

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Bor Karbür: Fizikokimyasal Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Savunma Teknolojileri Alanında Uygulamaları

Boron Carbide: Physicochemical Properties, Synthesis and Applications in Defense Technologies

Gülbahar BİLGİÇ¹ , Ayşegül BALIKÇIOĞLU GÜZEL² , Mükerrerem ŞAHİN³ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Metallurgy and Material Engineering, Nevşehir 50300, Türkiye

² Kazım Karabekir Vocational School, Karamanoğlu Mehmetbey University, 70600 Karaman, Türkiye

³ Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme

Başvuru: 14.12.2023

Düzeltilme: 24.01.2024

Kabul: 03.02.2024

Keywords

Boron Carbide

Synthesis methods

Defense Technologies

Armor

Anahtar Kelimeler

Bor Karbür

Sentez yöntemleri

Savunma Teknolojileri

Zırh

Özet

Araç ve vücut zırh sistemlerinde kullanılan bor karbür (B_4C) balistik performans için önemli olan yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve kırılma dayanıklılığı gibi özellikler sergiler. Bu çalışma, B_4C bileşiğinin askeri ve savunma sektöründeki önemini ve uygulamalarda kullanımını özetlemektedir. Eşsiz fizikokimyasal özellikleriyle bilinen B_4C , ulusların askeri güçlerini ve savunma kabiliyetlerini güçlendirmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Son araştırma eğilimlerinin, yararlarının ve potansiyel uygulamalarının anlaşılması, bu alanlarda daha fazla gelişmeye rehberlik edebilir. Çalışma daha etkili bir koruma ihtiyacı ve koruma sistemlerine yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Abstract

Boron carbide (B_4C), used in vehicle and body armor systems, exhibits properties such as high hardness, low density, and fracture toughness, which are important for ballistic performance. This study summarizes the importance of the B_4C compound in the military and defense sector and its use in applications. Known for its unique physicochemical properties, B_4C plays a crucial role in strengthening the military strength and defense capabilities of nations. Understanding recent research trends, benefits, and potential applications can guide further development in these areas. The study provides a need for more effective protection and a new perspective on protection systems.

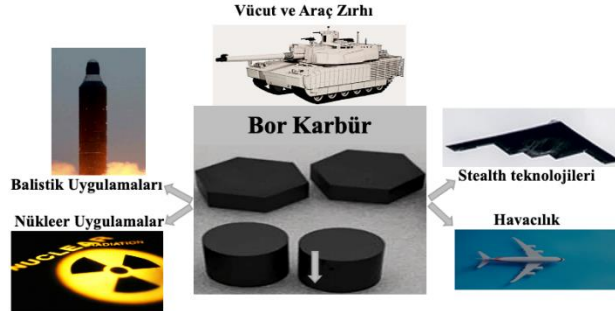
Önemli Noktalar / Highlights

- B_4C , yüksek erime noktasına, iyi mekanik özelliklere ve nötron absorpsiyon gibi özelliklere sahiptir.

-Yaklaşık 30 GPa'lık sertliğe sahip B_4C , "kara elmas" olarak da adlandırılmaktadır.

- Düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve kırılma dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı iyi balistik performans sergiler.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



*Corresponding author, e-mail: glbhrblg@nevsehir.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

En basit kimyasal formülü B_4C olan bor karbür, askeri teknolojiler, havacılık teknolojileri, nükleer ve nötron koruma sistemleri ve uzay endüstrisi gibi birçok alanda kullanılan ileri seramik malzemedir. Askeri teknoloji, savaş durumlarında kullanılmak amacıyla oluşturulmuş çok çeşitli silah, ekipman, yapı ve araçları içerir. Yenilikçi, yüksek teknoloji askeri silahlar ve teçhizat, savaşan her ulusun belkemiğidir. Savaş için son teknoloji donanım geliştirmek ve bu donanımı acil durumlarda kullanabilmek için askeri araştırmalar çok önemlidir.

Bu yaygın uygulama alanı, bor karbürün fiziksel-mekanik özelliklerinin benzersiz birleşimiyle ilgilidir. Bor karbür yüksek elastisite modülü, yüksek balistik direnç, yüksek sertlik, aşırı koşullarda artan aşınma direnci, düşük yoğunluk vb. üstün özelliklere sahiptir [1]. Yalnızca elmas ve kübik- bor nitrür 'den daha düşük, yaklaşık 30 GPa'lık sertliğe sahip B_4C , "kara elmas" olarak da adlandırılmaktadır. Ancak B_4C elmas ve kübik-BN'den daha ucuzdur ve hazırlanması daha kolaydır. Ayrıca B_4C , yüksek termodinamik stabilitesi, düşük yoğunluğu ($2,52 \text{ g/cm}^3$) ve kimyasal inertliği ile üstün performans sergilemektedir. Yüksek erime noktası, korozyona karşı yüksek direnç ve nispeten düşük yoğunluk ve termal genişleme, bor karbürün zırh malzemeleri, kesici takımlar ve metal matrisli kompozitler için ideal bir seçim olmasını sağlayan özellikleridir [1,2].

Ancak saf bor karbür ürünleri, termal strese karşı gerekli boyutsal kararlılığı bir araya

getiren malzemelere ihtiyaç duyan bazı motorlarda motor bileşeni olarak kullanılmaya uygun değildir. Bunun nedeni bor karbürün kırılabilirliği ve nispeten düşük kırılma tokluğu özelliğidir. Modern teknolojilerin gereksinimlerini karşılamak için bor karbürün sinterleme yeteneği, bükülme mukavemeti, elektrik iletkenliği vb. performans parametrelerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Son on yılda yapılan çalışmalar, nanoyapılı bor karbür matrisine seramik ve/veya metalik nano katkı maddelerinin (borürler, karbürler, oksitler, metalik alaşımlar vb.) eklenmesiyle bu dezavantajların çoğunun giderilebileceğini kanıtlamıştır. Bu amaçla, bor karbür matrislerine bazı seramikler, titanyum ve zirkonyum diborürler, metaller, bakır-manganez (Cu-Mn) ve bakır-titanyum (Cu-Ti) ikili alaşımları ve kobalt-nikel-titanyum (Co-Ni-Ti) üçlü alaşımı ve tungsten karbür-kobalt (WC-Co) ve bazı ilgili bileşimler gibi metal oksitler eklenerek bor karbürün yapısı daha da güçlendirilmiştir [3]. William Taylor ve diğerleri [4] bor karbür parçacık takviyeli silisyum karbürün mekanik özelliklerini araştırdı. Çalışmada X-ışını kırınımı ve Raman spektroskopisi aracılığıyla yapılan artık gerilim ölçümleri, bor karbürün ağırlık yüzdesi arttıkça SiC matrisi içindeki basınç gerilimlerinin arttığını göstermektedir, ancak hem bükülme mukavemetinin hem de kırılma tokluğunun azaldığı bulunmuştur.

M.B. Stone ve diğerleri [5] termal nötron koruması için alüminyum ve B_4C bazlı malzeme üretmişler ve karakterize etmişlerdir. Nötron saçılma enstrümantasyonu için iki farklı bor bazlı katkı maddesiyle üretilmiş maskeyi,

geleneksel olarak üretilmiş bir bor nitrür maskesiyle karşılaştırdılar. İlk katkı maddesiyle üretilen maske, alüminyum ve bor karbürden oluşan bir kompozittir. İkinci katkı maddesiyle üretilen maske, bor karbür ve siyanoakrilattan oluşan bir kompozittir. Sonuçlarda alüminyum bor karbür malzemesi, yüksek termal iletkenliğin, düşük toplam nötron saçılma kesitinin ve düşük toksisitenin kriter olduğu koruma uygulamalarında kullanılması için önerilmiştir.

Ancak B₄C ile ilgili çok fazla çalışma olmasına rağmen, günümüzde bor karbürün yapısı, bağlanmasının temel yönleri ve karbon konsantrasyonunu değiştirerek neden olduğu önemli yapısal değişiklikler hala tam olarak anlaşılabilmiştir. Bu nedenle öncelikle bor karbürün yapısı ve sentez yöntemleri iyice anlaşılmalıdır. Bu çalışmada ilk olarak bor karbürün fizikokimyasal özellikleri, yapısı ve sentez yöntemleri kısaca özetlenmiştir. Ardından bor karbürün savunma teknolojileri alanındaki uygulamaları özetlenip, bu alandaki son araştırma eğilimlerine genel bir bakış sunulmuştur.

2.BOR KARBÜRÜN YAPISI (STRUCTURE OF BORON CARBIDE)

Tablo 1 bor karbürün fizikokimyasal özelliklerini göstermektedir. B₄C yüksek sertlik (38 GPa), düşük yoğunluk (2,52 g/cm³), yüksek erime sıcaklığı (2350 °C), yüksek elastisite modülü (460 GPa), kimyasal inertlik, yüksek nötron absorpsiyon kesiti (600 barn), mükemmel termal iletkenlik gibi benzersiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle son yıllarda pek çok araştırmaya konu olan yüksek performanslı bir seramik malzemedir [6].

Tablo 1: Bor karbürün fiziksel kimyasal ve yapısal özellikleri [6,16].

Kimyasal formül	B ₄ C
Molar kütle	55.255 g/mol
Görünüm	Koyu gri veya siyah toz, kokusuz
Yoğunluk	2.52 g/cm ³ , katı
Erime noktası	2,350 °C (4,260 °F; 2,620 K)
Kaynama noktası	>3500 °C
Kristal yapı	Kristal yapı
Elastik modülü	460 GPa
Vickers sertliği	38 GPa
Seebeck katsayısı	300µVK ⁻¹

Bor karbürün kesin yapısı ve atomik düzenlemesi, yaygın olarak kullanılan hesaplamalı modellemeler ve deneysel araştırmalarla birlikte, hala çalışma ve tartışma konusudur.

İdealleştirilmiş, en simetrik formunda bor karbürün yapısı genellikle bir ikosahedral B₁₂ birimi ve bir doğrusal --C–B–C-- zinciri içeren eşkenar dörtgen birim hücrede (uzay grubu R-3m) tanımlanır. En yaygın kabul edilen atomik yapısı Şekil 1’de görülen, rombohedral ekseninde yer alan ikozahedral birimleri birbirine bağlayan 3 atomlu lineer zincirler ve R $\bar{3}m$ uzay grubunun köşelerinde bulunan 12 atomlu ikozahedral birimlerden oluşur [7,8].

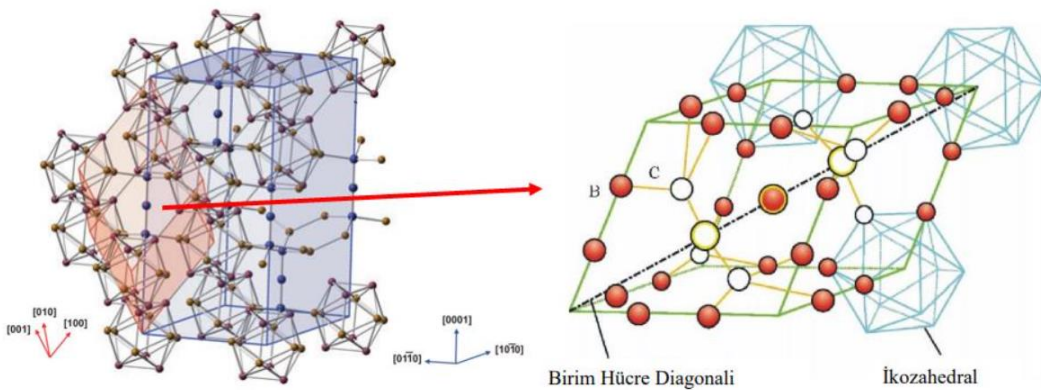
Bor karbürün basit 15 atomlu birim hücrelerinin altında bazı beklenmedik ayrıntılar ve önemli yapısal/bağlanma soruları yatmaktadır. Bor karbür yapısının, faz ayrımı veya ara yer dolulukları olmadan karbon içeriğindeki önemli bir değişime (B₄C’den B₁₀C’ye) dayanma kapasitesi bir sır olarak kalıyor [6,9]. B₁₂ birimleri, D_{3d} ortamında kristalografik olarak farklı bor atomları BE_q (Ekvator) ve BP’den (Polar) oluşur.

Bu B₁₂ birimleri BE_q atomları aracılığıyla karbon atomlarıyla bağ yaptığında katmanlar oluşur ve komşu katmanların B₁₂ birimlerini birleştirmek için çokyüzlüler arası BP-BP bağları kullanılır. İkosahedrondaki bu iki tür bor atomunun yanı sıra, bitişik katmanlardaki iki karbon atomunu birbirine bağlayan ve kısa doğrusal --C-B-C-- zincirini oluşturan benzersiz bir bor yapısı vardır [9-12].

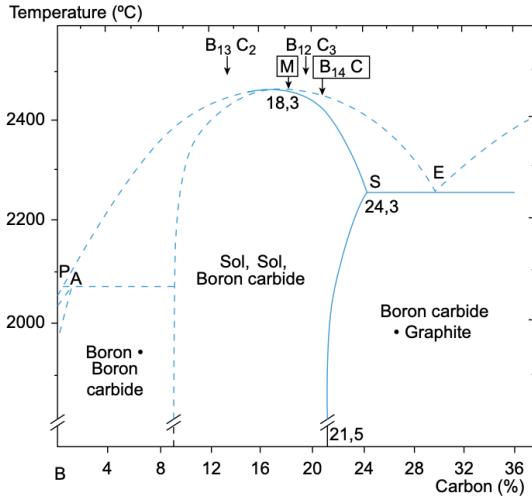
Mükemmel sertlik, yüksek elastiklik limiti ve düşük yoğunluk gibi benzersiz nitelikleri nedeniyle bor karbür, koruyucu vücut zırhında kullanım için mükemmel bir aday malzemedir. Güçlü kovalent bağlar ve yüksek atomlar arası elektron yoğunluğuna sahip benzersiz kafes yapısı, bu benzersiz özelliklerin nedenleridir. Bor karbürün birtakım polimorflarda mevcut olmasına rağmen, enerji açısından avantajlı B₄C yapısının genellikle C atomunun polar bölgede yer aldığı bir B₁₁C ikosahedradan ve aynı zamanda bir --C-B-C-- zincirinden oluştuğu anlaşılmaktadır [13].

Bor karbürdeki bor ve karbon atomlarının kristal yapı konumlarını belirlemek için nükleer manyetik rezonans, nötron ve X-ışını kırınımı, kızılötesi ve Raman spektroskopisi, X-ışını

absorpsiyonu ve saçılma teknikleri gibi deneysel yöntemler kullanılır. Bu tekniklerin ortaya çıkardığı potansiyel yapılar arasında üç farklı türde üç atomlu zincir bulunmaktadır: CBC, CBB ve BBB. Karbon konsantrasyonu bu zincirlerin dağılımını belirler. B₄C (%20 C) yapısı B₁₁C ikosahedrası ve CBC zincirlerinden oluşur. Bor zengini bir bileşimde, B₁₁C ikosahedrada bulunan karbon atomları aynı konumda kalırken, CBC zincirlerindeki bir karbon atomu bir bor atomu ile yer değiştirir. B₁₃C₂ bileşimine yakın bir yapıda ise B₁₁C ikosahedra ve CBB zincirleri bulunur. Karbon indirgenme süreci sırasında bazı B₁₁C ikosahedraları B₁₂ ikosahedraları ile yer değiştirirken, CBB zincirleri korunur. İkosahedrada bulunan bor-bor bağlarıyla karşılaştırıldığında, triatomik zincirlerdeki karbon-karbon bağları daha güçlüdür. Ayrıca, ikosahedralar içindeki bağlar, ikosahedralar arasındaki bağlardan daha güçlüdür. Şekil 2'de en çok kabul gören B-C faz diyagramı gösterilmiştir. Karbonun sabit fazda geniş bir katı çözünürlüğü olduğu ve homojenlik aralığının %8 C ile %20 C arasında uzandığı görülmektedir [6,8].



Şekil 1: Bor karbür rombohedral kristal yapısı [7,8].



Şekil 2: B-C faz diyagramı [14].

Toz formunda, sinterlenmiş üründe ve ince filmde uygulama alanları olan B_4C , yüksek sertliği nedeniyle metal ve seramik parlatma, yumuşatma ve su jeti kesimde aşındırıcı toz olarak kullanılır.

Malzemenin yüksek bir erime noktası, mükemmel termal iletkenliği ve düşük özgül ağırlığı vardır; bu özellikler, savunma uygulamalarında, özellikle personel ve araç zırhlarında kullanımı için önemlidir. Ancak, yüksek sertliği, uygulanabilirliğini sınırlayabilen nispeten düşük bir kırılma dayanıklılığını beraberinde getirir. Balistik senaryolarda olduğu gibi yüksek basınçlı darbelerde faz dönüşümleri nedeniyle sertliği azalabilir. Kapsamlı araştırmalar, bu dönüşümleri anlamaya ve bor karbürün yüksek basınç durumlarında sertliğini korumasını sağlamak için bunları azaltmanın yollarını bulmaya odaklanmıştır. Son on yılda yapılan çalışmalar, bu dezavantajların çoğunun seramik ve/veya metal nano katkı maddelerinin (borürler, karbürler, oksitler, metal alaşımlar vb.) nano yapıdaki bor karbür matrisine eklenmesiyle aşılabileceğini göstermiştir [3].

Ek olarak B_4C , p-tip yarıiletken bir malzeme olması nedeniyle yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik cihazlarda kullanılmak üzere uygun bir malzeme adayıdır. Ayrıca, yüksek Seebeck katsayısına ($300\mu VK^{-1}$) sahip olması nedeniyle mükemmel bir termoelektrik malzemedir [15]. Bor karbür, ısı çiftler, diyotlar ve transistörler gibi uygulama alanlarına sahiptir. Aynı zamanda diğer metal borürlerin ve refrakter malzemelerin yapımında kullanılan prosesin önemli bir parçasıdır. Bor karbürün düşük yoğunluğu, yüksek sertliği ve düşük termal genleşme özellikleri, onu uzay gemilerinde kullanılan Be/Be alaşımları için uygun bir alternatif haline getirmektedir [6].

3.BOR KARBÜR SENTEZİ (BORON CARBIDE SYNTHESIS)

19. yüzyılda metal borür reaksiyonlarının bir yan ürünü olarak B_4C 'nin keşfine tanık olundu. İlk sentez çalışmalarında, bor karbürün saflığı %75'in altında kaldı. Daha sonra 1933 yılında, karbotermik indirgeme yöntemiyle %90 saflıkta kristal bor karbür üretilerek bir patent alındı [16]. B_4C üretmek için literatürde en çok kullanılan yöntemler, karbotermik indirgeme ve bor oksidin bir elektrik ark fırınında karbon ile reaksiyonlarıdır. Bununla birlikte mekanokimyasal sentezleme, magnezotermik indirgeme, elementlerden sentezleme, buhar fazı reaksiyonları, polimerik öncüllerden sentezleme, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) dahil olmak üzere çeşitli başka yöntemler de önerilmiş ve incelenmiştir [3,6,16-20].

Bor karbür tozu üretmenin ana yöntemleri arasında gaz fazı reaksiyonları, karbotermal

indirgeme ve bir elektrik ark ocağında karbon-B₂O₃ reaksiyonları yer alır. Bor karbürün %95'ten fazla bağlı yoğunluğuna ulaşmak için 2200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sıcak presleme işlemi şarttır [1]. Bu, son ürünün özelliklerini değiştirirse de doğru sinterleme yardımcılarının kullanılması, sinterleme sürecinin kısaltılmasına ve sıcaklığın düşürülmesine yardımcı olabilir [1]. Sentez sürecini optimize etmek, bor karbürün kalitesini kontrol etmek ve çeşitli uygulamalarda maliyet

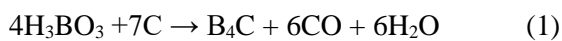
etkinliğini yönetmek için çok önemlidir. Bu sentez yöntemleri, sonuçta elde edilen bor karbürlerin bileşim, yapı ve özellikleri üzerinde çeşitli derecelerde kontrol sağlar ve farklı uygulamalar için uygun hale getirir. Araştırmacılar, bor karbür sentezinin verimliliğini ve çok yönlülüğünü artırmak için sürekli olarak yeni yöntemleri incelemekte ve geliştirmektedirler. Bor karbürün sentez teknikleri Tablo 2'de karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2: Bor karbür sentez yöntemlerinin karşılaştırılması [6].

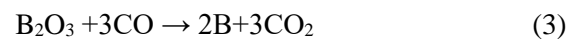
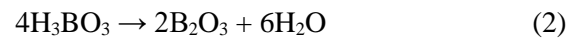
Yöntem	Bor kaynağı	Karbon kaynağı	Avantaj	Dezavantaj
Karbotermik indirgeme	H ₃ BO ₃ veya B ₂ O ₃	Grafit, aktif karbon	-Ucuz hammadde, -Ticari kullanım için uygun	-Yüksek bor kayıpları, -Parça halinde elde edilen toz için öğütmeye ihtiyaç var
Magnezotermik indirgeme	B ₂ O ₃ veya Na ₂ B ₄ O ₇	Grafit, aktif karbon	-İnce toz, ekzotermik reaksiyon, SHS'ye uygun işlem	-Ürün Mg, MgB ₂ ile kirlenmiş
Elementlerden sentez	Elemental bor	Grafit, aktif karbon	-Bor kaybı yok, -Ürünün saflığı ve karbon içeriği üzerinde kontrol	-Elemental borun yüksek maliyeti
Buhar fazı sentezi	BCl ₃ , BBr ₃ , BI ₃ , B ₆ H ₆ , B ₂ O ₃	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , CCl ₄	-İnce filmler, toz, lifler, kılçıksı yapılar için uygun	-Yoğunlaşma için B ₄ C uygun toz üretmek zor -Büyük ölçekli üretim için uygun değil
Polimerlerden sentez	Borik asit, B ₂ O ₃ , polivinil pentaboran, polivinil borat, etil dekaboran	Polivinil alkol, sitrik asit, hidroksil benzil alkol, şeker, etilen glikol	-Düşük sıcaklıkta proses -Yüksek serbest karbon içeriği,	-Laboratuvar aşamasında
Sıvı faz reaksiyonu	BBr ₃ , Elemental bor	CCl ₄	-Düşük sıcaklık prosesi, -Nanopartiküller için uygun	-Reaktif metal ihtiyacı, Na veya Li gibi
İyon ışın sentezi	Elemental bor	Karbon	BxC için uygundur	-Yalnızca ince filmler için
Buhar sıvı katı büyüme	B ₂ O ₃	Karbon siyahı	Kılçıksı yapılar için uygun	-Erimiş metal katalizör ihtiyacı

3.1 Karbotermik İndirgeme

Ticari B₄C üretimde yaygın olarak kullanılan karbotermik indirgeme yönteminde, borik asit ve bor trioksit karbon ile indirgenir. Toplam karbotermik indirgeme reaksiyonu aşağıdaki gibidir;



Bu reaksiyon üç adımda gerçekleşir;



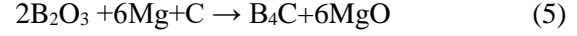
Borik asit ısıtıldığında (Denklem 2) ortama su vererek B₂O₃'e dönüşür. B₂O₃'ün karbon

monoksit ile indirgenmesi (Denklem 3) 1400 °C'nin üzerinde termodinamik olarak gerçekleşebilir. Toplam reaksiyon hızını arttırmak için fırın sıcaklığı 2000 °C'nin üzerine çıkarılır. Bu, 16800 kJ/mol enerji tüketen endotermik bir süreçtir. Bor karbür üretmek için karbotermik indirgeme işleminde üç farklı tipte elektrikle ısıtılan fırın kullanılır: boru tipi fırın, elektrik ark ocağı ve direnç malzemesi olarak grafit çubuk kullanan Acheson tipi fırın [6]. Karbotermik indirgeme yöntemiyle ticari olarak bor üretim sürecinde sıcaklık yaklaşık 2000 °C civarındadır ve sonuçta elde edilen ürün külçe halindedir. Bor karbürünün toz haline getirilmesi için öğütme işlemi kullanılır, ancak bu çok sert materyalin öğütülmesi ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği için üretim maliyetini artırır. Endüstriyel elektrik ark ocaklarında sıcaklık eşit şekilde dağılmamaktadır; merkezden dışarı doğru çıktığında okumalar 1200 ile 2200 °C arasında değişir. Merkezdeki sıcaklık 2200 ila 2500 °C arasında değişmektedir. Sonuç olarak reaksiyona girmeyen reaktanlar nihai ürünlerdeki safsızlıklardır. Öğütme sırasında meydana gelen kirliliklerle birlikte, geleneksel üretim yöntemiyle elde edilen bor karbür önemli derecede safsızlıklar içermektedir [7]. Ticari olarak üretilen bor karbürlerde yaşanan bu zorluklar nedeniyle, bor karbürün alternatif yöntemlerle üretimi, önemli bir araştırma alanı olarak büyük ilgi görmektedir.

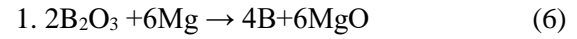
3.2 Magnezotermik İndirgenme

Karbon varlığında bor anhidritten bor karbür üretmeye yönelik diğer bir işlem, B₂O₃'ün magnezotermal indirgenmesidir. Cam, seramik,

kimya, metalurji ve elektrik-elektronik mühendisliği alanlarında bor oksit kullanılmaktadır [21]. Magnezotermik indirgenme üç basamakta ilerler (Denklem 5, 6, 7);



genel reaksiyonuyla gösterilen süreç iki basamakta devam eder;



Reaksiyon, ekzotermiktir ($\Delta H=1812$ kJ/mol). Magnezyumun 1000 °C'nin üzerindeki reaksiyon sıcaklıklarında yüksek bir buhar basıncına sahip olması nedeniyle, yüksek sistem basıncını korumak için argon veya hidrojen gibi bir inert gaz kullanılır. Bu yöntemle elde edilen ürünler, MgO'yu uzaklaştırmak için yıkanır. Bununla birlikte, magnezyum borürler adı verilen kararlı moleküller, bor karbürde kirlenici madde olarak varlığını sürdürüyor. Bu işlem, ince taneli sinterlenmiş ürünlerin üretilmesinin yanı sıra son derece ince tozların sentezi için de iyi çalışır [6,22]. Ancak, yüksek maliyetli olması ve son ürünün safsızlıklar içermesi, bu yöntemin en büyük dezavantajlarıdır.

3.3 Kendiliğinden İlerleyen Yüksek Sıcaklık Yöntemi (SHS)

Garry [23], alkali Na₂B₄O₇ veya B₂O₃'ün 1650 ile 1700 °C arasındaki sıcaklıklarda karbon varlığında magnezotermik indirgenmesinden B₄C tozlarının üretimini tanımlayarak SHS prosesinin patentini almıştır. Katalizör olarak metalik sülfatların kullanılmasıyla reaksiyonun sıcaklığının 700 °C'ye düşürüldüğü bulundu.

Yüksek sıcaklıktaki sentez yolu için magnezotermik reaksiyonun ürettiği ısı tek başına yeterlidir. C, H₃BO₃ ve Mg tozlarından ince B₄C tozu üretmek için SHS'nin kullanımı araştırılmış ve bu karışımın aktivasyon sıcaklığı 670 °C olarak belirlenmiştir [24,25].

SHS yöntemi, yüksek kalorili uygulamalarda kullanılan bor karbürün elde edilmesinde kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemin çıktısı, kalorifik değerinden dolayı kontrol edilemez. Başka bir deyişle, bu stratejiyi kullanmak, düzenli ve eşit kalitede bir ürünü tutarlı bir şekilde üretmeyi zorlaştırır.

3.4 Elementlerden Sentezleme

Bor karbürün bu sentezi, doğrudan B ve C elementlerinden B₄C eldesini içerir. Ancak elementel borun çok pahalı olması nedeniyle bu işlem uygun maliyetli değildir. Bu nedenle, özellikle B10 izotopunu içeren veya yüksek saflıkta bor karbür elde etmek gibi özel uygulamalarda kullanılmak üzere bu yöntem tercih edilir. Bor karbürün kendisini oluşturan parçalardan sentezlenmesi için öncelikle karbon ve bor içeren homojen bir toz karışımının yapılması gerekmektedir. Bu toz karışımı peletlenir ve inert bir ortamda veya vakum altında 1500 °C'yi aşan bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu prosedür, kısmen sinterlenmiş peletler verir; bunlar daha sonra kırılır, ezilir ve son olarak ince bor karbür tozuna dönüştürülür.

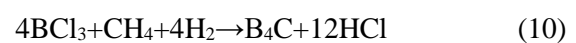
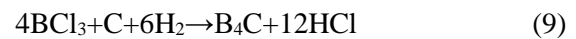
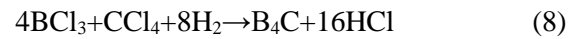
Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek saflıkta bor karbür elde etmek için elemental bor, genellikle erimiş tuzun elektrolizi yöntemiyle üretilmiştir. Ayrıca, sıcak presleme, metal alaşımlama ve ısıtma, kıvılcım plazma

sinterleme, şok dalgası tekniği ve amorf bor ve grafit, karbon siyahı gibi karbon kaynaklarının kullanımı dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak elementel bor karbürün sentezi üzerine araştırmalar yapılmıştır [26-30].

3.5 Buhar Fazı Reaksiyonu

Bor ve karbon içeren gazlı türler arasındaki reaksiyonun gerçekleştirilmesi yoluyla bor karbür sentezi kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Bu teknik, kılçıksız ince yapılar ve mikrometre altı boyutlu parçacıkların yanı sıra bor karbürden yapılmış kaplamalar oluşturmak için kullanılmıştır. BCl₃, BBr₃ ve BI₃ gibi bor halojenürler uygun bor kaynağı olmakla birlikte, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle BCl₃ en çok tercih edilenidir. Halojenürlerin yanı sıra boran (B₆H₆) ve oksit (B₂O₃) de faydalı bor kaynaklarıdır. Karbon kaynağı olarak CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂ ve karbon tetra klorür (CCl₄) gibi hidrokarbon gazları kullanılmaktadır [4]. Bor karbür sentezi istenilen sıcaklık ve basınçta tutulan reaksiyon odasında gerçekleşir. Genellikle ortamda hidrojen bulunur ve bu hidrojen, aşağıdaki reaksiyonlara göre halojen oluşturan hidrojen klorürle reaksiyona girer (Denklem 8,9,10).

Buhar fazı reaksiyonu için böyle bir düzenek Bourdeau [29] tarafından patentinde anlatılmıştır. Buhar fazındaki bor halojen ürününün 1500 ila 2500 °C sıcaklıkta hidrokarbonla işlenmesiyle bor karbür elde edildi.



3.6 Polimerik Öncüllerden Sentezleme

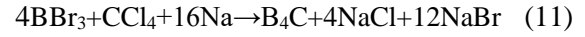
Düşük sıcaklıklarda seramik malzemeler yapmak için polimer öncüllerinin geliştirilmesi, yüksek sıcaklıktaki reaksiyon prosedürlerine alternatif olarak büyük ilgi görüyor. Polivinil pentaboran, karboran ($C_2B_nH_{n+2}$), trifenilboran ve borazinler gibi bazı bor yüklü organik bileşikler, B_4C eldesi için pirolize tabi tutulur.

Tipik olarak bu prosedür, inert bir ortamda veya vakumda 1000 ila 1500 °C arasında gerçekleştirilir. Serbest akışlı bir bor karbür tozu oluşturmak için şekeri borik asitle birleştirmeye yönelik bir yöntem, bir ABD patentinde açıklanmaktadır [30]. Karışım etilen glikolde çözüldükten sonra 180 °C'de havada kurutulur ve daha sonra hidrojenle 700 °C'ye kadar ısıtılır. İnce bor karbür tozu üretmek için bu reaksiyon ürünü öğütülür ve 1700 °C'de yedi saat boyunca yakılır. Düşük sıcaklıkta sentetik bir teknik Mondal ve Banthia tarafından açıklanmıştır [31]. Borik asidin polivinil alkol ile etkileşimi yoluyla bir polimerik öncünün sentezini içerir, bu da 400/800 °C'de piroliz yoluyla kristal bor karbür üretimiyle sonuçlanır. Borik asit ve sitrik asidin sulu çözeltisinden stabil bir jel oluşturma yöntemi Sinha ve meslektaşları tarafından ortaya atılmıştır [32]. Bu jel, vakum altında 1450 °C'ye ısıtıldığında B_4C üreten bir öncül elde etmek üzere ayrıca işlenir.

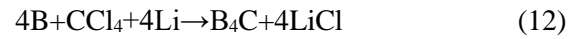
3.7 Sıvı faz reaksiyonu

Solvotermal süreç veya koredüksiyon yöntemi bu tekniğe verilen ek adlardır. Geleneksel tekniklerin aksine bu, gerekli özelliklere sahip bor karbürün önemli ölçüde daha düşük

sıcaklıklarda üretilmesini sağlayabilir. Shi ve diğerleri, aşağıdaki reaksiyona (Denklem 11) göre indirgeyici madde olarak sodyum kullanılarak boron tribromür ve karbon tetraklorürün ortak indirgenmesi yoluyla ultra ince bor karbür tozlarının oluşumunu araştırmışlardır [33].



Reaksiyon bir otoklavda 450 °C'de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen B_4C kristalleri, tekdüze küresel (80 nm çap) ve çubuk benzeri parçacıklardan oluşmuştur. Gu ve ark. solvotermal yolun nanokristalin B_4C 'nin oluşmasına yol açtığını kaydetti. Amorf bor tozunun 600 °C'de otoklavda sınıvlaştırılmasından sonra, CCl_4 'ün indirgenmesiyle B_4C oluşturuldu (Denklem 12) [34]. Yaklaşık 15-40 nm çapında parçacık boyutuna sahip altıgen B_4C kristalleri elde edilmiştir.



3.8 Kimyasal buhar biriktirme (Buhar sıvı katı (VLS) büyümesi)

Son zamanlarda bir silikon substrat üzerinde plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (VLS yoluyla) ile sentezlenen "nanoteller" üzerine çalışmalar yapıldı. İnce ve kılçıksız bor karbür yapıları VLS büyüme mekanizmasıyla elde edilebilir. Bu yöntemde, gaz fazındaki borun ve karbonun, sıvı bir katalizör metale (Fe, Ni veya Co) taşınarak kılçıksız bor karbür yapıları olarak çözünür. Bor karbür kılırları, karbon katalizör ile aşırı doymun hale geldiğinde metal damlacıklarından ayrılır [6].

Bu yöntemde, reaksiyon karışımına bir halojenit tuzu ve bir metal katalizör ilave edilerek VLS büyümesi destekler. Mekanizma şu şekildedir: oksit, karbotermal yollarla indirgenir ve daha sonra bor, gaz fazındaki türler olarak, bıyık bileşenlerinin çözündüğü sıvı katalizör metale taşınır. Katalizörün karbon ve borun aşırı doyması, bor karbür kıllarının metal damlacıklarından ayrılmasına neden olabilir. Damlacıklara yakın reaktif gaz türlerinin miktarı belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde veya damlacıklarla temas halinde olan karbon yetersiz olduğunda bıyık yapısının büyümesi durur [35]. Carlsson ve ark. bu tekniği kullanarak B_4C yapılarını ve trombositlerini hazırlamışlardır [35]. Bor ve karbon kaynağı olarak sırasıyla B_2O_3 ve karbon siyahı kullanılmıştır. Kılçaksız yapıların büyümesini kolaylaştırmak için NaCl ve Co eklenmiştir. Reaksiyonlar 1200-1800 °C sıcaklık aralığında gerçekleşti ve katalizör metalleri olarak Co, Ni ve Fe test edildi. B_2O_3 , NaCl ile reaksiyona girerek BCl₃'yi oluşturmuştur. Bu durumda BCl₃ karbonla birlikte sıvı kobaltta çözülür ve daha sonra bor karbür kılları halinde çöker.

4. SAVUNMA TEKNOLOJİLERİNDEKİ UYGULAMALAR (APPLICATIONS IN DEFENSE TECHNOLOGIES)

Askerler tarafından kullanılan mevcut balistik koruma sistemleri hem çok ağır hem de yeterli koruma sağlamamaktadır. Bu tür kayıpları ve yaralanmaları azaltmak için modern balistik zırh sistemleri için tipik olarak sinterlenmiş seramikler, sentetik elyaflar ve yüksek sertlikte metaller dahil olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılır. Kompozit zırh olarak bilinen bu

malzemeler, uygulamaya (araç veya personel) ve tehdit tipine (parça, mermi, patlama vb.) göre uyarlanarak kombinasyon halinde kullanılmaktadır. Örneğin yeleşin özellikleri ve balistik dayanıklılık genel olarak seramik malzemelerin sertlik ve yoğunluk özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Ancak balistik çarpmanın dinamik bir olay olduğu dikkate alındığında (yüksek deformasyon hızları), seramiklerin kırılma modu gibi özellikleri daha çok ön plana çıkmaktadır. Tablo 3'te listelenen özellikler, tane şekli ve boyutu, kristalin fazlar, faz dönüşümleri ve gözenekliliğin yanı sıra malzemenin mikro yapısıyla da ilişkilidir.

Bu malzemeler arasında bor karbür, olağanüstü sertliği, hafifliği ve nötron soğurma kapasitesi nedeniyle savunma sektöründe büyük ilgi gören bir malzemedir. Avantajlı özellikleri, savunma ve askeri teknolojilerdeki birçok kritik uygulamada kullanılabilir. Bu bölümde bor karbürün savunma alanında kullanılan uygulamaları araştırılmıştır.

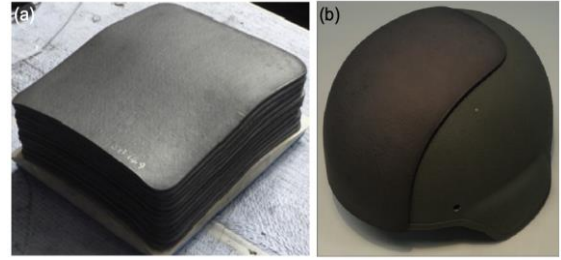
Tablo 3: Bor karbür malzeme özellikleri ile balistik performans arasındaki ilişki.

Seramik Özelliği	Balistik Performansa Etkisi
Yoğunluk	Kurşun geçirmez zırh ağırlığı
Sertlik	Mermi hasarı
Genç Modül	Şok dalgalarının yayılması
Mekanik direnç	Çoklu darbelere karşı dayanıklılık
Kırılma Tokluğu	Çoklu darbe dayanımı; saha dayanıklılığı
Kırılma Modu	Enerji Emilimi

4.1 Vücut ve Araç Zırhı

Balistik koruma, kişisel kullanım, kara, deniz ve hava araçları, askeri yerleşim bölgeleri için gereklidir. Zırh kullanımının silahlı çatışma ortamlarında ölümleri azalttığı bilinmektedir. Bu koruyucu donanımın kullanılmasıyla savaşçı yaralanmaları ve ölümleri başarılı bir şekilde azaltılır. Balistik koruma, mermileri insan vücudundan uzak tutma amacına hizmet eder. Ancak bu amaç için bir malzeme seçerken ağırlık, enerji emme kapasitesi, hasar direnci ve çoklu darbe direnci gibi bir dizi faktör dikkate alınır. Üretim parametrelerinin optimizasyonu ve fiziksel ve mikroyapısal özelliklerin bir karışımı, dikkate alınması gereken ek hususlardır. Kurşun geçirmez yelek üretiminin fiyatı, bu malzemeleri seçerken belirleyici bir faktördür. Yukarıda sayılan özelliklerden dolayı seramik malzemeler, onları uygulama için ideal kılan ve balistik zırh üretiminde kullanılan diğer malzeme sınıflarından daha iyi performans gösterir. Bu da onları balistik zırh üretiminde kullanılan mükemmel bir aday haline getirir. Balistik koruma sistemleri hafif ve ucuz olacak şekilde tasarlanmıştır. Genellikle, bu özellikler seramik zırh sistemleri ile sağlanır. Seramik zırh sistemleri, yüksek çekme gerilim değerlerine sahip Kevlar™ veya cam elyafı gibi dayanıklı özel takviye elyaflarla kaplanmış bir alüminyum gibi yumuşak metal gövdeden oluşur [36]. Kinetik enerjisi 2-4 kJ civarında olan bir merminin balistik yüzeye 800 m/s hızla çarpması sonucu ilk olarak sert seramik yüzey kırılıyor ve kalan enerji takviye elemanları tarafından emiliyor. Balistik koruma performansı, seramik kaplama malzemesinin mekanik özellikleri ve yapısından etkilenen

balistik enerjinin dağılımı ile belirlenir. Alümina gibi oksit seramikler ve karbür ve nitrür dahil oksit içermeyen seramikler, balistik koruma için yaygın olarak kullanılmaktadır. [37]. Günümüzde silisyum karbür (SiC), B₄C, alümina ve (Al₂O₃) balistik uygulamalarda en sık kullanılan seramiklerdir. Alümina bu malzemelerin işletme açısından en ekonomik olanıdır. Silisyum karbürün mekanik dayanım ve daha düşük yoğunluk açısından alüminaya göre avantajları olmasına rağmen, işleme ve malzeme edinimi ile ilgili daha büyük masraflar nedeniyle ekonomik faydası azalmaktadır. Bor karbür ise gelişmiş seramikler arasında balistik dirence ve daha düşük yoğunluğa ek olarak en iyi mekanik özellikleri sunan üründür [36].



Şekil 3: Bor karbür koruyucu yelek plakaları (a) ve kask zırhı (b) [14].

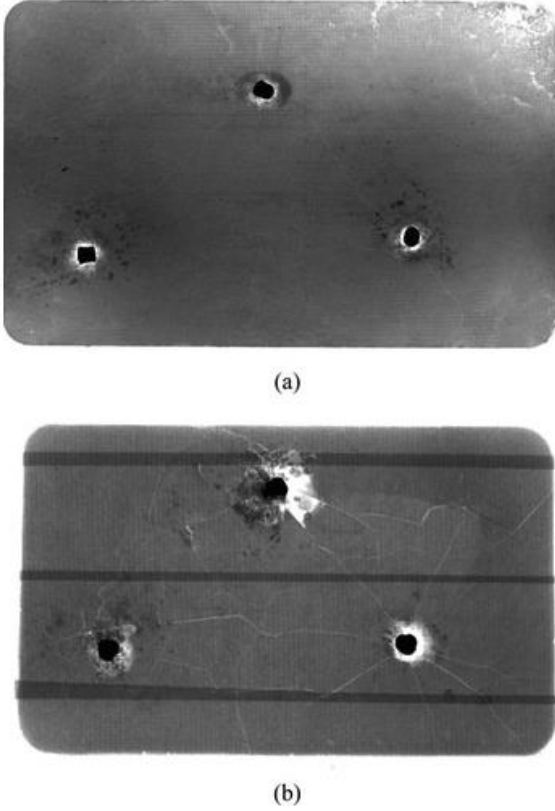
Bor karbürün savunmada birincil kullanımlarından biri gövde ve araç zırhı imalatıdır. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra insanoğlunun bildiği en sert madde olan bor karbür, balistik darbelere karşı güçlü bir direnç sunduğundan zırhlı araçlar ve kişisel koruma ekipmanları için mükemmel bir seçenektir. Şekil 3'te bor karbürden yapılan koruyucu yelek plakaları (a) ve kask zırhı (b) görülmektedir. Yüksek sertliğine rağmen, bor karbür nispeten hafiftir ve personelin gelişmiş hareketliliğine ve zırhlı araçlar için daha iyi yakıt verimliliğine olanak tanır. Gücü en üst

düzeğe çıkarırken ağırlığı en aza indirmenin çok önemli olduğu uygulamalarda özellikle hayati önem taşır [38-40]. Yüksek sertlik, balistik özellikler için kritik bir parametre olmasına rağmen, kırılma tokluğu da balistik performans için aynı derecede önemlidir. Yüksek sertlik ve kırılma tokluğuna sahip zırh malzemeleri üstün balistik performans sağlamalıdır. Sonuç olarak bor karbür bazlı sistemler, mükemmel balistik performansın yanı sıra yüksek kırılma dayanıklılığına ulaşma potansiyeline sahiptir. Devam eden araştırmalar, sertliğin azalmasına neden olabilecek yüksek basınçlı darbeler altında malzemenin faz dönüşümlerini daha iyi anlamayı ve hafifletmeyi amaçlamaktadır [13,41,42].

Minoo Naebe ve arkadaşları polimer seramik B₄C katkılı kompozitleri, balistik darbe tepkilerini araştırmak için çeşitli kalibrelerdeki mermilere karşı tepkilerini araştırmışlardır [43]. Numuneler, B₄C ve cBN'nin çeşitli oranlarda ve ısıyla sertleşen fenolik veya epoksi reçine ve aramid hamuru ile kombinasyonlarla mekanik olarak karıştırılmasıyla hazırlandı. Daha sonra sıcak plaka presi kullanılarak kapalı bir kalıpta kuru karışımlar oluşturuldu. Nihai karolar daha sonra aramid arkalık malzemesi üzerine "çapraz yüzeyler" olarak yerleştirmek için epoksi yapıştırıcı ile kullanıldı. İlk kez, seramik parçacıkları ve polimer reçineden oluşan yeni bir kompozit malzeme, sıkıştırılmalı kalıplama yoluyla oluşturuldu ve bir zırh sistemi olarak test edildi. Önerilen hafif polimer B₄C kompozitler şekillendirilebilir ve olumlu çoklu vuruş kapasitesine sahip olduğu görüldü. Geliştirilen kompozit zırhın, daha fazla takviye

eklenmesine gerek kalmadan daha yüksek ağırlık ve daha büyük kalibreli mermi tehditlerine karşı ölçeklenebilir ve etkili olduğu kanıtlandı. Seramik kompozitlerin balistik performansı üzerindeki etkisini incelendiğinde cBN tabanlı zırhların balistik testleri, 784 m/s'lik bir hız artışı sağladığı görüldü. B₄C içeren polimer seramik kompozitler 702 m/s'lik bir hız artışı gösterdi. Bu, aynı artan hıza sahip olan eşdeğer Kevlar ~ 680 m/s hedefine göre marjinal bir gelişmedir [43].

Şekil 4'a, balistik çarpışma sonrasında B₄C/fenolik vuruş yüzünün X-ışını görüntüsünü sergilenmektedir. Gösterildiği gibi, mermi darbelerinin nispeten yakın mesafesi göz önüne alındığında, sınırlı radyal ve çevresel çatlama vardır. Karşılaştırma için, eşdeğer alan yoğunluğuna sahip monolitik sinterlenmiş B₄C karonun (Şekil 4b) bir X-ışını görüntüsü eklenmiştir; bu, özellikle merkezi üst darbe bölgesinde yoğun radyal çatlama ve ciddi çevresel çatlama gösterir. Polimer seramik zırhların, mermi çapının 2-3 katı hasara dayanma eğiliminde olduğunu ve zaman zaman çarpma bölgeleri arasında uzanan radyal çatlakların olduğunu fark edilmiştir. Zırh, geleneksel sinterlenmiş seramik malzemelerden çok daha fazla hasara dayanıklıdır ve bu, bu yeni polimer seramik malzemenin bir avantajıdır [43].



Sekil 4: (a) Sınırlı çevresel ve radyal çatlama gösteren B₄C bazlı polimer seramiğin (203 mm × 123 mm) ve (b) eşdeğer alan yoğunluğuna sahip monolitik sinterlenmiş B₄C karonun kapsamlı radyal ve çevresel çatlama gösteren boyutun X-ışını görüntüsü [43].

4.2 Nükleer Uygulamalar

Bor karbürün savunmada bir başka önemli uygulaması, mükemmel nötron absorpsiyon özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Termal nötronları soğurmada oldukça verimlidir ve bu da onu nükleer teknolojide, özellikle donanma gemilerindeki nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında paha biçilmez bir varlık haline getirir. Bor karbür içeren kompozit malzemeler, güçlü termal iletkenlikleri ve termal strese dayanma yetenekleri nedeniyle nükleer füzyon reaktörlerinde birinci duvar malzemesi olarak kullanılabilir. Malzemenin radyasyon kalkını özelliği, nükleer enerjiyle çalışan savunma

sistemlerinde personelin ve ekipmanın zararlı radyasyondan korunmasında da çok önemlidir. Bor karbürün nötron soğurma kapasitesindeki iyileştirmeler ve bu özellikten yararlanan kompozit malzemelerin geliştirilmesi, mevcut aktif araştırma alanlarıdır.

Düşük molar kütleleri nedeniyle, polimer matrisli kompozitler, nötron koruması için mevcut çeşitli seçenekler arasında endüstrinin ilgisini çekmiştir. Nötron koruma açısından bakıldığında, bu hidrojenli malzemeler aynı zamanda termal nötronları absorbe etme potansiyeline de sahiptir. Minimum büzülme, çoklu takviyelere güçlü yapışma, yüksek kimyasal ve ısı direnci, yüksek mekanik mukavemet ve gama ve nötron radyasyonuna karşı olağanüstü direnç gibi olağanüstü nitelikleri nedeniyle, epoksi reçineden yapılan kompozit bunlar arasında incelenmektedir.

Kiani ve arkadaşları, yüksek konsantrasyonda bor karbürde termal nötron koruma performansını test etmek için Epoksi/Kil/B₄C nanokompozitini hazırlamış ve karakterize etmişlerdir [44]. Ağırlıkça yüzde 3 montmorillonit nanokil içeren nanokompozitlerin termal nötron soğurma özellikleri üzerine deneysel araştırma yapıldı. Mekanik testler, daha yüksek B₄C konsantrasyonlarının, daha fazla çekme dayanımına sahip olduğunu, ancak söz konusu numunelerin tamamında Young modülünün daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bor karbür parçacıklarının kullanılması, Epoksi/Kil nanokompozit numunelerine kıyasla numunelerin çekme mukavemetini azaltmıştır. Bu etki, B₄C dolgu maddesinin daha yüksek

konsantrasyonlarında daha ciddi hale gelir. Yani ağırlıkça %5 ve ağırlıkça %20 bor karbür içeren bir numunede çekme mukavemetinde sırasıyla yaklaşık %8 ve %28 oranında bir azalma gözlenmiştir. TGA analizine göre ise, B₄C içeren veya içermeyen nanokompozitler için T50%'nin sırasıyla 477 °C ve 439 °C olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu veriler, nötron soğurucu olarak B₄C'nin eklenmesinin epoksinin termal stabilitesinin arttığı anlamına geldiğini göstermektedir [44].

4.3 Havacılık Uygulamaları

Bor karbür, yüksek erime noktası ve termal kararlılığı nedeniyle havacılık uygulamalarında karşılaşılan yüksek sıcaklıklı ortamlarda kullanım alanı bulmaktadır. Bor karbürden yapılan malzemelerin aşırı sıcaklıklara dayanması, roket tahrik gibi sistemlerinin imalatında kullanılır [45,46].

Naslain ve arkadaşları havacılık uygulamaları için seramik matrisli kompozitlere B₄C içeren türler eklemiştir [45]. B-katkılı pirokarbon ve h-BN matrisleri şekillendirilmiş ve homojen veya çok katlı fiber kaplamalar olarak yük altında oluşan çatlaklara dayanıklılık için başarıyla kullanılmıştır. Kendi kendini onaran çok katlı bir matris, B katkılı pirokarbon katmanlarını ve B₂O₃ bazlı sıvı iyileştirme aşamalarını oluşturan B ve Si içeren organik (yani B₄C ve SiC) katmanlarını birleştirici bir kompozit model kullanılarak tasarlanmıştır. Tüm özellikler kimyasal buhar infiltrasyonu ile biriktirilmiştir. Sonuçta bu kompozitin yüksek çekme kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir.

Reddy ve diğerleri havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere bor karbür içeren kompozit malzemelerin geliştirilmesini araştırmışlardır [46].

Bu amaçla alüminyum alaşımıyla takviye edilmiş çeşitli silisyum karbür ve bor karbür bileşikleri elde ettiler. Yapılan testler sonucunda yüksek miktarda karbürün varlığı nedeniyle malzemenin daha yüksek çekme, eğilme mukavemetine ve sertliğine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca karbür ve alüminyum içeren numunenin daha fazla enerji emdiği görülmüştür.

4.4 Gelişen Uygulamalar

Bor karbürün savunma teknolojilerindeki geniş uygulama yelpazesi, malzemenin bu alandaki stratejik önemini vurgulamaktadır. Araştırma topluluğu, kritik savunma ve askeri uygulamalarda daha iyi performans elde etme umuduyla, özelliklerinden yararlanmanın yeni yollarını keşfetmeye devam ediyor. Bu karmaşık malzeme hakkındaki anlayışımız derinleştikçe, uygulamaları genişlemeye devam edecek ve bor karbürde sürekli araştırma yapılması gerekliliğinin altını çizecektir.

Düşük gözlemlenebilir teknoloji olarak da bilinen stealth (gizlilik) teknolojisi, askeri kişilerin, uçakların, gemilerin, denizaltıların, füzelerin, uyduların ve kara araçlarının radar, kızılötesi, sonar ve diğer tespit teknolojilerine görünürlüğünü azaltmak için tasarlanmış bir askeri teknoloji tekniğidir. Bor karbür doğrudan stealth teknolojisi ile ilgili olmasa da belirli stealth uygulamalarında benzersiz özellikleri nedeniyle rol oynayabilir. Bor karbürün yüksek

sertliği ve aşınmaya karşı dirençli olması, bir uçağın veya aracın yüzeyinin stealth yeteneklerini korumak için zorlu çevresel koşullara dayanmasında faydalı olabilir. Bazı stealth teknolojileri, radyo dalgalarının yansımalarını azaltmaya yönelik kaplamalar veya malzemeler içerir. Bor karbür, nispeten düşük bir kırılma indisine sahip olduğu için belirli uygulamalarda bu eşleşmeyi sağlamak için kullanılabilir, bu da radar dalgalarının yansımalarını azaltabilir. Bor karbür, stealth araçlarının üretiminde yapısal bileşenlerin üretilmesinde kullanılabilir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, hafif ancak güçlü yapıların oluşturulmasında faydalıdır ve bu, stealth platformlarının genel performansını korumak için önemlidir [47].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sonuç olarak, bor karbür savunma ve askeri uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. En çok vücut zırhlarında ve son derece güçlü ve dayanıklı olması gereken tank ve helikopter gibi askeri araçların imalatında kullanılır. Bu özelliklerinden dolayı bor karbür, bir ülkenin askeri gücünün ve savunma sektörünün geliştirilmesinde vazgeçilmez bir kimyasal bileşendir.

Ayrıca, borun savunma ve askeri uygulamadaki tam potansiyeli henüz kullanılmamıştır. Devam eden araştırma ve yenilikler, askeri teknolojiye dönüştürebilecek yeni uygulamaların geliştirilmesi için çok önemlidir. Bor ile ilgili araştırmalara yatırım yapan ülkelerin savunma yeteneklerinde önemli ilerlemeler yaşaması muhtemeldir. Bu da borun modern savunma alanındaki önemini teyit eder.

Bor karbürün yukarıda belirtilen avantajları olmasına rağmen balistik uygulamalarda iki dezavantajı vardır. Metallerde ve hatta silisyum karbürde görülen yerel plastik deformasyon süreçlerinden yoksundur, bu da onu çok kırılğan hale getirir. İkincisi, bor karbürün lokalize katı hal amorfizasyonu, yüksek hızlı çarpmaların ardından meydana gelir ve buna parçalanmada dikkate değer bir artış eşlik eder.

Bor karbür hakkındaki bilimsel literatür çok geniştir ve karmaşık atomik yapısını anlamaktan, yüksek basınçlı darbeler altında faz dönüşümünü incelemeye, kırılma tokluğunu arttırmaya ve zırhtan nükleer reaktörlere ve yarı iletkenlere kadar sayısız uygulamasını keşfetmeye kadar çok çeşitli konuları kapsar. Sentez yöntemlerindeki daha fazla araştırma ve yenilik, bu çok yönlü seramik malzeme için yeni olanaklar yaratmaya devam eder. Son olarak bor karbürün elektronik endüstrisinde ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı önümüzdeki yıllarda hızlı bir büyüme gösterecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Gülbahar BİLGİÇ: Kavramsal tasarım, Araştırma, Metodoloji, Yazma – Taslak, Görselleştirme, Gözden geçirme ve Düzenleme.

Ayşegül BALIKÇIOĞLU: Kavramsal tasarım, Araştırma, Yazma – Taslak, Görselleştirme.

Mükerrem ŞAHİN: Araştırma, Denetim, Onaylama, Görselleştirme, Yazma.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] K. A. Schwetz and W. Grellner, "The influence of carbon on the microstructure and mechanical properties of sintered boron carbide," *Journal of The Less-Common Metals*, vol. 82, no. C, 1981, doi: 10.1016/0022-5088(81)90195-8.
- [2] A. Sokhansanj and A. M. Hadian, "Purification of Attrition Milled Nano-size Boron Carbide Powder," *Int J Mod Phys Conf Ser*, vol. 05, 2012, doi: 10.1142/s2010194512001894.
- [3] L. Chkhartishvili *et al.*, "Advanced Boron Carbide Matrix Nanocomposites Obtained from Liquid-Charge: Focused Review," *Condensed Matter*, vol. 8, no. 2, 2023. doi: 10.3390/condmat8020037.
- [4] Shoulders, W. T., Guziewski, M., & Swab, J. J. (2023). Microstructural and thermal stress effects on mechanical properties of boron carbide particle-reinforced silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(2), 1249–1261. doi:10.1111/jace.19535
- [5] Stone, M. B., Kolesnikov, A. I., Fanelli, V. R., May, A. F., Bai, S., & Liu, J. (2024). Characterization of aluminum and boron carbide based additive manufactured material for thermal neutron shielding. *Materials & Design*, 237, 112463. doi:10.1016/j.matdes.2023.112463
- [6] A. K. Suri, C. Subramanian, J. K. Sonber, and T. S. R. Ch Murthy, "Synthesis and consolidation of boron carbide: A review," *International Materials Reviews*, vol. 55, no. 1, 2010. doi: 10.1179/095066009X12506721665211.
- [7] F. Thévenot, "Boron carbide-A comprehensive review," *J Eur Ceram Soc*, vol. 6, no. 4, 1990, doi: 10.1016/0955-2219(90)90048-K.
- [8] V. Domnich, S. Reynaud, R. A. Haber, and M. Chhowalla, "Boron carbide: Structure, properties, and stability under stress," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, no. 11, 2011, doi: 10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x.
- [9] M. M. Balakrishnarajan, P. D. Pancharatna, and R. Hoffmann, "Structure and bonding in boron carbide: The invincibility of imperfections," *New Journal of Chemistry*, vol. 31, no. 4, 2007, doi: 10.1039/b618493f.
- [10] T. Aselage and D. Emin, "Boron Carbides," in *CRC Handbook of Thermoelectrics*, 1995. doi: 10.1201/9781420049718.ch31.
- [11] R. R. Ridgway, "Boron Carbide: A New Crystalline Abrasive and Wear-Resisting Product," *Transactions of The Electrochemical Society*, vol. 66, no. 1, 1934.
- [12] H. Werheit, "Boron-rich solids: A chance for high-efficiency high-temperature thermoelectric energy conversion," *Materials Science and Engineering B*, vol. 29, no. 1–3, 1995, doi: 10.1016/0921-5107(94)04023-W.
- [13] A. Chauhan, M. C. Schaefer, R. A. Haber, and K. J. Hemker, "Experimental observations of amorphization in stoichiometric and boron-rich boron carbide," *Acta Mater*, vol. 181, 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2019.09.052.
- [14] I. G. Crouch, G. V Franks, C. Tallon, S. Thomas, and M. Naebe, "7 - Glasses and ceramics BT - The Science of Armour Materials," in *Woodhead Publishing in Materials*, 2017.
- [15] G. Amulele, M. H. Manghnani, H. Werheit, A. W. Lanati, and S. M. Clark, "Electrical conductivity of B~4.3C boron carbide up to 9 GPa and 1273 K," *Solid State Sci*, vol. 140, 2023, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2023.107185.
- [16] W. M. Haynes and M. L. Williams, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 2016. doi: 10.1201/9781315380476.
- [17] R. R. Ridgway, "Boron Carbide: A New Crystalline Abrasive and Wear-Resisting

Product,” *Transactions of The Electrochemical Society*, vol. 66, no. 1, 1934.

[18] Gokmese, H., & Bostan, B. (2016). Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B₄C composite by Mechanochemical Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 684–694. doi:10.1177/0954408916629106

[19] Gokmese, H., Bostan, B., & Baris, M. (2016). Fabrication and characterization of nanoceramic particle Al₂O₃/B₄C composite by Mechanochemical Approach. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 47(3), 416–422. doi:10.1080/15533174.2016.1186075

[20] Pekdemir, A. D. (2018) “Borik Asit Ve Poliollerden Düşük Sıcaklıkta Bor Karbür Tozlarının Hazırlanması Ve Karakterizasyonu”. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi

[21] F. S. Bayraktar, R. Köse, and M. Şahin, “Bor Bileşiklerinin Solar Tuzun Termo-Fiziksel Özelliklerine Etkileri,” *Savunma Bilimleri Dergisi*, no. 39, 2021, doi: 10.17134/khosbd.913808.

[22] A. W. Weimer, W. G. Moore, R. P. Roach, J. E. Hitt, R. S. Dixit, and S. E. Pratsinis, “Kinetics of Carbothermal Reduction Synthesis of Boron Carbide,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 75, no. 9, 1992, doi: 10.1111/j.1151-2916.1992.tb05604.x.

[23] G. E. Garry, “Process for the production of boron carbide.,” 2,834,651, 1958

[24] T. A. Zhang, Z. H. Dou, H. Yang, and Q. L. Ding, “Preparation of boron carbide by magnesium reducing-SHS,” *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, vol. 24, no. 10, 2003.

[25] A. K. Khanra and M. M. Godkhindi, “Synthesis of boron carbide by self-propagating high temperature synthesis,” *Journal of the Australasian Ceramic Society*, vol. 41, no. 1, pp. 30–35, 2005.

[26] K. Yamada, “Boron carbide particles formed from an amorphous boron/graphite powder mixture using a shock-wave technique,” *Journal of the American Ceramic*

Society, vol. 79, no. 4, 1996, doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08557.x.

[27] J. Wei, B. Jiang, Y. Li, C. Xu, D. Wu, and B. Wei, “Straight boron carbide nanorods prepared from carbon nanotubes,” *J Mater Chem*, vol. 12, no. 10, 2002, doi: 10.1039/b204792f.

[28] E. M. Heian, S. K. Khalsa, J. W. Lee, Z. A. Munir, T. Yamamoto, and M. Ohyanagi, “Synthesis of dense, high-defect-concentration B₄C through mechanical activation and field-assisted combustion,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 87, no. 5, 2004, doi: 10.1111/j.1551-2916.2004.00779.x.

[29] R. G. Bourdeau, “Process of preparing boron carbide from boron halide and a hydrocarbon,” 3,334,967, 1967

[30] G. L. Harris and S. P. Donald, “Method of producing boron carbide from water alcohol solution of carbon source,” 3,885,022, 1975

[31] S. Mondal and A. K. Banthia, “Low-temperature synthetic route for boron carbide,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 25, no. 2-3 SPEC. ISS., 2005, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.08.011.

[32] A. Sinha, T. Mahata, and B. P. Sharma, “Carbothermal route for preparation of boron carbide powder from boric acid-citric acid gel precursor,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 301, no. 2–3, 2002, doi: 10.1016/S0022-3115(02)00704-3.

[33] L. Shi, Y. Gu, L. Chen, Y. Qian, Z. Yang, and J. Ma, “A low temperature synthesis of crystalline B₄C ultrafine powders,” *Solid State Commun*, vol. 128, no. 1, 2003, doi: 10.1016/S0038-1098(03)00627-6.

[34] Y. Gu, L. Chen, Y. Qian, W. Zhang, and J. Ma, “Synthesis of nanocrystalline boron carbide via a solvothermal reduction of CCl₄ in the presence of amorphous boron powder,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 88, no. 1, 2005, doi: 10.1111/j.1551-2916.2004.00023.x.

[35] M. Carlsson, F. J. García-García, and M. Johnsson, “Synthesis and characterisation of boron carbide whiskers and thin elongated platelets,” *J Cryst Growth*, vol. 236, no. 1–3, 2002, doi: 10.1016/S0022-0248(01)02272-2.

- [36] P. H. P. M. da Silveira, T. T. da Silva, M. P. Ribeiro, P. R. Rodrigues de Jesus, P. C. R. dos S. Credmann, and A. V. Gomes, "A Brief Review of Alumina, Silicon Carbide and Boron Carbide Ceramic Materials for Ballistic Applications," *Academia Letters*, 2021, doi: 10.20935/al3742.
- [37] E. Medvedovski, "Silicon carbide-based ceramics for ballistic protection," in *Ceramic Transactions*, 2003. doi: 10.1002/9781118406793.ch2.
- [38] P. G. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. K. Aghajanian, and M. Sennett, "A Review of Ceramics for Armor Applications," 2009. doi: 10.1002/9780470456286.ch16.
- [39] L. Vargas-Gonzalez, R. F. Speyer, and J. Campbell, "Flexural strength, fracture toughness, and hardness of silicon carbide and boron carbide armor ceramics," *Int J Appl Ceram Technol*, vol. 7, no. 5, 2010, doi: 10.1111/j.1744-7402.2010.02501.x.
- [40] K. Dasgupta, "Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor," *Ceram Int*, vol. 46, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.129.
- [41] G. Fanchini, J. W. McCauley, and M. Chhowalla, "Behavior of disordered boron carbide under stress," *Phys Rev Lett*, vol. 97, no. 3, 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.97.035502.
- [42] L. Farbaniec, J. D. Hogan, K. Y. Xie, M. Shaeffer, K. J. Hemker, and K. T. Ramesh, "Damage evolution of hot-pressed boron carbide under confined dynamic compression," *Int J Impact Eng*, vol. 99, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.09.008.
- [43] M. Naebe, J. Sandlin, I. Crouch, and B. Fox, "Novel polymer-ceramic composites for protection against ballistic fragments," *Polym Compos*, vol. 34, no. 2, 2013, doi: 10.1002/pc.22397.
- [44] M. A. Kiani, S. J. Ahmadi, M. Outokesh, R. Adeli, and A. Mohammadi, "Preparation and characteristics of epoxy/clay/B₄C nanocomposite at high concentration of boron carbide for neutron shielding application," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 141, 2017, doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.013.
- [45] R. Naslain, A. Guette, F. Rebillat, R. Pailler, F. Langlais, and X. Bourrat, "Boron-bearing species in ceramic matrix composites for long-term aerospace applications," in *Journal of Solid State Chemistry*, 2004. doi: 10.1016/j.jssc.2003.03.005.
- [46] P. S. Reddy, R. Kesavan, and B. Vijaya Ramnath, "Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061-Silicon Carbide, Boron Carbide Metal Matrix Composite," *Silicon*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.1007/s12633-016-9479-8.
- [47] Y. Wu, S. Tan, Y. Zhao, L. Liang, M. Zhou, and G. Ji, "Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application," *Progress in Materials Science*, vol. 135, 2023. doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101088.