

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR KARBÜR VE ALÜMİNA SERAMİK ZIRH PLAKALARININ MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Beytullah AKÇAY
DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ

VAN-2020

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR KARBÜR VE ALÜMİNA SERAMİK ZIRH PLAKALARININ MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Beytullah AKÇAY

VAN-2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ danışmanlığında, Beytullah AKÇAY tarafından sunulan "**BOR KARBÜR VE ALÜMİNA SERAMİK ZIRH PLAKALARININ MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**" isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 05 / 03 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 04/05/2020 tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Beytullah AKÇAY

ÖZET

BOR KARBÜR VE ALÜMİNA SERAMİK ZIRH PLAKALARININ MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AKÇAY, Beytullah

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ

Nisan 2020, 60 sayfa

Bu çalışmada, zırh yapımında yaygın olarak kullanılan bor karbür (B_4C) ve alümina (Al_2O_3) seramik plakalarına X-ışını difraksiyonu (XRD), X-ışını floresans spektrometresi (XRF) uygulanarak plakaların kristalografik özellikleri, içyapı, içerdiği fazlar, kimyasal bileşim gibi özellikleri belirlenmesi hedeflenmiştir. Bor karbür ve alümina seramik plakaların elementel kompozisyonlarının belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), yoğunluk, mikro sertlik ve üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda literatür ile mekanik dayanımları, gözeneklilik ve NIJ-STD0-101.04 standardında P-BFS balistik testi uygulayarak elde edilen mekanik özelliklerin balistik anlamda etkilerini ortaya konulması amaçlanmıştır. B_4C ve Al_2O_3 içeriği homojen bir dağılım göstermekte olup sırası ile yoğunlukları $2,52 \text{ g/cm}^3$ ve $3,85 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. B_4C ve Al_2O_3 numuneleri gevrek kırılma özelliği sergilemekte ve düşük gerilimlerde lineer deformasyon oluşturmaktadır. Elastik özellikler bor karbür içeriğindeki karbon oranına göre değişmektedir. Bor karbür plakanın elastisite modülü 440 GPa olarak elde edilmiştir. B_4C ve Al_2O_3 plakalar, askeri standartlara uygun olarak yapılan balistik testlerde 4. seviye tehditlere (hızı bor karbür plakasında 878 m/sn , alümina plakasında 884 m/sn olan $7.62 \times 63 \text{ mm}$ M2 AP mermide) karşı travma derinlikleri 28.8 mm ve 34.4 mm olmak üzere NIJ-STD-0101.04 standardı çerçevesinde tam koruma sağlamaktadır. B_4C 'nin yüksek sertliği nedeniyle Al_2O_3 'e nazaran daha iyi balistik özellik göstereceği beklentisi, malzemenin aşırı gevrek olması nedeniyle mümkün olmamaktadır.

Anahtar kelimeler: Alümina, Balistik, Balistik limit testi, Bor karbür, P-BFS balistik testi, Seramik, SEM, Üç nokta eğme testi, XRF, XRD, Zırh.



ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND BALLISTIC PROPERTIES OF BORON CARBIDE AND ALUMINA CERAMIC ARMOR PLATES

AKÇAY, Beytullah
M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Serap KOÇ
April 2020, 60 pages

In this study, the most common used materials in the production of the armors, namely boron carbide and alumina ceramic plates, have been planned to be exposed to X ray diffraction (XRD) and X ray fluorescence spectrometry for elemental analysis (XRF) in order to reveal their crystallographic characteristic features, internal (inner) structure, involved phases, chemical compound/composition. In order to specify elemental composition of the boron carbide and alumina ceramic plates, scanning electron microscopy coupled with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS Analysis), density test, micro hardness test and compression test as well have been planned to be utilised. With this study, reviewing the literature which is relevant for the study, the comparison of mechanical endurance of the plates and the specification of ceramic pores, performing P-BFS ballistic test in conformity with the NIJ-STD 0-101.04 standard in order to display the ballistic effects of the mechanical particularities have been aimed. B₄C and Al₂O₃ samples content show a homogeneous distribution and their density is measured as 2.52 g/cm³ and 3.85 g/cm³, respectively. B₄C and Al₂O₃ exhibit brittle fracture and constitute linear deformation at low stresses. Elastic properties change according to the carbon content in boron carbide structure. B₄C and Al₂O₃ plates have trauma depths of 28.8 mm and 34.4 mm (872 m / sec on boron carbide plate, 884 m / sec, 7.62x63 mm M2 AP bullet on alumina plate and) on ballistic tests. Due to the high hardness of B₄C, the expectation that it will exhibit better ballistic properties compared to Al₂O₃ is not possible because the material is excessively brittle.

Keywords: Alumina, Armor, Ballistic, Ballistic limit test, Boron carbide, Ceramic, P-BFS ballistic test, SEM, Threepoint bending test, XRF, XRD.



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ'a teşekkür ederim. Ayrıca üzerimde büyük emeği olan annem Nezaket AKÇAY ve babam Hasan AKÇAY ile beni sabırla destekleyen eşim Dilara AKÇAY ve oğlum Hasan Efe AKÇAY'a teşekkürlerimi sunarım.

2020

Beytullah AKÇAY



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	4
2.1. Zırh	4
2.1.1. İlkel Zırh	4
2.1.2. Modern zırh	4
2.1.2.1. Metal vücut zırhları	5
2.1.2.2. Ara dönem	5
2.1.2.3. Çelik zırh dönemi	5
2.1.2.4. Seramik/kompozit zırh dönemi	5
2.2. Seramikler.....	6
2.2.1. Geleneksel seramikler.....	7
2.2.2. İleri teknolojik seramikler	8
2.2.2.1. Fonksiyonel seramikler.....	8
2.2.2.2. Yapısal seramikler	8
2.3. Alümina ve Kullanım Alanları	9
2.4. Bor Karbür ve Kullanım Alanları.....	12
2.5. Balistik.....	16
2.5.1. İç balistik	16
2.5.2. Ara balistik.....	17
2.5.3. Dış balistik.....	17
2.5.4. Hedef balistiği.....	17

	Sayfa
2.6. Balistik Testler ve Standartlar	18
2.6.1. NIJ-STD-0101.04/06 standardı	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Yoğunluk Ölçümü ve Gözenek Analizi.....	27
3.2. Sertlik Ölçümü.....	28
3.3. Üç Nokta Eğme Testi	28
3.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri.....	29
3.5. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizleri	30
3.6. X Işını Difraktometresi (XRD) Analizleri.....	30
3.7. Balistik Testler.....	31
4. BULGULAR	33
4.1. Yoğunluk Ölçümü ve Gözenek Analiz Sonuçları	32
4.2. Sertlik Ölçümü Sonuçları	33
4.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	34
4.4. B ₄ C Zırh Seramiğinin Karakterizasyonu.....	36
4.5. Al ₂ O ₃ Zırh Seramiğinin Karakterizasyonu	43
4.6. Balistik Test Sonuçları.....	47
5.TARTIŞMA VE SONUÇ	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZ GEÇMİŞ.....	57

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yüksek saflıktaki alüminanın özellikleri.....	11
Çizelge 2.2. Porozite oranına ve safsızlığa bağlı olarak oda sıcaklığında mühendislik alümina seramiklerinin elastik özelliklerinin tipik değerleri (alüminanın mekanik ve fiziksel özellikleri)	12
Çizelge 2.3. Alüminanın safsızlık oranı ve porozitesine bağlı olarak kırılma tokluğu, weibull modülü ve sertliğindeki değişim.....	12
Çizelge 2.4. Bor karbürün mekaniksel özellikleri	14
Çizelge 2.5. Bor karbürün özellikleri	14
Çizelge 2.6. Balistik koruyucular için standartlar	20
Çizelge 2.7. NIJ-STD-0101.04 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri.....	20
Çizelge 2.8. Balistik limit testi	25
Çizelge 4.1. Yoğunluk, su emme ve porozite değerleri	32
Çizelge 4.2. Sertlik ölçüm sonuçları.....	33
Çizelge 4.3. Eğme mukavemeti ve elastisite modülü	34
Çizelge 4.4. B ₄ C elementel analiz sonuçları (XRF)	42
Çizelge 4.5. Al ₂ O ₃ elementel analiz sonuçları (XRF)	47
Çizelge 4.6. P-BFS test sonuçları	51



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. B-C faz diyagramı	13
Şekil 2.2. Milli tankımız Altay	16
Şekil 2.3. a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreye sahip mermiler.....	22
Şekil 2.4. Bir merminin seramik zırh plakaya çarpması.....	23
Şekil 2.5. Simüle maddesinin numune gerisine entegre edilmesi	24
Şekil 2.6. Balistik test düzeneği	24
Şekil 3.1. Mettler Toledo PG 503S marka hassas terazi	27
Şekil 3.2. Shimadzu marka sertlik ölçüm cihazı	28
Şekil 3.3. INSTRON 33 marka universal üç nokta eğme cihazı	28
Şekil 3.4. JEOL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu	29
Şekil 3.5. Panalytical ZETIUM marka XRF cihazı.....	30
Şekil 3.6. Bruker D8 Advance marka XRD cihazı.....	30
Şekil 3.7. Balistik test laboratuvarı.....	31
Şekil 4.1. Bor karbür üç nokta eğme testi grafiği.....	35
Şekil 4.2. Alümina üç nokta eğme testi grafiği	35
Şekil 4.3. B ₄ C numunesine ait XRD paterni	36
Şekil 4.4. B ₄ C plakasının SEM görüntüsü.....	37
Şekil 4.5. Mikron boyutta B ₄ C numunesine ait yüzey görüntüsü	38
Şekil 4.6. (a) ve (b) Farklı büyütmelelerde B ₄ C yüzeyinin mikro yapı görüntüleri.....	39
Şekil 4.7. B ₄ C seramik yüzeyinde EDS analizi için seçilen noktalar.....	39
Şekil 4.8. 1. bölge EDS analiz sonucu (B ₄ C için)	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. 2. bölge EDS analiz sonucu (B_4C için)	40
Şekil 4.10. Fe ilavesinin gözenek yapısına etkisi	41
Şekil 4.11. Fe ilavesinin sertliğe etkisi	42
Şekil 4.12. Al_2O_3 numunesine ait XRD paterni.....	43
Şekil 4.13. Al_2O_3 numunesine ait SEM görüntüsü.....	44
Şekil 4.14. (a) Farklı büyütmedeki Al_2O_3 yüzeyinin SEM görüntüsü (b) Backscattering SEM görüntüsü	45
Şekil 4.15. Al_2O_3 seramik yüzeyinde EDS analizi için seçilen noktalar	45
Şekil 4.16. 1. bölge EDS analiz sonucu (Al_2O_3 için)	46
Şekil 4.17. 2. bölge EDS analiz sonucu (Al_2O_3 için)	46
Şekil 4.18. Atış öncesi 6 plakadan oluşan Al_2O_3 paneli.....	48
Şekil 4.19. Atış öncesi 6 plakadan oluşan B_4C paneli.....	48
Şekil 4.20. (a) Platforma sabitlenmiş B_4C paneli (b) Platforma sabitlenmiş Al_2O_3 paneli	49
Şekil 4.21. Atış sonrası Al_2O_3 zırh panelinde oluşan deformasyon	49
Şekil 4.22. Atış sonrası B_4C zırh panelinde oluşan deformasyon	50
Şekil 4.23. Al_2O_3 zırh paneline atış sonrası destek malzemesinde oluşan travma derinliği.....	50
Şekil 4.24. B_4C zırh paneline atış sonrası destek malzemesinde oluşan travma derinliği	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Al_2O_3

B_4C

SiC

E

V_{50}

cBN

Açıklama

Alümina

Bor karbür

Silisyum Karbür

Elastisite modülü

Malzemeyi %50 delecek mermi hızı

Kübik bor nitür

Kısaltmalar

PBFS

AP

FMJ

NIJ

SEM

STANAG

STD

XRD

XRF

NDP

BAD

DWE

FTG

TCA

NMR

Açıklama

The Perforation and Backface Signature Test
(Delme ve arka yüz imza testi)

Zırh delici (mermi)

Bakır gömlek kaplı (mermi)

A.B.D. Araştırma ve Doğrulama Enstitüsü

Elektron mikroskop tarama,

NATO Standart Anlaşması

Standart

X ışını difraksiyonu

X ışını floresans spektrometresi

Deforme etmeyen penetrasyon-Non Deforming
Penetration

Zırh Arkası Kırıntıları- Behind Armor Debris

Çarpma Testleri-Dwell Tests

Sabit hedef geometrisi-Fixed Target Geometry)

Tandem kompozit zırhı-Tandem Composite
Armor)

Nükleer Manyetik Rezonans



1. GİRİŞ

İnsanoğlu kendisini korumak için sürekli en iyi silahı geliştirmek ve silaha sahip olan kişilerden de korunmak için koruyucu malzeme geliştirme yarışında olmuştur. İlk koruyucu giysi ve zırhlar hayvan derilerinden yapılmıştır. Uygarlıklar geliştikçe tahta ve metal zırhlar kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Metaller, orta çağ şövalyeleri tarafından koruyucu giysi olarak kullanılmışlardır (Anonim, 2019).

Kurşun geçirmez levha 1500'lerde bilinmesine rağmen ilk yumuşak balistik zırh 1860'larda Kore'de icat edilmiştir (Henderson, 2008). Seramik kurşun geçirmez levhaların ise ilk kez kullanımının II. Dünya Savaşında Almanlar tarafından uçaklarda kullanıldığı düşünölmektedir. Seramikler, sahip oldukları mekaniksel, termal ve elektriksel özellikleri dolayısıyla çok önemli ve stratejik malzemelerdir. Seramik malzemeler son 20 yılda endüstriyel olarak çok yaygın kullanım alanı bulmuştur (Saito, 1997). Özellikle elektronik ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak 80'li yıllardan itibaren başta savunma sanayi, makine ve kimya sanayi gibi sektörlerde metal malzemelere alternatif malzeme olarak seramik malzemeler kullanılmaya başlanmıştır (Barsoum, 1997). Bu süreç, günümüzde de yeni seramiklerin geliştirilmesi ile yeni uygulama alanlarında kullanılması ile sürmektedir. Seramikler sahip oldukları düşük yoğunluk yüksek mukavemet ve ısı direnci gibi özelliklerden dolayı içinde bulunduğumuz yüzyılın zırh malzemeleri arasında yer almaktadır.

Bor karbür, SiC, Si₃N₄, elmas, alümina gibi önemli sert ametal grubunda özel bir yere sahip, oksit olmayan bir seramik malzemedir. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti, düşük yoğunluğu gibi birçok üstün özelliğiyle zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar, aşındırıcılar gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrür (cBN)'den sonra en sert üçüncü malzemedir (Theveot, 1990). Sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde zırh teknolojisi açısından daha uzun süre bilim insanların ilgisini çekmektedir. Ülkemizin bor zengini bir ülke olması sebebiyle, katma değerü oldukça yüksek olan borun uç ürünü bor karbür seramiğinin üretimi ülkemizin refahına büyük katkı sağlayacaktır. Ayrıca zırhlanmada en iyi bor karbürün üretilerek kullanımı,

içerisinde bulunduğumuz coğrafyada askeri anlamda ÷lkemize üstñnlük sağlaması mümkün olacaktır.

Günümüzde alümina kimyasalları dünyanın birçok bilimsel, teknolojik ve endüstriyel uygulamalarında araştırılmaktadır. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısasal kararlılık ve korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri yanı sıra düşük birim maliyeti alümina tüketimini arttırmaktadır (Lee ve ark., 1994; Mostaghaci, 1996). Düşük birim fiyatı sebebiyle gemi, tank gibi büyük savaş araçlarının zırhlandırılmasında birincil balistik zırh olarak tercih sebebidir.

Roma ordusunda kale surlarını yıkmak için kullanılan balista silahından adını alan balistik kelimesi en genel tanımıyla bir merminin silahtan (namludan) çıkarak hedefe ulaşması, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin absorblanması ve oluşan bozulma/deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Mermiye, silaha ve hedefe etki eden kuvvetler açısından iç balistik, ara balistik, dış balistik ve hedef balistiğı olarak 4'e ayırmak mümkündür. Yeni zırh malzemelerini geliştirmek hedef balistiğinin konu alanlarından birisi olup bunu gerçekleştirmek için belirlenen birçok standart ve test mevcuttur (Anonim, 2019).

Vücut zırhları için P-BFS (the Perforation and Backface Signature Test) ve balistik limit testleri kullanılmaktadır (Chen ve ark. 2012). Yaygın olarak kabul edilen standartlar NIJ (The US National Institute of Justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) tarafından kabul edilen standartlardır (Perfor.,2013). Bu çalışmada NIJ 0101-04 standardının belirlediğı balistik testler B₄C ve Al₂O₃ panellerine uygulanmıştır.

NIJ-STD-0101.04 standardının amacı, asgari performans şartlarını ve insan vücudunu silah ateşine karşı korumayı amaçlayan kişisel vücut zırhının balistik performansı için uygulanılacak test yöntemlerini açıklamaktır (NIJ-STD-0101.04). Standart, mermi kütle ağırlığı ve mermi ilk hızına göre 7 bölüme ayrılmış koruma seviyesinde malzemenin delinip delinmediğini ve travma derinliğinin hesaplanmasını amaçlamaktadır.

Bu çalışmada zırh yapımında en yaygın olarak kullanılan bor karbür ve alimüna seramik plakalarına; XRD, XRF, SEM, yoğunluk, mikro sertlik ve basma testleri uygulanarak literatür ile mekanik dayanımları karşılaştırılmış, gözenekler belirlenmiş,

elementel ve faz analizleri uygulanmıştır. Ayrıca NIJ 0101-04 standardı çerçevesinde, P-BFS testi ile balistik performanslarının ortaya konulmuştur.





2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

2.1. Zırh

Zırh en genel tanımıyla hedef olabilecek kişilere karşı mermilerin veya diğer silahların etkisini saptırma veya absorbe etme özelliğine sahip koruyucu malzemelerdir. Modern zamanlardan önce zırhlar seçkin askerler ya da bürokratlar tarafından koruyuculuğunun yanında sosyal önemin göstergesi olarak da kullanılırken günümüzde silahların öldürücü gücünün artması sebebiyle tehlike alanında bulunan kişiler tarafından tamamen koruyucu malzeme olarak kullanılmaktadır. Zırh teknolojisini süreç anlamında bölüp inceleyecek olursak İlkel Zırh ve Modern Zırh olarak 2 'ye ayırmak mümkündür (Alper ve ark., 2005).

2.1.1 İlkel zırh

İnsanlar ilkel çağlarda silahlardan korunmak maksatlı zırhları, sert kumaş ve derinin kumaş parçaları, hayvan kürkleri, at kılı gibi malzemeler ile güçlendirilmesi ile elde ediyordu. Bu çok katmanlı hafif malzemeler basit silah ve küçük bıçaklara karşı koruma sağlıyordu. M.Ö. 3000 ile 1000 yılları arasında bronz metalürjisinin hayatımıza girmesi ile birlikte birçok uygarlık ok, kılıç, örs gibi daha ağır silahlara koruma sağlayan dayanıklı zırhlar üretmeye başlamış ve modern zırh dönemine geçilmiştir (Anonim, 2019).

2.1.2 Modern zırh

Modern zırh dönemi insanoğlunun zırh teknolojisinde metali kullanmayı öğrendikten sonraki sürecini tanımlar. Mevcut tarihi bulgulara göre, metal zırhların en eski örnekleri M.Ö. 1400 yılları Antik Yunan Miken dönemine aittir (Anonim, 2019). Metal vücut zırhlarının kullanımıyla başlayan modern zırh tarihi günümüzü de kapsamakta olup bu uzun süreci Metal Vücut Zırhları, Ara Dönem, Dökme Çelik Dönemi ve Seramik/Kompozit Dönemi başlıkları altında incelenecektir.

2.1.2.1. Metal vücut zırhları

M.Ö. 1400 lü yıllardan itibaren hayatımıza giren metal vücut zırhları 18'nci y.y. kadar etkinliğini korumuş barutlu silahların savaş alanlarında kullanılmaya başlaması ile birlikte barutlu silahlar karşısında yenilerek güçlü sömürgeci imparatorlukların kurulmasına zemin hazırlamıştır (Anonim, 2019).

2.1.2.2. Ara dönem

Savaş alanında barutlu silahların etkinliği sayesinde insan gücünde doyumu ulaşılan güçlü yönetimler koruyucu malzeme geliştirmeden ziyade etkili silah üretme yarışına başlamıştır. Mesela Amerikan Bağımsızlık Savaşı ya da 1'nci Dünya Savaşında çok seçkin görevlerde kullanılan, sadece kısmi koruma sağlayan metal başlıklar dışında askerler de zırh malzemesi bulunmamaktaydı (Anonim, 2019).

2.1.2.3. Çelik zırh dönemi

Zırh teknolojisinin altın çağıdır. Metal vücut zırhlarından ziyade savaş alanındaki askerlere hem yapay mevzi hem de kitlesel imha imkânı sağlayan tank, top, uçak ve gemi gibi savaş araçların zırhlandırılmasının önem kazandığı dönemdir. 1930 ile 1970 li yıllara kadar zırhın temelini dökme çelikler oluşturuyordu. Fakat çukur imla prensibi ile çalışan silahların ortaya çıkması ve savaş alanında hız unsurun çok önemli hale gelmesi, zırh teknolojisini yeniliğe zorladı (Anonim, 2019).

2.1.2.4. Seramik/kompozit zırh dönemi

Çukur İmla Hakkı (Munreo etkisi) prensibine göre çalışan silahların savaş alanında etkin olarak kullanılmaya başlaması ile birlikte çok kalın çelik zırhları bile delmek mümkün hale gelmiştir. Ayrıca savaşın kaderi açısından çok önemli olan birliklerin hızlı hareket etmesi bilim insanlarını yeni zırh malzemesi aramaya zorlamıştır. Seramikler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve iyi mukavemet özellikleri ile önem kazanmaktadır (Alper ve ark., 2005).

2.2. Seramikler

Seramik malzemeler metal ve metal dışı bileşenlerden elde edilen inorganik metalik olmayan malzemelerdir. Seramik malzemeler kristalin ya da kısmen kristal olabilirler. Bu malzemeler ısınma ve soğutma işlemleri ile şekil alırlar. Kil, seramiğin ürüne dönüştürülmesinde kullanılan ilk malzemelerden birisidir. Fakat günümüzde pek çok farklı seramik malzeme endüstriyel ve yapısal ürün uygulamalarında kullanılmaktadır. Seramik malzemeler mukavim, sert, gevrek, kimyasal olarak inert (korozyona dayanım) elektrik ve ısı özellikler bakımından yalıtkan davranış gösterme eğiliminde olsalar da özellikleri çok çeşitli bir alana yayılır. Örneğin izolatör seramikler elektrik direklerinde yalıtkan olarak kullanılırken bazı seramik bileşenler ise süper iletken davranış gösterirler (Toy ve ark., 1994)

Seramiğin tarihçesi araştırıldığında birbirinden bağımsız ve farklı olarak gelişmiş iki ayrı bölgesi görülür. Birincisi Güneydoğu Asya'da, 8-13'üncü asırlarda gelişmiş Pers Çinisi adı verilen yumuşak (düşük derecede) pişmiş seramiktir. Güneydoğu Asya'dan Kuzey Afrika'ya oradan da İtalya ve Avrupa'ya yayılmıştır. Pers Çinisi adı verilen bu yumuşak pişmiş seramik Avrupa Seramiğinin temelini teşkil etmiştir. Diğeri; sert, yüksek derecede pişmiş seramik olup Tangve Sung (8-12. asır) devirlerinde Çin'de gelişmiş oradan Japonya'ya ve daha sonrada Avrupa'ya geçmiştir. Bu sert-pişmiş seramik Avrupa'da Porselen adını almıştır (Anonim, 2019).

Geçmişte insanların yiyecek ve içecek malzemelerinin muhafazası için ortaya çıkarttığı seramik malzemeler, günümüzde kendisine çok daha fazla kullanım alanı bulabilmiştir. Seramiğin kullanım alanlarına genel anlamda değinecek olursak;

- a) Yapı Seramikleri (Tuğla, Kiremit, duvar ve Yer Kaplama Plakaları, Su ve Kanalizasyon Boruları, Sağlık Gereçleri)
- b) Ev Eşyası Seramikleri (Saksı, Çanak – çömlek, Süs Eşyaları, Sofra Seramiği)
- c) Elektrik (Şalter ve Sigorta Parçaları, Alçak-Yüksek Gerilim İzolatörleri)
- d) Elektronik Seramikler (Manyetik, Dielektrik, Piezo Elektrik Seramikler)
- e) Refrakter Seramikler (Ateş, Silika, Bazik, Karbon Tuğla, Grafit, Ateş Çimentosu..)
- f) Aşındırıcı Seramikler (Zımpara Taşları ve Tozları, Sentetik Elmas)
- g) Bio Seramikler (Seramik Kemikler, Protezler, Dişler)

- h) Nükleer Seramikler (Nükleer Yakıt Sistem Seramikleri, Radyasyona Karşı Ağır Betonlar)
- i) Mekanik Seramikler (Piston, Motor Gövdesi)
- j) Seramik-metal' ler (Seramik Metal Karışımı Parçaları)
- k) Uzay Araçları Seramikleri (Isı ve Sürtünmeye Dayanıklı Kılıflar, Uçuş Pist Platformları)
- l) Süper İletken Seramikler (Enerji İletimi Sistemleri)
- m) Zırh Seramikleri

Günümüzde seramik malzemelere ilginin artmasının başlıca nedenleri aşağıda belirtilmiştir (Reed, 1995).

- a) Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- b) Kimyasal karalılığın yüksek olması,
- c) Çok sert olmaları,
- d) Metallerden hafif olmaları (%40 mertebesine varan),
- e) Hammadde olarak bol miktarda bulunması ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
- f) Pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi,
- g) Erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
- h) Oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
- i) Sürtünme katsayısının düşük olması,
- j) Basma mukavemetinin yüksek olması

2.2.1. Geleneksel seramikler

Geleneksel seramikler kil, silika ve feldispat temel bileşenlerini içeren tuğla, çimento, fayans, kiremit, cam, çömlek gibi malzemelerdir.

2.2.2. İleri teknolojik seramikler

Seramikler, sahip oldukları mekaniksel, termal ve elektriksel özellikler dolayısıyla çok önemli ve stratejik olan seramik grubudur. Saf ya da safa çok yakın alüminyum oksit (alümina) (Al_2O_3), bor karbür, (B_4C), zirkonya (ZrO_2), magnezya (MgO), berilya (BeO), silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi bileşenlerden oluşurlar. Modern seramikler, ince seramikler, teknik seramikler gibi isimler halinde de tanınırlar (Anonim, 2019).

2.2.2.1. Fonksiyonel seramikler

Malzemelerin dielektrik, elektriksel ve ısı yalıtkanlık, iletkenlik ve manyetiklik gibi, maddenin elektronik, elektromekanik, optik, opto-elektronik ya da manyetik fonksiyonlarını belirleyen “elektronik yapısının” ortaya koyduğu özelliklerin elde edilmesinde gerekli olan uygulamalara dayanılarak elde edilen seramiklerdir (Anonim, 2019).

2.2.2.2. Yapısal seramikler

Seramik malzemelerin kırılma dayanımı ve aşınma direnci gibi mikroyapısal değişkenlerden etkilenen özellikleri ile sertlik, yoğunluk, ısı dayanım, yüksek elastik modülü gibi kristal yapısı ve atomlar arası bağlanmadan etkilenen özelliklerinin önem kazandığı durumlarda üretilen türlere denir. Bu grupta özellikle Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC , B_4C , CBN, TiC, TiB_2 , TiN, AlN gibi seramikler tek tek veya çiftli, üçlü veya daha fazla elemanların kombinasyonu ile oluşan kompozitler olarak göze çarpmaktadırlar. Tekstil makinelerinde kullanılan aşınmaya dayanıklı sentetik iplik kılavuzları, yüksek hızlı torna tezgâhlarında kullanılan kesici seramik takımlar, otomobillerde hızlı ivme sağlayıcı turbo yükleyici, madencilik, çimento sektörü, hafif balistik yelek ve zırhlı araç koruyucu kaplamalarda, modern aç-kapa teknoloji seramik malzemeleri grubuna giren örneklerden bazılarını oluşturmaktadırlar (Heimann, 2010).

2.3. Alümina ve Kullanım Alanları

Alüminanın bilimsel keşfi geçen yüzyıla dayanmaktadır. Bununla birlikte ticari olarak kullanımı, 1907 yılında yüksek alümina seramik üretimine ait bir patentle başlamıştır. Geniş çapta ticari üretimi ve kullanımı ise 1920 yılının sonu ile 1930 yılının başlarına rastlamaktadır.

Alüminanın ilk ticari kullanım alanı, buji ve laboratuvar malzemeleridir. Üretimindeki imkânların gelişmesi ve araştırmalardan oluşan bilgi birikimi sonucu günümüzde alüminanın kullanım alanı önemli miktarda artmıştır. Günümüzde alümina, özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında geniş çapta kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, kesici takım, yatak malzemesi, tekstil endüstrisinde iplik kılavuzu olarak ayrıca, elektronik endüstrisinde, zırh yapımında, tıpta implant ve protezlerde kullanılmaktadır.

Saf alümina, düşük sıcaklıkta birkaç formda bulunur. Fakat bütün bu formlar, zaman, kristal boyutu ve atmosfere bağlı olarak 750-1200°C arasında α -alüminaya dönüşür. 1600°C'nin üzerinde yapılan ısıtma, bu dönüşümü hızlandırır. Alüminanın, α - fazına dönüşümü tersinir değildir (Lee ve ark., 1994).

Alüminanın en önemli oksidi Al_2O_3 formülü ile gösterilen alüminadır. Alüminyum, yerkabuğunda en yaygın olarak bulunan 3. element olup daha çok alümina silikat halinde bulunur. Doğada serbest oksit halinde çok az olarak bulunur. En fazla gibsit (alüminyum trihidroksit), böhmit (alüminyum oksit hidroksit) ve diaspor (alüminyum oksit hidroksit) şeklinde bulunur ki bunlara genel olarak boksit adı verilmektedir (Geçkinli, 1991).

Korund olarak adlandırılan α -alümina pek çok seramik malzemede bulunan ana fazlardan birisidir. Alümina hem asitlere karşı hem de bazlara karşı aynı direnci gösterir. Elektrik özellikler açısından alümina çok iyi bir yalıtıcıdır. Yüksek elastik modülüne (≈ 380 GPa) ve sertliğe sahip olan alümina kırılma enerjisi yüksek olduğundan zirkonya katkısı ile tokluğu ve dayanım artırılmakta ve yaklaşık 800°C'ye kadar bu özelliklerini korumaktadır (Mostaghac, 1996).

Erime noktası $2000 \pm 30^\circ C$ olan alüminyum oksit orta sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve yüklere karşı en dayanıklı malzemelerden birisidir. Alümina suda ve şayet iyi kalsine edilmişse ne mineral asitlerinde ne de bazlarda çözünmez. Alümina, HF asidine karşıda dayanıklıdır. Sodyum karbonat, kostik soda ve sodyum peroksit saf alümina potalarda çok az

bir tahribatla eritilebilir. 1700-1800°C gibi yüksek sıcaklıklarda flor gazı dışında bütün gazlara karşı direnç gösterir (Geçkinli, 1991).

Alüminadan poröz ve yoğun ürünler üretilir. Poröz ürünler genellikle ergimiş alüminadan yapılır ve bunlar 1900°C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık fırınlarının astarı olarak kullanılır. Ergimiş alümina %99,8 Al_2O_3 içermektedir. Saflık derecesi yükseldikçe, mukavemet, elektrik ve aşınma direncinde artış kaydedilir. Diğer taraftan, saf alümina tamamen saydam olarak bazı cihazlarda kullanılmaktadır.

Yeniden kristallenmiş, poröz olmayan alümina, ergimiş alüminadan daha saftır. Yüksek sertliği ve aşınmaya karşı olan direnci nedeniyle, iplik mekiklerinde, spray nozullarında ayrıca öğütme bilyası ve laboratuvar malzemesi olarak da kullanılmaktadır.

Alümina ürünler slip-dökümle, ekstruzyonla, enjeksiyonlu enjeksiyon kalıbı, soğuk ve sıcak presle şekillendirilmektedir. Şekillendirilmede un, polivinil alkol, mum, doğal reçine gibi organik bağlayıcılar ve yağlayıcılar ve ayrıca $Al(OH)_3$ gibi inorganik bağlayıcılarda kullanılmaktadır. Alümina, ısıtılmış termoplastik reçine ile karıştırılarak enjeksiyonla şekillendirildiğinde, yüzeyi çok düzgün hassas ölçülerde parçalar üretmek mümkündür. Alümina asit veya baz ilavesi ile defloküle sulu süspansiyon halinde slip dökümle şekillendirilebilir. Ergimiş alümina öncelikle eritilerek 0,5-1,0 μ toz boyutuna getirilir. Daha sonra safsızlıklardan temizlenir ve gerekiyorsa HCl, NaOH veya $(OH)_4NOH$ ile defloküle edilir. Asidik çamur oldukça sabit döküm özellikleri gösterir, fakat alçı kalıbı tahrip eder (Mostaghaci, 1996).

Alümina ileri teknoloji uygulamalarında diğer oksit seramiklerinden daha çok kullanılmaktadır. Sinterlenmiş alüminanın mükemmel aşınma, oksidasyon ve korozyon direncine sahip olması nedeni ile kesici uç, motor parçaları ve biyolojik parça yapımında kullanılmaktadır. Böyle ileri teknoloji uygulamaları için saflık derecesi yüksek ve iyi dağılıma sahip ince tozlar gerekmektedir. Geleneksel toz hazırlama teknikleri olan değirmen ile toz üretiminde safsızlıklar nedeni ile sinterlenmiş yapıda hatalar görülmektedir. Yaş yapıda görülen aglomereler üniform olmayan bir sinterlenmiş ürüne neden olmaktadır.

Alüminyum sülfat çözeltisinden homojen çöktürme yöntemi ile küresel partiküllü alüminyum oksit sentezlenebilmektedir (Mostaghaci, 1996).

Çizelge 2.1. Yüksek saflıktaki alüminanın özellikleri

Termal İletkenlik Katsayısı	28 W/Mk
Yoğunluk	3.98 Mgm ⁻³
Ergime Sıcaklığı	2030°C
Elastisite Modülü	~ 360 GPa
Genleşme Katsayısı	7-8.8*10 ⁻⁶ m/K
Spesifik Yüzey Alanı	115 m ² g ⁻¹
Mikrosertlik	25 GPa

Dünya alümina üretiminin yaklaşık %90'ı alüminyum metal üretiminde kullanılırken, geriye kalan %10'luk kısım ise ısıya dirençli dolgu malzemeleri, pigment, katalizör, refrakter, aşındırıcı ve seramik malzemelerin üretiminde kullanılır. Yapısal amaçlı mühendislik uygulamalarının başında korozif olan ve olmayan pompa salmastraları, musluk ve vana contaları, tekstil sektöründe kullanılan iplik kılavuzları, madencilik ve çimento sektöründe kullanılan aşınmaya dirençli plaka kaplamaları, biyolojik amaçlı metalleri taşlamada kullanılan taşlama elemanları sayılabilir. Al₂O₃'ün zırh seramiği uygulamasına alt kısımda değinilecek olup askeri bir diğer uygulaması roket ve uçak uç kısımlarında kullanılan radar dalgalarına geçirgen radomeler şeklinde kendini gösterir Alüminanın sertliğinden dolayı, aşınma direnci yüksek olan uygulamalarda aranır malzeme durumuna sokmaktadır, örneğin kesme takımları gibi. Sertlik sıralamasında beşinci sıradadır. Ancak doğal sertlik sıralamasında ikinci sıradadır. Mohs sertliği dokuzdur (Toy ve ark., 1994).

Çizelge 2.2. Porozite oranına ve safsızlığa bağlı olarak oda sıcaklığında mühendislik alümina seramiklerinin elastik özelliklerinin tipik değerleri (alüminanın mekanik ve fiziksel özellikleri) (Holmquist, 1999).

Al ₂ O ₃ /Porozite (%)	Young Modülü (GPa)	Shear Modülü (GPa)	Poisson's Oranı
≥ 99.6 / 0-2	410-380	164-158	0.27-0.24
≥ 99.8 / < 1	405-380	164-161	0.25-0.22
≥ 99.5 / < 1	400-398	163-161	0.26-0.23
≥ 99.6 / 3-6	380-340	150-140	0.26-0.24
≥ 99.0 / 1-5	380-340	145-130	0.26-0.24
96.5-99.0 / 1-5	375-340	140-120	0.25-0.24
94.5-96.5 / 1-5	370-300	140-110	0.25-0.23
86.0-94.5 / 2-5	330-260	130-100	0.25-0.22
80.0- 86.0 / 3-6	330-260	130-100	0.25-0.22

Çizelge 2.3. Alüminanın safsızlık oranı ve porozitesine bağlı olarak kırılma tokluğu, weibull modülü ve sertliğindeki değişim (Holmquist, 1999).

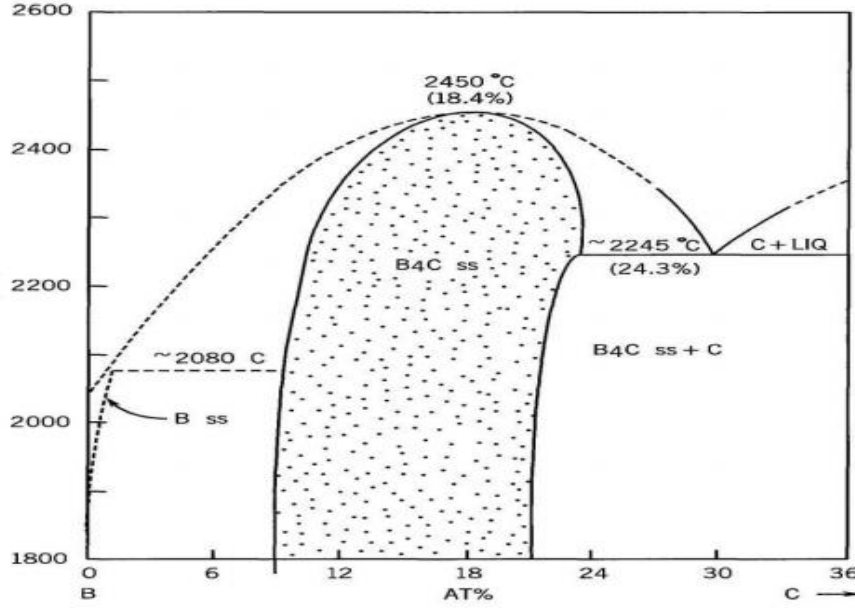
Al ₂ O ₃ /Porozite (%)	Weibull modulus (m)	Kırılma Tokluğu (MPa)	Sertlik HV
≥ 99.6 / 0-2	410-380	164-158	2400-2700
≥ 99.8 / < 1	405-380	164-161	2200-2500
≥ 99.5 / < 1	400-398	163-161	2300-2600
≥ 99.6 / 3-6	380-340	150-140	2400-2600
≥ 99.0 / 1-5	380-340	145-130	2400-2600
96.5-99.0 / 1-5	375-340	140-120	2400-2500
94.5-96.5 / 1-5	370-300	140-110	2300-2500
86.0-94.5 / 2-5	330-260	130-100	2200-2500
80.0- 86.0 / 3-6	330-260	130-100	2200-2500

2.4. Bor Karbür ve Kullanım Alanları

Bor karbür elmas ve bor nitrürden sonra bilinen en sert üçüncü malzemedir. Ayrıca doğada tek başına bulunmadığı için üretilen en sert malzemedir. İlk olarak 19.yy. ortalarında bir bor yan ürünü olarak tesadüfen keşfedilen bor karbür 1930'lu yıllardan beri ayrıntılı olarak çalışılmaktadır. İlk kez 1934 yılında Ridgway tarafından tanımlanmıştır. Ridgway amonyağın borik oksit ile tepkimesi sonucu saf bor nitrürü elde etmiştir. Bor karbürü de aynı yöntem ile karbonla harmanladıktan sonra yüksek sıcaklıkta elde etmiştir. Bu araştırmacı, bu işlemler sonrasında B₄C veya B₅C elde ettiğini iddia etmiştir. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti, düşük yoğunluğu gibi birçok üstün özelliğiyle zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar, aşındırıcılar gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Bor karbürün kristal yapısı uzun zamandır bilinmektedir. Rombohedral birim hücre, B₁₂C₃'e tekabül eden 15 atom içerir. İlerleyen yıllarda yapılan NMR çalışmalarında, merkezi konumdaki C-C-C zincirinin kısmi olarak bor tarafından işgal edildiği görülmüştür ve IR absorpsiyon spektroskopisi çalışmasıyla da C-B-C zincirinin varlığı tespit edilmiştir. Bor karbürler 12 atomlu ikosahedral kümelerin, kovalent bağlar ve 3 atomlu ikosahedraller arası zincirlerle bağlanmasıyla meydana gelir. Bor karbürler, atomca yaklaşık %8,8–20 arasında karbon derişiminde tek bir faz oluşturmasıyla bilinirler. Bu karbon derişimi aralığı, ikosahedraller arası zincirde ve ikosadehrallerde bor ve karbon atomlarının bir diğeriyle yer değiştirebilmesini mümkün kılar. Toplam 15 bor ve karbon

atomu için 4 farklı yerleşimin uygun olduğu belirtilmiştir. En yaygın olarak kabul edilen yapısal model, $B_{11}C$ ikosahera ve C-B-C ikosahedraller arası zincirdir (Thevenot, 1990).

Bor karbür rombohedral fazda kompozisyonu itibariyle düzensiz bir malzemedir. Kompozisyonu ise çok geniş alana sahiptir. Bu $B_{10.4}C$ 'dan (8.8 atomik %C) B_4C (18.8 atomik %C) kadar geniştir. Homojenite Şekil 2.1 de B-C faz diyagramında gösterilmektedir (Suri ve ark., 2010, Reynould, 2010).



Şekil 2.1. B-C faz diyagramı (Akarsu, 2009).

Bor karbür B-C faz sisteminde belirlenebilir. B_4C , $B_{13}C_2$ ve B_8 şekillerinde gösterilebilir. B_4C en kararlı bileşiktir ve çok yüksek sertlik ve termal iletkenlik gibi üstün özelliklere sahiptir (Bouchacourt ve ark., 1985). Bu üstün özelliklerini ise benzersiz atomik yapısından kaynaklanmaktadır. Bor karbürün en çok kabul edilen yapısının her tanesinde 12 atomlu icosahedral bulunmaktadır (Suri, 2010). Karbon içeriği, bor karbür bileşiğinin yapısını ve özelliklerini büyük ölçüde etkiler ve bu nedenle B/C oranı hakkında kesin bilgi büyük önem taşır (Thevenot, 1990).

1300 ° C'nin üstünde, elmas ve kübik bor nitrürden bile daha serttir. Yoğunluğa bağlı olarak 4 noktalı eğilme dayanımı 50.000-70.000 psi ve 414.000 psi basınç dayanımı vardır. Bor karbür ayrıca düşük ısı iletkenliğine (29-67 W / mK) sahiptir ve 0,1-10 ohm-cm arasında değişen elektriksel dirence sahiptir. Bor karbür içerik bakımından yaklaşık %80 bor ihtiva

etmektedir. Bu yüksek bor içeriği, bileşiğin yüksek erime noktasına sahip olmasına neden olmaktadır (Thevenot, 1990).

Kimyasal ve fiziksel kararlılığından dolayı nötronların absorbe edilmesinde bor karbür oldukça etkili ve ekonomiktir. Ayrıca içeriğinde yüksek bor ihtiva etmesi, bor karbürü bor halojenleri gibi diğer bor bileşiklerinin elde edilmesinde önemli bir kaynak yapmaktadır. Yoğunluğu $2,51 \text{ g/cm}^3$, kaynama noktası 3500°C , erime noktası 2450°C basma mukavemeti 345 MPa , çekme dayanımı 155 MPa (980°C)- 162 MPa (1425°C) ve basma mukavemeti 2850 MPa olan bor karbür, sadece HF, H_2SO_4 , HNO_3 karışımlarında yavaş da olsa çözünebilmekte olup bazı metaller, metal hidrürler ve metal oksitlerle borürler oluşturmaktadır (Thevenot, 1990).

Çizelge 2.4. Bor karbürün mekanik özellikleri (Thevenot, 1990).

Özellik	Sıcaklık (K)	Özellik Değerleri
Bükme Basıncı	298	323-346 (10^6 Nm^{-2})
Basma Basıncı	298	$2752 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ 0.003-0.0028 J
Darbe Basıncı	298	(Çentikli)
Young Modülü	298	362-400 (10^9 Nm^{-2})
Kesme Modülü	298	$165-206 \cdot 10^9 \text{ Nm}^{-2}$
Poisson Oranı	298	0.19
Mikro Sertlik	298	2800 kg mm^{-2}

Çizelge 2.5. Bor karbürün özellikleri (Thevenot, 1990).

Özellik	Birimi	Değeri
Görünümü		Siyah ve parlak
Kimyasal Formülü		$\text{B}_{4.9}\text{C}$, $\text{B}_{4.3}$ (B_4C)
Bor İçeriği		77.83, 79.47 (78.26)
Özgül Ağırlık	kg/m^3	2510
Erime noktası	$^\circ\text{C}$	2450
Kaynama Noktası	$^\circ\text{C}$	3500
Sertliği	kg mm^{-2}	2900-3580

Bor karbürler makine ve çalışma aletleri yüzeylerinin işlenmesi için başta kesim plakaları olmak üzere, anaç taşlar, her türlü matrisler, soğuk çekilmiş aletler, akıcı baskı aletleri,

demircilik, matkap uçları, ok dövme keski, valfler, valf yatakları, piston ringleri, silindir düğmeler, silindir burçlar, silindirik yüzeyler, dişli mekanizmalar, rulman yatakları, salmastra kutuları, püskürtmeli pompalar, sertleştirilmiş oturma yüzeyleri, suni malzeme pres kalıpları, her türlü eğitim alet ve kesiciler, rendeler, frezeler, krank miller ve diferansiyeller gibi alanlarda yüzey işlenmesinde kullanılmaktadır (Boren, 2019).

Bor karbür tozları florürle aktive edilerek çelik yüzeylerinde bor difüze etmede kullanılır. Böylece 10-200 µm kalınlığında Fe₂B elde edilir ve bu katman çok ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Belirli bazı durumlarda kırılma özelliğindeki iki fazlı demir borit (FeB-Fe₂B) katmanı da uygundur, burada amaç Fe₂B'yi tek faz halinde üretebilmektir (Boren, 2019).

Bor karbürün kullanıldığı bir diğer önemli alanda da nükleer enerji santralleridir. Bor karbür nükleer santrallerde radyasyondan korunma ve yakıt yükleme çubuğu olarak kullanılmaktadır. Bu bor karbürün yüksek nötron absorblama özelliğinden kaynaklanmaktadır. Metallurji ve ateşe dayanıklı alanlarda içinde bağlayıcı olarak karbon bulunan refraktörlerde karbonun oksitlenmesini önlemek için yani antioksidant olarak kullanılmaktadır (Boren, 2019).

Bor karbür yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bor karbür esaslı bir zırh sisteminin geleneksel sistemlerle kıyasladığımızda %20 hafif olması günümüz tank ve helikopterlerinde daha kolay hareket ve manevra yeteneği demektir. Ayrıca Al ve Si ile birlikte oluşturduğu kompozitler etkin zırh oluşturmaktadır. Bor karbür yeni nesil bir seramik olarak gözükebilecek olsa bile ilk kullanımı Vietnam Savaşında görülmüştür. Bor Karbür ilk olarak, hafif silahlara, zırh delici cephaneye karşı koruma amaçlı olarak helikopterler üzerinde ve personel taşıyıcı hava taşıtlarında kullanılmıştır. 1980'lerde ise kara taşıtlarını kimyasal ve kinetik enerji tehlikesi arz eden tehditlere karşı balistik koruma özellikli seramik korular geliştirilmiştir (Askeriharekat, 2019). Ceradyne Incorporated isimli Amerikan firması 1960'lı yıllarda ilk bor karbür zırh sistemlerini geliştiren firmadır. Bu firma balistik sınıf dahil olmak üzere geniş çapta ileri seramik ürünler geliştirmekte ve üretmektedir. Firmanın ürettiği bazı seramik ürünlere sıcak preslenmiş bor karbür, silisyum karbür ve titanyum diborit örnek gösterilebilir (Boren, 2019).



Şekil 2.2. Milli tankımız Altay.

Türkiye Cumhuriyeti'nin ilk milli tankı olan Altay'da (Şekil 2.2) bor karbür esaslı zırh kullanılmaktadır.

2.5. Balistik

Balistik kelimesinin kökeni Roma İmparatorluğuna dayanmaktadır. Roma ordusu tarafından kuşatmalarda, büyük ok ve gülleleri kale surlarına ve istihkâmlara atmak için kullanılan mancınığa Latince "Balista" denilmekteydi. Bu silahı kullanan personelin hedefe isabeti sağlamak amacıyla hesaplamalar yapması ve silahı ayarlaması, modern balistiğin ilk uygulamalarını oluşturdu. Atış Bilimi olarak da adlandırabileceğimiz balistiğin günümüz manasıyla tanımı: Fişegin ateşlenmesiyle; yanma odasında (fişek yatağı) ve namluda meydana gelen basınç - ısı değişimlerini, mermi çekirdeğinin namlu içerisindeki ivmeli hareketini, mermi çekirdeğinin havadaki hareketini, mermi çekirdeğinin hedef üzerindeki etkilerini inceleyen bilim dalı olarak yapılmaktadır. Balistik biliminin incelediği alanının çok geniş olması ve bir birlerinden tamamen farklı kuvvetlerin etkilerinden ötürü iç balistik, ara balistik, dış balistik ve hedef balistiği olmak üzere dört alt bilim dalına ayrılmıştır (Anonim, 2019).

2.5.1. İç balistik

İç balistik, kısaca "sevk barutunun yanmaya başlamasından, mermi namluyu terk edinceye kadar geçen süre içinde meydana gelen olayları inceleyen bilim dalı" olarak

tanımlanabilir. İç balistik bilimi aşağıda ifade edilen konular üzerine çalışmalar yürütmektedir (Anonim, 2019).

1. Namlu Ağzı Girdapları ve Patlama Basıncı
2. Namlu Ağzı Alevi
3. Namlu Ağzı Dumanı
4. Namlu Ağzı Sesi

2.5.2. Ara balistik

Mermi çekirdeğinin namluyu terk etmesinden önceyi ve terk etmesinden 1-2 milisaniye sonrasında inceleyen bilim dalıdır. İç balistikten dış balistiğe geçiş bölümü olup namlu ağzı bölgesinde meydana gelen olayları inceler (Anonim, 2019).

2.5.3. Dış balistik

Dış balistik, ateşlemenin akabinde namluyu terk eden mermi çekirdeğinin namlu ile hedef arasındaki hareketlerine, aerodinamik kuvvetlerin; moment sistemlerinin; meteorolojik değişkenlerin ve dünyanın karakteristik özelliklerinin, etkilerini inceleyen bilim dalıdır. Dış balistikte atış, vakumlu ortamda ve atmosfer şartlarında olmak üzere iki koşul altında incelenmektedir (Anonim, 2019).

2.5.4. Hedef balistik

Hedef balistiği, mermi çekirdeği, şarapnel ve av tüfeği saçmalarının katı-akışkan zeminler üzerinde meydana getirdikleri tahribatlara ve deformasyonlarına etki eden faktörleri, hedef ve mermi çekirdeği açısından inceleyen bilim dalıdır. Yeni zırh malzemelerini geliştirmek hedef balistiğinin konu alanlarından birisidir. Eldeki mevcut hedef seramikleri balistik açıdan değerlendirirken yararlanabilecek birçok standart ve test mevcuttur (Anonim, 2019).

2.6. Balistik Testler ve Standartlar

Seramik zırh plakalarına uygulanan on türde balistik test yöntemi mevcuttur:

a) NDP (Deforme Etmeyen Penetrasyon-Non Deforming Penetration)

Tipik olarak yumuşak metaller ve sert hedefler için kullanılır. Betona, kireçtaşına ve diğer jeolojik malzemelere uygulanır. Bu penetrasyon modunda hedef direncinin izole edilmesi amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır (Normandia, 2001)

b) PEN (Penetrasyon Derinliği, Doğrudan ya da Ters Çarpma-Penetration Depth Direct or Reverse Impact)

Penetrasyon-hız eğrileri, penetrasyon direnci, penetrasyon hızı, penetrasyon tükenme hızı ile ilgilidir (Normandia, 2001).

c) DOP (Modifiye Edilmiş Penetrasyon Derinliği-Modified Depth of Penetration)

Performans hedeflerinin seramik kalınlığına karşılık fonksiyonunun belirlenmesiyle ilgilidir. TAD'ye benzer, tek farkı yarı sonlu konfigürasyona sahip olmasıdır (Normandia, 2001).

d) DWE (Çarpma Testleri-Dwell Tests)

Toplam ara yüz yenme durumları. Burada yüzey üzerinde merminin hasara uğratılması ve yapının buna verdiği karşılık ölçümlenir (Normandia, 2001).

e) DPT (Çarpma/Penetrasyon Geçişi-Dwell/Penetration Transition)

Burada hız, seramiğin başarısız olacağı kesme dayancını veya geçiş gerinimini tanımlayacak bir yük oluşturur (Normandia, 2001).

f) FTG (Sabit Hedef Geometrisi-Fixed Target Geometry)

Genel zırh tipi konfigürasyonlarda malzeme karşılaştırma deneyine dayanmaktadır. Özellikle eğimli olarak kullanılır (Normandia, 2001).

g) TCA (Tandem Kompozit Zırhı-Tandem Composite Armor)

Hasarlı malzemenin kullanılmasını en aza indirecek konfigürasyon (Normandia, 2001).

h) VBL (Balistik Limit Hızı (V_{50}) veya Artık Veri-Ballistic Limit Velocity (V_{50}) or Residual Data)

Kabul edilebilir zırh için tipik gereksinimler, ayrı ayrı testlerle artık penetratör karakteristikleri ölçülebilmektedir (Normandia, 2001).

i) BAD (Zırh Arkası Kırıntıları- Behind Armor Debris)

Bir penetratörün öldürücülüğünü veya bir hedefin hassasiyetini aynı düzeydeki bir tehditle ölçümler (Normandia, 2001).

j) TAD (Hedef Yüzey Yoğunluğu Performans Haritaları-Target Areal Density Performance Maps)

Optimuma yakın zırh konfigürasyonlarının belirlenmesine yardım eder. Bu konudaki teoriler, ortaya çıkan verilerle, değişik tehditlerin varlığına karşılık birtakım öngörülerde bulunmayı içerir (Normandia, 2001).

Balistik performans her şeyden önce merminin kompozisyonuna, şekline, kalibresine, kütesine, çarpma açısına ve çarpma hızına bağlıdır. Asker, polis ya da tehdit altında bulunan şahıslar tarafından vazife, arazi, düşman, zaman gibi kriterlere göre ihtiyaç duyulan balistik performansta farklılıklar duyulur. Bu durum balistik plakaların sınıflandırılması ihtiyacını oluşturmuştur. Amerikalılar tarafından kullanılan sınıflandırma NIJ, Ruslar tarafından kullanılan sınıflandırma GOST, NATO tarafından kullanılan sınıflandırma STANAG olarak adlandırılmaktadır. Bunların dışında Türk Standartları Enstitüde bazı askeri standartlar geliştirmiştir.

Çizelge 2.6. Balistik koruyucular için standartlar (Bozdoğan ve ark., 2015)

Standart No	Standart Adı
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS13349	Askeri zırhlar-V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light weight, ceramic faced composite armor procedure requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective body armor, Vest ground troops
MIL-STD-663 F	Balistik test for armor
NIJ-STD-0101.04	Balistik Resistance of personal body armor
NIJ-STD-0101.06	Balistik Resistance of personal body armor
NIJ-STD-0108.04	Balistik Resistance of protective materials
STANAG 2920	Balistik Resistance of personal body armor
UK/SC/4697	The ballistic testing of fragment protective personal armors

Günümüz teknolojisinde genellikle hafif silahlara karşı koruyucu zırhlar için geliştirilen ürünlerin balistik değerlendirilmesinde NIJ standardı ile belirtilen değerleri kullanmak yaygındır (Bozdoğan ve ark., 2015).

2.6.1 NIJ-STD-0101.04 standardı

Standartın amacı, asgari performans şartlarını ve insan vücudunu silah ateşine karşı korumayı amaçlayan kişisel vücut zırhının balistik performansı için uygulanılacak test yöntemlerini açıklamaktır (NIJ-STD-0101.04, 2019). Vücut zırhlarının balistik performansını değerlendirmede en yaygın kullanılan standarttır. Standartta tanımlanan 7 koruma seviyesi içerisinde, malzemenin hangi koruma seviyesinde ne kadar koruma sağlayacağı gibi hususlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 2.7. NIJ-STD-0101.04 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri.

Koruma Seviyesi	Kalibre ve Mermi Tipi	Mermi Ağırlığı	Mermi Hızı (m/s)	Travma Derinliği (max)
I (5m mesafeden)	22 LR (LR, LRN), (FMJ RN)	2,6- 6,2	320- 312	44 mm
IIA (5m mesafeden)	FMJ RN, FMJ	8,0-11,7	332- 312	44 mm
II (5m mesafeden)	FMJ RN, JSP	8,0- 10,2	358- 427	44 mm
IIIA (5m mesafeden)	FMJ RN, JHP	8,0- 15,6	427- 427	44 mm
III (15m mesafeden)	FMJ	9,6	838	44 mm
IV (15m mesafeden)	AP	10,8	869	44 mm

a) Tip I (22LR; 380 ACP)

Bu zırh çeşidi 0.22" (5,60 mm.) yuvarlak burunlu, 2.6 g, 320 m/sn veya daha az hızla, LR LRN (Long Rifle Lead Round Nose) mermi tipine veya 380 ACP tüm gömleklili yuvarlak burunlu (FMJ RN-Full Metal Jacketed Round Nose) mermilerine 6.2 g nominal ağırlıkla 312 m/s hızla çarpmaya dayanan cinstedir (NIJ-STD-0101.04, 2019).

b) Tip IIA (9 mm, 40 S&W)

Bu zırh çeşidi 9 mm tüm gömleklili yuvarlak burunlu (FMJ RN-Full Metal Jacketed Round Nose) mermilerine 8.0 g nominal ağırlıkla 332 m/s veya daha az hızla çarpmaya dayanan cinstedir. Ayrıca 40 S&W kalibre tüm metal gömleklili (FMJ-Full Metal Jacketed), 11.7 g nominal ağırlıkta, 312 m/s hızda veya daha az hızda çarpmaya karşı korumalı özelliği olmalıdır. Yukarıda (a) kısmında bahsedilen tehditlere de koruma sağlamalıdır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

c) Tip II (9mm, 357 Magnum)

Bu zırh çeşidi 9 mm tüm gömleklili yuvarlak burunlu (FMJ RN-Full Metal Jacketed Round Nose) mermilerine 8.0 g nominal ağırlıkla 358 m/s veya daha az hızla çarpmaya dayanan cinstedir. Ayrıca 357 Magnum gömleklili yuvarlak burunlu (JSP-Jacketed Soft Point), 10.2 g nominal ağırlıkta, 427 m/s hızda veya daha az hızda çarpmaya karşı korumalı özelliği olmalıdır. Yukarıda (a) ve (b) kısımlarında bahsedilen tehditlere de koruma sağlamalıdır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

d) Tip IIIA (Yüksek Hızda 9 mm; 44 Magnum)

Bu zırh çeşidi 9 mm tüm gömleklili yuvarlak burunlu (FMJ RN-Full Metal Jacketed Round Nose) mermilerine 8.0 g nominal ağırlıkla 427 m/s veya daha az hızla çarpmaya dayanan cinstedir. Ayrıca 44 Magnum yarı gömleklili boşluk burunlu (SJHP-Semi Jacketed Hollow Point) 15.6 g nominal ağırlıkta, 427 m/s hızda veya daha az hızda çarpmaya karşı korumalı özelliği olmalıdır. Yukarıda (a), (b) ve (c) kısımlarında bahsedilen tehditlere ve çoğu el tipi tabancalara karşı da koruma sağlamalıdır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

e) Tip III (Tüfekler)

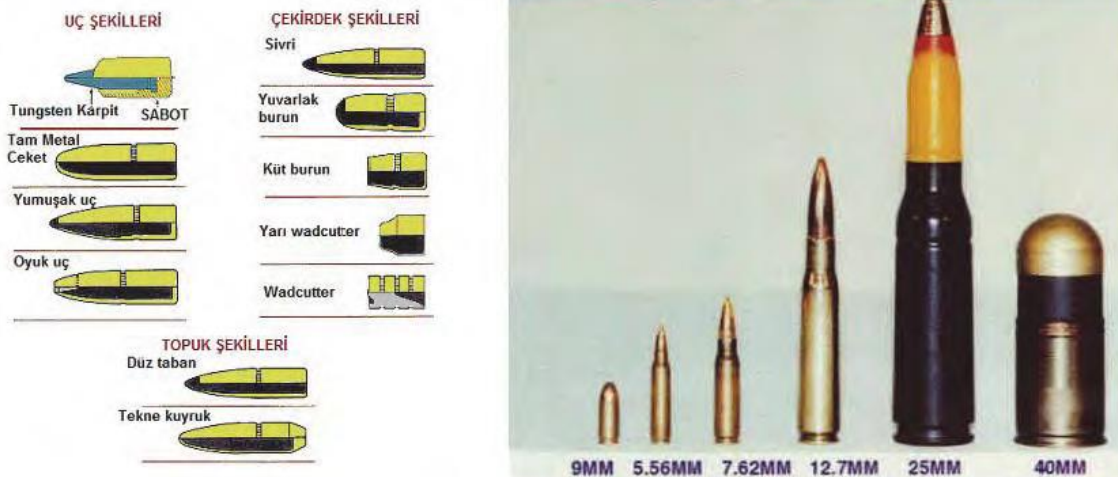
Bu zırh çeşidi 7.62 mm tüm metal gömleklili (FMJ-Full Metal Jacketed) mermilerine (A.B.D. askeri tarif olarak M80 geçmektedir) 9.6 g kütleyle 838 m/s veya daha az hızda çarpmaya karşı korumalıdır. Aynı zamanda yukarıdaki (a), (b), (c) ve (d) kısımlarında geçen tehditlerine karşı da koruma sağlamalıdır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

f) Tip IV (Zırh Delici Tüfekler)

Bu zırh çeşidi 7.62 kalibreli zırh delici (AP-Armor Piercing) mermilere (A.B.D. askeri tarifiyle M2 AP), 10.8 g nominal kütle ağırlığında, 869 m/s veya daha az hızda çarpmaya karşı korumalı olmalıdır. Ayrıca yukarıda bahsedilen (a), (b), (c), (d) ve (e) kısımlarında geçen tehditlere karşı da koruma sağlamalıdır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

g) Özel Tip

Yukarıda adı geçen zırh standart tipleri dışında, tehditlere karşı belli seviyede koruma istenmesi durumunda, kullanıcı kesin kalibreleri ve referans alınacak minimum çarpma hızlarını belirler ve bu standardın da bütün yönleriyle yeterli olduğunu beyan eder (NIJ-STD-0101.04, 2019).

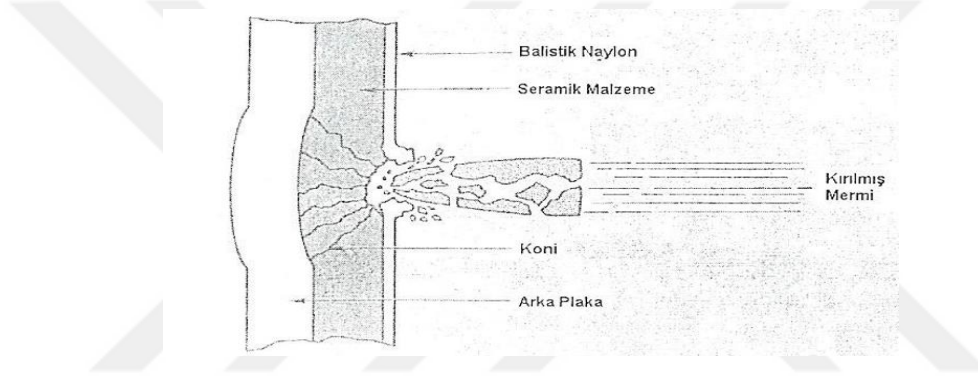


Şekil 2.3. a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreye sahip mermiler (Anonim, 2019).

NIJ STD.0101-04 standardı, zırhın mermiden kaynaklı dayanımını ve geçirmezliğin sağlanması durumunda hedef gerisinde oluşan deformasyonu tespit etmek için P-BFS testi (*the*

Perforation and Backface Signature Test) ve malzemenin dayanabileceği hız limitlerini tespit için yapılan balistik limit testlerini tanımlar.

NIJ STD.0101-04 ve NIJ STD.0101-06 standardında P-BFS testi arkasına iç organları simüle eden cam macunu, kil gibi malzemelerin, testi yapılacak olan plakanın arkasına yerleştirilerek belli mesafeden koruma seviyesinde belirtilen mermi çeşitleri ile atış yapılması mantığına dayanmaktadır. Yapılan atış zırhı delmemesi öncelik olup ayrıca atış sonrası iç organları simüle eden macunda 44 mm. çapından daha büyük çöküntünün oluşmaması beklenmektedir. Çünkü yapılan çalışmalarda 44 mm'den daha fazla oluşan çöküntü durumunda mermi zırhı delmese bile iç organlara zarar vererek ölüme sebep verdiği anlaşılmıştır. Kısacası zırh plakasının arkasına iletilen kinetik enerjinin yüzeye yayılması çok elzemdir.



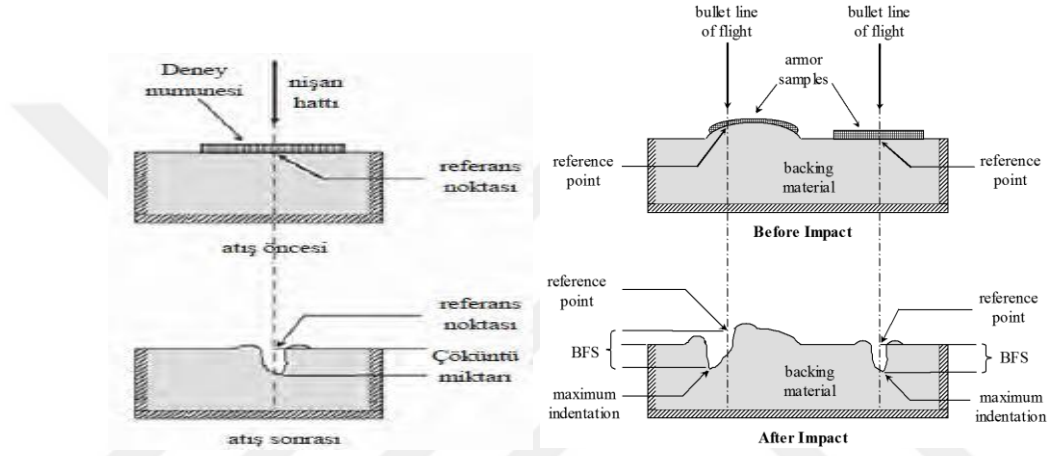
Şekil 2.4. Bir merminin seramik zırh plakaya çarpması (Alper ve ark, 2005).

Şekil 2.4'de bir seramik zırhın çalışma prensibi gösterilmektedir. Seramik zırhlar çift dayanımlı tabakalardan oluşur. Birinci plaka sert, ikinci plaka ise sünektir. Öndeki sert plaka darbeye beraber delici nesneyi kırarken arkadaki sünek plaka geri kalan darbe enerjisini emer ve mermi ve seramik parçalarını tutar. Şekil 2.4'de merminin seramik zırh plakaya çarpması verilmiştir (Alper ve ark, 2005).

P-BFS testi 2 aşamalıdır. Birinci aşama hazırlık aşaması ikinci aşama ise icra aşamasıdır. Hazırlık aşamasında testin yapılacağı numune ile iç organ ve beyni simüle eden destek malzemesi 24 saat boyunca $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de kondisyonlanması gerekmektedir. Akabinde destek malzemesinin teste uygunluğunun tespiti maksatlı en az 3 saat boyunca 29°C 'de bekletilir. 1043 ± 5 gram ağırlığında, $63,5\pm 0,05$ mm çapında çelik bilye 2 metre yükseklikten, kenarlardan 6 ± 3 mm içeriden ve merkezler arası 203 ± 25 mm olacak şekilde macunun üzerine serbest düşme etkisi ile bırakılmaktadır. Bu işlem sırasında 5 adet serbest düşme hareketi

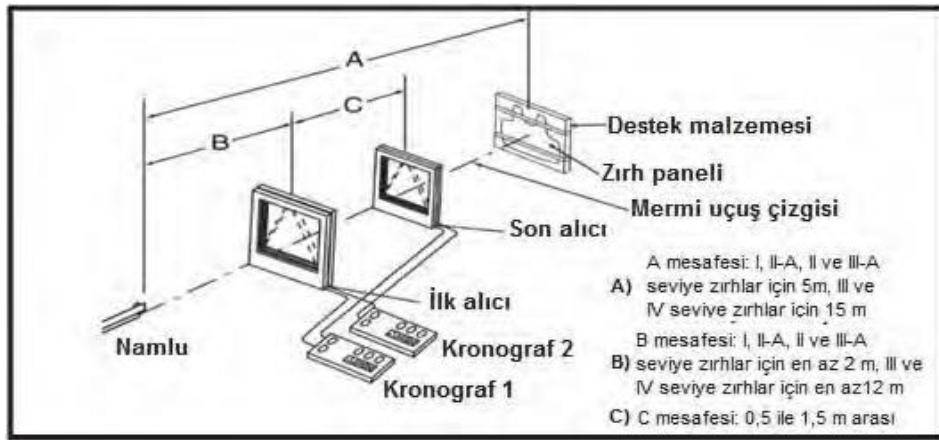
yapılmakta ve oluşan çukurların derinliklerinin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Aritmetik ortalama 20 ± 3 mm olduğu zaman destek malzemesinin teste hazır olduğu anlaşılmaktadır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

Test edilen malzemenin ön ve arka yüzü ile ıslak ve kuru olması durumunda balistik performansta farklılıklar olabileceği göz önünde bulunarak her durum için ayrı test edilmesi gerekmektedir. Malzemenin ıslaklık testinde yelekler $10-20^{\circ}\text{C}$ ve 100 ± 20 mm/sn hızla akan su ile 3 dakika süreyle ıslatılır. Yelekler daha sonra 10-30 dakika arasında atış testine tabi tutulmaktadır. Atışlar her iki yüzey için ayrı yapılmalıdır (Chen ve ark., 2012).



Şekil 2.5. Simüle maddesinin numune gerisine entegre edilmesi (NIJ-STD-0101.04, 2019).

Numune ile panel arasında entegre edilen destek malzemesinde boşluk kalmaması çok önemlidir. Atışlar gerçekleştirilirken istenilen koruma seviyesine göre hedef, ilk alıcı ve son alıcı arasındaki mesafeler değiştirilerek ayarlanmaktadır (NIJ-STD-0101.04, 2019).



Şekil 2.6. Balistik test düzeneği.

P-BFS testinde malzemede aranan koruma seviyesine göre balistik test düzeneğinde farklılıklar yapılmaktadır (Şekil 2.6). A mesafesi I, II-A, II ve III-A seviye zırhlar için 5 m olarak alınırken III ve IV seviye zırhlar için 15 m olarak belirlenmektedir. B mesafesi ise her seviye için minimum 2 m, C mesafesi 0,5 ile 1,5 m aralığında seçilmektedir. Standart P-BFS testinde koruma seviyesine göre kullanılacak merminin cinsi, ağırlığı, hız limitleri, hangi açıyla kaç atış yapılacağı gibi hususları belirtmiştir.

Standartta panel ve numune terimlerinin anlamı verilmiştir. Panel, vücut zırhını oluşturan B₄C ya da Al₂O₃ gibi tek plakayı, numune, panelleri ile birlikte bütün bir vücut zırhını tanımlamaktadır. Örneğin PBF-S testinde IV. seviye koruma için 10,6 g çekirdek ağırlığına sahip M2 AP zırh delici mühimmat ile minimum 878 m/s hızla panel başına bir, numune başına iki atış yapılması gerekmektedir.

P-BFS testinin başarıyla geçilmesi durumunda numunelerin balistik limit testi yapılabilir. Balistik limit testi zırhın hasara uğramadan dayanabileceği mermi hızının tespiti için yapılmaktadır. Bu hız merminin hedefe çarptığında %50 ihtimalle delinmenin gerçekleşeceği ya da gerçekleşmeyeceği ihtimalinin olduğu hızdır. Merminin hızı, baruta yapılan eklemelerle artırılmakta olup teknik bilgi MIL-STD 662'de belirtilmiştir. Uygulanan metoda aşağı yukarı (up and down) metodu denmektedir. Balistik limit testini daha iyi kavrayabilmek için tam delinme ve kısmi delinme terimlerinin anlamını bilmek faydalı olacaktır (NIJ-STD-0101.04, 2019).

Tam Delinme (Tam Penetrasyon): Atış sonrası merminin ya da zırh malzemesinden kopan parçanın zırh malzemesini tamamen delme durumudur.

Kısmi Delinme (Kısmi Penetrasyon): Zırh malzemesinde delinmenin hiçbir surette gerçekleşmeme durumudur.

Çizelge 2.8 Balistik limit testi.

Zırh Tipi	Test Mermisi	Panel Sayısı	Min. Atış Sayısı	Min. Penetrasyon Sayısı
I ile III arası seviye	FMJ	Ön ve arka	12 Ön yüzey	5 tam kısmi del. (Ön)
			12 Arka yüzey	5 tam kısmi del. (Arka)
III A Seviye	FMJ	2 ila 6	6	3 Tam 3 Kısmi Delme
IV Seviye	M2 AP	2 ila 6	6	3 Tam 3 Kısmi Delme

Aşağı ve yukarı hız metodu (up and down method) kullanılarak mermi atış hızları ayarlanmaktadır. İlk mermiye zırhın V_{50} balistik hız sınırı değerinde hız kazandırılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde tamamen delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 45 m/s daha az hızlı olacak şekilde atılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde kısmi delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 45 m/s daha fazla hızlı olacak şekilde atılmaktadır. Balistik zırhı delen ilk atışlar tamamlandıktan sonra, atışlar mermi hızları 27 m/s aşağı ya da yukarı büyüklükte olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. V_{50} balistik sınır hızı elde etmek için standartta yer alan prosedüre göre ateş etmeye devam edilmektedir. Atışların tamamlanmasına müteakip Çizelge 2.8'da belirtilen miktarda atış sayısının ortalaması V_{50} değerini verir.

2000 yılında balistik yeleklerin dayanımı üzerine yayınlanmış olan NIJ-0101.04 standardının bazı bölümlerinde balistik malzemenin belli bir süre kullanılması sonrası meydana gelen deformasyonun balistik performansta hesaba katılmaması gerekçesiyle güncellenmiş Temmuz 2008'de değişiklikler yapılmış ve Temmuz 2008'de NIJ-0101.06 standardı hazırlanmıştır. NIJ-0101.06 standardında numuneler ısıya, neme, mekanik aşınmaya ve yıpranmaya maruz bırakıldıktan sonra test edilebilmektedir (NIJ-0101.06, 2019).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yoğunluk Ölçümü ve Gözenek Analizi

Numunelerin yoğunluk ölçümleri 100 g kapasiteli 0,0001 g hassasiyet ile ölçüm yapan Mettler Toledo PG 503S marka hassas terazinin (Şekil 3.1) arşimet yoğunluk ölçümü ekipmanları kullanılarak hesaplanmıştır. Yoğunluk, su emme ve gözenek hesaplamaları TS 4380'de belirtildiği şekilde aşağıda verilmiş olunan 'Eş. 3.1' ve 'Eş. 3.2' doğrultusunda hesaplanmıştır.

$$\text{Bulk (görünür) yoğunluk} = D = M_1 \cdot \rho_{\text{su}} / (M_3 - M_2) \quad (3.1)$$

$$\text{Su emme} = \%A = [(M_3 - M_1) / M_1] \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Görünür gözeneklilik (porozite)} = a = (M_3 - M_1) \times 100 / (M_3 - M_2)$$

M_1 = Kuru haldeki numune ağırlığı (145°C' de yaklaşık 2 saat)

M_2 = Su içindeki ağırlık

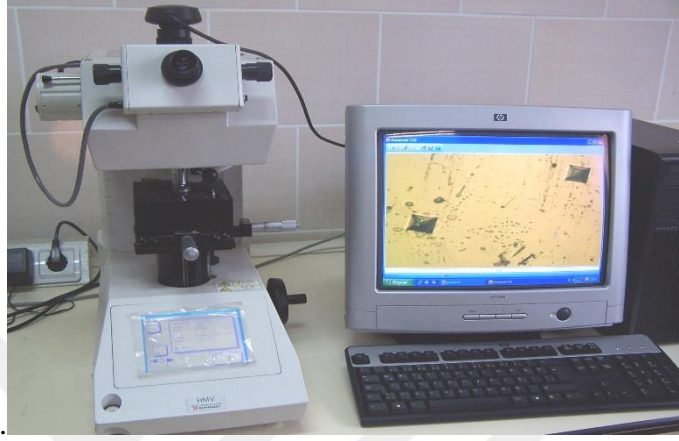
M_3 = Sudan çıkarılan numunenin nemli bez ile silindikten sonraki ağırlığı.



Şekil 3.1. Mettler Toledo PG 503S marka hassas terazi.

3.2 Sertlik Ölçümü

Numunelerin Vickers (HV1) sertlik ölçümü, yüzey parlatma işlemi sonrası Shimadzu marka sertlik ölçüm cihazı ile 1000 g, 20 saniye yük uygulanarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Shimadzu Vickers sertlik ölçüm cihazı.

3.3 Üç Nokta Eğme Testi

Eğme testi Şekil 3.3'deki 10 kN kapasiteli INSTRON 33 marka üniversal test cihazında mesnetler arası 30 mm alınarak 1 mm/dak hız ile gerçekleştirilmiştir. (12,96x40x59) mm boyutlarında olan alümina ve (10,23x40x50) mm boyutlarında olan bor karbür dikdörtgen numuneler teste tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3 INSTRON 33 marka üniversal üç nokta test cihazı.

Üç nokta eğme testinde deney ekipmanının boyut ve geometrisine bağlı olarak aşağıdaki 3.4 ve 3.5 formülleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_1 = \frac{P_1 S}{B w^2} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (3.4)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{w}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1.99 - \frac{a}{w}\left(1 - \frac{a}{w}\right)\left(2.15 - 3.93\frac{a}{w} + 2.7\frac{a^2}{w}\right)\right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{w}\right)\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.5)$$

S: Mesnetler arası uzunluk

B: Kiriş derinliği

w: Kiriş yüksekliği

P_1 : Uygulanan kritik yükü

$f\left(\frac{a}{w}\right)$: Geometriye bağlı boyutsuz bir katsayıyı ifade eder (Uğur, 1996).

3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Numunelerin parlatılmış yüzeylerinde görülebilecek hatalar ile beraber mikro yapısal özelliklerin belirlenmesi amacıyla Şekil 3.4'deki JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.4. JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu.

SEM-EDS yöntemi ile numunelerin elementel bileşimini karakterize etmek için, elektron demeti tarafından bombardıman edilen numuneden yayılan X-ışınları kullanılarak küçük yüzeyler ya da fazlar yarı-kantitatif olarak ortaya konulmuştur.

3.5 X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizleri

Numunelerin elementel (XRF) analizleri, içerikte bulunan elementleri tespit etmek ve element miktarını belirlemek amacıyla Van Çimento Fabrikasında bulunan Şekil 3.5'deki Panalytical ZETIUM marka XRF cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 3.5. Panalytical ZETIUM marka XRF cihazı.

3.6 X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizleri

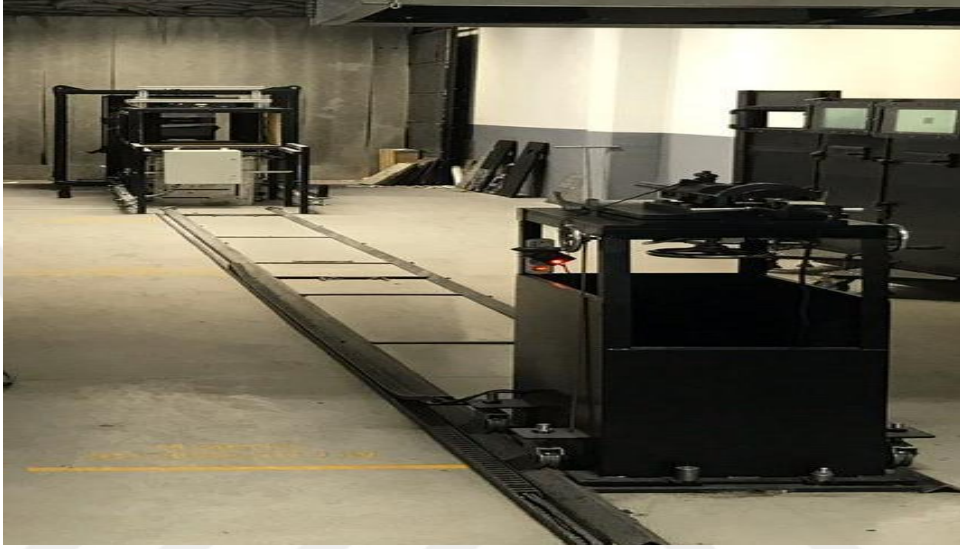
Numunelerin XRD analizleri BRUKER D8 ADVANCE XRD cihazı kullanılarak Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. XRD deneyleri 10-80°C, 2 θ açılarında, 2°/dak tarama hızı kullanılarak ICDD kartları doğrultusunda fazlar belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Bruker D8 Advance marka XRD cihazı.

3.7. Balistik Testler

Balistik testler; uluslararası standartlar sertifikasyonuna sahip özel bir balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Atışa hazır hale getirilen numuneler NIJ 0101-04 standartlarında P-BFS testi uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Balistik test laboratuvarı.



4. BULGULAR

4.1. Yoğunluk Ölçümü ve Gözenek Analizi Sonuçları

Bor karbür ve alümina seramik numuneler ağırlığı sabit kalıncaya kadar etüvde kurutuldu ve Metter Toledo PG 503-S marka hassas terazide tartıldılar (WK). Seramik plakalar 110°C sıcaklığa çıkarıldı ve kaynayan su içerisine atılarak, 4 saat süresince kaynatma işlemine devam edildi. Daha sonra oda sıcaklığına indirildi. Numuneler deney için özel hazırlanmış düzenekte su içerisinde asılı ağırlıkları tartıldı (WA). Daha sonra numuneler sudan çıkarıldı ve yüzeyindeki su, kâğıt havlu yardımıyla silinerek hızlı bir şekilde terazide tartıldı (WD).

Çizelge 4.1. Yoğunluk, su emme ve porozite değerleri.

Analizler	B ₄ C Seramik Plaka	Al ₂ O ₃ Seramik Plaka
Yoğunluk (g/cm ³)	2,52	3,85
Su Emme (%)	0,097	2,17
Porozite (%)	0,236	2,6

Numunelerin mikro yapılarına bakıldığında gözenek oluşumu neredeyse yok denilecek kadar azdır. B₄C plakalarının içeriğinde bulunan Fe, Al, Si katkılarının porları doldurduğu anlaşılmaktadır. Literatürde karşılaştırma yapıldığında, piyasadan temin edilen B₄C zırh seramiklerinin yoğunlukları 2,427-2,345 g/cm³, porozite miktarı ise % 1-1,297 aralığında hesaplanmıştır (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008). Ölçümler sonucunda alüminanın en yüksek yoğunluk değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, B₄C plakalarında, Fe, Al ve Si elementleri hem yoğunluğu artırmış hem de gözenekleri doldurmuştur. Fakat mikro yapıya bakıldığında B₄C plakanın Al₂O₃ plakasına nazaran daha gözenekli olduğunu söylemek olasıdır. Fakat porozite yüzdesi Al₂O₃ plakasından daha düşük hesaplanmıştır. Bu durum, B₄C plakasının mikro yapısında görülen boşlukların kapalı olduğu bilgisini vermektedir. Al₂O₃ plakası için literatür karşılaştırması yapıldığında Silva ve arkadaşlarının çalışmasında yoğunluk, su emme ve porozite değerleri verilen %99 saflıkta alümina ile çalışmamızda ki numunenin yoğunluklarının eşit olduğu

görülmüştür (Silva ve ark., 2014). Ayrıca bu çalışmadaki numunelerin porozite değeri daha düşük olmakla birlikte söz konusu çalışma ile arasında kayda değer bir fark bulunmamaktadır.

4.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Seramik malzemelerin sertlik ölçümlerinde en güvenilir sonucu vermesi sebebiyle Vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. Numune yüzeyinde oluşan izin görülebilmesi için yüzeyde parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemini kolaylaştırmak için bakalite alma işleminden geçirilen numuneler sırasıyla 14, 9, 6, ve 3 mikron metre elmas cila ile parlatıldı. Parlatılan numuneler daha sonra sertlik ölçümleri için Shimadzu marka sertlik ölçüm cihazında 1000 g yük 20 sn uygulanarak sertlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Sonuçların sağlıklı olması için numunelerin farklı noktalarından toplam 5 adet ölçüm yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Sertlik ölçüm sonuçları.

Numuneler Vick.)	1.Ölçüm	1.Ölçüm	1.Ölçüm	1.Ölçüm	1.Ölçüm	Ortalama
Bor Karbür	3320	3410	3170	3480	3345	3345
Alümina	1600	1445	1507	1455	1543	1510

Yapılan 5 ölçümün birbirine yakın değer vermesi numunenin homojen bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Literatürde, B₄C nin Vicker sertlik değeri 4452 olarak bulunmuştur (Evcı, 2009). Bu çalışmada, sertlik değeri 3345 olarak daha düşük hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan B₄C numunelerin ön sinterleme aşaması sonrasında yüzeyde bulunan porları doldurmak ve C atomları ile reaksiyona girmek üzere Si metali ile emdirilmektedir. 1600 °C'de yaklaşık 250 dak Otoklav fırınında ısıtılan numunede Si metali eriyerek gözenekleri doldurmaktadır. Ayrıca içerikte bulunan ve reaksiyona girmemiş C atomları ile SiC bileşiğini oluştururlar. Reaksiyon dışı C atomların varlığı numunenin sertliğini olumsuz etkilemektedir. Aslında B₄C plakasının sertliğini büyük ölçüde B₄C, SiC ve Si bileşikleri belirlemektedir. Bilinmesi gereken önemli nokta kalıntı Si oranının etkisidir. Reaksiyona girmeyen ve plaka içerisinde elementel olarak kalan Si, B₄C'nin sertliğini, eğme dayanımını ve young modülü parametrelerini olumsuz yönde

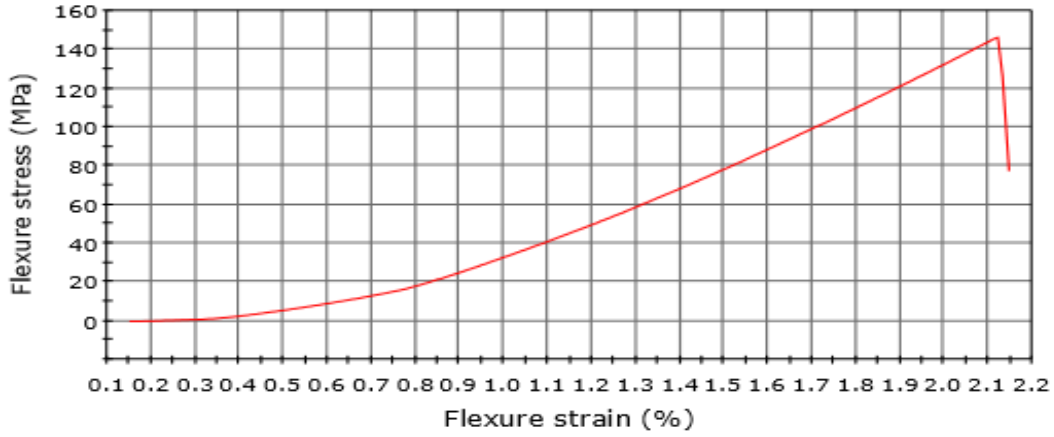
etkiler. Fakat diğer yandan, plakanın kırılma tokluğunu yükseltir (Dariel, 2012). Bu sebeptendir ki bu çalışmadaki numunelerin sertlik değeri daha düşük çıkmıştır. Ayrıca Savio ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada B₄C'nin sertlik değeri 3517 (\pm 100) olarak hesaplanmış olup bu çalışmada elde edilen veri ile oldukça yakın bir değerdir (Savio ve ark., 2010) Al₂O₃ için literatür karşılaştırması yapıldığında, Al₂O₃ seramik plakasının sertlik değeri Vickers cinsinden 1529 olarak hesaplanmıştır (Batıbay, 2013) Elde edilen değer, bu çalışmadaki değerden yüksek olup (1510) kayda değer bir fark yoktur. Ayrıca Batıbay'ın çalışmasında, alümina içerisine Co, Ni, Mo gibi iyon ilavelerinin sertliği artırdığı fakat bu sertliğin tek başına daha iyi bir balistik performans sağlamadığı anlaşılmıştır (Batıbay, 2013).

4.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

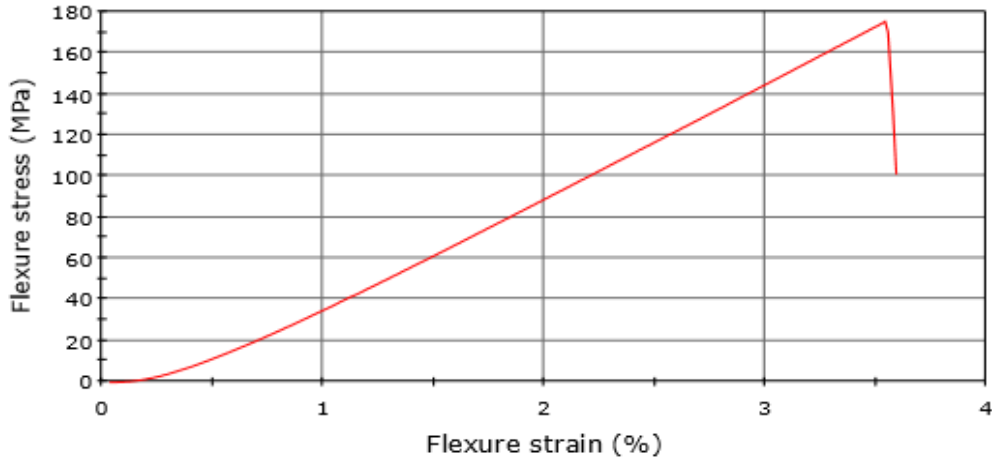
Üç nokta eğme testi ile seramik plakalara etkiyen yük ve elastik deformasyon arasındaki ilişkiyi ve bu ilişkiden yola çıkarak malzemenin bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. B₄C ve Al₂O₃ plakalarının seramik esaslı olması nedeniyle kırılma ile sonlanmıştır. Bu da bize numunelerin dayanabileceği maksimum eğme mukavemetini vermiştir. Üç nokta eğme testinin sonunda elastisite modülleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.3 de numunelere ait eğme mukavemetleri ve elastisite modülleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 Eğme mukavemeti ve elastisite modülü

Numuneler	Eğme Mukavemeti	Elastisite Modülü
Bor Karbür	145,98 MPa	440 GPa
Alümina	174,89 MPa	339 GPa



Şekil 4.1. Bor karbür üç nokta eğme testi grafiği.



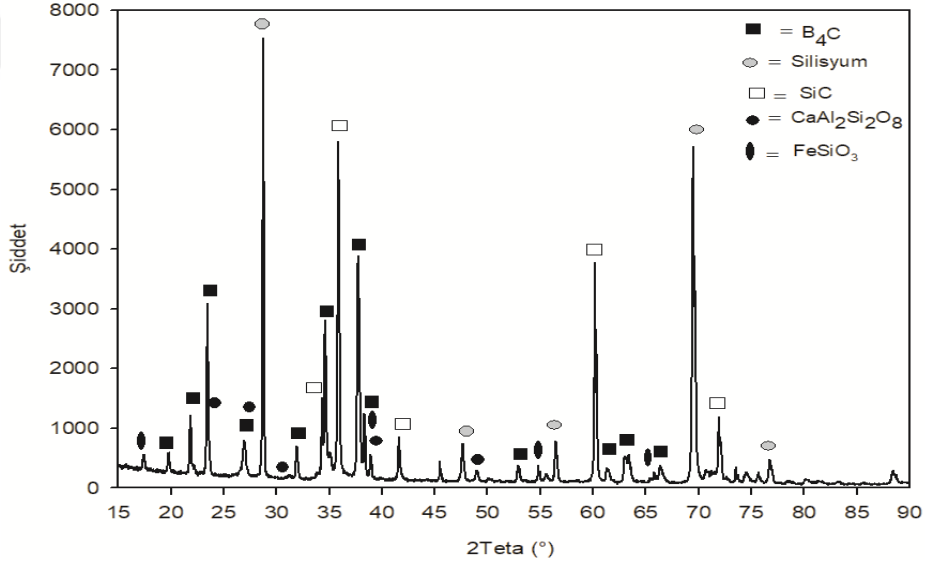
Şekil 4.2. Alümina üç nokta eğme testi grafiği.

Üç nokta eğme testlerinin sonuçlarına göre B_4C 'nin elastisite modülü Al_2O_3 'e göre daha yüksek fakat eğme dayanımının düşük olduğu anlaşılmaktadır. Eğme dayanımı yüksek olan numune daha iyi bir balistik performans ortaya koymuştur. Sertlik değeri yükseldikçe malzemelerin elastisite modülleride yükselmektedir bunun sonucu olarak malzeme daha kırılğan hale gelmektedir. Başka bir çalışmada da alüminalar Co, Ni, Mo gibi iyonlarla katkılandırılarak sertliği artırılmış ve safa yakın özel bir firmadan alınan alümina ile elastisite modül karşılaştırması yapılmıştır. Safa yakın numunenin elastisite modül değeri bu çalışmadaki sonuç ile uyusmaktadır (365 MPa). Ayrıca eğme dayanımı yüksek olan malzemeler daha iyi balistik performans göstermiştir (Batıbay, 2013). Başka bir çalışmada B_4C için elastisite modülü 454 GPa ve Al_2O_3 için 292 GPa olarak

hesaplanmıştır (Evcı, 2009). Ayrıca söz konusu çalışmada, bizim çalışmamıza benzer B₄C elastisite modülü Al₂O₃'e nazaran daha yüksek fakat eğme dayanımı daha düşük çıkmıştır.

4.4. B₄C Zırh Seramiğinin Karakterizasyonu

Üretimi yaptırılan B₄C seramik zırh plakalarının faz yapısının tespiti amacıyla yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 4.3.'de verilmiştir.

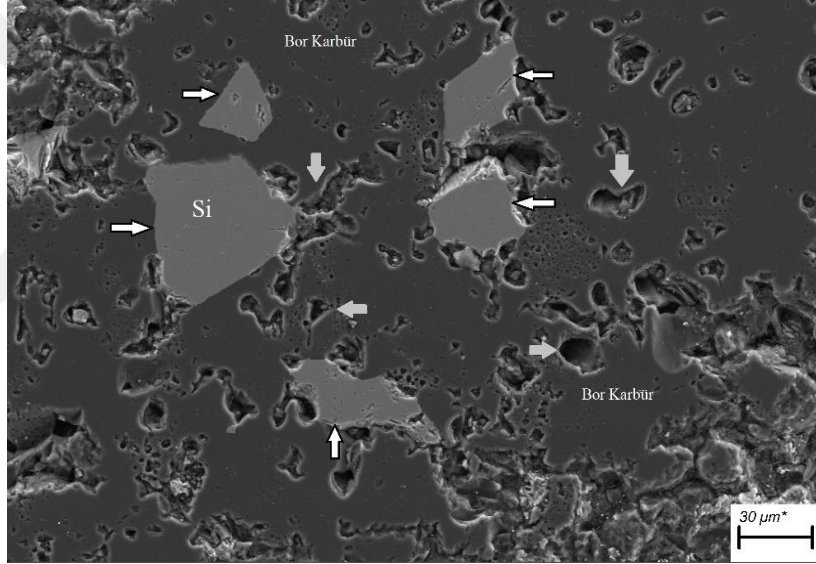


Şekil 4.3. B₄C numunesine ait XRD paterni.

Belirlenen fazlar bor karbür (00-019-0178), silisyum (04-012-7888), silisyum karbür (04-008-1657), kalsiyum silikat (04-011-5378) ve ferrosilit (04-009-1850) dir. Literatürde de belirtildiği gibi silisyum karbür iki farklı reaksiyon sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki, karbon ve ergimiş silisyum, ikincisi ise bor karbür ve ergimiş silisyum arasında gerçekleşmektedir (Yurkov ve ark. 1987, Chen ve ark. 2007). Kalsiyum alüminyum silikat ile ferrosilitinin oluşmasının nedeni eser miktarda kalsiyum ve demir katkılarının ergimiş silisyum, bor karbür ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır.

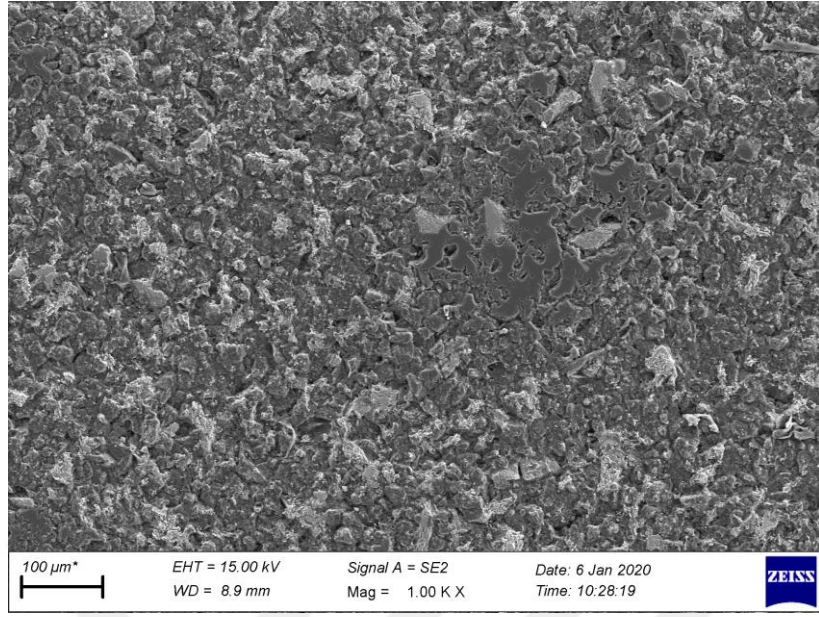
Bor karbürün tane boyutları, 1750 °C lerin üstünde gerçekleştirilen çözünme-çökelme işlemine bağlı olarak ergimiş silisyumun infiltrasyonu sonucunda Şekil 4.3'de

olduğu gibi düzgün ve çift-tepeli (faceted) dağılım göstermektedir. Bu durum tipik düzgün olmayan tane büyümesinin göstergesidir. Yüksek sıcaklıklarda bor karbür tanelerinde belirgin keskin köşeler ve düzgün kenarlar gözlemlenmektedir (Zhang ve ark. 2016) (Şekil 4.4). Ergimiş silisyumun gözeneklere infiltrasyonu esnasında bor karbür tanelerinin şekil değişimi Ostwald Olgunlaşması ile açıklanmaktadır. Küçük taneler anafaz içinde çözünürken, büyük taneler çözünen çözeltilerden gelen atomların eklenmesiyle büyümeyi sürdürmektedir. Sonuç olarak, küçük taneler çözünme şeklini, büyük taneler büyüme şeklini göstermektedir (Han ve ark. 1989). Şekil 4.4'deki gri oklar ile gösterilen gözenekler, sinterleme süresinin yeterli olmadığını ve buna bağlı tam yoğunluğa ulaşmamış numuneyi işaret etmektedir.

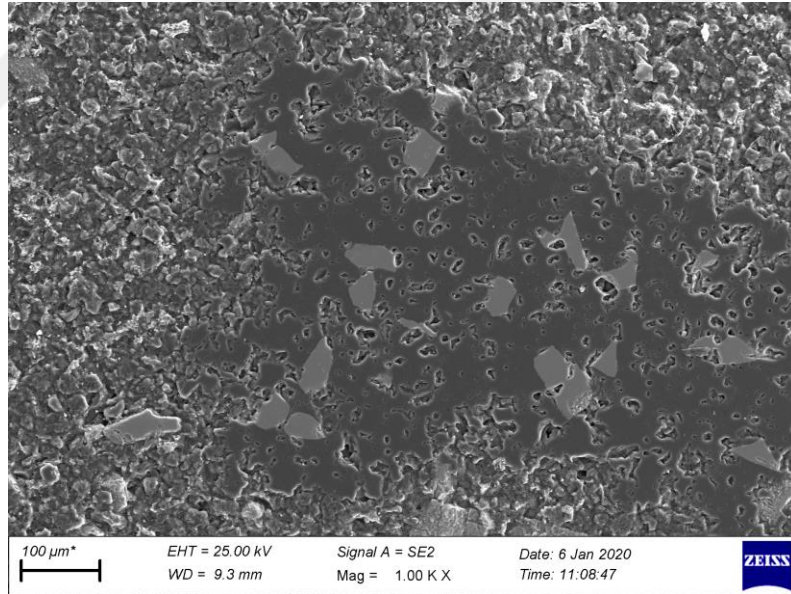


Şekil 4.4. B₄C plakasının SEM görüntüsü.

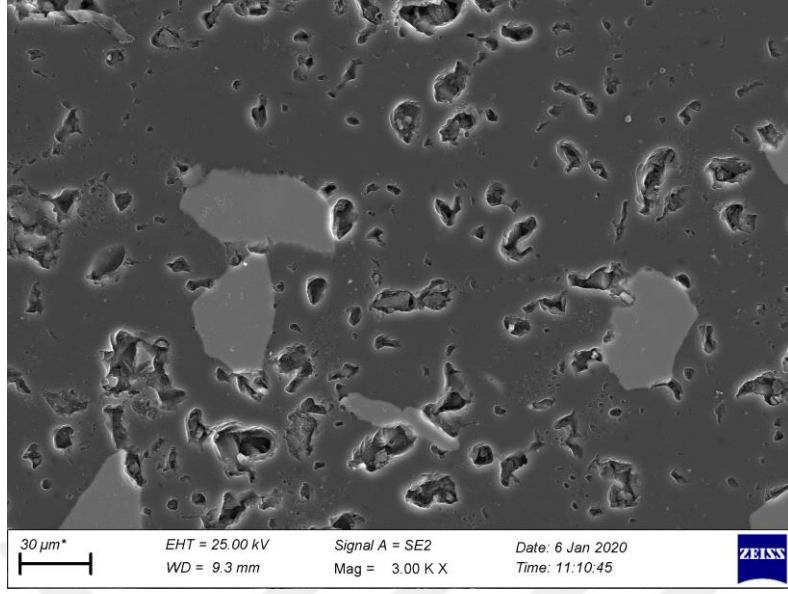
B₄C seramik zırh plakalarının karakterizasyonu amacıyla SEM analizine tabi tutulmuştur. B₄C seramik zırh plakalarının SEM fotoğrafları Şekil 4.5- 4.6 arasında gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Mikron boyutta B₄C numunesine ait yüzey görüntüsü.



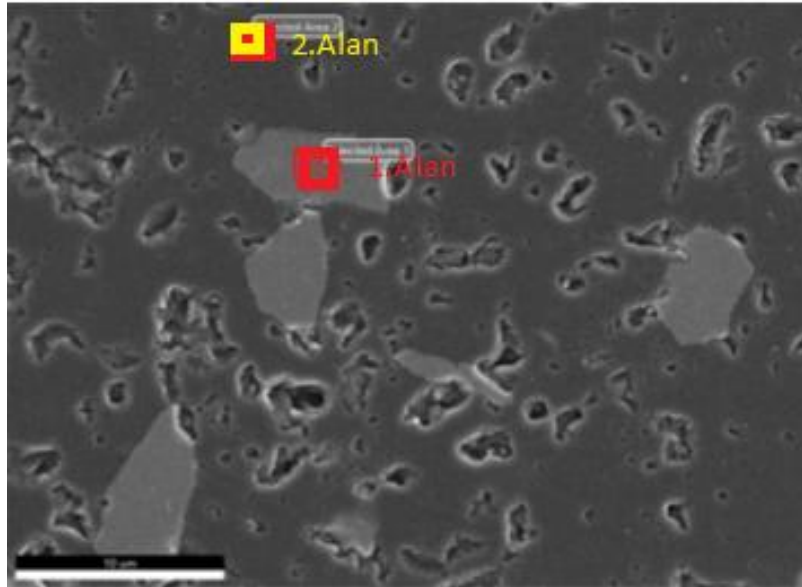
(a)



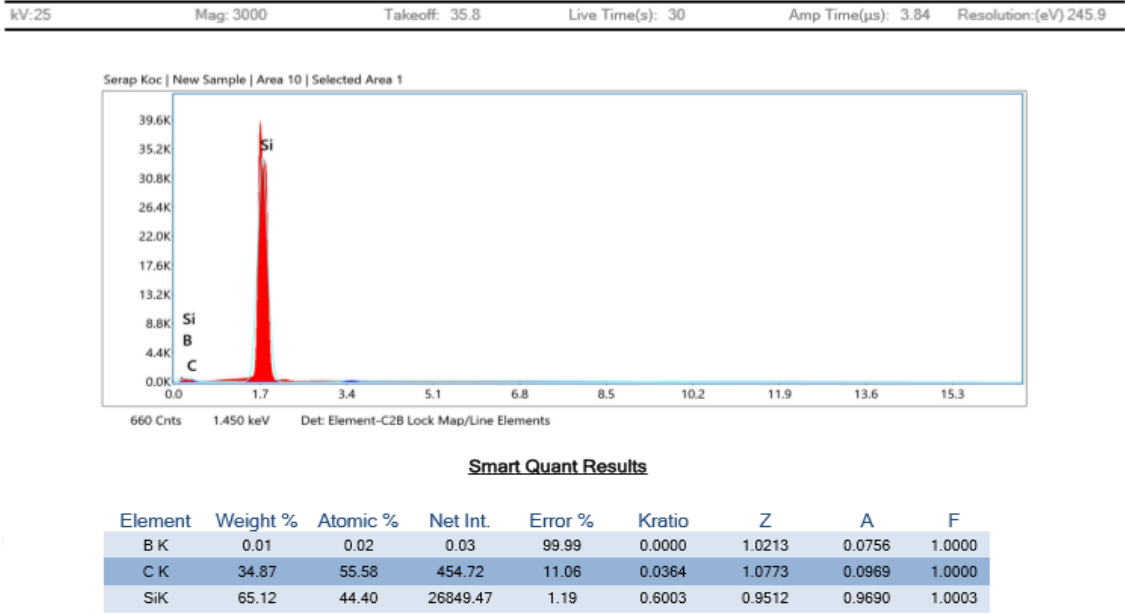
(b)

Şekil 4.6. (a) ve (b) Farklı büyütmelerde B₄C yüzeyinin mikro yapı görüntüleri.

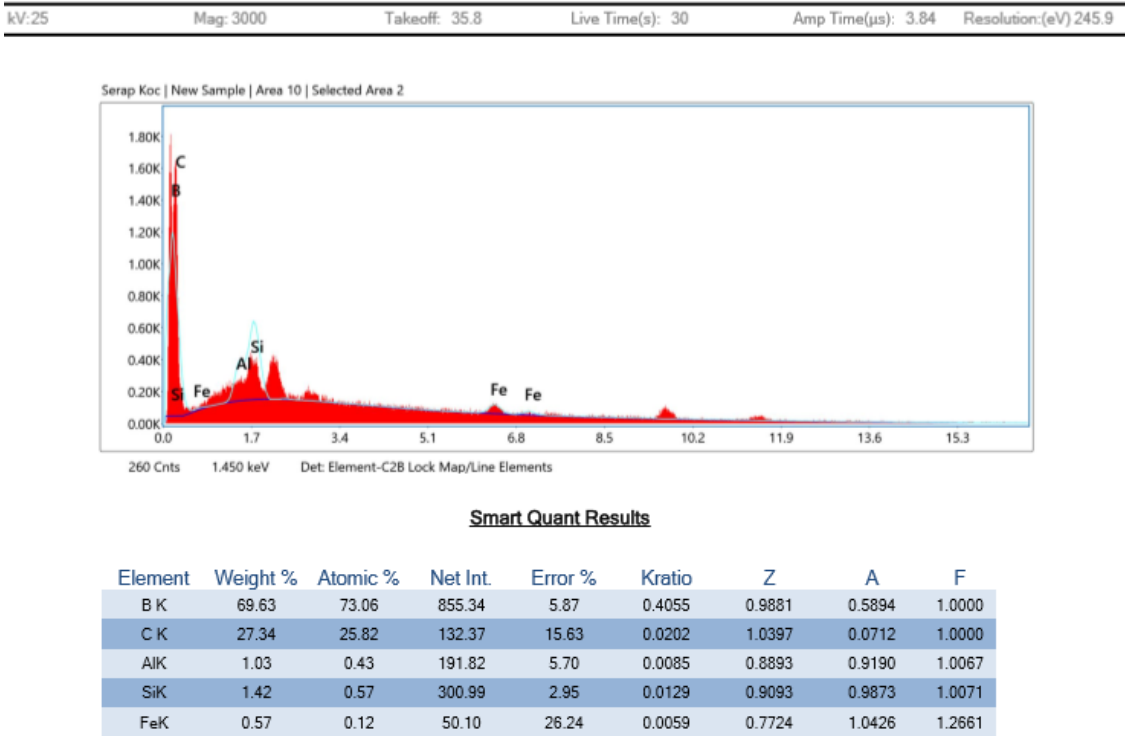
Şekil 4.7'deki B₄C seramik plakasının EDS analiz sonucu Şekil 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Yapılan EDS analiziyle yapıdaki B, Si, C, Al, Fe gibi elementler tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. B₄C seramik yüzeyinde EDS analizi için seçilen noktalar.



Şekil 4.8. 1. bölge EDS analiz sonucu.

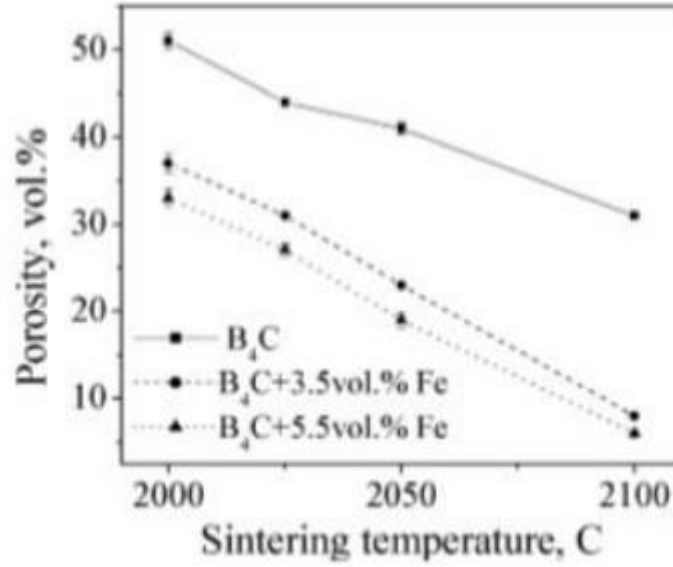


Şekil 4.9. 2. bölge EDS analiz sonucu.

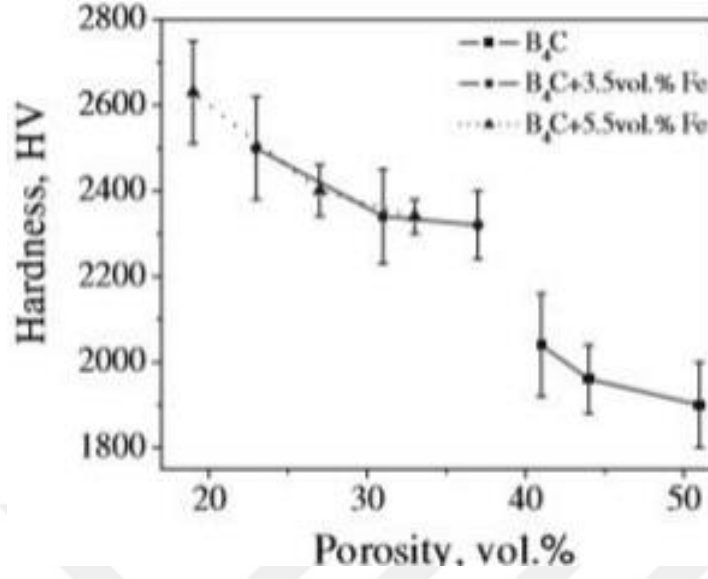
EDS sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.8) B_4C zırh seramiği içerisinde önemli ölçüde Si (%65 w) elementi göze çarpmaktadır. Bu elementin tespiti beklenen bir sonuçtur. B_4C plakalarında reaksiyona girmemiş serbest C atomunun varlığından

kaynaklı %20-25 oranında porozite bulunmaktadır. Si metali yüksek sıcaklıkta eriyerek gözenekleri doldururken, C atomları ile reaksiyona girer ve SiC bileşiklerini oluşturur. Yapı içerisinde B_4C , SiC ve Si bileşikleri yer almış olur. Bu üçlü, plakanın sertliğini büyük oranda belirler. Reaksiyona girmeyerek içerikte bulunan Si atomları plakanın sertliğinde, eğme dayanımı ve elastisite modülü parametrelerini olumsuz yönde etkiler. Fakat plakanın kırılma tokluğunu yükseltmektedir. (Nesmelov ve ark., 2015)

Fe eklentisinin amacı da aynı temele dayanmaktadır. Sinterleme aşamasında yüksek ısıda eriyerek gözenekleri dolduran Fe elementi yoğunluğu artırmaktadır. Bunun yanında yüksek sertliği de sağlamaktadır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den de anlaşıldığı gibi en düşük porozite ve en yüksek sertlik %5.5 Fe katkılı B_4C 'de görülmektedir. Fe katkısı azaldıkça porozitede artış ve buna takiben sertlikte düşüş yaşanmaktadır. Fakat bu durumun zırh malzemesinin daha ağır olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.10. Fe ilavesinin gözenek yapısına etkisi (Mizrah ve ark., 2007).



Şekil 4.11. Fe ilavesinin sertliğe etkisi (Mizrah ve ark., 2007).

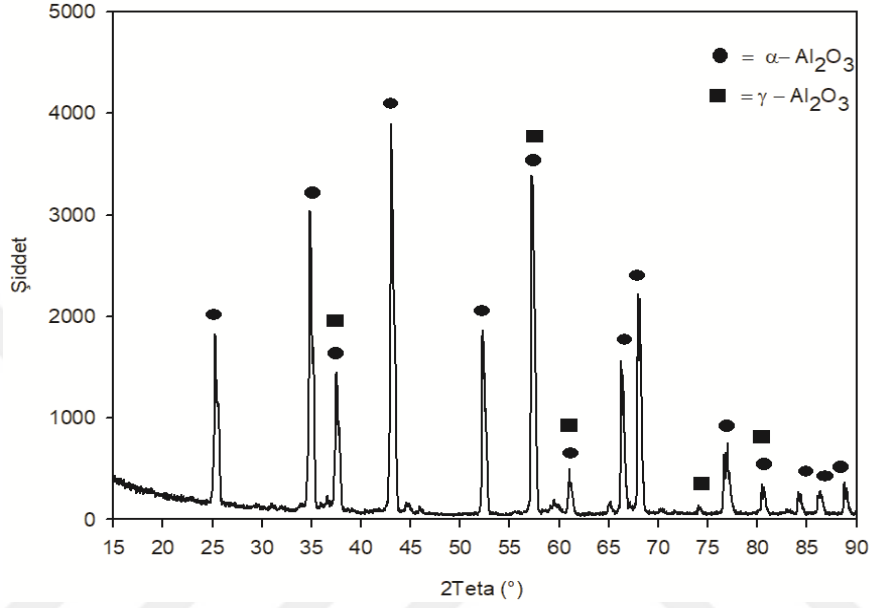
Kullanılan B₄C plakasının temel bileşiklerini belirlemek için elementel analiz (XRF) uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’de belirtilmiştir. XRF sonuçları numunelerde yan ürünlerinde olduğunu ortaya koymaktadır. Çizelge 4.4’den anlaşılacağı üzere B₄C plakasında Al₂O₃, SiO₂ ve FeO₃ miktarı yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar EDS analizini doğrular niteliktedir. B₄C plakalarında Al₂O₃, SiO₂ ve Fe₂O₃ önemli bileşikler olduğu bilinmektedir.

Çizelge 4.4. B₄C elementel analiz sonuçları (XRF).

Elementler	Yüzde %
SiO ₂	1,79
Al ₂ O ₃	89,83
Fe ₂ O ₃	3,31
CaO	1,31
MgO	0,87
SO ₃	0,03
K ₂ O	-
Na ₂ O	-

4.5. Al₂O₃ Zırh Seramiğinin Karakterizasyonu

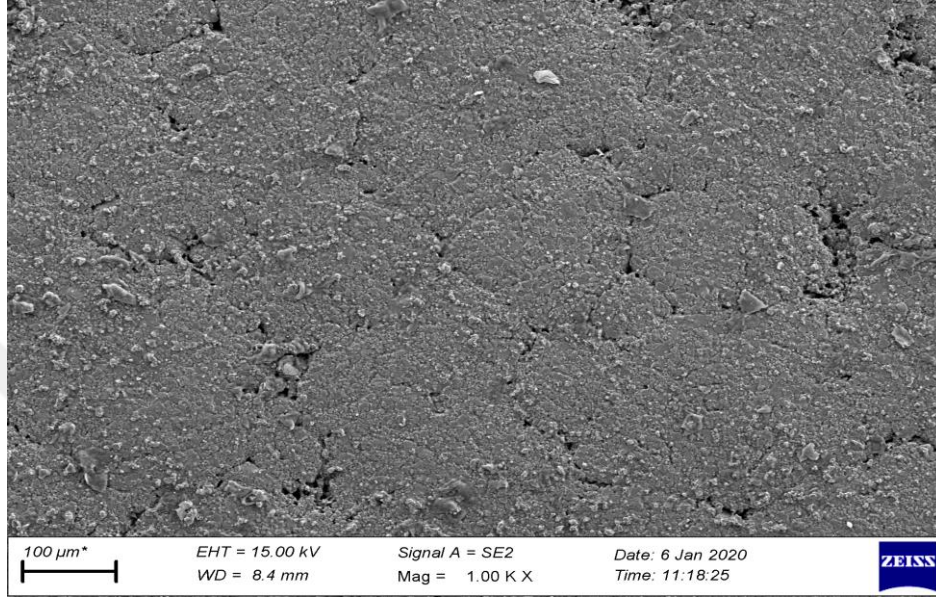
Üretimi yaptırılan Al₂O₃ seramik zırh plakanın faz yapısının tespiti amacıyla XRD analiz sonuçları Şekil 4.12.'de verilmiştir.



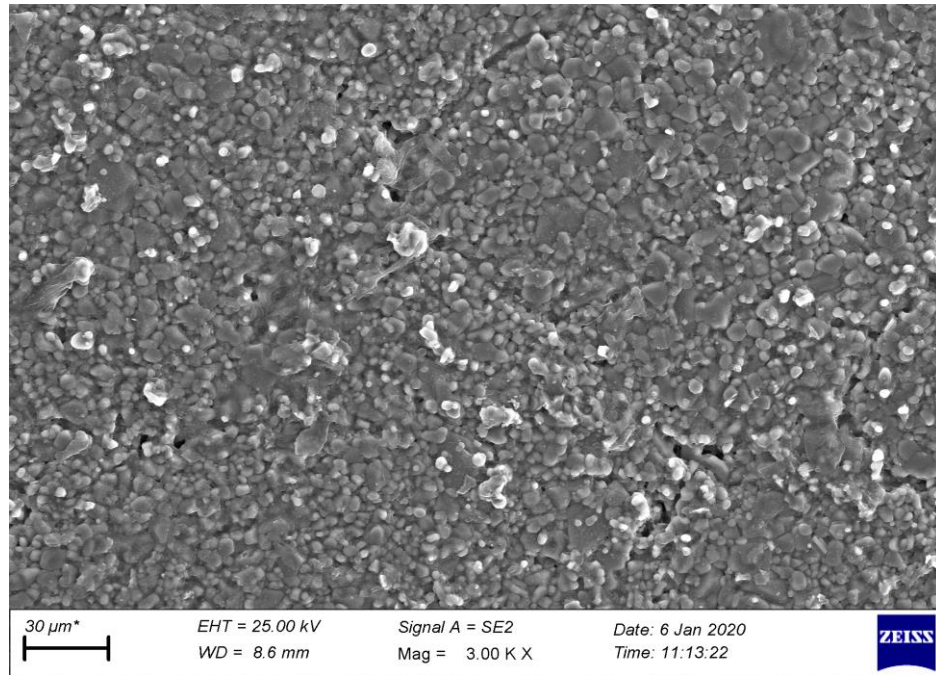
Şekil 4.12. Al₂O₃ numunesine ait XRD paterni.

Şekil 4.12'de alümina XRD paterni görülmektedir. Beklenildiği gibi numune çoğunlukla Al₂O₃ (ICDD 00-001-1243) fazından oluşmaktadır. XRD analizinde, ağırlıkça α-Al₂O₃ fazı olmak üzere, γ-Al₂O₃ fazları görülmektedir. Şekil 4.12'de R-3c uzay grubuna ait hegzagonal yapıda α-Al₂O₃ (JCPDS: 98-002-8102) ve Fd-3m uzay grubuna ait kübik yapıda γ-Al₂O₃ (JCPDS: 98-006-7690) fazlarının tepe noktaları görülmektedir. XRD grafiğinde görülen keskin tepe noktaları başlangıçtaki tozun büyük tane boyutlarının, düşük sıcaklıklarda görünen gözenekli yapının çökmesine bağlı olarak toz yüzey alanının değişmesi ile ortaya çıkmaktadır. α-Al₂O₃, 420°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda bazik hidroksit jelleşmeden dolayı kristalleşmeye başlamaktadır. Yarı kararlı alümina polimorfların varlığında, 1100°C tavlama sıcaklığına bağlı olarak farklı geçiş dizileri sonucu termodinamik olarak kararlı α-fazına dönüşmektedir (Levin ve ark. 1998).

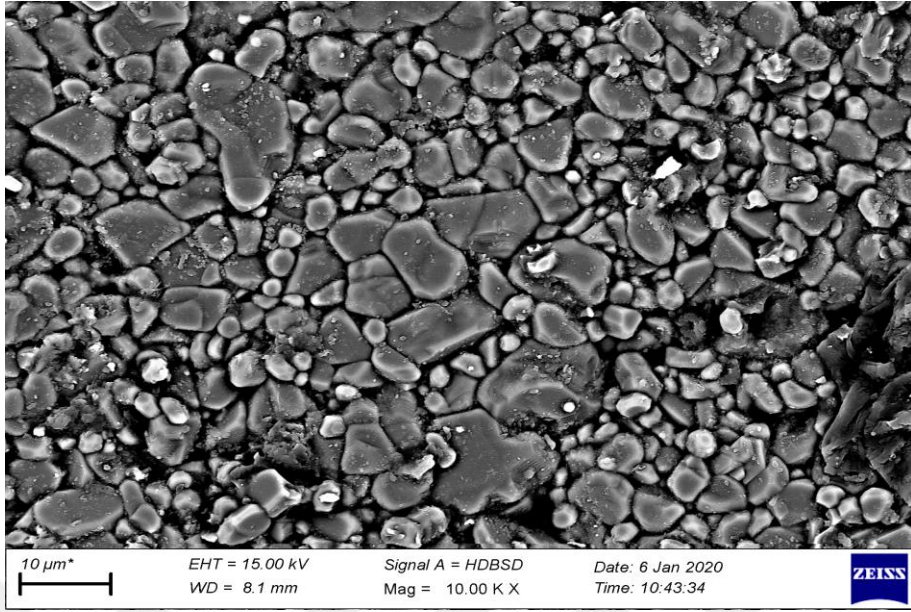
Sıcak pres yöntemiyle üretimi yaptırılan Al_2O_3 zırh seramikleri karakterizasyonu amacıyla SEM analizine tabi tutulmuştur. Al_2O_3 seramik zırh plakalarının SEM fotoğrafları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.13. Al_2O_3 numunesine ait SEM görüntüsü.



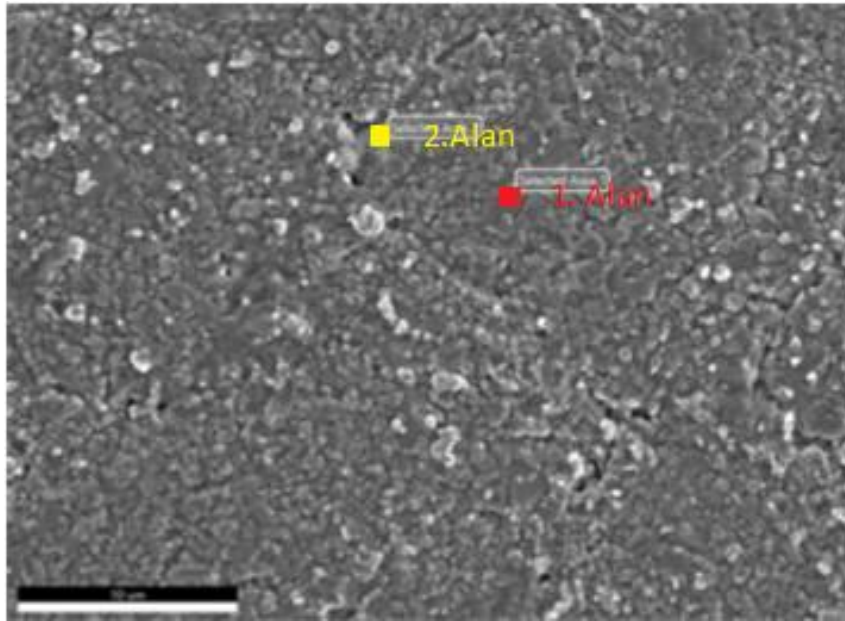
(a)



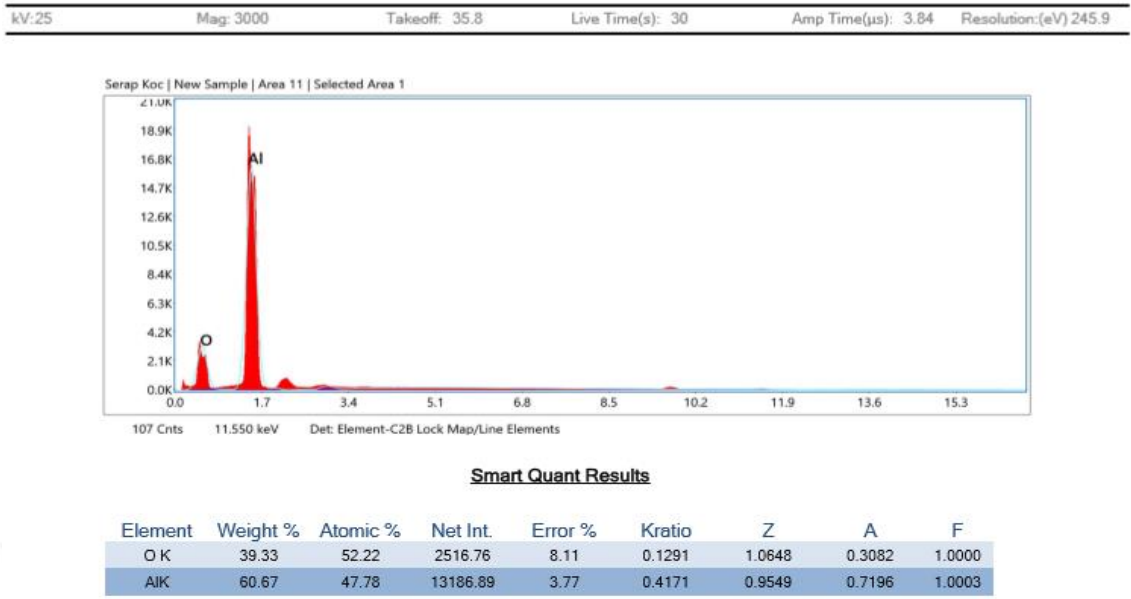
(b)

Şekil 4.14. (a) Farklı büyütmedeki Al_2O_3 yüzeyinin SEM görüntüsü, (b) Backscattering SEM görüntüsü.

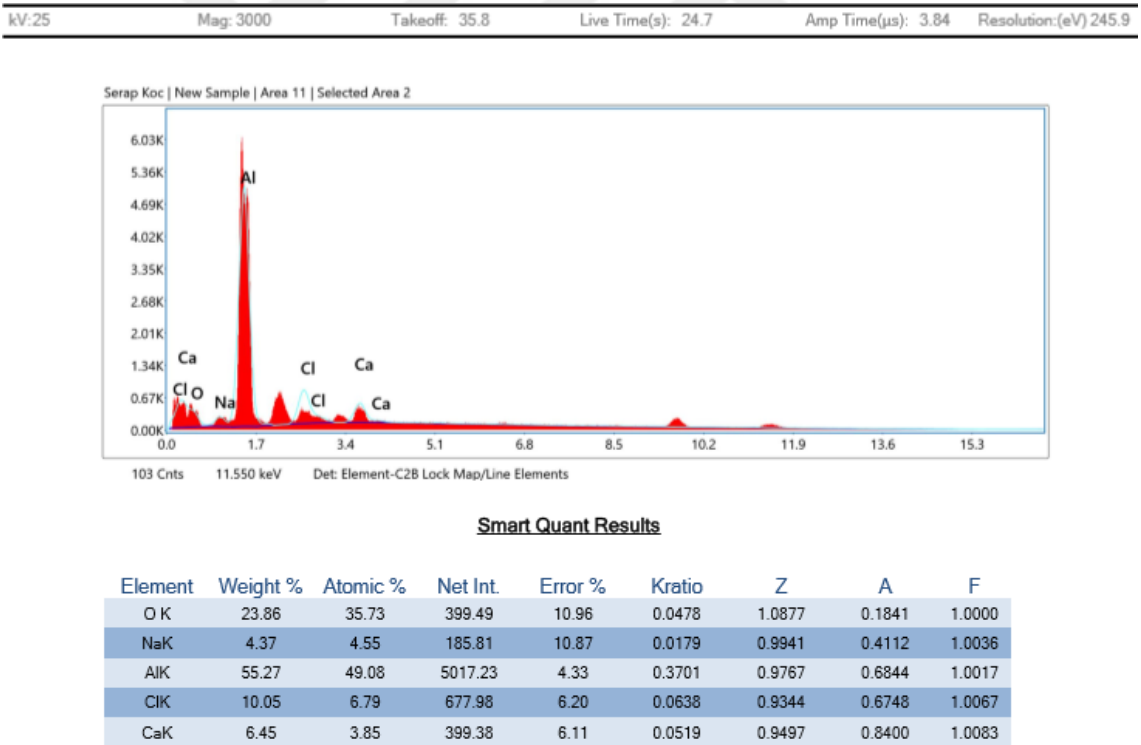
Şekil 4.15'deki Al_2O_3 seramik plakasının EDS analiz sonucu Şekil 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Yapılan EDS analiziyle yapıdaki O, Na, Al, Cl, Ca gibi elementler tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. Al_2O_3 seramik yüzeyinde EDS analizi için seçilen noktalar.



Şekil 4.16. 1. Bölge EDS analiz sonucu (Al_2O_3).



Şekil 4.17. 2. Bölge EDS analiz sonucu (Al_2O_3).

Al_2O_3 seramik plakasının EDS analizi incelendiğinde malzeme içeriğinin safaya yakın olduğu görülebilmektedir. İçerikte Al (% 60.67 w), O (% 39.33w) eser miktarda Na,

Cl ve Ca elementlerinin bulunduğu gözlenmektedir. Kalsine alümina üretiminde kimya büyük rol oynamaktadır. Düşük sıcaklarda daha büyük veya eşit büyüklükte kristallerin oluşturulması için kristal büyütücü katkı maddesi eklemek gerekmektedir. Bu katkılara mineralleştiriciler denir. Bunlar tuzlar ya da bor asitleri, florin veya klorinden oluşurlar. İçerikteki Na, Cl, ve Ca elementlerin varlığı bu sebeptendir. Fakat bu katkı %2'nin altındadır (Saridede ve ark., 2016).

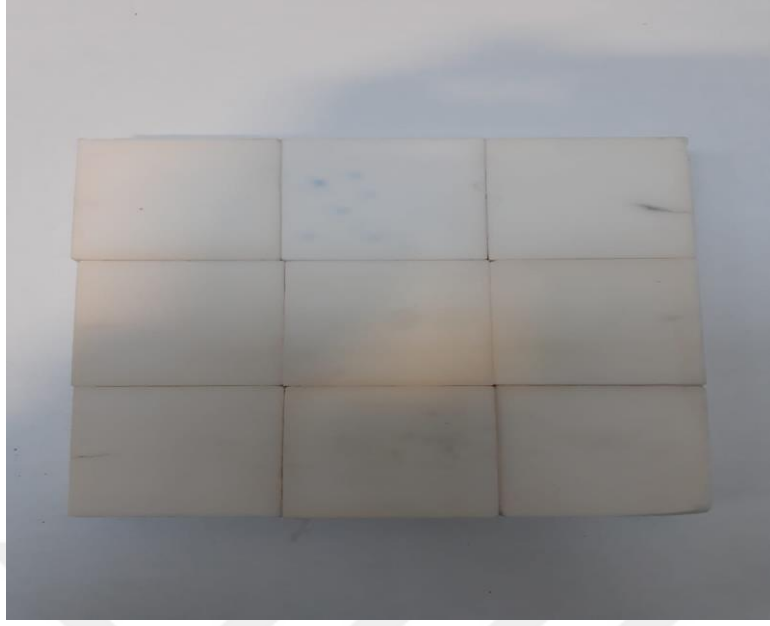
Kullanılan Al₂O₃ plakasının temel bileşiklerini belirlemek için yapılan elementel analiz (XRF) sonuçları Çizelge 4.5'de belirtilmiştir. Al₂O₃'ün elementel analizinde de yan ürün oluşmadığı görülmektedir. Numunenin safa yakın olması nedeniyle Al₂O₃ bileşiğinin miktarı yüksek çıkmıştır.

Çizelge 4.5. Al₂O₃ elementel analiz sonuçları (XRF).

Elementler	Yüzde %
SiO ₂	0,081
Al ₂ O ₃	99,23
Fe ₂ O ₃	0,027
CaO	0,02
MgO	0,435
SO ₃	0,009
K ₂ O	0,0061
Na ₂ O	0,16

4.6. Balistik Test Sonuçları

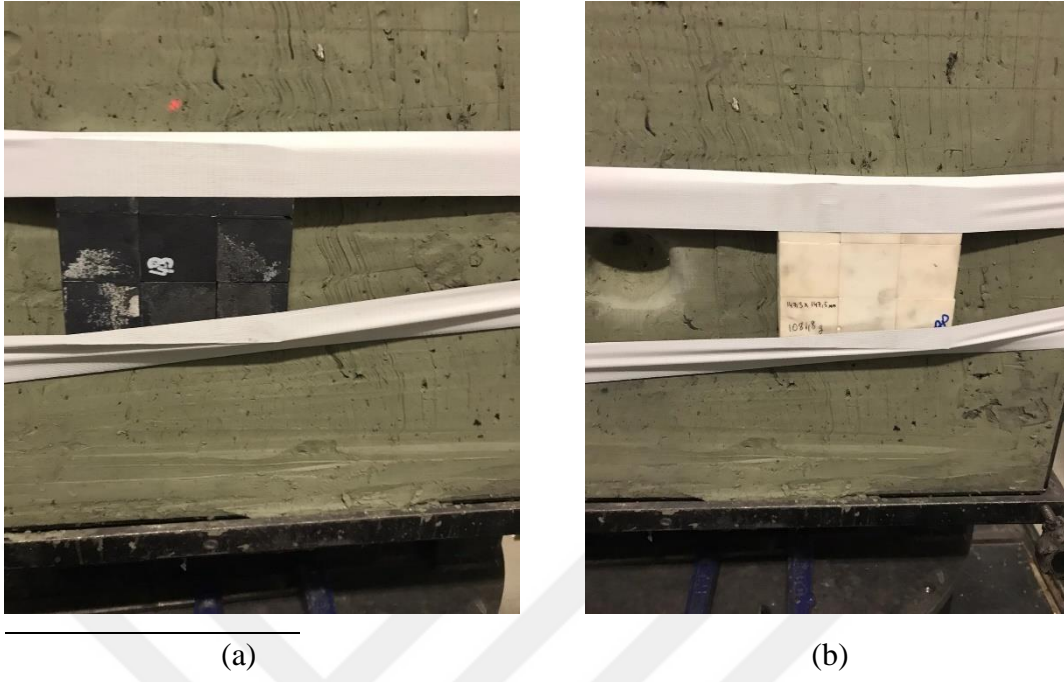
Balistik testler Ankara'da bulunan özel bir firmaya ait uluslararası standartlara uygun balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Zırh paneli 50x50x10 mm ebatlarında 6 adet plakadan oluşturulmuştur (150x150x10 mm.). Test, atışa hazır hale getirilen numunelere 15 m mesafeden 7.62x63 mm M2 AP çelik çekirdekli mühimmatlar ile atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası oluşan travma derinlikleri hesaplanmıştır. Numunelerin atış öncesi ve sonrası görselleri Şekil 4.18 ile 4.24 arasında verilmiştir.



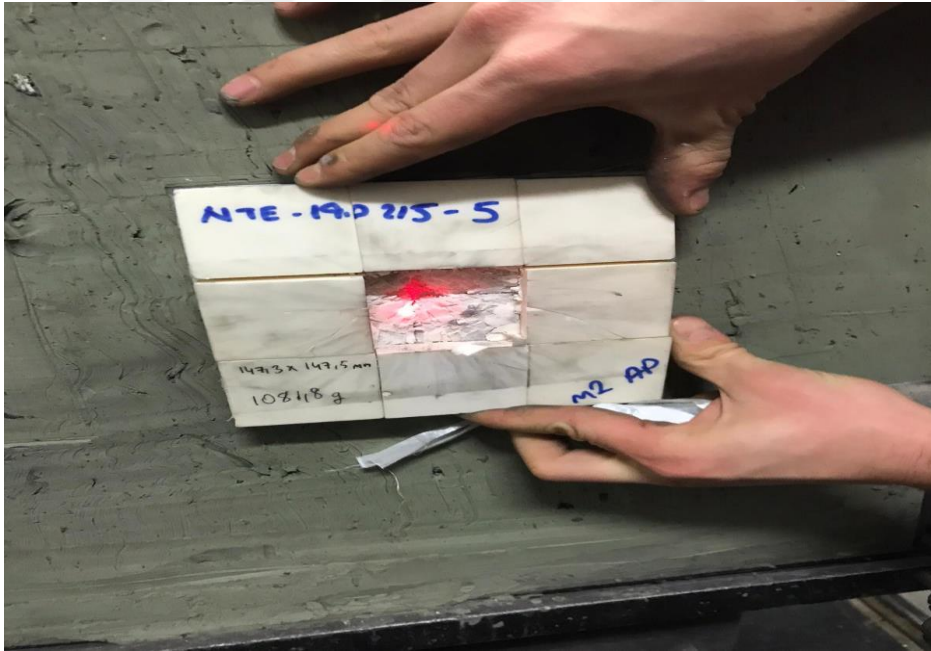
Şekil 4.18. Atış öncesi 6 plakadan oluşan Al_2O_3 zırh paneli.



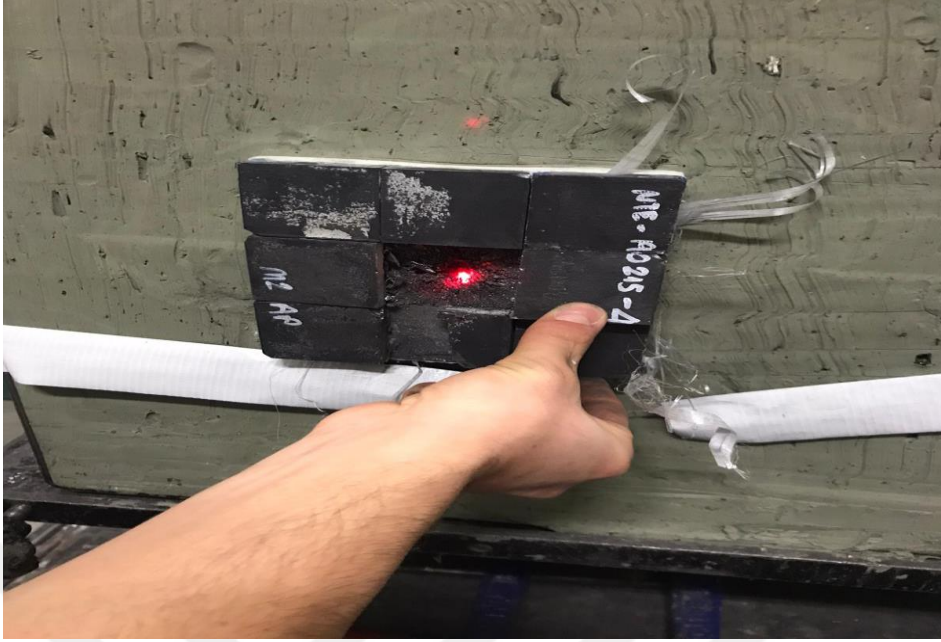
Şekil 4.19. Atış öncesi 6 plakadan oluşan B_4C zırh paneli.



Şekil 4.20. (a) Platforma sabitlenmiş B₄C (b) Platforma sabitlenmiş Al₂O₃ zırh paneli.



Şekil 4.21. Atış sonrası Al₂O₃ zırh panelinde oluşan deformasyon.



Şekil 4.22. Atış sonrası B₄C zırh panelinde oluşan deformasyon.



Şekil 4.23. Al₂O₃ zırh paneline atış sonrası destek malzemesinde oluşan travma derinliği.



Şekil 4.24. B₄C zırh paneline atış sonrası destek malzemesinde oluşan travma derinliği.

Numunelere NIJ-STD-0101.04 standardı çerçevesinde Çizelge 2.8’de belirtildiği gibi panel başına 1 atış olacak şekilde P-BFS testi uygulanmış test sonucu Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. P-BFS test sonuçları.

Numuneler	Travma Derinliği
Al ₂ O ₃	28,8 mm
B ₄ C	34,4 mm

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özel zırh üreticisi bir firmanın ürettiği plakaların (B_4C , Al_2O_3) içeriği homojen bir dağılım göstermekte olup B_4C plakaların yoğunluğu $2,52 \text{ g/cm}^3$, Al_2O_3 plakalar için yoğunluk $3,85 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Granüllü (tanecikli) yapıya sahip tozlardan üretilen Al_2O_3 malzemelerin yoğunluğu $3,89 \text{ g/cm}^3$ olduğu kullanılan tozların üretim yöntemlerine, şekillerine ve miktarlarına bağlı olarak bu değerin $3,28 \text{ g/cm}^3$ 'lere kadar düştüğü görülmektedir (Cao, 2014).

Bu çalışma balistik analizin etkin bir şekilde yapılabilmesi için vücut zırhları için geçerli olan NIJ 0101.04 standartları çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Testler Ankara'da bulunan özel, uluslararası standartlara uygun, modern, sertifikalı balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Balistik testler $7,62 \times 63 \text{ mm}$ M2 AP çelik çekirdekli $10,60 \text{ g}$ çekirdek ağırlığına, $12,51 \text{ g}$ kovan ağırlığı, $3,25 \text{ g}$ barut ağırlığına sahip zırh delici mühimmat kullanılmıştır. Zırh paneli $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ 'lik 6 adet plakadan oluşmakta olup B_4C için toplam panel ağırlığı $806,8 \text{ g}$ Al_2O_3 için toplam panel ağırlığı $1081,8 \text{ g}$ olarak ölçülmüştür. Yüksek maliyet sebebiyle daha fazla numune üretilenmiş ve panellere balistik limit testi uygulanamamıştır. B_4C 'den üretilen zırh paneline 15 m mesafeden $7,62 \times 63 \text{ mm}$ çapında mühimmat ile gerçekleştirilen atışın hızı 878 m/s olarak, Al_2O_3 'den üretilen zırh paneline 15 m mesafeden $7,62 \times 63 \text{ mm}$ çapında mühimmat ile gerçekleştirilen atışın hızı 884 m/s olarak ölçülmüştür. B_4C ve Al_2O_3 zırh panellerine gerçekleştirilen atış sonrası temel beklenti olan merminin zırh gerisine nüfuz etmeden durdurulmasında başarı sağlanmıştır. Ayrıca NIJ 0101-04 standardına göre atış sonrası zırh panelinin gerisinde 44 mm 'den küçük olması gereken travma derinliği B_4C için $34,4 \text{ mm}$ olarak; Al_2O_3 için $28,8 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Her iki malzemenin de NIJ 0101.04 standardında IV. Seviye korumaya sahip bir balistik malzeme olduğu ortaya çıkmıştır.

B_4C ve Al_2O_3 seramik zırh plakalarını dikkate alındığında; NIJ 0101-04 standardına göre $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ 'lik 6 plakadan oluşan her iki panelden Al_2O_3 'den yapılanı daha iyi balistik performans göstermiştir. Fakat Al_2O_3 paneli B_4C paneline nazaran 275 g daha ağırdır. Bu çalışmada aynı et kalınlığı yerine panel ağırlığı dikkate alınmış olsa idi B_4C yaklaşık $13,4 \text{ mm}$ et kalınlığına sahip olacak ve mevcut verinin üzerinde bir balistik performans sergileyecekti. James tarafından yapılan bir çalışmada eşit miktarda enerjiye

dayanabilmek için gerekli balistik malzemelerin fiyat tablosunda Al_2O_3/B_4C arasında 1/60 gibi bir oran olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (James, 2001).

B_4C ve Al_2O_3 plakaların atış sonrası fotoğraflarına (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22) bakıldığında B_4C 'nin Al_2O_3 'e göre daha kırılğan olduğunu, bu sebeple ufalandığını, keskin küçük parçalara ayrıldığını söylemek mümkündür. Ufalanmış parçalar panelden ayrılarak boşluklar oluşturmaktadır. Ayrıca gerçek muharebe ortamında vücut zırhından kopabilecek keskin küçük parçalar hem zırhı kullanan muharip personele hem de etrafında bulunan diğer personele zarar verebilir. Al_2O_3 plakalarında atış sonrasında ufalanmadan ziyade büyük parçalara ayrıldığı görülmüştür. Bu büyük parçalar panel içerisindeki konumunu terk etmemiş aynı bölgeye gelebilecek sonraki atışlara B_4C 'ye nazaran daha iyi mukavemet göstereceği kanısına ulaşılmıştır.

Günümüzde seramiklerin aşırı gevrek yapısından dolayı meydana gelen dezavantajı bertaraf etmek için zırh üretici firmalar, zırh panelini mümkün olduğunca küçük plakalardan üretme yoluna gitmiştir. Böylece atış sonrası boşalan bölgeyi minimal tutmayı hem de zırhın geriye kalan bölümünü hasarsız kurtarmayı amaçlamıştır. Fakat B_4C panelinde atış sonrası, atışa maruz kalmayan plakalarda dahi aşırı gevreklik gereği kırılmalar oluşmuştur.

B_4C ve Al_2O_3 seramik zırh plakalarının balistik performans karşılaştırmaları plakaların kinetik enerji esaslı mühimmata gösterdiği direnç kapsamında değerlendirilmiştir. Çukur imla prensibine göre çalışan, zırha, oluşan yüksek ısı sayesinde nüfuz etmeye çalışan mühimmatlarda B_4C , Al_2O_3 'e nazaran yüksek ısı direnci sayesinde daha iyi balistik performans göstermektedir. Bu sebeple milli tank Altay (Şekil 2.2) ve Leopard tanklarında kullanılmaktadır. Kullanıcı personelin zırhlandırılmasında B_4C plakalı zırh yelekleri hafifliği sebebiyle ön plana çıkarken, Al_2O_3 plakalı zırh yelekleri daha iyi balistik performans ve düşük maliyetten ötürü tercih sebebi olabilmektedir. Tercih genelde maliyet, arazi yapısı, operasyonun içeriği, çatışma olasılığı gibi birçok parametreye bağlıdır.

NIJ 0101-04 standardına göre 10 mm et kalınlığında her iki seramikte iyi bir balistik performans sergilemektedir. B_4C 'nin yüksek sertliği nedeniyle Al_2O_3 'e nazaran daha iyi balistik özellik göstereceği beklentisi, malzemenin aşırı gevrek olması nedeniyle mümkün olmamaktadır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2019. *History of Body Armor*, <http://www.historyofarmor.com/> Erişim Tarihi: 05.08.2019.
- Anonim, 2018. Seramikleri tanımları. www.metaluzmani.com/seramikler. Erişim tarihi: 01.06.2019.
- Anonim, 2014. İleri Seramikler. <https://www.ceramicindustry.com/topics/2641-advanced-ceramics>. Erişim Tarihi: 06.09.2019.
- Anonim, 2004. Emniyet Genel Müdürlüğü Kriminal Daire Başkanlığı tanımları. <https://www.egm.gov.tr/kriminal/balistikuzmanlik> Erişim Tarihi:15.05.2019.
- Anonim, 2013. Stanag 2920 tanımı. www.body-armor-protection.co.uk/stanag-protection-levels. Erişim zamanı:14.06.2019.
- Anonim, 2016. Bor elementi. <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>. Erişim tarihi:15.05.2019.
- Anonim, 2019. Mühimmat çeşitleri. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/bul lets.htm>, Erişim tarihi 25.08.2019.
- Alper, İ., Çoruhlu, A., 2005. *Silah Sistemleri ve Balistik*. Kara Harp Okulu Basımevi, Ankara, 77, 150-155.
- Akarsu C., 2009. *Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Bor Karbür Silisyum Karbür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi* (yüksek lisans tezi). İ.T.Ü., İstanbul.
- Barsoum, M., 1997. *Fundamentals of Ceramics*. McGraw-Hill Inc., Singapur. 254.
- Batıbay, B., 2013. *Alümina-Geçiş Metali İki Sistemlerin Zırh Malzemesi Olarak İncelenmesi* (yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul.
- Bouchacourt, M., Thevenot, F., 1985. The correlation between the thermoelectric properties and stoichiometry in the boron carbide phase B₄CB_{10.5} C. *Journal of Materials Science*, **20**: 1237-1247.
- Cao M., Yan Q., Li X., Mi Y., 2014. Effect of plate-like alümina on the properties of alümina ceramics prepared by gel-casting. *Materials Science & Engineering A*, **589**: 97-100.
- Chen, X., Sun, D., Wang, Y., Zhou, Y., 2012. *2D/3D Woven Fabrics for Ballistic Protection*. School of Materials, University of Manchester.
- Geçkinli, E., 1991. *İleri Teknoloji Seramikleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 98.
- James, B., 2001. Practical issues in ceramic armour design, defence science and technology laboratories, United Kingdom. *Ceramic Transactions*, **134**: 31-35.
- Evcı C., 2009. *Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi* (doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., Süpüren, G., 2015. Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, özellikleri ve balistik performans testleri. *Tekstil ve Mühendis*, **22**: 98, 84-103.
- Han J.H., Chung Y.K., Kim D.Y., Cho S.H., Yoon D.N., 1989. Temperature dependence of the shape of ZnO grains in liquid matrix. *Acta Metal*, **28**: 45-50.
- Heimann, R. B., 2010. *Classic and Advanced Ceramics*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim, U.S.A.

- Henderson, J., 2008. *Ballistic Body Armor Protecting The Protectors*. Strategic Standardization, 20: 0-18.
- Lee, W. E., Rainforth, M., 1994. *Ceramic Microstructures*. Cambridge University, London. 225.
- Levin I., Brandon D., 1998. Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences. *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**: 1995–2012.
- Dariel, M., P., 2012. Reaction bonded boron carbide: recent developments. *Advances in Applied Ceramics*, **111**: 5-6, 301-310.
- Mostaghaci, H., 1996. *Advanced Ceramic Materials (Key Engineering Materials)*. U.S.A., 220.
- Silva, M., V., Stainer, D., Qureshi, H., A., Montedo, O., R., K., Hotzal, D., 2014. *Alumina-Based Ceramics for Armor Application*. Mechanical Characterization and Ballistic Testing, 618154: 6.
- Mizrahi, A., Raviv, H., Dilman, 2007. The effect of Fe addition on processing and mechanical properties of reaction infiltrated boron carbide-based composites. *Journal of Materials Science*, **42**: 6923-6928.
- Nesmelov, D.D., Perevislov, 2015. Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide. *Glass Ceramics*: **71**, 313–319.
- NIJ-STD 0101.04, 2001. *Ballistic Resistance of Personal Body Armor-National Institute of Justice Standard*. New York.
- NIJ-STD-0101.06, 2008. *Ballistic Resistance of Personal Body Armor-National Institute of Justice Standard*. New York.
- Normandia M. J., Gooch W., 2001. An overview of ballistic test methods of ceramic materials, ceramic armor materials by design. *The American Ceramic Society*, **6**:140-225
- Reed, J., 1995. Principles of Ceramic Processing. *Wiley-Interscience*, **314**: Newyork, 314.
- Reynaud, S., 2010. *Fabrication and characterization of carbon and boron carbide nanostructured materials*. MRes Thesis, Graduate School-New Brunswick, University of New Jersey, NJ, USA, 38-64.
- Saito, S., 1988. *Advanced Ceramics*. Oxford University, England, 44-47.
- Sarıdede, N., M., Birol, B., 2019. *Alümina* (Ders Notu). Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Savio, S., Ramanjaneyulu, K., Madhu, V., 2010. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles. *International Journal of Impact Engineering*, **38**: 535-541.
- Suri, A.K., Subramanian, C., Sonber, J.K., Murthy, T.S.R.Ch., 2010. Synthesis and consolidation of boron carbide: a review. *Journal International Materials*, **55**: 4-39.
- Temiz, S., 2005. *Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma* (yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.
- Thévenot, F., 1990. Boron carbide-A comprehensive review, *Journal of the European Ceramic Society*, **87**: 132-135.
- Holmquist, T.J., Rajendran, A., M., Templeton, D., W., Bishnoi, K., D., 1999. *A Ceramic Armor Material Database*. U.S. Army Tank Automotive Research, Development

- and Engineering Center (TARDEC) Attn: AMSTA-TR-R (MS263) Warren, MI 48397-5000
- Toy, C. ve Baykara, T., 1994. 21. yüzyılın malzemesi seramikler. *Bilim Teknik*, **317**: 6-13, 1994.
- Uğur, A., 1996. *Kırılma Mekanikğine Giriş*. Bursa Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Yayın, No: 118.
- Yılmaz, H., 2012. *Üç Fazlı Elyaf Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin incelenmesi* (doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Yurkov A.L., Skidan B.S., Ponomarev A.B., 1987. Reaction between boron carbide and silicon. *Ogneupory*, **2**: 31-33.
- Zhang, X., Lu, G., Hoffmann, M. J. and Metselaar, R., 1995. Properties and interface structures of Ni and Ni-Ti alloy toughened Al₂O₃ ceramic composites. *Journal of the European Ceramic Society*, **15**: 225-232
- Zhang, C., Ru H., Zong H., Sun W., Zhu J., Wang W., Yue X., 2016. Coarsening of boron carbide grains during the infiltration of porous boron carbide preforms by molten silicon. *Ceramic International*, **42**: 18681-18691.

ÖZ GEÇMİŞ

1989 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2003-2007 yılları arasında Maltepe Askeri Lisesinde lise eğitimine müteakip 2007-2011 yıllarında Kara Harp Okulunda lisans eğitimini tamamladı. 2018 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.



T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 13 /04/2020

Tez Başlığı / Konusu: Bor Karbür ve Alümina Seramik Zırh Plakalarının Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 60 sayfalık kısmına ilişkin, 13 / 04 / 2020 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %12 (oniki) dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

13 / 04 /2020

Adı Soyadı: Beytullah AKÇAY

Öğrenci No: 18910001113

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği ABD

Programı:

Statüsü: Y. Lisans

Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR



Dr. Öğr. Üyesi Serap KOÇ

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR

(Unvan, Ad Soyad, İmza)
Prof. Dr. SERAP KOC
Enstitü Müdürü