

## ZrB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub>'nin Ultra Yüksek Sıcaklık Uygulamalarında Kullanımı

Emine Gizem YILDIZ<sup>1</sup>, Yasemin YILDIZ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-7153-8970>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2855-0496>

\*Sorumlu yazar: yyildiz@sakarya.edu.tr

### Derleme

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.05.2023

Kabul tarihi: 07.08.2023

Online Yayınlanma: 08.03.2024

#### Anahtar Kelimeler

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri

Termal şok

Metal diborür

Termal iletkenlik

Hipersonik uçuş teknolojisi

### ÖZ

Bu araştırma, ileri teknolojik uygulamalarda ultra yüksek sıcaklık seramiklere (UHTC) artan ilgiyi vurgulamaktadır. UHTC'ler ultra yüksek sıcaklık seramiklerdir, 1950'lerin sonunda ilgi çekmeye başlamışlardır, olağanüstü özellik ve nitelikleri olan malzemelere duyulan ihtiyacın artmasıyla da kullanımı da artmaktadır. Ultra yüksek sıcaklık seramiklerin uzay ve havacılık sektöründeki uygulamalarında bu seramiklerin içinde matris malzemesi olarak borürlerin kullanılması bir hayli yaygındır. Borürler ailesinde önde gelen grup ise diborürlerdir. Zirkonyum, titanyum ve hafniyum diborürler yüksek sıcaklıkta en kararlı diborürlerdir. Havacılık-uzay sanayii, nükleer sanayi, kesici takımlar, savunma sanayii (kurşun geçirmez malzemeler), ısıya dayanıklı kaplama malzemeleri gibi genel kullanım alanları bulunmakta ve ilerleyen teknolojiyle birlikte gittikçe kullanım alanları artmaktadır. Bu inceleme, bugüne kadar literatürde rapor edilen UHTC'lerin uygulamalarına genel bir bakış sağlar ve çok yönlü uygulama alanlarına dikkat çekmektedir.

## Use of ZrB<sub>2</sub> and TiB<sub>2</sub> Ultra High Temperature Applications

### Reviews

#### Article History:

Received: 22.05.2023

Accepted: 07.08.2023

Available online: 08.03.2024

#### Keywords:

Ultra high temperature ceramics

Thermal shock

Metal diboride

Thermal conductivity

Hypersonic flight technology

### ABSTRACT

This research highlights the growing interest in ultra-high temperature (UHTC) in advanced technological applications. UHTCs are ultra-high temperature ceramics, which began to attract attention in the late 1950s, and their use is increasing as the need for materials with extraordinary properties and qualities increases. The use of borides as matrix material in these ceramics is quite common in applications of ultra-high temperature ceramics in the aerospace and aerospace industries. The leading group in the borides family is the diborides. Zirconium, titanium, and hafnium diborides are the most stable diborides at high temperatures. There are general usage areas such as the aerospace industry, nuclear industry, cutting tools, defense industry (bullet-proof materials), and heat-resistant coating materials, and their usage areas are increasing with the advancing technology. This review provides an overview of the applications of UHTCs reported in the literature to date and draws attention to their versatile application areas.

## Giriş

Teknolojideki hızlı değişim ve gelişmeler; güvenilirlik, yüksek performans, hafiflik ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme gibi zorlu ihtiyaçları ortaya çıkarmaktadır. Bu ihtiyaçlar da olağanüstü özellik ve nitelikleri olan malzemelere duyulan gereksinimi giderek artırmaktadır (Ersan, 2019; Tülbez ve ark., 2019). Bilhassa uzay ve havacılık sektöründeki kullanımları nedeniyle seramik malzemelerde, yüksek sıcaklık dayanımı en fazla istenilen bir özelliktir. Günümüz teknolojisindeki ultra yüksek sıcaklık seramikleri (UHTC) 3000°C üzerinde ergime sıcaklığına, kimyasal reaktivite ve aşındırıcı ortamlarda kullanılabilme gibi özelliklere sahip özel malzemelerdir (Akin ve ark., 2019; Ersan, 2019).

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri sentezi 1800'lü yılların sonunda olsa da, bu malzemelere duyulan teknolojik alaka 1950'lerin sonunda başlamış ve 1960'larda genişleyen uzay yarışlarıyla beraber etkin olarak artmıştır. Bu dönemde Sovyet Rusya ve ABD roket motorunda, ısı kalkanında ve yüksek sıcaklığa maruz kalan yapısal parçalarda kullanılacak malzeme arayışlarına girmişlerdir. Teknolojik sorunlara çözüm arayışı bilim adamları önderliğinde gerçekleşen bir araştırmanın temel motivasyonu olmuştur. Ultra yüksek sıcaklık seramiklerine olan ilgi havacılık ve uzay uygulamalarında hücum jeti, hipersonik araçlar ve yüksek performanslı roket motorlarının gelişmesiyle artış göstermiştir. Örneğin, ABD Hava Kuvvetleri ve ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), hipersonik uçuşta ihtiyaç duyulan teknolojileri test etmek için bu duruma uygun araç tasarlanmışlardır (Şekil 1.1). Bu sistemdeki teknolojik sorunlardan biri, tasarımda kullanılan keskin hücum kenarları ve kontrol yüzeylerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme teknolojisinin yeterli teknolojik seviyede olmamasıdır. Şekil 1'de test uçuşu öncesinde B-52'nin kanadına monte edilen X-51 uçuş aracı göstermektedir (Tülbez ve ark., 2019). X-51 uçuş aracı en uzun süre hipersonik uçuş rekoruna sahiptir.

Hipersonik hızlarda uçan platformların keskin hücum kenarları, 2000°C'in üstündeki sıcaklıklarla karşılaşmaktadır. Aynı zamanda uçuş sırasında parçanın karşılaştığı yüksek entalpili akış nedeniyle aerodinamik ısınma meydana gelir. Parçanın uç kısmındaki yüksek ısı, iç kısımlara ısı iletim yolu ile ve dış yüzeylerden de ısı radyasyonu ile çevreye aktarılmaktadır. Bu sayede yalnızca parçanın uç kısımları ısınırken, iç kısımlarındaki sıcaklık değerleri alçak kalır. Malzemenin termal iletkenlik değerinin yüksek olması aerodinamik ısınmanın bir kısmının ısı iletim yoluyla iç kısımlara iletilebilmesini sağlar. Örneğin, hücum

kenarlarında yüksek termal iletkenlik özelliğinde parçanın varlığı, kanadın karşılaştığı termal gradyanı düşürüp stresi azaltmaya yardımcı olur. Uzay araçlarındaki manevra yeteneğinin artırılması ile yüksek performanslarda çalışabilmesi için ince aerodinamik keskin hücum kenarları tasarımı hedeflenmiştir (Şekil 2.) (Tülbez ve ark., 2019).



Şekil 1. B-52 kanadına monte edilen X-51 uçuş aracı (Tülbez ve ark., 2019).



Şekil 2. Küt ve keskin burun konisi ile hücum kenarı (Tülbez ve ark., 2019).

Hipersonik atmosfere yeniden giriş araçlarının hızlı gelişimi ile katı roket motorunun burun ucu veya uçağın ön kenarları gibi kritik termal yapısal bileşenler, havacılık ile ilgili ve roket ortamında yaklaşık 2000–3000°C ultra yüksek sıcaklıkta oksidasyona ve aşınmaya maruz kalmaktadır (Xu ve ark., 2021). Keskin hücum kenarı malzemelerinin seçiminde ve tasarımında; çalışma ortam şartlarında oksidasyon davranışı, termal şok direnci ve malzemenin termo-fiziksel özellikleri gibi faktörlerin incelendiği titiz çalışmaların gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu nedenlerle ileri teknoloji malzemeler gereksinimi hipersonik

araçlarda keskin hücum kenarları ve burun konisi tasarımında öne çıkmaktadır. Ultra yüksek sıcaklık seramikleri, bu ihtiyacı karşılayabilecek malzeme sınıfında yer alırlar. Teknolojinin zorunlu kıldığı yüksek sıcaklık sınırlarına çözüm getiren ultra yüksek sıcaklık seramik malzeme ve yapılarındaki gelişmeler, uzay uygulamalarında önemli sonuçları da getirmektedir (Tülbez ve ark., 2019). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri balistik füzelerin burun konileri, hipersonik araçların ön kenarları, roket motorları, uzaya yeniden giriş araçları vb. gibi aşırı ortamlardaki uygulamalar için uygun yüksek ergime noktasına ve oksidasyon direncine, yüksek sıcaklıklarda termal gerilmelere direnme yeteneğine sahiptir (Jia ve ark., 2021). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri, aşırı yüksek sıcaklık, kimyasal reaktivite ve aşındırıcı yerlerde tercih edilebilen bir malzeme sınıfıdır. Ultra yüksek sıcaklık seramikler sözü edilen ortamlarda kararlılıklarını koruyabilirler (Ersan, 2019). Bu seramiklerin sahip oldukları temel özellikler yüksek sertlik, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, iyi ısı şok dayanımı ve kimyasal kararlılık şeklinde sıralanabilir (Kaya, 2016; Akin ve Kaya, 2017). Ultra yüksek sıcaklık seramikler 2000 °C (Altuncu ve Esen, 2015) ve 3000 °C üzerinde erime noktasına sahip malzemeler olarak sınıflandırılabilirler. Malzeme sınıflarından çok az malzeme bu kriteri karşılamaktadır. Metaller arasında yalnızca Renyum (Re), Tungsten (W), ve Tantal (Ta) elementleri 3000°C üzerindeki sıcaklıklarda erime noktasına sahip olan metallerdir (Tülbez ve ark., 2019).

Zirkonyum (Zr), titanyum (Ti) ve hafniyum (Hf) gibi geçiş elementlerinin borür, karbür ve nitrür bileşikleri 3000°C'nin üstünde erime sıcaklığına sahip malzemelerdendir. Bu malzemeler zorlu çalışma ortamlarında yüksek kimyasal ve termal kararlılık, yüksek sertlik, yüksek mekanik dayanım ve bilhassa borür bileşikleri için yüksek termal iletkenlik göstermeleri ortak özellikleridir (Tülbez ve ark., 2019).

Ultra yüksek sıcaklık seramik malzemeleri, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek termal iletkenliği ve olağanüstü oksidasyon dirençleri, kimyasal inertlik gibi metallerle kıyaslanmayacak farklı özelliklere sahiptir bundan dolayı da benzersiz mühendislik ve refrakter özellikleri kombinasyonu nedeniyle onlarca yıldır çalışma alanı oluşturmuştur. Genel olarak ultra yüksek sıcaklık malzemeleri kullanım amacı, çalışma ortamı ve sıcaklığına bağlı olarak seçilmektedir (Atasoy ve Demir, 2019; Xia ve ark., 2020).

Bu derlemede, ultra yüksek sıcaklık seramikleri ve uygulama alanları ele alınmıştır. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı ultra yüksek sıcaklık seramiklerini tanımak ve borürlerden zirkonyum diborür ve titanyum diborürlerin ultra yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımını araştırmak ve bu borürleri ele alacak muhtemel çalışmalara da referans olması beklenmektedir.

## **Materyal ve Metod**

Derleme, 22 Nisan 2023 tarihine kadar olan yayınlar için aşağıdaki veri tabanlarında literatür taramasına dayalı olarak hazırlanmıştır; Pub Med; Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar ve ResearchGate'den faydalanılmıştır. Arama için kullanılan anahtar kelimeler; ultra yüksek sıcaklık seramikler veya UHTC'ler, borürler ve/veya termal iletkenlik, metal diborür, hipersonik uçuş teknolojisi, yüksek ergime sıcaklığı şeklinde sıralanabilir. Aramanın tüm sonuçları ile ilgili bilgiler manuel olarak tarandı ve ilgili olabilecek ek yayınlar için referansları da arandı. Ultra yüksek sıcaklık seramikleri hakkında bilgi vermeyen seramikler ile ilgili makaleler, ancak borürler, nitrürler ve karbürler hakkında bilgi vermeleri şartıyla dikkate alınmıştır.

## **Ultra Yüksek Sıcaklık Seramik Malzemeleri**

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri 3000°C üzerinde ergime sıcaklığına sahip olan malzemelerdir ve bu sınıftaki malzemeler geçiş metallerinin nitrürleri (HfN, ZrN, vb.), borürleri (HfB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, NbB<sub>2</sub>, TaB<sub>2</sub> vb.) ve karbürleridir (HfC, ZrC, TiC) (Ersan, 2019). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri özellikle de refrakter metal karbürler, nitrürler ve borürler, hipersonik uçuş teknolojisindeki ilerlemenin anahtarıdır (Backman ve ark., 2020). Bu gruptaki bazı karbür, borür ve nitrürlerin ergime sıcaklıkları, yoğunlukları, vickers mikro sertlik ve kristal yapıları ile termal iletkenlik değerleri incelendiğinde en yüksek termal iletkenliğe (60,0 W/m.K, 20°C'de) sahip olan HfB<sub>2</sub> aynı zamanda en yüksek mikrosertlik değerine (29,0 GPa)'de sahiptir. HfB<sub>2</sub>'nin kristal yapısı ise hegzagonaldır. Zirkonyum diborür ve titanyum diborürün termal iletkenliğinin ise (24,3 W/m.K, 20°C'de) aynı olduğu ve her ikisinin de hegzagonal kristal yapısına sahip olması dikkat çekicidir.

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri genellikle 4. ve 5. grup metal (M:Ta, Ti, Hf, Zr gibi) elementlerinin oksitli (MO), borürlü (MB), karbürlü (MC) ve nitrürlü (MN) bileşiklerinden meydana gelmektedir (Altuncu ve Esen, 2015).

## **Metal Borürler-Metal Diborürler**

Periyodik tabloda geçiş metallerinden titanyum, zirkonyum ve hafniyum metallerinin bulunduğu kısım IV B grubu olarak adlandırılır. Bu elementler bor metali ile uygun bir prosesle etkileştirilmesi sonucu IV B grubuna ait metallerin borürleri elde edilir. Metallerin borürleri ileri teknoloji seramiklerinin mühim bir alt grubudur (Aynibal, 2009). Borürler, bor elementi ile metal ve ametallerin meydana getirdiği bileşiklerdir ve genellikle diborür

formunda iki adet bor elementi ihtiva eder. Diborürlerin çoğunlukla geçiş metallerinin bileşikleri olduğu görülmektedir. Pek çok borür yüksek ergime sıcaklığına sahiptir, bunlardan bilhassa geçiş metallerinin diborürleri önde gelir. Bundan dolayı yüksek sıcaklık malzemeleri olarak nitrürler, karbürler ve silikatlarla beraber refrakter sert metal bileşikleri diye tanımlanmaktadır.

Metal borürler, son zamanlarda dikkat çekici bileşikler içerisinde yer almaktadırlar bunun sebebi sergiledikleri üstün özelliklerdir. Ayrıca yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve aşınma gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle pek çok alanda kullanım imkanı vardır. Metal borürlerin oksitli yapıdaki seramiklere kıyasla yüksek sertlik, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, yüksek ergime sıcaklığı, termal şok, iyi korozyon ve aşınma direncine sahip olmaları onların en belirgin özellikleridir (Akkaş, 2010). Zirkonyum, titanyum ve hafniyum diborürler yüksek sıcaklıkta en kararlı diborürlerdir ve her biri 3000°C civarında ergime noktasına sahiptir. Geçiş metallerinin diborürleri ise, en yüksek oksidasyon direncine sahip metal borürlerdir. Borun yüzeyde oluşturduğu oksit tabakası ve yapıdaki geçiş metalleri oksidasyon direncini sağlayan faktördür. Yüzeyde meydana gelen oksit tabakası, yaklaşık 1000°C'ye (bor oksidin ( $B_2O_3$ ) buharlaşmaya başladığı sıcaklığa) kadar yüzeyi korur. Metal borürlerin çoğu, karbon, hidrojen ve azot atmosferinde yüksek sıcaklıklara kadar inert özellik gösterir (Kurtoğlu, 2007). Metal borürler elektriksel özellikler bakımından birbirlerinden çok farklıdır. Örneğin  $ZrB_2$  ve  $TiB_2$  metalik iletken,  $ZrB_{12}$ ,  $NbB$  ve  $YB_6$  gibi pek çok geçiş metale ait borürler ise süper iletkenlik gösterir (Akkaş, 2010). Borür sistemlerinin oksidasyon dirençleri karşılaştırıldığında en iyi özellikler  $HfB_2$ 'de görülmüştür.  $HfB_2$ 'yi  $ZrB_2$  ve  $TiB_2$  izlemektedir (Kaya, 2016). Borürler bilhassa yüksek sertlik ve yüksek ergime noktası gibi mekanik ve ısıl özelliklerinden dolayı yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ve öğütme sistemlerinde kullanılmış olsalar da teknik seramiklerde son gelişmelerle birlikte önemlerinin arttığı görülmüştür. Borürler olağanüstü kimyasal, mekanik, ısıl ve elektriksel özellikleri nedeniyle ileri teknoloji uygulamalar için muhtemel adaylardır (Turan, 2014). Son zamanlarda tüm dünyada UHTC'lerin en mühim uygulama alanlarından biri olan uzay ve havacılık uygulamalarında borürlerin ve borür esaslı kompozitlerle yönetilen araştırmalar ilgi görmektedir. Bu malzemelerin geliştirilmesindeki ve performanslarının artırılmasındaki araştırmalarda kullanılmak için NASA her yıl milyonlarca dolar fon ayırmaktadır (Altuncu ve Esen, 2015). 1997 yılında NASA metal borür esaslı bileşiği deneysel uçuşta burun ucu malzemesi olarak kullanmıştır. Borür sistemlerinden  $HfB_2$  ve  $ZrB_2$  burun ucu ve hücum kenarı uygulamalarında en fazla çalışılan borürlerdir. Kanadın keskin köşesi en yüksek sıcaklık değerine maruz kalan

kısımdır. Uçuş sırasında bu bölgenin maruz kaldığı ısı akısı sonucu sıcaklık 2000°C'nin üzerine çıkar.

Hipersonik ve atmosfere giriş sistemlerinde burun ucu ve hücum kenarlarında ultra yüksek sıcaklık seramikler ve/veya kompozitler, aşırı aerotermal ısıtma ortamlarında çalışmalıdır (Marschall ve Fletcher, 2010). Keskin köşeli parçalarda üç boyutlu ısı transferi etkili olur bu bölgelerde ısı enerjisinin malzeme boyunca iletilmesi ve sıcaklığın daha alçak yüzeylere doğru tekrar yayılması için termal iletkenliği yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Burun ucu ve hücum kenarlarında yüksek termal iletkenliğe sahip metalik borürler kullanıldığında ısı enerjisi bu bölgelerden kanat, gövde kısımlarına kontrollü ve etkili biçimde uzaklaştırılabilir. Ultra yüksek sıcaklık seramiklerin içinde matris malzemesi olarak borürlerin kullanılması ve uzay ve havacılık sektörü gibi alanlarda borür kullanımının tercih edilme sebepleri; nitrürlere ve karbürlere kıyasla daha iyi oksidasyon direnci göstermeleri, daha yüksek termal iletkenlik göstermeleri ve elektro erozyonla işlemeye imkan vermesi bakımından önem arz eden bir özellik olan elektriksel iletkenliğinin de daha yüksek olmasıdır (Kaya, 2016).

Ultra yüksek sıcaklıklardaki yapısal uygulamalar bağlamında di-borürler; refrakterlik, yüksek sertlik, yüksek elastik modül, iyi kırılma mukavemeti, iyi termal iletkenlik, iyi elektriksel iletkenlik ve kayda değer oksidasyon direnci gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özellikler sergiler. Geçiş metali di-borürlerinin özelliklerinin benzersiz kombinasyonu, onu erimiş metal potalar, kesici aletler, aşınmaya dayanıklı parçalar, elektro deşarj işleme için elektrotlar, hall-heroult hücresi için katot malzemesi, elektrikli cihazlar, diğer malzemelerin iletkenliği ve özelliklerini iyileştirme için güçlendirme, zırh malzemeleri, alüminyum buharlaştırma botu, enerji uygulamaları (nükleer ve güneşte), roket nozulları, refrakter parçalar ve yüksek sıcaklık yapısal parçalar vb. çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir (Golla ve ark., 2020). Borürler ailesinde diborürler önemli bir bileşik grubunu oluştururlar. Oksitli yapıdaki seramiklere kıyasla yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, yüksek ergime sıcaklığı, termal şok ve korozyon direnci, yüksek sertlik, iyi aşınma dayanımı göstermeleri metal borürlerin en belirgin özellikleridir. Zirkonyum ve titanyum elementleri IV B grubundaki geçiş metalleridir ve IV B grubu metal borürlerin genel özellikleri: düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek ergime noktası, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek kimyasal kararlılıktır (Yıldızçelik, 2015; Bugdayci ve ark., 2018).

Yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dayanımına sahip olan metal borürler aynı zamanda asit ve erimiş metal dayanımı, yüksek sertlik, yüksek ısıda elastikiyet ve elektrik iletkenliği gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle de sanayide çok yaygın bir

kullanım alanları vardır. Havacılık -uzay sanayii, nükleer sanayi, kesici takımlar, savunma sanayii (kurşun geçirmez malzemeler), ısıya dayanıklı kaplama malzemeleri genel kullanım alanlarıdır. Metal borürler ilerleyen teknolojiyle bu kullanım alanlarını gittikçe artırmaktadırlar. (Yıldızçelik, 2015).

### **Ultra Yüksek Sıcaklık Seramik Malzemelerin Kıyaslanması**

- Seramik borürler ( $M_xB_y$ ), 3000°C'den yüksek yüksek ergime sıcaklığına, yaklaşık 107 S/m elektrik iletkenliğine, termal iletkenliğe (60-120 W/m.K), yaklaşık 500 GPa esneklik katsayısına, ve 20 GPa'dan yüksek sertliği de dahil metallere benzeri alışılmadık dışında bir özellik birleşimi göstermektedir (Altuncu ve Esen, 2015).
- Borürlü bileşikler, karbürlü bileşikler ile kıyaslandığında düşük ergime sıcaklıklarına rağmen ısı ve elektriksel iletkenlikleri nispeten yüksektir ( $ZrC$ - 106 S/m) (Altuncu ve Esen, 2015).
- Seramikler arasında en yüksek ergime sıcaklığına 3800°C erime noktası ile TaC sahiptir (Altuncu ve Esen, 2015).
- Seramik borürler müthiş oksidasyon dirençlerine sahipken seramik karbürler daha düşük oksidasyon direncine sahiptirler (Altuncu ve Esen, 2015).
- Karbürlerin ergime sıcaklıkları daha yüksektir bunun nedeni güçlü kovalent bağ yapılarına sahip olmalarıdır. Yine de, borürlerde bağ yapılarındaki özel elektronik dizilim sebebiyle, elektriksel ve termal iletkenlik değerleri nitrürlere ve karbürlere kıyasla yüksektir (Kaya, 2016).

### **Ultra Yüksek Sıcaklık Seramiklerinin Kullanım Alanları**

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri; yüksek sertliğe, aşınma direncine sahip olmanın yanı sıra çok yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları sebebiyle bilhassa havacılık ve uzay endüstrisinde kullanım ihtimali yüksek ileri teknolojik seramik esaslı malzeme sınıfında yer almaktadırlar (Yıldırım, 2021). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri yeni nesil hipersonik araçta kullanım için potansiyel malzemelerdir. 3000°C'yi aşan ergime noktalarına sahiptirler ve bu da onları hipersonik uçuş sırasında aracın ön kenarlarının yaşadığı aşırı sıcaklıklara dayanmak için uygun adaylar haline getirir. Yüksek ısı iletkenliğe ve iyi oksidasyon direncine sahiptirler, bu nedenle ses altı uçuştan hipersonik uçuşa hızlanma sırasında yaşanabilecek ani sıcaklık değişikliklerine ek olarak yüksek sıcaklık yüklemesini sürdürmek için ideal hale getirirler (Backman ve ark., 2020; Povolny ve ark., 2022). Bu malzemeler termal



kararlılıklarının yüksek olması nedeniyle yeniden giriş ve hipersonik araçların bileşenleri olarak kullanılmaktadır (Marumo ve ark., 2022). Ultra yüksek sıcaklık seramikler 1950'lerde nükleer reaktörlerde ve uzay uçağı konseptleri için termal koruma sistemleri (TPS) olarak kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Povolny ve ark., 2021). O zamandan beri araştırmalar aralıklı olmasına rağmen, bir dizi yüksek performanslı havacılık aracı ve sistemi için ihtiyaç duyulduğundan UHTC'lere olan ilgi yeniden canlanmıştır. Bunlar;

- Füzeler ve diğer savunma uygulamaları,
- Yüksek irtifa ve uzay uçuşu,
- Yüksek hızlı hava soluma motorlarıdır.

Ultra yüksek sıcaklık seramikler için tipik uygulamalar, roket nozulleri, burun konileri ve hipersonik füzelerdeki kanatların ve stabilizatörlerin ince ön kenarları, ters itme yaprakları ve itme saptırıcılarıdır. Bu uygulamaların tümü, malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kararlı olmasını gerektirir. Ayrıca, kimyasal ve yapısal olarak kararlı ve aşınmaya dayanıklı, ayrıca hafif ve aerodinamik olmalıdırlar. Hipersonik araçlarda keskin ön kenarlar için ısı yalıtım malzemeleri çok yüksek sıcaklıklarda ( $2000^{\circ}\text{C}$ 'ye yakın) kararlı olmalıdır. Malzemeler buharlaşmaya, erozyona ve oksidasyona direnmelidir. Bileşen ağırlığını en aza indirmek için UHTC'nin kendi içinde düşük yoğunluklu olması veya ince bir kaplama veya bağımsız bir bileşen olarak etkili olacak kadar verimli olması gerekir. Borürler, yüksek erime sıcaklığı, sertlik ve mükemmel termal iletkenlik ile karakterize edilir. Bu nedenle hipersonik araçlarda hücum kenarlarında uygulanırlar (Cotton, 2010).

Özellikle hipersonik uçuş sırasında aerodinamik ısıtma, bir seferde  $2000^{\circ}\text{C}$ 'yi aşan sıcaklıklara maruz kaldığında kimyasal ve yapısal bütünlüklerini koruyan malzemeler gerektirir. Ek olarak, bu malzemeler, ön kenarlar, girişler ve itici bileşenler gibi keskin araç geometrilerinin yakınında yaşanan muazzam ısı akışlarını sürdürmeli ve yönlendirmelidir. Ultra yüksek sıcaklık seramikleri bu rolü yerine getirmektedir (Povolny ve ark., 2021).

İleri teknolojik seramikler; yapıları, kullanım alanları ve özellikleri bakımından çeşitli sınıflara ayrılabilir. Ultra yüksek sıcaklık seramikleri olarak tanımlanan nitrür ve karbür, borür seramikleri (4. ve 5. grup elementleri) üstün yüksek sıcaklık ve atmosfer şartlarında kullanılabilen malzemelerdir ve bu sınıflandırmada en dikkat çekici malzeme grubudur. Genellikle yüksek sıcaklıkların kullanılması gereken uygulamalarda ön plandadırlar. Nitrür, borür ve karbür bileşikleri olan bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda çok yüksek termofiziksel ve termokimyasal özelliklere sahiptir ve kararlıdırlar. Tüm bu özelliklerinin yanı sıra uzay araçlarının yüzey kaplamalarında da kullanılmaktadır (Atasoy ve

Demir, 2019). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri olumsuz ve kimyasal olarak agresif ortamları içeren uygulamalar için onları güçlü rakipler yapan olağandışı özelliklere sahip refrakter malzemelerdir. Son derece yüksek erime sıcaklıkları, yüksek oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığı ile gelişmekte olan bir seramik malzeme sınıfıdır ve bu da onları aşırı ve kimyasal olarak agresif ortamları içeren uygulamalar için güçlü bir rakip haline getirir (Pasagada ve ark., 2022). Ultra yüksek sıcaklık seramikler, hipersonik havacılık araçları için termal koruma ve tahriklerdeki ve gelişmiş nükleer yakıtlardaki çekirdek bileşenler gibi ultra yüksek sıcaklık ortamlarıyla karşılaşan uygulamalar için en umut verici aday malzemeler olarak kabul edilmiştir (Jin ve ark., 2021). Burun konisi ve keskin hücum kenarları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarındaki kullanımının yanı sıra pota ve ısıl çift astarı yapımında, refrakter ve döküm özellikli malzeme üretim proseslerinde, çelik üretimi termovel tüplerinde, kesme ve aşındırma takımlarında, nozullarda ve zırh uygulamalarında kullanılmakta ya da kullanıma aday gösterilmektedir (Tülbez ve ark., 2019).

### **ZrB<sub>2</sub>' nin Ultra Yüksek Sıcaklık Uygulamalarında Kullanımı**

Refrakter diborür bileşiklerinin diğer intermetalik bileşikler (nitürler, karbürler, silisitler) ile karşılaştırıldığında kısmen yüksek oksidasyon dayanımına sahip olmaları geçiş metali borürleri üzerinde yapılan araştırmaları arttırmıştır. Ultra yüksek sıcaklık seramiklerinin bir türü olarak, ZrB<sub>2</sub> gibi diboridlerin oksidasyona karşı oldukça dirençli olduğu kanıtlanmıştır (Jin ve ark., 2021). Yüksek ergime sıcaklığına ek olarak kimyasal kararlılığa, yüksek elektrik ve termal iletkenliğe, mekanik aşınmaya ve korozyon dayanımına sahip olmaları, onların aşırı termal ve kimyasal koşullarda kullanılmasını sağlar. Yüksek termal iletkenliklerinin sayesinde elde edilen termal şok dayanımı bu malzemelerin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilmesine imkan verir. Zirkonyum diborürün 3000°C üzerinde ergime sıcaklığına sahip olması, 1800°C üzerinde sıcaklıklara gereksinim olan uygulamalarda, yüksek sıcaklık seramikleri arasında 6,1 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukla en alçak yoğunluğu olan seramik olması sebebiyle uzay teknolojisinde en çok kullanılan malzeme olmasını sağlar. ZrB<sub>2</sub>, ultra yüksek sıcaklık seramikleri grubuna aittir ve ZrB<sub>2</sub>, termal koruma sistemlerinde, hipersonik araç sistemlerinde, güneş yoğunlaştırıcılarında ve fırın elemanlarında kullanılabilir (Kumar Thimmappa ve ark., 2021). Ultra yüksek sıcaklık seramikleri arasında, diğer boridlere kıyasla nispeten düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti, sertliği, termal iletkenliği ve korozyon direnci nedeniyle ZrB<sub>2</sub>'ye özel bir önem verilmektedir (Nowak ve ark., 2021). ZrB<sub>2</sub>, yüksek erime noktası, yüksek sertlik, mükemmel aşınma ve kimyasal direnci ve yüksek termal kararlılık gibi çok özel fizikokimyasal özelliklere sahiptir.

Bu benzersiz özellikler, bu malzemenin çeşitli alanlardaki geniş uygulamaları için kilit faktörlerdir; örneğin termal koruma sistemler, yeniden giriş araçlarında uygulanan aşınma parçaları, yüksek sıcaklık elektrotları, erimiş metal potalar, nozullar ve kesme aletlerinde ZrB<sub>2</sub> kullanılmaktadır (Nayebi ve ark., 2016). ZrB<sub>2</sub>, 3250°C ergime noktasıyla ve görel olarak yaklaşık ~6,09 g/cm<sup>3</sup> düşük yoğunluğu yanı sıra bir hayli iyi yüksek sıcaklık mukavemeti, bu malzemenin sesten hızlı uçaklarda (hipersonik) ya da roket ateşleme sistemlerindeki gibi yüksek sıcaklık uzay aracı uygulamalarında aday malzeme olmasına sebep olur. ZrB<sub>2</sub> görel olarak yüksek termal ve elektrik iletkenliği ile aşılmanın dışında bir seramik malzemedir (Üşümez, 2016). Bu malzemenin buharlaştırma kayıçıkları ve metal ergitme potaları gibi yüksek sıcaklık dayanımına ihtiyaç duyulan uygulamalar, alüminyumun elektrokimyasal prosesle üretiminde hava sahası taşıtlarında yapı malzemesi, katot malzemesi ve aşındırıcı zırh uygulamaları olarak kullanım alanı bulmaktadır. Bu durum malzemenin kimyasal kararlılık, yüksek ergime sıcaklığı, elektrik iletkenliği ve yüksek termal şok dayanımı gibi özelliklerinden dolayıdır. Ayrıca nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak da uygulama alanı bulur ki bu da korozyona dayanıklılığı ve nötron yakalama özelliğinin düşüklüğü nedeniyle. Aynı zamanda ZrB<sub>2</sub>, yüksek termal iletkenlik ve yüksek ısı kapasitesi gibi özelliklere de sahiptir ve bu nedenle uçak ön kenar ve uç kısımlarında yapı malzemesi olarak da hipersonik hava sahası uygulamalarında kullanılmaktadır (Akkaş, 2010). Bahsi geçen diğer özellikler gibi ZrB<sub>2</sub> esaslı seramiklerin ultra yüksek sıcaklık malzemeleri yüksek sıcaklıklardaki olağanüstü fiziksel ve kimyasal kararlılık nedeniyle, nozul ve zırh malzemeleri olarak, fırınlarda korozyona dirençli malzemeleri olarak kullanılmasının yanı sıra uzay ve havacılık endüstrisinde uygulama alanları bulmaktadır (Öztürk, 2017).

Ultra yüksek sıcaklık seramiklerin termal ve kimyasal kararlılıkları aynı zamanda yüksek fiziksel dayanımda olmalarına imkan verir. ZrB<sub>2</sub> yapısının yüksek oksidasyon dayanımı onun askeri alanlarda ve uzay endüstrisinde de kullanılmasını sağlar. Bilhassa son zamanlarda Çin, İtalya, ABD, Hindistan ve Japonya'da diborürler ile gerçekleştirilen çalışmalarda artma görülmektedir. Hipersonik uzay araçlarında, tekrar kullanılabilir atmosfere giriş araçlarında ve roket yanma sistemlerinde kullanım alanı bulmaktadır (Özkan, 2019). ZrB<sub>2</sub>, korozyona karşı ve sıcaklık değişmelerine oldukça dayanıklıdır. Bundan dolayı termo elementlerde koruyucu kaplama ve pota malzemesi olarak kullanılır. Roket motoru parçalarında, jet motoru parçalarında, kesici aletler ve elektrik kontaktörleri üretiminde zirkonyum diborür şeklinde borlar kullanılmaktadır (Kuştutar, 2008). ZrB<sub>2</sub> yüksek sıcaklıklarda bile bir hayli iyi mekanik özellikler sergiler ve bu nedenle nozul gibi parçalarda yapısal eleman olarak kullanılabilir (Turan, 2014). Zirkonyum diborür artan sıcaklık

değerlerinde yüksek oksidasyon direnci gösterir (Aynibal, 2009). Zirkonyum diborür termal şok direnci ve oksidasyon direnci ve yüksek sertliğe sahip, nükleer reaktör çekirdeklerinde tutuşma emici, eriyik metal kabı, yarı iletkenlerde difüzyon bariyeri olarak kullanılmaktadır. Zirkonyum diborür, bilhassa karbon çeliği, eriyik Zn, Mg, Fe, Cu, Cd, Sn, Pb, Rb, Bi, Cr, pirinç, pik demir, itriya, kriyolit, alümina ve zirkonya sıcak pres proseslerinde kroze olarak kullanılmaktadır. Atmosfer şartlarında 1100-1400°C sıcaklıklarda ciddi biçimde oksitlenebile inerte atmosferde 2000°C üzerindeki sıcaklıklarda da kararlılığını kaybetmemektedir (Şimşek, 2014).

Atmosfere geri dönen uzay araçları uzay boşluğundan dünyamıza girdiklerinde astronotların karşılaştığı direnç yaklaşık 12 G kuvvetindedir. Bu sırada aracın hızı saniyede yaklaşık 8 kilometredir ve sürtünme nedeniyle 1500°C ila 2100°C arasında bir yüzey sıcaklığı olduğu rapor edilmiştir. Bundan dolayı Termal Koruma Sistemlerinde (TPS) zirkonyum diborür gibi 2000°C üzeri sıcaklıklara dayanıklı ultra yüksek sıcaklık seramikleri kullanılır (Anonim, 2023a).

Zirkonyum diborür üstün özellikleri nedeniyle son zamanlarda endüstriyel uygulamalar içerisinde takviyeli kompozit malzeme imalatında kullanılmaktadır. Bu nedenle sertlik ve tokluk değeri bakımından otomotiv sektörünün gereksinimleri karşılayabilecek seramik kompozit malzemeler çalışılmaktadır. Bu malzemeler otomotiv sektöründe sıcaklığın ve sürtünmenin çok olacağı parçaların kaplanması ya da yapımı gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

### **TiB<sub>2</sub>' nin Ultra Yüksek Sıcaklık Uygulamalarında Kullanımı**

Zirkonyum diborür gibi metal diborürler arasında geniş çapta kullanıma sahip olanlardan bir tanesi de titanyum diborürdür (Akkurt, 2019). 3000°C üzerinde yüksek ergime sıcaklığına sahip olan titanyum diborür, yüksek sertlik, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek aşınma direnci gösteren bir geçiş malzemesi olup, ultra yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır. Titanyum diborür UHTC'lerinden olup, sahip olduğu bunlar gibi özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık sektörleri önde gelmekle birlikte pek çok alanda kullanım alanı bulmaktadır (Ersan, 2019).

TiB<sub>2</sub> bazlı ultra yüksek sıcaklık seramikleri mükemmel mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Cai, 2022). Geçiş grubu metali diborürleri bir hayli çeşitli ve olağanüstü kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olan kapsamlı bir bileşik grubudur. Titanyum diborür grubun ilk akla gelen üyeleri arasında olup, elektriksel iletkenliği ve ergimiş sıvılara karşı direnci sebebiyle alüminyum buharlaştırma kayıkçıklarının

vazgeçilmez yapısal elemanlarından biridir. Bu bileşikler, genellikle kimyasallara karşı yüksek inertlik, yüksek sıcaklıklarda bir hayli iyi kararlılık ve yüksek sertlik gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar (Turan, 2014). Titanyum diborür, bir dizi yüksek teknolojik uygulama için temel malzeme olarak kabul edilen, artan ilgi gören bir malzemedir. Titanyum diborürün, sertlik, termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve oksidasyon direnci özelliklerinin kombinasyonu,  $TiB_2$ 'yi özellikle yüksek sıcaklıklarda aşınma uygulamaları için aday bir malzeme yapar.  $TiB_2$ , termal şok direnci ve ani sıcaklık değişimlerine karşı direnci oldukça yüksek olan, ultra yüksek sıcaklık seramikleri sınıfında yer alan ve benzersiz özellikleri nedeniyle bir hayli dikkate değer bir malzemedir (Ersan, 2019). Yüksek sıcaklık uygulamalarında WC esaslı malzemeler yerine  $TiB_2$  esaslı malzemeler tercih edilmelidir.

Yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığı ve iyi elektriksel iletkenliği  $TiB_2$ 'yi özel elektrik uygulamaları için (örneğin, alüminyum elektro-ergitme için katotlar veya vakumlu metal biriktirme ekipmanları için buharlaştırma elemanları) mükemmel bir aday yapar (Yanardağ, 2022). Titanyum diborür nan-oksit (oksit olmayan) seramik olarak kullanımının yanı sıra contalar, kesici takımı, yüksek sıcaklıkta bağlantı parçaları, nozuller, aşınma plakaları olarak da kullanılır. Kimyasal atağa ve yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarda kaplama veya parça olarak (örneğin jet motoru parçalarında, motor parçalarında, metal ergitme nozulleri ve roket motor parçalarında) kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda elektrik kontak malzemesi olarak kullanılır.  $TiB_2$  alüminyum fırınlarda (Hall-Herault) elektrot olarak kullanılır (Maraşlıoğlu, 2005).  $TiB_2$  sertliğe, mukavemete, kimyasal kararlılığa, ergimiş alüminyum tarafından ıslanabilirliğe ve iyi elektrik iletkenliğine sahip olması nedeniyle aşınma ve yüksek sıcaklık içeren uygulamalarda mühim olan borürler arasında bir adım öndedir. Ayrıca  $TiB_2$ , yapısında bulunan bor çiftinin nötron absorblama özelliği nedeniyle yüksek sıcaklık nükleer reaktörlerinde kontrol malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertliğe (25 GPa), yüksek ergime noktasına (3225°C), düşük yoğunluğa (4,5 g/cm<sup>3</sup>), kimyasal kararlılığa, iyi derecede termal iletkenliğe (96 W/mK) sahip olması titanyum diborürü aşınma ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda mühim bir borür yapmaktadır. Geçmişte edilgen savunma zırhlarında zırh çelikleri kullanılırken yoğunluğu, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı üstünlüğünden dolayı artık titanyum diborürler kullanılmaktadır (Aynibal, 2009). Titanyum diborür seramikleri ek olarak, yüksek ergime noktası, yüksek yoğunluk/mukavemet oranı (spesifik mukavemet), yüksek sertlik, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek elektriksel iletkenlik, iyi korozyon dayanımı ve yüksek aşınma direncine sahip iyi bilinen bir ileri teknoloji seramiğidir. Titanyum diborürlerin tüm özellikleri dikkate alındığında metal ergitme nozulleri, kaplama olarak yüksek sıcaklığa maruz kalan parçalarda,

roket motor parçalarında ve yüksek sertlikte olan büyük mermilerin yapısında, jet motoru parçalarında kullanılan silisyum karbür (SiC) kompozitlerinin mukavemetlerinin artırılmasında da kullanıldığı görülmektedir (Ersan, 2019). TiB<sub>2</sub>'ün bir başka mühim özelliği aşınma direncidir. Yüksek sıcaklıkta meydana gelen aşınmaya karşı dirence ihtiyaç duyulan uygulamalarda bile kullanılabilir. TiB<sub>2</sub> esaslı seramikler, tekrar kullanılabilir fırlatma araçları, hipersonik uçaklar, ya da roket motorlarında potansiyel malzeme olmaya ve 1800°C üstündeki hipersonik tekrar giriş alanı araçlarındaki ön kenar parçaları için termik koruma yapıları olmaya aday olduğu görülmektedir. Ayrıca nötron absorblama özelliği olması nedeniyle, yüksek sıcaklık nükleer reaktörlerde kontrol çubuk malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Akkurt, 2019). 1100°C'lere kadar ki sıcaklıklarda havada oksidasyona karşı dirençlidir (Anonim, 2023b).

### **Zirkonyum Diborür ve Titanyum Diborür**

#### **Zirkonyum Diborür – Titanyum Diborürün Karşılaştırması, Avantaj, Dezavantajları**

Ti-B sistemindeki gibi Zr-B sisteminde Zr<sub>3</sub>B<sub>4</sub> ara fazı bulunmamaktadır (Aynibal, 2009). Zirkonyum diborür, titanyum diborürden sonra ikinci en düşük yoğunluğa (6.17 g/cm<sup>3</sup>) sahip olan ultra yüksek sıcaklık seramiklerinin bir üyesidir (Yücel, 2022). TiB<sub>2</sub>'nin ısı iletkenliği yüksek, elektrik iletkenliği orta seviyededir (Anonim, 2023a). ZrB<sub>2</sub>'nin TiB<sub>2</sub>'ye kıyasla avantajları vardır. ZrB<sub>2</sub> daha yüksek yoğunluğa sahiptir ve takviyeli kompozit malzemelerde daha çok tercih edilir. ZrB<sub>2</sub>'in tercih nedeni pek çok dengeli ara faza sahip olmasıdır (Kuştutar, 2008).

### **Sonuçlar**

Ultra Yüksek Sıcaklık Seramikleri, agresif çalışma atmosferi, çok yüksek sıcaklık ve yüksek termal gerilme koşullarında kullanılan yüksek maliyetli spesifik, ileri teknoloji bir seramik malzeme sınıfıdır. Bu malzemelerin genel ortak özelliği yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapıya sahip olması ve ergime sıcaklıklarının 2000°C'nin üzerinde olmalarıdır. Bu nedenle havacılık ve uzay malzemelerinin seçiminde ve tasarımında sıcaklık-zaman çevrimine bağlı olarak çalışma ortam koşullarında oksidasyon ve sıcak korozyon davranışı, termal şok direnci, termal yorulma dayanımı, termal çevrim ömrü yanında malzemenin termofiziksel özellikleri; ısı iletkenlik, ısı genleşme, difüzyon hızı, reaksiyon kinetiği gibi faktörlerin üzerinde hassas çalışmaların yapılması zorunludur.

Aynı zamanda maliyetleri malzeme tasarımcıları uygulamalarda kullanılacak parçanın performansının ve dayanımının yanında üretim ve şekillendirme kabiliyetini de dikkate alması gerekmektedir.

Metal borürler (titanyum/zirkonyum diborürler) diborürler yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dayanımı, yüksek aşınma direnci, özelliklerinin yanı sıra asit ve erimiş metal dayanımı, yüksek sertlik, yüksek ısıda elastikiyet ve elektrik iletkenliği gibi olağanüstü özelliklere sahip olmaları onların endüstride çok yaygın bir kullanım alanı bulmalarına neden olmaktadır. Titanyum diborür, bir dizi yüksek teknolojik uygulama için temel malzeme olarak kabul edilen, artan ilgi gören bir malzemedir.  $ZrB_2$ 'de  $TiB_2$  üstün özelliklere sahip bir malzemedir ve oksidasyona karşı oldukça dirençli olduğu kanıtlanmıştır Aynı zamanda  $ZrB_2$ 'nin  $TiB_2$ 'ye kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Diborürler otomotiv, havacılık sektöründe sıcaklığın ve sürtünmenin olabileceği parçaların kaplanması veya yapımında kullanılabilir. İlerleyen teknolojiyle birlikte bu kullanım alanları gittikçe genişleyerek artmakta ve artması beklenmektedir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Kaynaklar**

Altuncu E, Esen SG., 2015. Ultra yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik malzemeler: tantalyum karbür (TaC). Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 8(1): 67-74.

Akkaş B., 2010. Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile zirkonyum diborür tozu üretimi. İTÜ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Akkas B, Alkan M, Derin B, Onüralp Y., 2010. Production of zirconium diboride powder by self propagating high temperature synthesis. Advances in Science and Technology, 63: 251-256.

Akkurt F, Kalender E, Yörükoğlu A., 2019. Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Titanyum diborür. Boron, 4(4): 203-208.

Akin I, Cagri Ocak B, Sahin F, Goller G., 2019. Effects of SiC and SiC-GNP additions on the mechanical properties and oxidation behavior of NbB<sub>2</sub>. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 7(2): 170-182.

Akin I, Kaya O., 2017. Microstructures and properties of silicon carbide- and graphene nanoplatelet-reinforced titanium diboride composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 729: 949-959.

Anonim., 2023a. Zirkonyum diborür. <https://pavtec.com.tr/tr/zirkonyum-diborur-zrb2/> (Çevrimiçi) (Alınma Tarihi: 20.04.2023).

Anonim., 2023b. Titanyum diborür. <https://pavtec.com.tr/tr/titanyum-diborur-ti-b2/> (Alınma Tarihi: 20.04.2023).

Atasoy A, Demir B., 2019. Zirkonyum karbür esaslı aşırı yüksek sıcaklık seramik kompozit tozların metalotermik yöntemle üretimi. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 14(1): 17-25.

Aynibal F., 2009. IVB grubu metal borürlerin ve lantan hekzaborürün mekanokimyasal reaksiyon ortamında sentezlenmesi. İTÜ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Backman L, Joshua G, Jian L, Opila EJ., 2020. Part II: Experimental verification of computationally predicted preferential oxidation of refractory high entropy ultra-high temperature ceramics. *Acta Materialia* 197: 81–90.

Bugdayci M, Turan A, Benzesik K, Yucel O., 2018. Production of nano ZrB<sub>2</sub>-TiB<sub>2</sub> composite powder mixtures composite powder mixtures composite powder mixtures via self-propagating high propagating high propagating high-temperature synthesis. *Nano Studies*, 5-16.

Cai XQ, Wang DP, Qi FG, Wang Y, Qiu QW, Yang ZW., 2022. Joining of titanium diboride-based ultra high-temperature ceramics to refractory metal tantalum using diffusion bonding technology. *Journal of the European Ceramic Society*, 42: 344–353.

Cotton J., 2010. Ultra-high-temperature ceramics. *Advanced Materials & Processes*. 2010.

Ersan FD., 2019. Titanyum diborür seramiklerinin yitrium oksit ve yitrium oksit+alüminyum oksit katkıları kullanılarak spark plazma sinterleme yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu. İTÜ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Golla RB, Mukhopadhyay A, Basu B, Thimmappa Kumar S., 2020. Review on ultra-high temperature boride ceramics. *Progress in Materials Science*, 111: 100-651.



Jia Y, Shashvat TM, Ryan L, Chowdhury MAR, Horn T, Xu C., 2021. Additive manufacturing of ZrB<sub>2</sub>-ZrSi<sub>2</sub> ultra-high temperature ceramic composites using an electron beam melting process. *Ceramics International*, 47: 2397–2405.

Jin X, Yang J, Sun Y, Li P, Hou C, Zhao Y, Fan X., 2021. Fabrication and characterisation of high-performance joints made of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultra-high temperature ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 41: 7412–7422.

Kaya Ö., 2016. Silisyum karbür ve grafen nano plaka (GNP) takviyeli titanyum diborür seramiklerin spark plazma sinterleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu. İTÜ Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.

Kumar Thimmappa S, Golla BR, Pitchuka SB, Bhanu Prasad VV., 2021. Nanoindentation and high temperature oxidation behavior of ZrB<sub>2</sub>-20SiC-(0–10 wt.%) Ta UHTCs. *Ceramics International*, 47: 22184–22190.

Kurtoğlu K., 2007. Titanyum diborürün karbotermik redüksiyon yöntemi ile üretimi. İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kuşutur S., 2008. Yanma sentezi ile zirkondan nitrür ve karbür tozu üretiminin araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

Maraşlıoğlu D., 2005. Titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) üretimi. Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Marschall J, Fletcher DG., 2010. High-enthalpy test environments, flow modeling and in situ diagnostics for characterizing ultra-high temperature ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(11): 2323-2336.

Marumo T, Koide N, Arai Y, Nishimura T, Hasegawa M, Inoue R., 2022. Characterization of carbon fiber-reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites fabricated via Zr-Ti alloy melt infiltration. *Journal of the European Ceramic Society*, 42: 5208–5219.

Nayebi B, Shahedi MA, Kakroudi MG, Farahbakhsh I, Shokouhimehr M., 2016. Interfacial phenomena and formation of nano-particles in porous ZrB<sub>2</sub>-40 vol% B<sub>4</sub>C UHTC. *Ceramics International*, 42: 17009–17015.

Nowak R, Bruzda G, Polkowski W., 2021. High temperature interaction between molten Ni50Al50 alloy and ZrB<sub>2</sub> ultra-high temperature ceramics. *Materials Letters*, 290: 129447.

Özkan S., 2019. Ergimiş tuz elektrolizi yöntemiyle ZrB<sub>2</sub> sentezi ve karakterizasyonu. İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Öztürk OÖ., 2017. Zirkonyum karbür esaslı seramiklerin spark plazma sinterleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu. İTÜ, Doktora Tezi, İstanbul.

Pasagada VKV, Yang N, Xu C., 2022. Electron beam sintering (EBS) process for Ultra-High Temperature Ceramics (UHTCs) and the comparison with traditional UHTC sintering and metal Electron Beam Melting (EBM) processes. *Ceramics International* 48: 10174–10186.

Povolny SJ, Seidel GD, Tallon C., 2021. Investigating the mechanical behavior of multiscale porous ultra-high temperature ceramics using a quasi-static material point method. *Mechanics of Materials*, 160: 103-976.

Povolny SJ, Seidel GD, Tallon C., 2022. Numerical investigation of thermomechanical response of multiscale porous ultra-high temperature ceramics. *Ceramics International*, 48: 11502–11517.

Şimşek T., 2014. Zirkonyum diborür nano kristal kaplanmış farklı malzemelerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.

Simsek T, Baris M, Ozcan S., 2019. Investigation of machinability properties of laser treated S355JR carbon steel with ZrB<sub>2</sub> nanoparticles. *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, 3(2): 51-59.

Turan A., 2014. Yerli hammaddelerden hareketle TiB<sub>2</sub> esaslı ileri teknoloji seramiklerin üretilmesi. İTÜ, Doktora Tezi, İstanbul.

Tülbez S, Kocaoğlu BC, Akgün B., 2019. Sıcaklık algısını değiştiren malzemeler: ultra yüksek sıcaklık seramikleri. *Roketsan*, 15.

Üşümezel C., 2016. Yapısal amaçlı uygulamalar için zirkonya-zirkonyum diborür (ZrO<sub>2</sub>-ZrB<sub>2</sub>) kompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonu Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.

Xia C, Shahedi AM, Sabahi Namini A, Ahmadi Z, Delbari SA, Van Le Q, Shokouhimehr M, Mohammadi M., 2020. Enhanced fracture toughness of ZrB<sub>2</sub>-SiCw ceramics with graphene nanoplatelets. *Ceramics International* 46: 24906–24915.

Xu Y, Sun W, Xiong X, Liu F, Miao C., 2020. Chloride salt assisted reactive molten infiltration method for Cf-UHTCs and their unique microstructure. *Ceramics International*, 46: 6424–6435.

Yanardağ B., 2022. TiB<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin ve fonksiyonel dereceli malzemelerin sıcak pres ve basınçsız sinterleme ile üretimi ve karakterizasyonu Akdeniz Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.

Yıldırım B., 2021. Seramik malzemenin kullanım alanları ve ülkemizde “seramik üniversitesi” kurulması önerisi. Yeni Fikir Dergisi, 13(26): 18–34.

Yıldızçelik AE., 2015. Zirkonyum diborür-titanyum diborür kompozit seramik tozlarının kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile üretilmesi. İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Yücel Ö., 2022. The effect of reactive sintering on the densification of boron carbide zirconium diboride composite. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.