



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



B₄C ve Al₂O₃ seramik plakalarının balistik özelliklerinin incelenmesi

Examining the ballistic properties of the B₄C and Al₂O₃ ceramic plates

Yazar(lar) (Author(s)): Serap (GÜNGÖR) KOÇ¹, Beytullah AKÇAY²

ORCID¹: 0000-0002-4547-0642

ORCID²: 0000-0002-6272-2610

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koç (Güngör) S. Ve Akçay B., “B₄C ve Al₂O₃ seramik plakalarının balistik özelliklerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(3): 991-996, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.801714

B₄C ve Al₂O₃ Seramik Plakaların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi

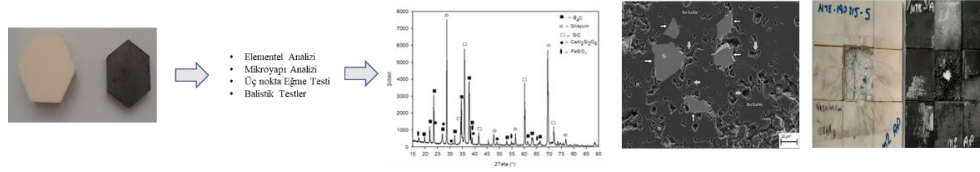
Examining The Ballistic Properties of The B₄C and Al₂O₃ Ceramic Plates

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bor Karbür ve Alümina Plakalarının Yapısal Özellikleri / Structural Properties of Boron Carbide and Alumina Plates
- ❖ Balistik Standartlar / Ballistic Standards

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada zırh yapımında yaygın olarak kullanılan bor karbür (B₄C) ve alümina (Al₂O₃) seramik plakalar kullanılmıştır. Bor karbür ve alümina plakalara elementel analiz, faz analizi, mikroyapı analizi, yoğunluk, gözenek analizi ve üç nokta eğme testi yapılarak iç yapı ve mekanik dayanımları literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. / In this study, the microstructure, mechanical and ballistic properties of boron carbide (B₄C) and alumina (Al₂O₃) ceramic plates used for ballistic protection are examined and the results are compared with similar studies in the literature.



Şekil. Bor karbür ve alümina plakaların mekanik ve balistik özelliklerinin incelenmesi /Figure. Investigation of mechanical and ballistic properties of boron carbide and alumina plates.

Amaç (Aim)

B₄C ve Al₂O₃ seramik plakaların iç yapısal, mekanik ve NIJ-STD-0101.07 standarttı çerçevesinde balistik özelliklerinin belirlenmesi. / Determination of the internal structure, mechanical and ballistic properties of B₄C and Al₂O₃ ceramic plates within the scope of NIJ-STD-0101.07.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

B₄C ve Al₂O₃ seramik plakaların yapısal özellikleri XRF, XRD, SEM, Üç Nokta Eğme Testi ve balistik testler ile karakterize edilmiştir. / The structural properties of B₄C and Al₂O₃ ceramic plates were characterized by XRF, XRD, SEM, Three Point Bending and Ballistic tests.

Özgünlük (Originality)

B₄C ve Al₂O₃ seramik plakaların literatürde NIJ standartlarına uygun laboratuvar sonuçları bulunmamaktadır. Bu nedenle, sonuçları bakımından NIJ standartlarına uygun orijinal bir çalışmadır. / There are no laboratory results for B₄C and Al₂O₃ ceramic plates in the literature in accordance with NIJ standards. Therefore, it is an original study that complies with NIJ standards in terms of its results.

Bulgular (Findings)

Travma derinliği B₄C için 34.4 mm olarak, Al₂O₃ için 28.8 mm olarak ölçülmüştür. / Trauma depth was measured as 34.4 mm for B₄C and 28.8 mm for Al₂O₃.

Sonuç (Conclusion)

B₄C ve Al₂O₃ seramik plakaların NIJ-STD-0101.07 standardı çerçevesinde IV seviye korumaya sahip bir balistik malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. / It has been revealed that the B₄C and Al₂O₃ ceramic plates are a ballistic material with IV level protection within the framework of the NIJ-STD-0101.07 standard.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

B₄C ve Al₂O₃ Seramik Plakaların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Serap (GÜNGÖR) KOÇ^{*}, Beytullah AKÇAY

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 29.09.2020 ; Kabul/Accepted : 09.03.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 29.03.2021)

ÖZ

Bilinen en sert malzemelerden olan bor karbür (B₄C) ve alümina seramik (Al₂O₃) plakaların eşsiz özelliklerinden dolayı dikkatleri çekmektedir. Bu çalışmada balistik koruma amaçlı kullanılan bor karbür (B₄C) ve alümina (Al₂O₃) seramik plakaların iç yapı, mekanik ve balistik özellikleri incelenmiş ve literatürde yapılmış olunan benzer çalışmalarla sonuçları karşılaştırılmıştır. B₄C ve Al₂O₃ içeriği homojen bir dağılım göstermekte olup sırası ile yoğunlukları 2.52 g/cm³ ve 3.85 g/cm³ olarak ölçülmüştür. B₄C ve Al₂O₃ numuneleri gevrek kırılma özelliği sergilemekte ve düşük gerilimlerde lineer deformasyon oluşturmaktadır. Elastik özellikler bor karbür içeriğindeki karbon oranına göre değişmektedir. Bor karbür plakasının elastisite modülü 440 GPa olarak elde edilmiştir. B₄C ve Al₂O₃ plakalar, askeri standartlara uygun olarak yapılan balistik testlerde IV. seviye tehditlere (hızı bor karbür plakasında 878 m/sn, alümina plakasında 884 m/sn olan 7.62x51 mm M2 AP mermide) karşı travma derinlikleri 28.8 mm ve 34.4 mm olmak üzere NIJ-STD-0101.07 standardı çerçevesinde tam koruma sağlamaktadır. B₄C'nin yüksek sertliği nedeniyle Al₂O₃'e nazaran daha iyi balistik özellik göstereceği beklentisi, malzemenin aşırı gevrek olması nedeniyle mümkün olmamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bor karbür, alümina, balistik standartlar, seramikler, zırh.

Examining The Ballistic Properties of the B₄C and Al₂O₃ Ceramic Plates

ABSTRACT

Boron carbide (B₄C) and alumina ceramic (Al₂O₃) plate, known as the hardest materials are of a great scientific interest for years due to a unique combination of different useful properties. In this study, the microstructure, mechanical and ballistic properties of boron carbide (B₄C) and alumina (Al₂O₃) ceramic plates used for ballistic protection are examined and the results are compared with similar studies in the literature. B₄C and Al₂O₃ samples content shows 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, 7.62x51 mm M2 AP bullet on alumina plate and) on ballistic tests. It provides full protection within the framework of NIJ-STD-0101.07 standard. 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: Boron carbide, alumina, ballistic standards, ceramics, armor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bor karbür (B₄C), Si₃N₄, Al₂O₃ gibi ametal grubunda oksit olmayan seramik malzemelerdendir. Kimyasal maddelere karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet dayanımları, nötron emme yeteneği, düşük yoğunluğu nedeniyle genellikle zırh uygulamaları, kesici ve delici uçlar, aşındırıcılar gibi birçok alanlarda kullanılmaktadır. B₄C, elmas ve kübik bor nitür'den sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinmektedir. Ticari B₄C bileşimi 4:1 (B:C) stokiyometrisine yakın yapıda olması beklenilmektedir. Bor karbür içerisinde C atomlarının miktarı %8.8–20 arasında değişmektedir [1].

Bor karbür yüksek sertliği (38 GPa) [2], düşük yoğunluğu (~ 2.52 g.cm⁻³), yüksek kimyasal kararlılığı, nötron yakalama özelliği, yarı iletken ve p-tipi termo elektrik özelliklerinden dolayı havacılık ve zırh yapımda

sıklıkla kullanılan malzemelerden biridir [3-7]. B₄C, Black Hawk gibi yeni nesil helikopterlerde, uçaklarda, tanklarda, Hummer gibi yüksek hız gerektiren zırhlı kara araçlarında, balistik yeleklerde zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemizin bor zengini bir ülke olması sebebiyle, katma değeri oldukça yüksek olan borun uç ürünü bor karbür seramiğinin üretimi; ülkemizin refahına büyük katkı sağlayacaktır. Ayrıca zırhlanmada bor karbürün üretimi ve kullanımı, içerisinde bulunduğumuz coğrafya göz önüne alındığında askeri anlamda üstünlük sağlanması kaçınılmazdır.

Günümüzde alüminanın yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısıl kararlılık ve korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri yanı sıra düşük birim maliyeti nedeniyle üretimi artmaktadır [8, 9]. Özellikle düşük birim fiyatı sebebiyle gemi, tank gibi büyük savaş araçlarının zırhlandırılmasında birincil balistik zırh olarak tercih edilmektedir.

**Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : serapgungor@yyu.edu.tr*

Kolluk kuvvetlerince ya da koruma ihtiyacı duyulan kişilerce vazife, düşman, arazi, mevcut kuvvet ve zaman (VDAM+Z) kriterlerine göre ihtiyaç duyulan balistik performansta farklılıklar duyulmaktadır. Amerikalılar tarafından kullanılan sınıflandırma NIJ-STD-0101.07 (Ballistic Resistance of Body Armor), Ruslar tarafından kullanılan sınıflandırma GOST R 50744-95 (National Standard of Russia), NATO tarafından kullanılan sınıflandırma STANAG (Standard NATO Agreement) olarak adlandırılmaktadır. Bunların dışında Türk Standartları Enstitüde bazı askeri standartlar geliştirmiştir. Dünyada kullanılan en yaygın standart NIJ standarttır. NIJ-STD-0101.07 standardında asgari performans şartlarını ve insan vücudunu, silah ateşine karşı korumayı amaçlayan kişisel vücut zırhının balistik performansı için uygulanılacak test yöntemlerini açıklamaktadır [10]. Standart, mermi kütle ağırlığı ve mermi ilk hızına göre 7 koruma seviyesine ayrılmıştır. NIJ-STD-0101-07 standardı, zırhın mermiden kaynaklı dayanımını ve geçirmezliğini sağlanması durumunda hedef gerisinde oluşan deformasyonu tespit etmek için P-BFD testi ve malzemenin dayanabileceği hız limitlerini tespit için yapılan balistik limit testlerini tanımlar. Bor karbür tozlarının üretim yöntemlerinden biri olan RBBC (reaction bonded boron carbide, reaksiyon sonucu oluşan bor karbür) de elde edilen tozlar soğuk preslenerek bor karbür plakaları elde edilmektedir. RBBC üretiminde, vakum altında, 1600°C ergimiş silisyum, bor karbür ve/veya serbest karbon içeren gözenekli kalıpların içine yerleşmektedir. Ergimiş silisyum gözeneklerin içini doldurmada ve içerisinde bulunan serbest karbonlarla reaksiyona girerek silisyum karbürleri oluşturmaktadır. Silisyum karbürler toplam gözeneklerin bir kısmını ihtiva ederken, geri kalan gözenekler silisyum ile dolmaktadır. Reaksiyon sonucunda oluşan silisyum karbür, reaksiyona girmemiş artık silisyum, ve önceden ortamda var olan bor karbürler düzenli ve güçlü üç boyutlu ağ örgüsü ile bağlanmaktadır. RBBC'nin diğer yöntemlere göre avantajı, düşük işlem sıcaklığına bağlı olarak (1450-1600°C) düzgün şekilli, büzülmenin olmadığı numunelerin üretilmesidir [11].

Alümina üretiminde, matris ve takviye fazı olarak seçilen tozlar (ALCOA-A-16 tozu) %5 oranında saf su ile karıştırılarak granülasyon ve presleme işlemleride uygulandıktan sonra kalıplara dökülürler. Sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı sıcak press'de tozların bağlanması sağlanır. Elde edilen alümina numuneler tekrar yüksek sıcaklıkta sinterlenerek katı-faz difüzyonunun gerçekleşmesi beklenilir [12 - 14].

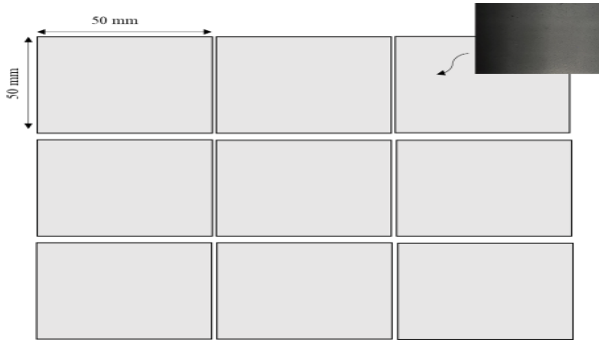
Bu çalışmada zırh yapımında yaygın olarak kullanılan bor karbür (B₄C) ve alümina (Al₂O₃) seramik plakalar kullanılmıştır. Bor karbür ve alümina plakalara elementel analiz, faz analizi, mikroyapı analizi, yoğunluk, gözenek analizi ve üç nokta eğme testi yapılarak iç yapı ve mekanik dayanımları araştırılmıştır. Ayrıca NIJ-STD-0101.07 standartında P-BFD balistik testi uygulanmış malzemelerin delinip delinmediği, travma derinlikleri, ve plakalarda oluşan deformasyonlar irdelenmiştir. Literatürde benzer çalışmalarda bor karbür plakalar

üretirken alümina plakalar hazır alınmış ya da tek bir plaka üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir ve balistik testlerin gerçekleştirildiği laboratuvarların özellikle (NIJ-STD-0101.07) standartlara uygunluğu belirsizdir. Bu çalışmanın önemi savunma sanayii alanında yaygın kullanılan bor karbür (B₄C) ve alümina (Al₂O₃) seramik plakaların karşılaştırılmalı analizlerinin yapılması ve (NIJ-STD-0101.07) standartlarına uygun laboratuvarlarda 7.62x51 mm M2 AP çelik çekirdekli mühimmatla balistik testlerin gerçekleştirilmiş olmasıdır

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bor karbür (BK) ve alümina seramik (AS) plakalar özel bir firmadan temin edilmiştir. Bor karbür tozları RBBC (reaction bonded boron carbide, reaksiyon sonucu oluşan bor karbür) işlemi sonucunda üretilmiş ve tozların soğuk preslenmesi ile plakalar elde edilmiştir.

Kullanılan BK ve AS plakaların temel bileşenlerini belirlemek için elemental analizi PANalytical Zetium marka XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir. BK ve AS numunelerinin balistik testler öncesi minerolojik analizleri Bruker D8 Advance marka X-ışını difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Numunelere X-ışını difraktometresinde CuK α ışınımı kullanılarak difraksiyon paternleri elde edilmiştir. Burada yansımaların şiddetleri de hesaba katılarak, olası fazlar ICDD (JCPDS) kartları kullanarak belirlenmiştir. Plakaların mikroyapılarının belirlenmesi için SEM cihazında değişik büyütmelemlerde incelenmiştir (JEOL JSM-6060LV). Vickers sertlik ölçme yöntemleri kullanılarak mikrosertlik değerleri elde edilmiştir (EMCOTEST DuraVision). BK ve AS plakalarının mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla üç nokta eğme deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğme deneyi, Türk Standartlar Enstitüsünün 205 standardı doğrultusunda iki destek üzerine yerleştirilen, dikdörtgen kesitli düz bir numune parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulanması ile oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlayabiliriz (INSTRON 3369). NIJ STD.0101-07 standartı kapsamında yapılan P-BFD testi, bor karbür ve alümina seramik plakalar arkasına iç organları simüle eden cam macunu, kil gibi malzemelerin, seramik plakanın arkasına yerleştirilerek koruma seviyeside belirtilen mesafe ve mermi çeşiti ile atış yapılması mantığına dayanmaktadır. Balistik testler özel bir firmada uluslararası standartlara (NIJ-STD-0101.07) uygun balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Zırh paneli 50x50x10 mm ebatlarında 6 adet plakadan oluşturulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Zırh paneli (Armor panel)

Test, atışa hazır hale getirilen numunelere 15 m mesafeden 7.62x51 mm M2 AP çelik çekirdekli mühimmatlar ile atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Teste kullanılan 7.62x51 mm M2 AP çelik çekirdekli mühimmat 71.12 mm fişek boyu, 24 g fişek ağırlığı, 838 m/sn hızı ve en az %80'i 91 mesafede 10 mm kalınlığındaki çelik levhayı delebilmeye özelliğine sahiptir. Atış sonrası oluşan travma derinlikleri (Perforation-Backface Signatur (P-BFD) testleri sonucunda) hesaplanmıştır. P-BFD testinin hazırlık numune ile iç organ ve beyni simüle eden destek malzemesi (macun) 24 saat boyunca 23°C'de muhafaza edildi. Akabinde destek malzemesinin teste uygunluğunun tespiti için 3 saat boyunca 29 °C'de bekletildi. 1043 gram ağırlığında, 63.5 mm çapında çelik bilye 2 metre yükseklikten macunun üzerine serbest düşme etkisi ile bırakıldılar. Bu işlem sırasında 5 adet serbest düşme hareketi yapıldı ve macunda oluşan izlerin ölçümleri alındı. Beş farklı yükseklik için ortalama değer hesaplanmış ve bu değer balistik atışlarda oluşan mermi travma derinlikleri ölçülüp aritmetik ortalamaları alınması ile sonuçlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Ölçümlerin gerçekleştirildiği balistik test laboratuvarı (Ballistic test laboratory)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

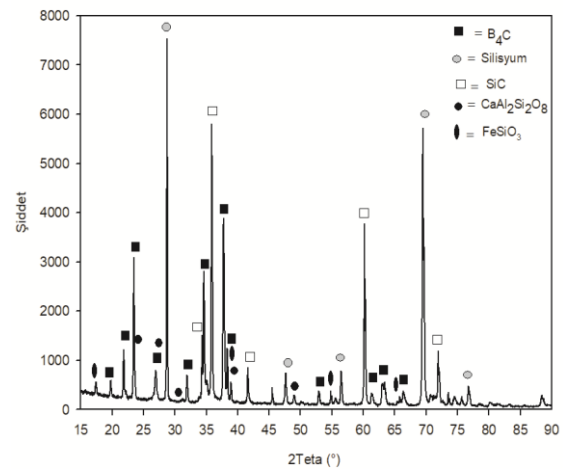
Kullanılan BK ve AS plakaların temel bileşenlerini belirlemek için elemental analiz (XRF) uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. XRF sonuçları numunelerde yan ürünlerinde oluştuğunu ortaya koymaktadır. Tablo 1'de anlaşılabileceği gibi AS plakasında Al₂O₃ miktarı nispeten yüksek çıkmıştır. Genellikle AS

plakalarında Al₂O₃ ve SiO₂ önemli bileşikler olduğu bilinmektedir. Hafif elementlerden olan bor ve karbonun oluşturduğu bileşiği XRF analizi ile ortaya koymak zor olduğundan BK sonuçları eklenmemiştir.

Çizelge 1. Alümina tozlarının XRF elemental analiz sonuçları (XRF elemental analysis results of the boron carbide and alumina powders).

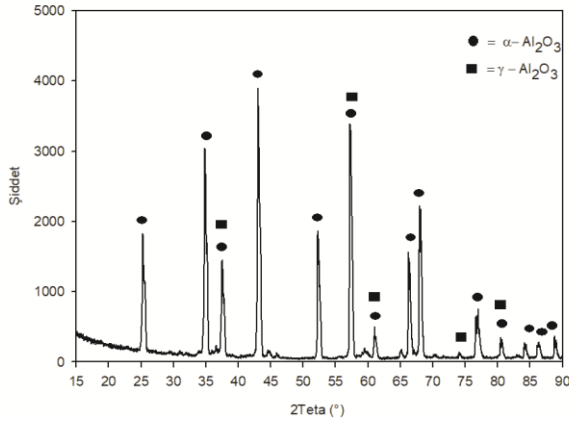
Bileşik (ağ.%)	Alümina Plaka (AS) (ağ.%)
Al ₂ O ₃	99.23
MgO	0.435
CaO	0.02
Fe ₂ O ₃	0.027
Na ₂ O	0.16
K ₂ O	0.0061
SiO ₂	0.081
Cr ₂ O ₃	0.006
Ni	0.003
SO ₃	0.009
CuO	0.001
ZrO ₂	0.0005

BK numunesinin mikroyapısındaki fazları ICDD veritabanı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil-1). Belirlenen fazlar bor karbür (00-019-0178), silisyum (04-012-7888), silisyum karbür (04-008-1657), kalsiyum alüminyum 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 [15-16]. Şekil-3'de kalsiyum alüminyum silikat ile ferrosilitinin oluşmasının nedeni eser miktarda kalsiyum ve demir katkılarının ergimiş silisyum, bor karbür ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır.



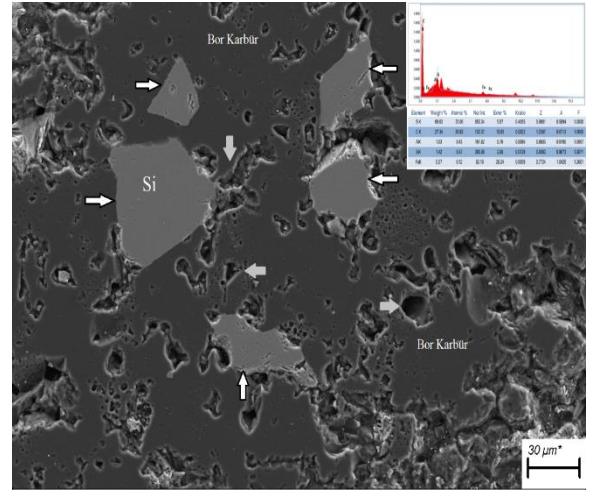
Şekil 3. BK plakasının XRD paterni (XRD results of the BK plates)

XRD analizinde, ağırlıkça α - Al_2O_3 fazı olmak üzere, γ - Al_2O_3 fazları görülmektedir. Şekil-4.'de R-3c uzay grubuna ait hegzagonal yapıda α - Al_2O_3 (JCPDS: 98-002-8102) ve Fd-3m uzay grubuna ait kübik yapıda γ - Al_2O_3 (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 - Al_2O_3 , 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 [17].



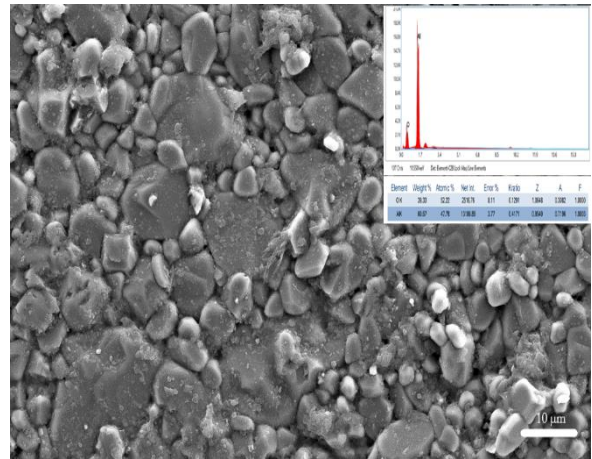
Şekil 4. AS plakasının XRD paterni (XRD pattern of AS plates)

Şekil-5'de bor karbürün tane boyutları, $\geq 1600^\circ\text{C}$ lerin sıcaklığın üstünde gerçekleştirilen çözünme-çökme işlemine bağlı olarak ergimiş silisyumun infiltrasyonu sonucunda düzgün ve çift-tepeli (faceted) dağılım göstermektedir bu da tipik düzgün olmayan tane büyümesinin göstergesidir. Yüksek sıcaklıklarda bor karbür tanelerinde belirgin keskin köşeler ve düzgün kenarlar gözlemlenmektedir [18]. Şekil-5'de 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 [19]. Şekil-5'deki gri oklar ile gösterilen gözenekler hızlı sinterleme süresine bağlı olarak Kirkendall gözeneklilik etkisi yüzünden tam yoğunluğa ulaşmamış numuneyi işaret etmektedir.



Şekil 5. B₄C plaka yüzeyinin mikro yapı görüntüsü (SEM)(Microstructure image of the B₄C plate surface (SEM))

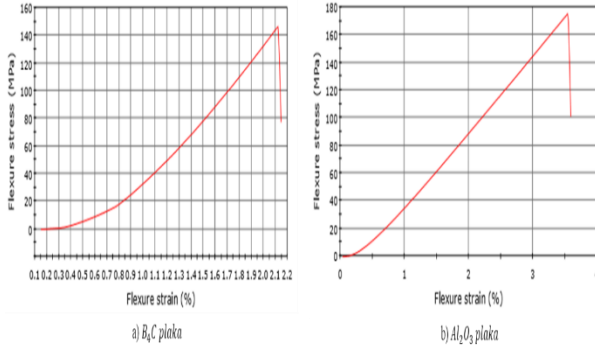
Al_2O_3 seramik plakasının (Şekil-6)'ün EDS sonuçları incelendiğinde malzeme içeriğinin safa yakın olduğu görülebilmektedir. İçerikte Al (% 60.67 ağı.), O (%39.33 ağı.) eser miktarda Na, Cl ve Ca elementlerinin bulunduğu gözlenmektedir. Kalsine alümina üretiminde, düşük sıcaklıklarda daha büyük veya eşit büyüklükte kristallerin elde edilmesi için kristallerin büyümesini sağlayan katkı maddeleri eklenmektedir. Bu katkı maddelerine mineralleştiriciler denir. Bunlar tuzlar ya da bor asitleri, florin veya klorinden oluşurlar. İçerikteki Na, Cl, ve Ca elementlerinin varlığı bu sebeptendir. Fakat bu katkı %2'nin altındadır [20-23].



Şekil 6. Al₂O₃ plaka yüzeyinin mikro yapı görüntüsü (SEM)(EDS) (Microstructure image of the Al₂O₃ plate surface (SEM)(EDS))

Numunelerin eğilme testi, üç nokta yükleme koşulları altında eğmek için gerekli olan kuvveti verir. Sonuçlar gerilme-şekil değiştirme diyagramları olarak elde edilmiştir (Şekil-7). BK ve AS diyagramlarından görüldüğü gibi numunelerde

gevrek kırılma özelliği sergilemekte ve düşük gerilimlerde lineer deformasyon oluşturmaktadır. Elastik özellikler bor karbür içeriğindeki karbon oranına göre değişmektedir. Bor karbür plakasının elastisite modülü 440 GPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 5’de görülen köşeli ve keskin yapıları oluşturan takviye elemanlarının varlığı numune içerisinde çentik tesirine neden olmakta ve buna bağlı olarak kırılmayı hızlandırdığı düşünülmektedir.



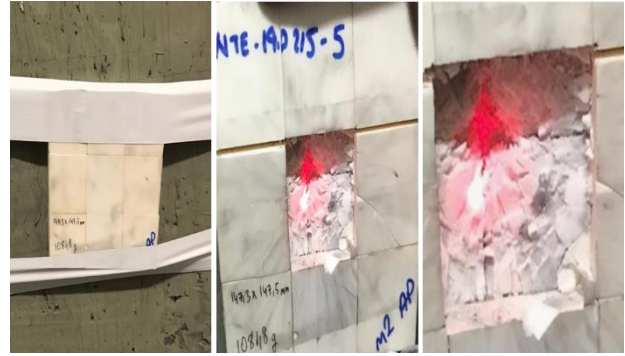
Şekil 7. B₄C ve Al₂O₃ plakalarının üç nokta eğme test sonuçları (Three point bending test results of the B₄C and Al₂O₃ plates)

Balistik testte 7.62x51 mm M2 AP çelik çekirdekli 10.60 g çekirdek ağırlığına, 12,51 g kovan ağırlığı, 3.25 g barut ağırlığına sahip mühimmat kullanılmıştır. Zırh paneli 50x50x10 mm’lik 6 adet plakadan oluşmakta olup B₄C için toplam panel ağırlığı 806.8 g, Al₂O₃ için toplam panel ağırlığı 1081.8 g olarak ölçülmüştür. B₄C’den üretilen zırh paneline 15 m mesafeden 7.62x51 mm çapında mühimmat ile gerçekleştirilen atışın hızı 878 m/s olarak, Al₂O₃’den üretilen zırh paneline 15 m mesafeden 7.62x51 mm çapında mühimmat ile gerçekleştirilen atışın hızı 884 m/s olarak ölçülmüştür. NIJ-STD-0101.07 standardına göre atış sonrası zırh panelinin gerisinde 44 mm’den küçük olması gereken travma derinliği B₄C için 34.4 mm olarak; Al₂O₃ için 28.8 mm olarak ölçülmüştür. Her iki malzemenin de NIJ-STD-0101.07 standartları doğrultusunda balistik özellikleri sağlamaktadır.



Şekil 8. Atış sonrası B₄C zırh panelinde oluşan deformasyon (Deformation of the B₄C armor panel after shooting)

B₄C ve Al₂O₃ plakaların atış sonrası fotoğraflarına bakıldığında B₄C’nin Al₂O₃’e göre daha kırılğan olduğu, bu sebeple ufalandığını ve keskin küçük parçalara ayrıldığı görülmektedir (Şekil-8). Al₂O₃ plakalarında atış sonrasında ufalanmadan ziyade büyük parçalara ayrıldığı görülmüştür. Bu büyük parçalar panel içerisindeki konumunu terk etmemiş aynı bölgeye gelebilecek atışlara B₄C’ye nazaran daha iyi mukavemet göstereceği kanısına ulaşılmıştır (Şekil-9).



Şekil 9 Atış sonrası Al₂O₃ zırh panelinde oluşan deformasyon (Deformation of the Al₂O₃ armor panel after shooting)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında günümüzde zırh üretiminde yaygın olarak kullanılan B₄C ve Al₂O₃ plakaları mekanik ve balistik açıdan incelenmiştir. NIJ-STD-0101.07 standardı çerçevesinde 50x50x10mm’lik 6 plakadan oluşan B₄C ve Al₂O₃ panelden Al₂O₃ daha iyi balistik performans göstermekte ve her iki malzemeninde NIJ-STD-0101.07 standardında IV. Seviye korumaya sahip bir balistik malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat Al₂O₃ paneli B₄C paneline nazaran 275 g daha ağırdır. Kullanıcı personelin zırhlandırılmasında B₄C plakalı zırh yelekleri hafifliği sebebiyle ön plana çıkarken, Al₂O₃ plakalı zırh yelekleri daha iyi balistik performans ve düşük maliyetten ötürü tercih sebebi olabilmektedir. Tercih genelde maliyet, arazi yapısı, operasyonun içeriği, çatışma olasılığı gibi bir çok parametreye bağlı olmaktadır. NIJ-STD-0101.07 standardına göre 10 mm et kalınlığında her iki seramikte iyi bir balistik performans sergilemektedir. B₄C’nin yüksek sertliği nedeniyle Al₂O₃’e nazaran daha iyi balistik özellik göstereceği beklentisi, malzemenin aşırı gevrek olması nedeniyle mümkün olmamaktadır. Yukarıdaki sonuçlar çerçevesinde B₄C ve Al₂O₃ plakaların üretim teknikleri, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve balistik açıdan daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Serap (GÜNGÖR) KOÇ: Analizlerin yapılmasında ve analiz sonucu elde edilen verileri kullanarak analiz edilmesi ve elde edilen sonuçları yorumlayarak makalenin oluşturulması.

Beytullah AKÇAY: Numunelerin tedarik edilmesinde, analizlerin yapılmasında ve analiz sonucu elde edilen verileri kullanarak analiz edilmesinde yer almıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)
Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar (ları) çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Thévenot, F., 'Boron carbide-A comprehensive review', *Journal of the European Ceramic Society*, 87, (1990).
- [2] Hermann M., Sigalas I., Thiele M., Mueller M., Kleebe H.J., Michaelis A., 'Boron suboxide ultrahard materials', *International Journal of Refractory Metals Hard Materials*, 39: 53-60, (2013).
- [3] Caretti I., Gago R., Albella J.M., Jimenez I., 'Boron carbides formed by coevaporation of B and C atoms. vapor reactivity, BxC1-x composition, and bonding structure', *Physical Review B*, 77: 174109, (2008).
- [4] Kakiage M., Tominaga Y., Yanase I., Kobayashi H., 'Synthesis of boron carbide powder in relation to composition and structural homogeneity of precursor using condensed boric acid-polyol product', *Powder Technologies*, 221: 257-263 (2012).
- [5] Suri A., Subramanian C., Sonber J., Murthy T., 'Synthesis and consolidation of boron carbide: a review', *International Materials Review*, 55: 4-40 (2012).
- [6] Werheit H., Leithe-Jasper A., Tanaka T., Rotter H.W., Schwetz K.A., 'Some properties of single-crystal boron carbide', *Journal of Solid State Chemistry*, 177: 575-579 (2004).
- [7] Mori T., 'Thermoelectric and magnetic properties of rare earth borides: boron cluster and layered compounds', *Journal of Solid State Chemistry*, 275: 70-82 (2019).
- [8] Lee W.E., Rainforth M., 'Ceramic Microstructures', Cambridge University, London, 225, (1994).
- [9] Mostaghaci H., *Advanced Ceramic Materials* (Key Engineering Materials), U.S.A., 220, (1996).
- [10] NIJ-STD-0101.07, *Ballistic Resistance of Personal Body Armor*, 74, (2018).
- [11] Baric P., Dulal C.J., Thiyagarajan N., 'Effect of particle size on the mechanical of reaction bonded boron carbide ceramics'. *Ceramics International*, 39: (763-770), (2013).
- [12] Torralba J.M., da Costa C.E., Velasco F., 'P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview', *Journal of Materials Processing Technology*, 133: (203-206), (2003).
- [13] Tekmen, Ç., 'Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi'. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, *Doktora Tezi*, İzmir, 122s, (2006).
- [14] Ozturk Y., 'Alumina ve bor karbür esaslı mühendislik seramiklerin balistik özelliklerinin incelenmesi'. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 53s, (2008).
- [15] Yurkov A.L., Skidan B.S., Ponomarev A.B., 'Reaction between boron carbide and silicon', *Ogneupory*, 2: (31-33), (1987).
- [16] Chen Z.F., Su Y.B., Cheng Y.B., 'Formation and sintering mechanisms of reaction bonded silicon carbide-boron carbide composites', *Key Engineering Materials*, 352: (207-212), (2007).
- [17] Levin I., Brandon D., 'Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences', *Journal of The American Ceramic Society*, 81: (1995-2012), (1998).
- [18] Zhang C., Ru H., Zong H., Sun W., Zhu J., Wang W., Yue X. 'Corasening of boron carbide grains during the infiltration of porous boron carbide preforms by molten silicon', *Ceramic International*, 42: (18681-18691), (2016).
- [19] Han JH., Chung YK., Kim DY., Cho SH., Yoon DN., 'Temperature dependence of the shape of ZnO grains in liquid matrix', *Acta Metal*, 37: (2705-2708), (1989).
- [20] Sarıdede N, Birol M 'Özel Alüminalar-1, Kalsine Alüminalar' *Metalurji*, (25-30), (2005).
- [21] Değerli S., "Bayer Prosesinin Ara Atık Ürünü Olan Alüminyum Hidroksit Kabuğundan Aktif Alümina Eldesi", Y. Lisans Tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, YTÜ, İstanbul, (2002).
- [22] Hart L., "Alumina Chemicals: Science and Technology Handbook", Westerville, Ohio, American Ceramic Society, (1990).
- [23] Sarıdede N, Birol M 'Özel Alüminalar-2, Alüminyum Hidroksit ve Aktif Alüminalar' *Metalurji*, (15-20), (2006).