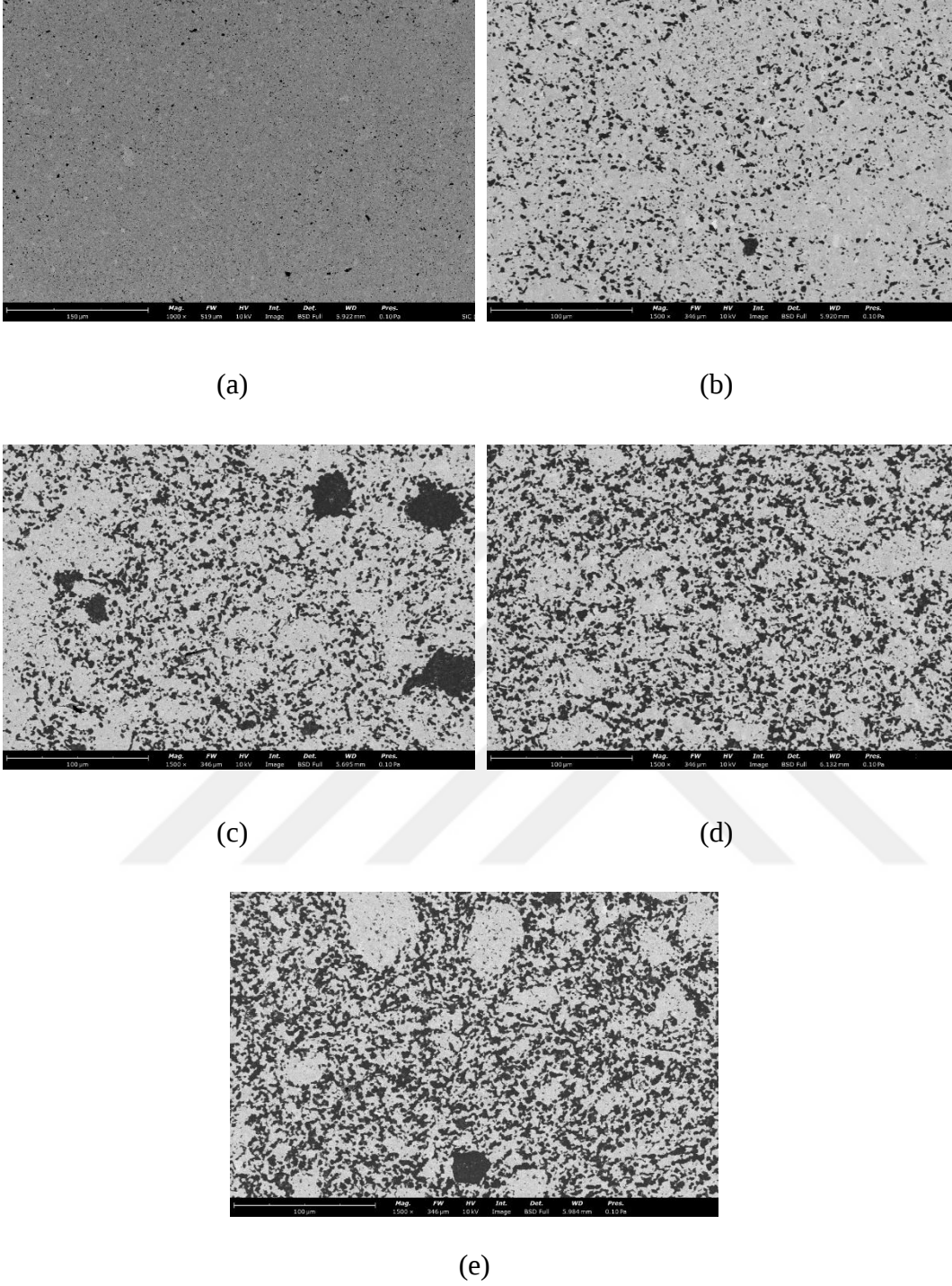


(d)



(e)

Şekil 3.33. (a) BA0, (b) BA10, (c) BA20, (d) BA30 ve (e) BA40 numunelerinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 3.34. (a) BA0, (b) BA10, (c) BA20, (d) BA30 ve (e) BA40 numunelerinin SEM mikroyapı görüntüleri

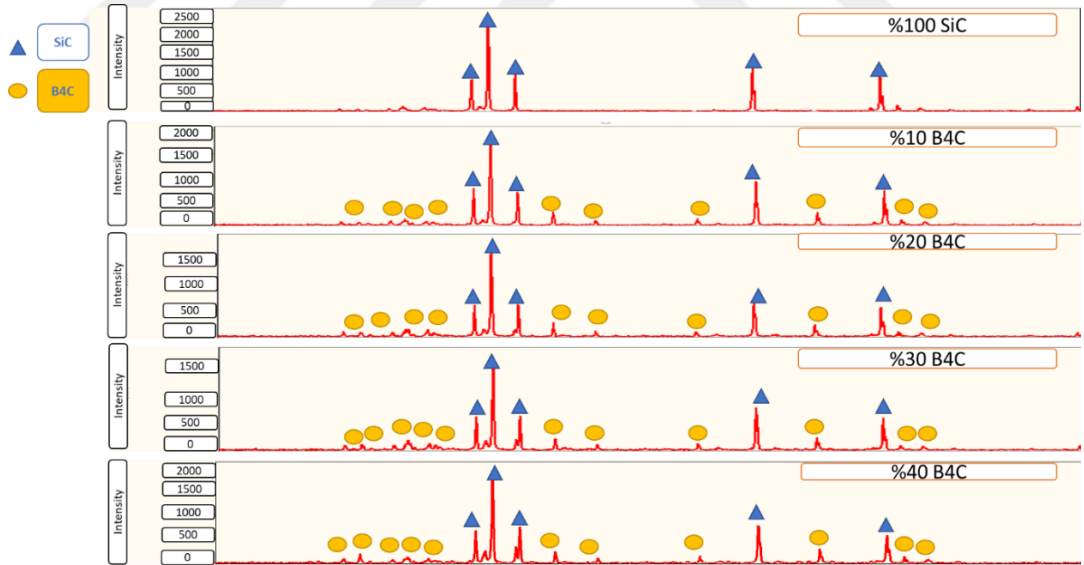
3.4.5. Faz analizleri

Sinterleme işlemi sonrasında numunelerin Şekil 3.35’de verilen Rigaku marka cihazla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Cu-K α ($\lambda=1,5406\text{\AA}$) dalga boyu ve faz

kartları kullanılarak yapılmıştır. Tüm bileşimlere ait XRD analiz sonuçları ve paternleri Şekil 3.36'da görülmektedir. Analiz sonuçlarında tüm bileşimlerde SiC ve B₄C fazlarının oluştuğu belirlenmiş olup, bileşime bağlı olarak pik şiddetlerinde küçük değişimler olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar beklenen katı ve istenen faz yapısına sahip ürünler olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 3.35. Rigaku marka XRD cihazı.



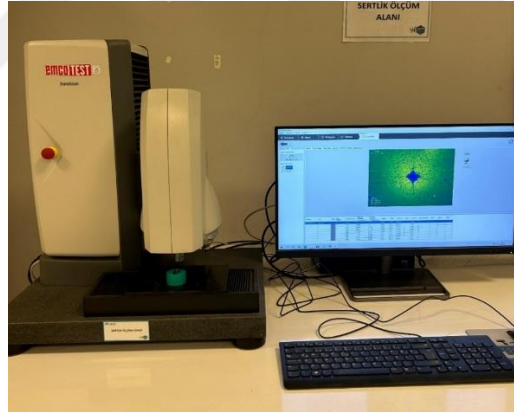
Şekil 3.36. Sinterlenmiş numunelere ait XRD analizi.

3.4.6. Sertlik incelemeleri

%40 oranına kadar B₄C ilave edilen SiC esaslı seramik numuneleri sertlik ölçümleri emcoTest Durascan marka (Şekil 3.37) cihazda kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan her bir reçetede test tekrarlanmıştır. Ölçümler tüm numunelerde üç farklı noktadan alınmış olup vickers sertlik ucu kullanılarak 1000g yük altında gerçekleştirilmiştir. 5 farklı bileşimdeki numulere ait sertlik değerleri Tablo 3.7’de verilmektedir.

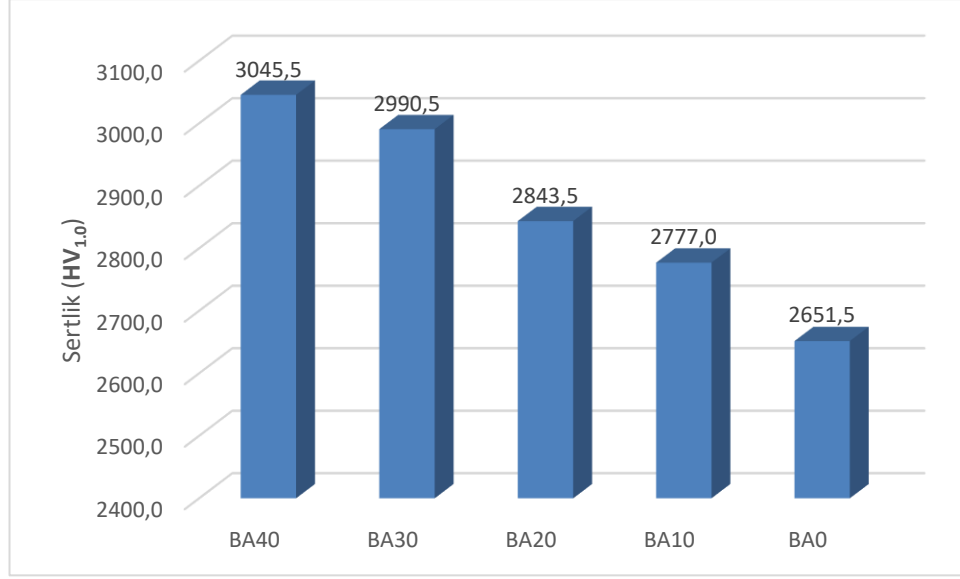
Yapılan sertlik ölçümlerinde elde edilen sertlik değerleri Şekil 3.38’de görülmektedir. Üretilen numunelerde 3 farklı noktadan alınan ölçümlere göre en düşük sertlik değeri $2652,7 \pm 2,52 \text{ HV}_{1.0}$ ile BA0 reçetesinde görülürken maksimum sertlik değeri $3043,7 \pm 8,14 \text{ HV}_{1.0}$ ile BA40 reçetesinde belirlenmiştir. B_4C oranı arttıkça seramik malzemenin sertliği artmaktadır Vargas ve arkadaşlarının [74] B_4C -SiC esaslı kompozit malzemeler üzerine yapmış oldukları çalışmada $2308,1 \pm 88$ – $2646,3 \pm 62,6 \text{ HV}$ sertlik değerlerine sahip olduğu görülmekte olup yapılan deneysel çalışmada bu sertlik değerlerinden daha yüksek değerlere çıkıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmada B_4C oranının artışına bağlı olarak sertlikte yaklaşık %15 oranında artış olduğu belirlenmiş olup, B_4C oranına bağlı olarak sertlikteki % değişim Şekil 3.39’da görülmektedir.



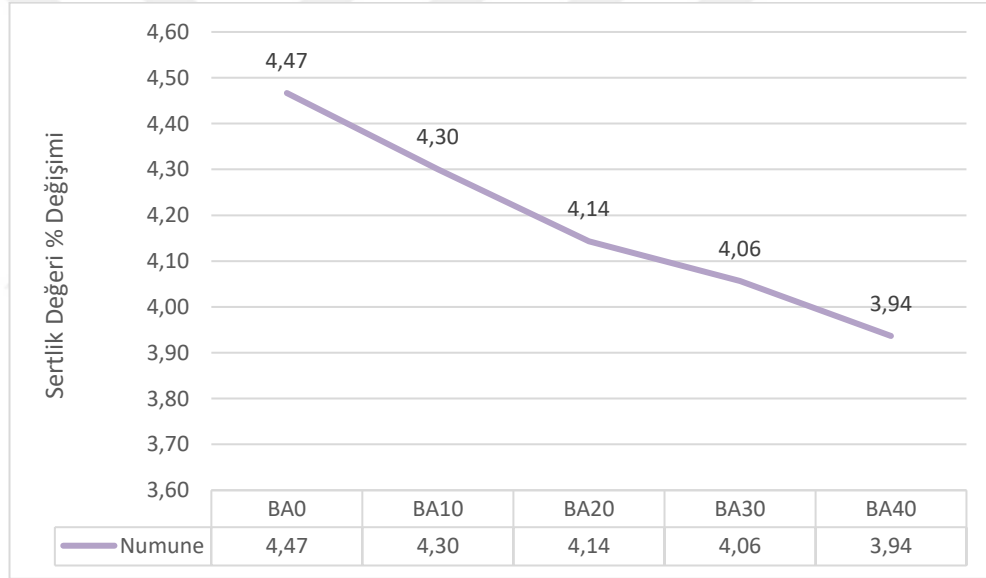
Şekil 3.37. Emco test durascan sertlik ölçüm cihazı.

Tablo 3.7. Sinterleme sonrası sertlik değerleri.

Numune No	Sertlik ($\text{HV}_{1.0}$)
BA0	$2652,7 \pm 2,52$
BA10	$2774,7 \pm 4,16$
BA20	$2841,3 \pm 4,04$
BA30	$2989,0 \pm 2,65$
BA40	$3043,7 \pm 8,14$



Şekil 3.38. Sertlik değerlerindeki değişim.



Şekil 3.39. Sertlik değerlerindeki % değişim.

3.4.7. Üç nokta eğme ve kırılma tokluğu ölçümleri

Hazırlanan numunelerin eğme ve basma testlerinde aşağıda görseli bulunan Zwick roell çekme ve basma cihazı (Şekil 3.40) kullanılmıştır. Yapılan ölçümler TS EN ISO 7438 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Testte 2 noktadan sabitlenmesi sağlanan numuneye orta noktadan uygulanan yükle meydana gelen deformasyon ve hasar değerleri ölçülmüş, numunelerdeki eğme direnci bu şekilde hesaplanmıştır. Ayrıca aynı cihazda ürünlere orta noktadan 100 kN yük uygulanarak kırılma tokluğu değerleri tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 3.8’de verilmiştir.

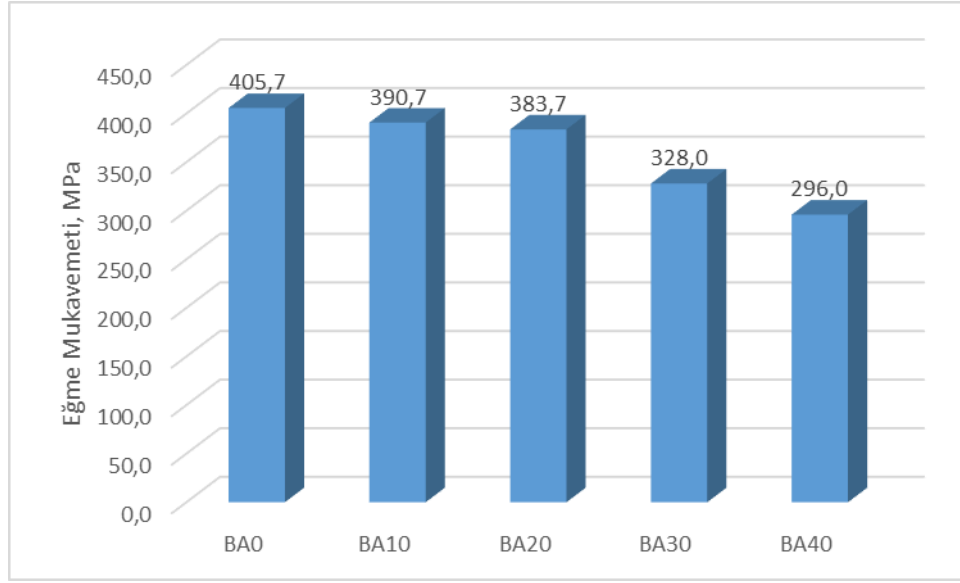


Şekil 3.40. Zwick basma ve çekme cihazı.

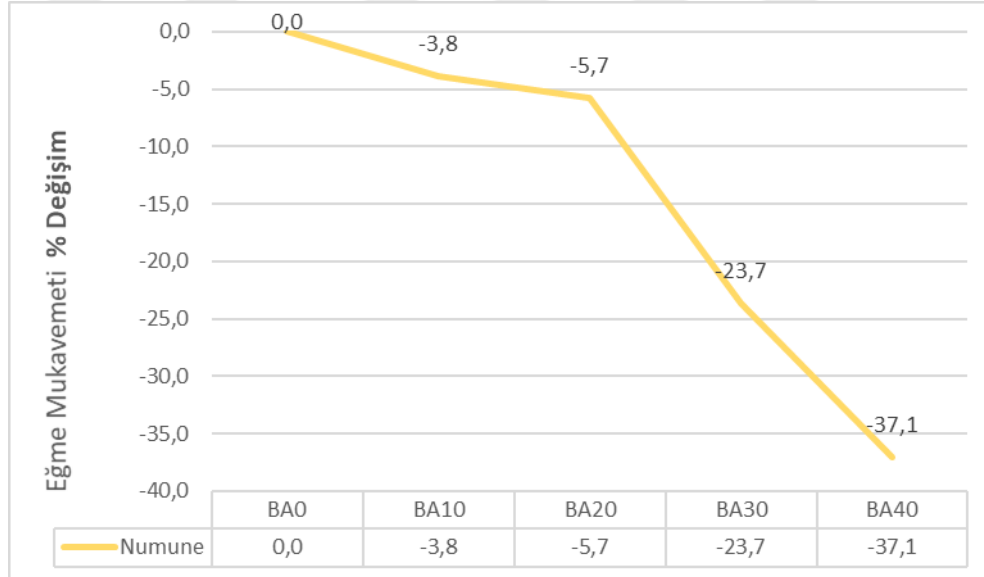
Tablo 3.8. Eğme mukavemeti ve kırılma tokluğu değerleri.

Numune No	Eğme Mukavemeti (MPa)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})
BA 0	405,7	4,47
BA 10	390,7	4,30
BA 20	383,7	4,14
BA 30	328	4,06
BA 40	296	3,94

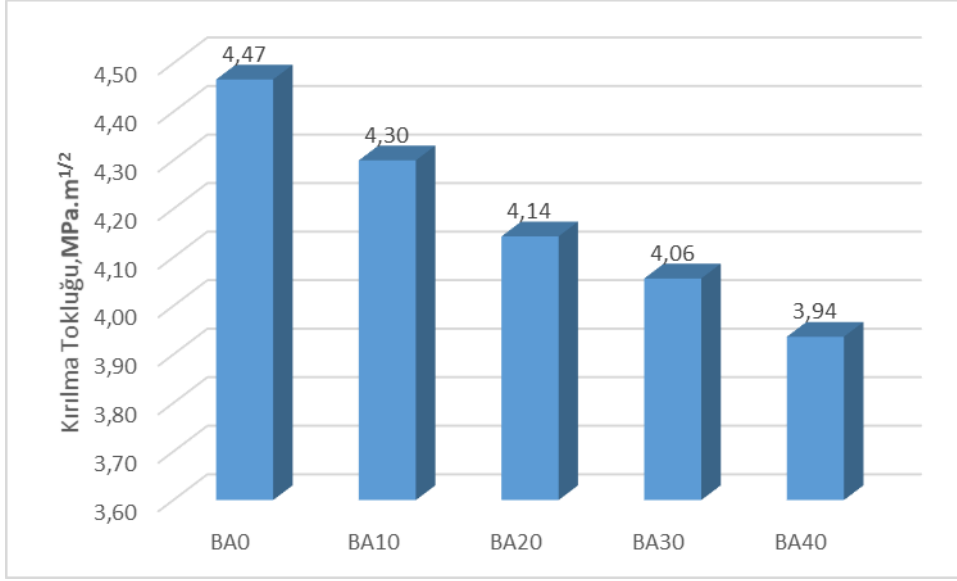
BA0 reçetesine sahip numunenin eğme mukavemeti diğer numuneler arasında en yüksek değere sahiptir. Reçete bileşimindeki değişimin eğme mukavemeti ve kırılma tokluğu değerlerine etkisi tabloda görülmektedir. Buna göre eğme mukavemeti değerleri 296- 405,7 MPa arasında, kırılma tokluğu ise 3,94-4,47 MPa.m^{1/2} arasında değişmektedir. Kırılma tokluğu ölçümleri ISO 28079:2009 standardı referans alınarak yapılmıştır. 3 noktadan yapılan eğme testi sırasında oluşan çatlak boyu test cihazında hesaplanarak tokluk değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda B₄C oranının artışına bağlı olarak kırılma tokluğu değerlerinin azaldığının görülmesine rağmen Pittari ve arkadaşlarının [75] çalışmalarında bulunan 2,4-4,1 MPa.m^{1/2} aralığındaki kırılma tokluğu değerleri ve Vargas ve arkadaşlarının [74] yapmış oldukları çalışmalarda elde edilen 2,48-2,90 ±0,39 Mpa.m^{1/2} değerleri ile kıyaslandığında yapılan tez çalışmasında daha yüksek kırılma tokluğu değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Numunelerin bileşimine bağlı olarak eğme mukavemetlerindeki ve kırılma tokluğundaki değişimler ve bu değişimin % oranları sırasıyla Şekil 3.41-42 ve Şekil 3.43-44'de görülmektedir.



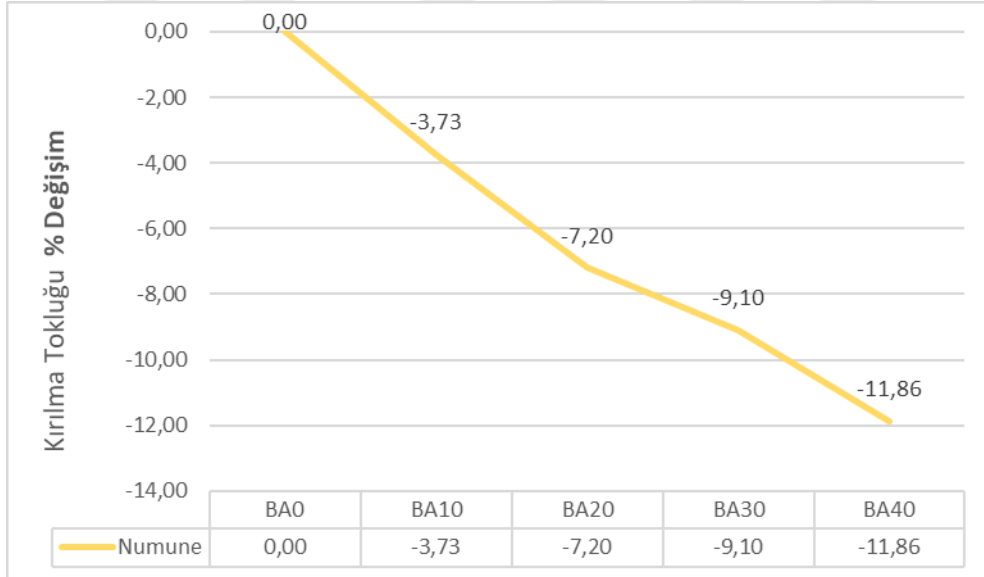
Şekil 3.41. Reçete tipine göre eğme mukavemeti değerleri.



Şekil 3.42. Reçete tipine göre eğme mukavemeti yüzde değişimi.



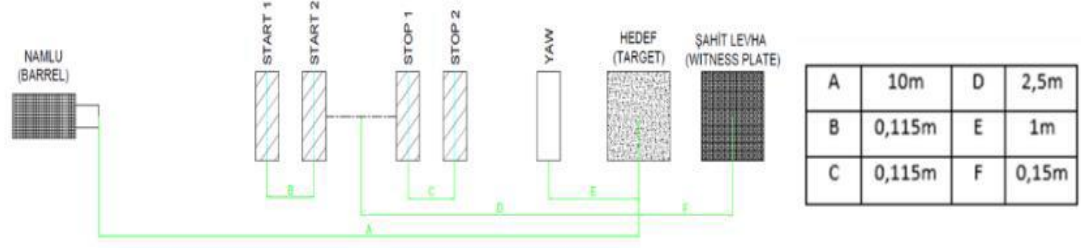
Şekil 3.43. Reçete tipine göre kırılma tokluğu değerleri.



Şekil 3.44. Kırılma tokluğu yüzde değişimi.

3.4.8. Balistik testler

Bu deneyde TS EN 1522 ve NIJ 0101.06 standartları referansıyl atış numuneleri hazırlanmıştır. TS EN 1522'ye göre NIJ 0101.06 ve FB7'ye göre seviye III balistik güvenlik seviyesine göre deney numuneleri hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. İlgili test düzeneği Şekil 3.45'da verilmiştir. Yapılan testlerde atış düzeneğinde yer alan namlu 50 m mesafede hareket kabiliyetine sahiptir. Namlu 9,19'dan 14,5x114 kalibreye kadar olan mühimmatlarla atış yapma kabiliyetine sahiptir. Balistik test laboratuvarı gereken tüm kalite standartlarına akredite olup ilgili laboratuvar görseli Şekil 3.46'de verilmiştir.



Şekil 3.45. Balistik test düzeneği.



Şekil 3.46. Balistik test Laboratuvarı.

Balistik test laboratuvarında bulunan yüksek hız kamerası ihtiva ettiği ışık bariyeri sayesinde atış yapılan merminin hızını ölçebilmektedir. Kullanılan mühimmatlar MKE tarafından tedarik edilmiş olup 60 HRC çekirdek sertliğinde ve 9,7 gram ağırlıktadır. Mühimmatın ucu kurşun kaplamalı, sertleştirmeye tabi tutulmuş çelik çekirdekli ve pirinç kasa içinde bakır kılıflı zırh delici mermiye sahip bir mühimattır. Boyutu 20 mm'dir.

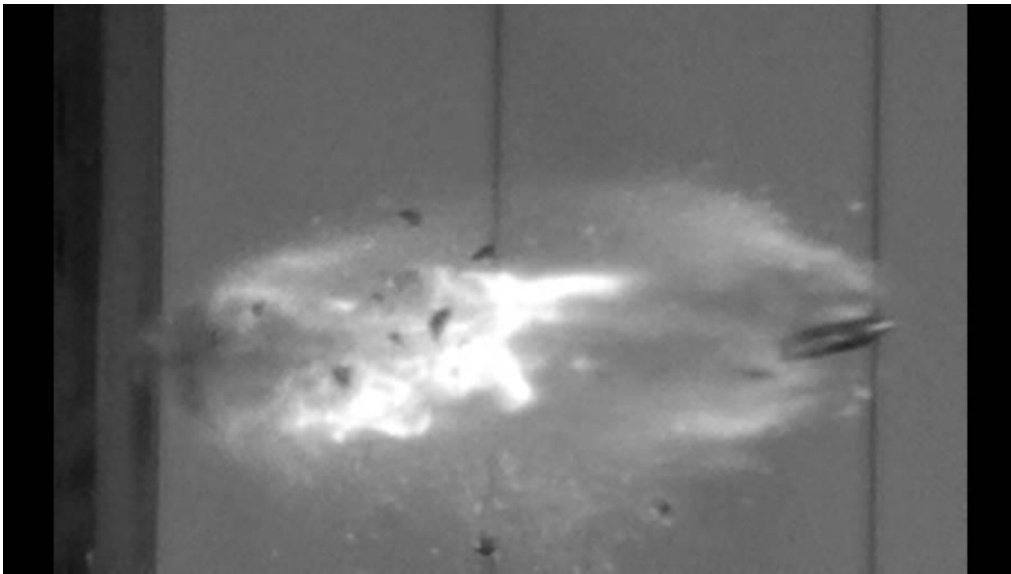
Atış yapılacak numune test düzeneğine bağlanmış ve akabinde TS 1522 FB7 koruyuculuk seviyesinde 10 metre mesafeden uzaktan kumanda yardımıyla atışa tabi tutulmuştur. Atış esnasında düzenekte yer alan hız sensörleri ile 2 m mesafeden hız okumaları yapılarak hızlı kamera yardımıyla kayıtları alınmıştır. Balistik testlere ait hız değerleri Tablo 3.9 ve atış yapılan BA0 ve BA40 numunelerine ait görüntüler Şekil 3.47, 3.48 ve 3.49'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Balistik test sonuçları.

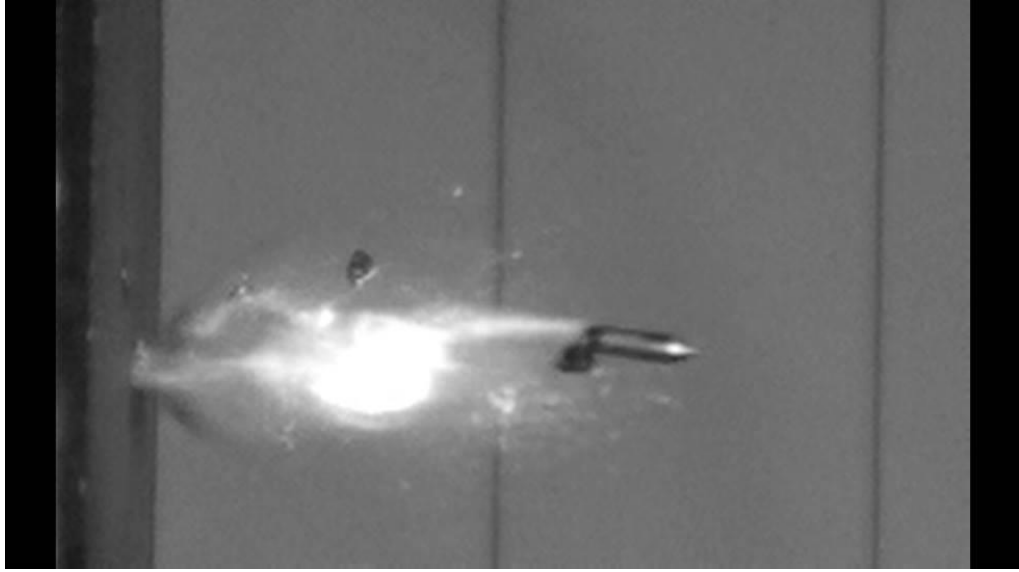
No	Test No	Seri No	Mühimmat	Numune Adı	Boyutsal Ölçü			Barut Gramaj (g)	Mermi Ağırlığı(g)	Hız (m/sn)
					En (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)			
1	NTG-24-0206-1	1	7,62x63M2 AP	BA40	49,8	49,8	78,3	48,50	10,144	882,56
2	NTG-24-0206-2	2	7,62x63M2 AP	BA30	50,26	50,27	79,2	48,50	10,524	891,51
3	NTG-24-0206-4	4	7,62x63M2 AP	BA20	50,98	50,96	79,7	48,50	10,626	879,8
4	NTG-24-0206-5	5	7,62x63M2 AP	BA10	51,51	51,48	80,3	48,50	10,590	880,2
5	NTG-24-0206-6	6	7,62x63M2 AP	BA0	51,31	51,28	80,1	48,50	10,620	875,3



Şekil 3.47. Atış temas öncesi kamera görüntüsü.



Şekil 3.48. BA40 numunesi hızlı kamera görüntüsü.



Şekil 3.49. BA0 numunesi hızlı kamera görüntüsü.

Hız testleri üzerinde yapılan incelemelerde Numune BA0'ın 20 mm olarak ölçülen çekirdek boyu seramikle temas sonrasında arka tarafa 12 mm geçmiştir. Numune BA10'de çekirdek geçiş boyu 13 mm, Numune BA20'de çekirdek geçiş boyu 11 mm, Numune BA30'de 9 mm ve BA40'de 8 mm olarak ölçüm sağlanmıştır. Hazırlanan seramik numuneler balistik testlerinde beklenen performansları sağlamıştır. Çalışmada üretilen ürünlerin genel olarak personel zırh koruyucularında ve araç zırh panellerinde kullanıma uygun olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca ürünlerin sahip olduğu düşük yoğunluğun bu alanda kullanım avantajı sağlayacağı düşünülmektedir.



4. GENEL SONUÇLAR

- Bu çalışmada temel amaç, silisyum karbür matrisli teknolojik seramiklere bor karbür ilavesinin sinterleme sonrasında mekanik özelliklere etkisi/katkısı ve hazırlanan ürünün balistik dayanımının belirlenmesi olmuştur. Gerek numune üretimi, gerekse karakterizasyon çalışmaları Nurol Teknoloji laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.
- Silisyum Karbür'e %0-10-20-30-40 Bor Karbür ilavesiyle hazırlanan reçeteler soğuk pres ortamında şekillendirilmiş ve yaklaşık 2050°C'de sinterlenmiştir. Deneyler 5 farklı reçetede ve 15 farklı numune hazırlanarak yapılmıştır. Elde edilen numuneler yoğunluk, sertlik, eğme ve kırılma tokluğu değerlerini tespit etmek amacıyla testlere tabi tutulmuştur.
- Hazırlanan reçetelerde bor karbür miktarı arttıkça görülen yoğunluk değeri azalmaktadır. En yüksek yoğunluk değeri %100 SiC içeren numunede $3.0994 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülürken %40 Bor karbür ilavesi yapılan reçetede $2,8549 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.
- Hazırlanan reçetelerde eğme mukavemetinin bor karbür oranındaki artışla azaldığı gözlenmiştir. En yüksek değer %100 SiC numunede 405,7MPa %60SiC-%40 B₄C reçeteli üründe ise 296 Mpa olarak ölçülmüştür. Kırılma tokluğu değerleri B₄C oranının artışına bağlı olarak azalmakta olup $3,94\text{-}4,47 \text{ MPa.m}^{1/2}$ arasında değişmektedir.
- Sertlik ölçümlerinde B₄C miktarındaki artışın sertlikte artışa neden olduğu gözlenmiştir. %100 SiC reçeteli numunede $2652,7 \pm 2,52 \text{ HV}_{1.0}$, %60 SiC- %40 B₄C reçeteli numunede ise $3085 \pm 8,14 \text{ HV}_{1.0}$ olarak ölçülmüştür.
- Balistik hız testleri üzerinde yapılan incelemelerde Numune BA0'ın 20 mm olarak ölçülen çekirdek boyu seramikle temas sonrasında arka tarafa 12 mm geçmiştir. Numune BA10'de çekirdek geçiş boyu 13 mm, Numune BA20'de çekirdek geçiş boyu 11 mm, Numune BA30'de 9 mm ve BA40'de 8 mm değerlerine ulaşılmıştır.

- Sonuç olarak farklı bileşimlerde imal edilen seramik zırhlar kullanım olarak çeşitli avantajlar sağlayabilmektedir. Ürün bileşimindeki değişimler maliyet, mekanik özellikler ve yoğunluk değerlerindeki değişimler sayesinde kullanıcıya farklı opsiyonlar sunacaktır. Çalışmada üretilen ürünlerin genel olarak personel zırh koruyucularında ve araç zırh panellerinde kullanıma uygun olacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Schwartz, Mel M., 1997, Composite Materials, Vol1, Prentice-Hall, pp 1, 2, 5.
- [2] Yıldırım, İ. “Al₂O₃ ve SiC’ün Mukavemet Özellikleri Üzerine Üretim Şartları ve Bileşimin Etkisi”, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eylül, 2002
- [3] Başman, G., Atar, E., Kayalı, E, S., “Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı”, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Metalurji Dergisi, Sayı127, 39, Aralık, 2001
- [4] Öğünç, H.,” Sıcak Presleme İle Sinterlenmiş a-SiC Matriksli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi” İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Haziran, 2006
- [5] Turan, E., 2004. Bor-Karbür-Silisyum karbür kompozitlerinin sıcak presleme ile elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi,İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Pierson, H. U. (1996). Handbook of Refractory Carbides and Nitrides. United States: Noyes Publications.
- [7] Tabor, D. (2000). The hardness of metals. London: Oxford University Press.
- [8] Karabaş, K., 2006. Bor karbür üretimi, yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [9] Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. Journal of the American Ceramic Society, 94 (11), 3605-3628.
- [10] Gadow, R., & Von Niessen, K. (2006). Lightweight ballistic with additional stab protection made of thermally sprayed ceramic and cermet coatings on aramide fabrics.
- [11] Medvedovski, E. (Ed.). (2006). Ceramic Armor and Armor Systems. Ohio: Ceramic Transactions - American Ceramic Society.
- [12] Gulsever Apak, B., (2018). “Production And Characterization Of Spark Plasma Sintered Boron Carbide Ceramic Composites Suitable For Ballistic Use”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- [13] Backman, M. E., Goldsmith, W., (1978), The mechanics of penetration ofprojectiles into targets., International Journal of Engineering Science, 16, 1-99.
- [14] Büyükuncu, G. (2000). “ Bor Karbür/ Silisyum Karbür Kompozitlerinin Üretimi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi
- [15] Afşar, B. , SiC-B₄C-TiB₂ Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022

- [16] Akgünlü, M. Y. Silisyum karbür seramik tozlarının katkı sistemleri ile granülizasyon ve sinterleme proses parametrelerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2021
- [17] Evci C., Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2009
- [18] Yue, C., Liu, W., Zhang, L., Zhang, T. ve Chen, Y. (2013). Fracture toughness and toughening mechanisms in a (ZrB₂-SiC) composite reinforced with boron nitride nanotubes and boron nitride nanoplatelets, *Scr Mater*, c. 68, sy 8, ss. 579-582. doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.12.005
- [19] Yılmaz, B., Zırh Uygulamalarına Yönelik Grafen Katkılı SiC Seramik Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mikro ve Nanoteknoloji Ana Bilim Dalı, 2020
- [20] Apak Gülsever, B., Production and Characterization Of Spark Plasma Sintered Boron Carbide Ceramic Composites Suitable For Ballistic Use, Ph.D. Thesis, Graduate School Of Science Engineering And Technology, Metallurgical And Materials Engineering Department, 2018.
- [21] Kim G.Y., Kim Y.W., Yong S.M., Jung W.K, Improving specific stiffness of silicon carbide ceramics by adding boron carbide, *Journal of the European Ceramic Society* 42 (2022) 6827–6835
- [22] Boutell C. Arms And Armour In Antiquity And The Middle Ages s.11-13
- [23] Normandia, J.M., LaSalvia, J.C., Gooch Jr, W.A., McCauley, J.W., and Rajendran, A.M., Protecting the Future Force: Ceramics Research Leads to Improved Armor Performance. *AMPTIAC Quaterly*, 2004. 8(4): p. 21-27.
- [24] Medvedovski, E., Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 2010. 36(7): p. 2103-2115.
- [25] İnternet <http://www.historyofarmor.com/armor-history/> Erişim Tarihi: 01.09.2023
- [26] İnternet <https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing> Erişim Tarihi: 01.09.2023
- [27] İnternet:<https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing/Modern-armour> Erişim Tarihi: 01.09.2023
- [28] Baykara T., Günay V., Demirural A., Zırh Teknolojileri, Yeditepe Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 2020
- [29] J. Prifti, M.Castro, R. Squillacioti, R. Cellitti “Improved Rolled Homogeneous Armour (RHA) Steel Through Higher Hardness” *Armay Research Laboratory (ARL)*, ARL- Tr- 1347, 1997
- [30] I.G. Crouch “Metallic Armour- from cast aluminum alloys to high strength steels” *Materials Forum* 12, 1988, s31
- [31] Yıldırım E., Temel Zırh Mühendisliği Ders Notları, 2019

- [32] N.Bhatnagar, N.Asija “Durability of high performance ballistic composites” in “Lightweight Ballistic Composites: Military and Law- Enforcement Applications” Edited by Ashok Bhatnagar, Second Edition, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 71, 2016
- [33] Sant’Ana Gallo L., O.C. Villas Boas M., Rodrigues C.M. A., Melo C.L. F.,Zanotto D. E., “Transparent glass–ceramics for ballistic protection: materials and challenges” Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 3, May-June 2019, Pages 3357-3372
- [34] İnternet: <https://www.advanced-impact.com/smartgard-ballistic-security-glazing.html> Erişim Tarihi: 01.03.2024
- [35] Besnard C., Silicon doped boron carbide for armour, Doktora Tezi, Imperial College London, Department Of Materials, 2017
- [36] “Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications” Edited by Philippe Boch, Jean Claude Niepce,2007
- [37] R.G. O’Donnell “An investigation of the fragmentation behaviour of impacted ceramics” J Mat Sci 10, 1991
- [38] İnternet: <https://aonlineen.unionjill.org/content?c=ceramic+armor+plates&id=20> Erişim Tarihi 01.03.2024
- [39] Palacı, Y. (2001). “Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- [40] Dağaşan Bulucu, E. Seramikler Ders Notları, Erciyes Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 2016.
- [41] Akarsu, C. (2009) “Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,
- [42] Ergün, N. (2006) “Bor Karbür- Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme İle Üretilmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [43] Bakan, S. (2020). “Dinamik/ Termokimyasal Yöntemle Bor Karbür (B₄C) Seramik Tozu Üretimi”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi
- [44] Gölbaş, C. (2018) “Bor Karbür Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [45] Çiçek, B., Karaahmet, O. (2018). Bor Karbür ve Düşük Sıcaklık Bor Karbür Sentezleme Yöntemleri, ISBN:978-605-320-944-7.
- [46] Kurt, A.O. Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 2004-2010.

- [47] Şahin, O. TiB₂ ve B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilirliğinin İncelenmesi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı, 2018
- [48] Araslı, A. Grafen Kaplı Silisyum Karbür Seramiklerin Mekanik Ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2022
- [49] Toplan, N. Toz Malzeme Teknolojisi Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 2013
- [50] German, R. M., “Powder Metallurgy of Iron and Steel”, Jhon Willey and Sons, U.S.A., 1998
- [51] İnternet <https://www.eirich.com/en/meta/news/news-detail/eirich-preparation-technology-in-the-recovery-and-recycling-of-dumpsite-materials> Erişim Tarihi:xxxxx
- [52] İnternet <https://www.freund-vector.com/technology/spray-drying/> Erişim Tarihi: 22.01.2024
- [53] Lame, O., Bellet, D., Michiel, M. D. ve Bouvard, D., 2004. Bulk observation of metal powder sintering by X-ray synchrotron microtomography, *Acta Materialia*, 52(4), 977-984.
- [54] Dikici, B., 2010. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [55] Kang, S. J. L., 2005. Sintering, densification grain growth and microstructure, Butterworth-Heinemann Elsevier, England.
- [56] Lame, O., Bellet, D., Michiel, M. D. ve Bouvard, D., 2004. Bulk observation of metal powder sintering by X-ray synchrotron microtomography, *Acta Materialia*, 52(4), 977-984.
- [57] Bradbury, S., “Powder Metallurgy Equipment Manual”, 1986, U.S.A
- [58] İnternet<https://www.dorst-technologies.com/en/products/axial-powder-presses/product/ep30> Erişim Tarihi: 01.02.2024
- [59] Çelik, Y. Bor Karbür’ün Spark Plazma Yöntemiyle Sinterlenmesi, Çeşitli Sinterleme Katkılarının Sinterleme Ve Malzeme Özelliklerine Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2010
- [60] Somunkıran, İ. ve Özel, S., 2006. Fe esaslı toz alaşımında sinterleme Sıcaklığının aşınma direncine etkisi, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 153-157.
- [61] Lame, O., Bellet, D., Michiel, M. D. ve Bouvard, D., 2004. Bulk observation of metal powder sintering by X-ray synchrotron microtomography, *Acta Materialia*, 52(4), 977-984.
- [62] Kang, S. J. L., 2005. Sintering, densification grain growth and microstructure, Butterworth-Heinemann Elsevier, England.

- [63] Öztürk, M. SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2007
- [64] Upadhyaya, G. S., 1998. Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties, and Testing, Noyes Publications, New Jersey.
- [65] Barsoum, M. W., 2003. Fundamentals of ceramics, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
- [66] İnternet <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/en/vacuum-furnaces.aspx> Erişim Tarihi: 05.02.2024
- [67] Özgültekin, S., Balistik zırhlarda kullanılan Kompozit malzeme kombinasyonlarının incelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [68] Lowry E.D., Interior Ballistics, Doubleday & Company, New York, 1968
- [69] Öztürk A. R. Dış balistik, Ankara: Makine Kimya Endüstrisi Kütüphanesi, 174-178 (1988).
- [70] Thomas J.H., Elements of Ordnance, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1938
- [71] Atapek, H., Bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalürjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve balistik performansının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [72] Turatti, A.M, Wear resistant boron carbide compacts produced by pressureless sintering, Ceramics International 43(2017) 7970-7977
- [73] B. Buyuk, A.B. Tuğrul, An investigation on gamma attenuation behaviour of titanium diboride reinforced boron carbide-silicon carbide composites, Radiation Physics And Chemistry 97(2017)354 359
- [74] L.Vargas Gonzalez, R.F. Speyer, J. Campbell, Flexural Strength Fracture Toughness and Hardness of Silicon Carbide And Boron Carbide Armor Ceramics, Applied ceramic technology 7 (5) 2010 643 651
- [75] J. Pittari G. Subhash J. Zheng V. Halls P. Jannotti, The rate dependent fracture toughness of silicon carbide and boron carbide based ceramics, Journal Of the European Ceramic Society 35(2015) 44 11-44 22



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Talha ÇAVDAR

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2016,Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- Yüksek Lisans** : 2022- *Halen, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2019 yılları arasında Çelik Halat ve Tel Sanayii A.Ş’de Üretim Mühendisi.
- 2019-2022 yılları arasında BMC Savunma Sanayii A.Ş’de Kalite Mühendisi
- 2022- Halen Nurol Teknoloji A.Ş Kalite Şefi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Çavdar T., Şen Ş., (2024,20-21, Ocak). SiC ESASLI B₄C TAKVİYELİ SERAMİKLERİN MEKANİK, FİZİKSEL VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ3.Uluslararası Malzeme Mühendisliği ve İleri İmalat Teknolojileri Kongresi. Uluslararası Kongre *Gebze Teknik Üniversitesi*, Kocaeli, Türkiye