

**BOR KARBÜR/SİLİSYUM KARBÜR  
KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ**

İC. YAB. KURULU  
10.06.2000  
101138

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Met. Müh. Güçlü BÜYÜKUNCU**  
**506981126**

10 11 38

101138

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Haziran 2000**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Haziran 2000**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Onuralp YÜCEL**  
**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Okan ADDEMİR**

**Yard. Doç.Dr. Nilgün KUŞKONMAZ (Y.T.Ü.)**

**HAZİRAN 2000**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarında her yönden bana büyük destek veren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Onuralp Yücel'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübesiyle değerli yardımlarını benden esirgemeyen Prof. Dr. Okan Addemir'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar safhasında bana yardımlarını esirgemeyen Dr. Filiz Çınar, sevgili arkadaşlarım Yüksek Met. Müh. C. Bora Derin'e, Met. Mühendisleri Alper Keskin ve Özgür Özdemir'e teşekkür ederim.

Mekanik deneylerimde çok büyük yardımları olan Sayın Mızrap Canbeyaz'a ve Met. Müh. Mehmet Ali Akoy'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren ve her zaman büyük destek veren ve yanımda olan aileme minnettarım.

Haziran, 2000

Met. Müh. M. Güçlü Büyükuncu

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                  |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ                                                                                            | ii   |
| İÇİNDEKİLER                                                                                      | iii  |
| TABLO LİSTESİ                                                                                    | v    |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                                                    | vi   |
| ÖZET                                                                                             | viii |
| SUMMARY                                                                                          | x    |
| <br>                                                                                             |      |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ                                                                                 | 1    |
| <br>                                                                                             |      |
| 2. TEORİK İRDELEME                                                                               | 4    |
| 2.1 Kompozitlerin tanımı                                                                         | 4    |
| 2.2. Karbürler                                                                                   | 6    |
| 2.3. Bor karbür özellikleri, kullanım alanı, üretim teknolojileri                                | 7    |
| 2.3.1. Bor Karbürün Yapısı                                                                       | 7    |
| 2.3.2. Bor Karbürün Stoikometrisi                                                                | 8    |
| 2.3.3. Bor Karbür Üretimi                                                                        | 8    |
| 2.3.4. Bor Karbürün Şekillendirilmesi                                                            | 8    |
| 2.3.5. Bor Karbürün Özellikleri                                                                  | 10   |
| 2.3.6. Bor Karbürün Kullanım Alanları                                                            | 11   |
| 2.4. Silisyum karbür özellikleri, kullanım alanı, üretim teknolojileri                           | 11   |
| 2.4.1 Silisyum Karbürün Yapısı                                                                   | 12   |
| 2.4.2. Silisyum Karbür Üretimi                                                                   | 13   |
| 2.4.3. Silisyum Karbürün Şekillendirilmesi                                                       | 13   |
| 2.4.4. Silisyum Karbürün Özellikler                                                              | 14   |
| 2.4.5 Silisyum Karbürün Kullanım Alanları                                                        | 16   |
| 2.5. Fenolik esaslı reçine özellikleri, kullanım alanı, üretim teknolojileri                     | 17   |
| 2.5.1 Fenolikler                                                                                 | 17   |
| 2.5.2. Reçine Kimyası                                                                            | 17   |
| 2.5.3. Novalaklar                                                                                | 18   |
| 2.5.4. Resoller                                                                                  | 18   |
| 2.5.5 Ticari Formdaki Fenolikler                                                                 | 18   |
| 2.5.6. Fenol Formaldehid Reçinelerin Üretimi                                                     | 18   |
| 2.5.7. Reçinelerin Uygulama Alanları ve Maliyetler                                               | 19   |
| 2.6. Bor karbür-Silisyum karbür kompozitlerin özellikleri kullanım alanları üretim teknolojileri | 21   |
| 2.6.1 Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerin Özellikleri                                       | 21   |
| 2.6.2. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerin Kullanım Alanları                                | 22   |

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.3. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerin Üretim Teknolojileri                                      | 22        |
| 2.7. Bor karbür-Silisyum karbür-Reçine kompozitlerin özellikleri, kullanım alanları, üretim teknolojileri | 24        |
| 2.7.1 Bor Karbür-Silisyum Karbür-Reçine Kompozitlerin Özellikleri ve Kullanım Alanları                    | 24        |
| 2.7.2. Bor Karbür-Silisyum Karbür-Reçine Kompozitlerin Üretim Teknolojileri                               | 24        |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                                                             | <b>28</b> |
| 3.1 Kullanılan Hammaddeler                                                                                | 28        |
| 3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar                                                                          | 32        |
| 3.3. Deneylerin Yapılışı                                                                                  | 35        |
| <b>4. DENEY SONUÇLARI</b>                                                                                 | <b>39</b> |
| 4.1 Birinci Seri Deney Sonuçları                                                                          | 39        |
| 4.2. İkinci Seri Deney Sonuçları                                                                          | 41        |
| 4.3. Üçüncü seri deney sonuçları                                                                          | 43        |
| <b>5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ</b>                                                                  | <b>47</b> |
| 5.1 Yoğunluk Ölçüm Değerlerinin İrdelenmesi                                                               | 47        |
| 5.2. Sertlik Ölçüm Değerlerinin İrdelenmesi                                                               | 48        |
| 5.3. Eğme Mukavemeti Değerlerinin İrdelenmesi                                                             | 49        |
| 5.4. SEM Fotoğraflarının İrdelenmesi                                                                      | 50        |
| <b>6. GENEL SONUÇLAR</b>                                                                                  | <b>56</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                                          | <b>59</b> |
| <b>EKLER</b>                                                                                              | <b>62</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                                                           | <b>65</b> |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                           | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Bor karbürün tipik özellikleri .....                                                                                                    | 10              |
| <b>Tablo 2.2.</b> Belli bazı aşındırıcıların sertlikleri .....                                                                                            | 10              |
| <b>Tablo 2.3.</b> Silisyum karbürün tipik özellikleri .....                                                                                               | 15              |
| <b>Tablo 2.4.</b> Fenoliklerin kullanımı .....                                                                                                            | 20              |
| <b>Tablo 2.5.</b> Fenoliklerin maliyeti .....                                                                                                             | 21              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Tüm deneylerde kullanılan Carborex firması ürünü silisyum karbürün kimyasal analizleri (SiC-1, SiC-2) .....                             | 28              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan B <sub>4</sub> C-1.'in kimyasal analizleri .....                                 | 28              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Üçüncü seri kompozit hazırlamada kullanılan H. C Starck GmbH&Co. KG ürünü bor karbürün kimyasal analizleri (B <sub>4</sub> C-2) .....   | 29              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan Carborex firması ürünü silisyum karbürün elek analizi (SiC-1) .....              | 29              |
| <b>Tablo 3.5.</b> Üçüncü seri kompozit hazırlamada kullanılan 10 dk süreyle öğütülmüş Carborex firması ürünü silisyum karbürün elek analizi (SiC-2) ..... | 30              |
| <b>Tablo 3.6.</b> Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan bor karbürün elek analizi (B <sub>4</sub> C-1) .....                             | 30              |
| <b>Tablo 3.7.</b> Tüm deneylerde kullanılan Treibacher firması ürünü hegzaminli toz novalak reçinenin kimyasal analizleri .....                           | 30              |
| <b>Tablo 3.8.</b> Tüm deneylerde kullanılan Treibacher firması ürünü sıvı fenolik reçinenin kimyasal analizleri .....                                     | 31              |
| <b>Tablo 3.9.</b> Kompozit karışımların yüzde ve ağırlıkça miktarları .....                                                                               | 36              |
| <b>Tablo A.1.</b> 1. Seri Deney Sonuçları .....                                                                                                           | 62              |
| <b>Tablo A.2.</b> 2. Seri Deney Sonuçları .....                                                                                                           | 63              |
| <b>Tablo A.3.</b> 3. Seri Deney Sonuçları .....                                                                                                           | 64              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                    | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 : Kompozit sınıfları.....                                                                | 5               |
| Şekil 2.2 : Bor karbürün yapısı.....                                                               | 7               |
| Şekil 2.3 : Silisyum karbür hegzagonal katmanlar.....                                              | 12              |
| Şekil 3.1 : Sartorius tartı cihazı.....                                                            | 32              |
| Şekil 3.2 : Octagon elek cihazı.....                                                               | 32              |
| Şekil 3.3 : Turbula marka karıştırıcı.....                                                         | 32              |
| Şekil 3.4 : Paslanmaz çelik kalıp.....                                                             | 32              |
| Şekil 3.5 : Mohr&Federhaff cihazı .....                                                            | 33              |
| Şekil 3.6 : Heraeus Etüv .....                                                                     | 33              |
| Şekil 3.7 : Buehler kesici.....                                                                    | 33              |
| Şekil 3.8 : Instron cihazı.....                                                                    | 33              |
| Şekil 3.9 : MSS sertlik ölçüm cihazı.....                                                          | 34              |
| Şekil 3.10 : Mettler Toledo yoğunluk ölçme cihazı.....                                             | 34              |
| Şekil 3.11 : Deneylerin şematik incelenmesi.....                                                   | 35              |
| Şekil 3.12 : Pişirme süresince sıcaklığın değişimi.....                                            | 37              |
| Şekil 4.1 : Birinci seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi.....            | 39              |
| Şekil 4.2 : Birinci seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....             | 40              |
| Şekil 4.3 : Birinci seri deneylerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi .....   | 40              |
| Şekil 4.4 : İkinci seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi .....            | 41              |
| Şekil 4.5 : İkinci seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....              | 42              |
| Şekil 4.6 : İkinci seri deneylerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....     | 42              |
| Şekil 4.7 : Silisyum karbür tozlarının öğütme sürelerine bağlı olarak tane boyut dağılımları.....  | 43              |
| Şekil 4.8 : Üçüncü seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....              | 44              |
| Şekil 4.9 : Üçüncü seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi.....             | 45              |
| Şekil 4.10 : Üçüncü seri deneylerde mukavemetin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....           | 45              |
| Şekil 5.1 : Teorik yoğunluğa yaklaşım değerlerinin bor karbür miktarına bağlı olarak değişimi..... | 47              |
| Şekil 5.2 : Sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....                                     | 48              |
| Şekil 5.3 : Eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi.....                            | 49              |

|                   |                                                                                      |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.4</b>  | : % 40 B <sub>4</sub> C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750).....  | 50 |
| <b>Şekil 5.5</b>  | : % 60 B <sub>4</sub> C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750).....  | 50 |
| <b>Şekil 5.6</b>  | : % 100 B <sub>4</sub> C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750)..... | 51 |
| <b>Şekil 5.7</b>  | : %100 SiC içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750).....               | 51 |
| <b>Şekil 5.8</b>  | : % 100 SiC içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500).....               | 52 |
| <b>Şekil 5.9</b>  | : % 100 SiC içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1500).....               | 52 |
| <b>Şekil 5.10</b> | : % 100 B <sub>4</sub> C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500).....  | 53 |
| <b>Şekil 5.11</b> | : % 100 B <sub>4</sub> C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1500).....  | 53 |
| <b>Şekil 5.12</b> | : % 60 B <sub>4</sub> C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500).....   | 54 |
| <b>Şekil 5.13</b> | : % 40 B <sub>4</sub> C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500).....   | 54 |

## BOR KARBÜR SİLİSYUM KARBÜR KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

### ÖZET

Kompozit malzemeler günümüz endüstrisinde askeri ve savunma sanayinde, nükleer enerji teknolojisinde, aşındırıcılarda, otomobil endüstrisinde, elektronik sektöründe ve daha birçok sektörde artan bir taleple kullanılmaktadır.

Bor karbür ve silisyum karbür kompozitleri ikinci dünya savaşı sırasında askeri silah sanayisinin eksikleri ve zayıf yanları da görülerek bilim adamlarını, ekonomik, dayanıklı ve kullanışlı malzemelerin kullanılması amacıyla yeni çalışmalar yapmasıyla kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak bu kompozitlerin üretimi 1960'lı yıllarda başlamıştır. Genel olarak bor karbür silisyum karbür kompozitler 2000 °C sivarındaki sıcaklıklarda sıcak preslenerek zırhlı yapımında, nötron emici plakalarda ve aşındırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Ayrıca üretilen zırh malzemeleri düşük kalibreli, düşük hızdaki silahlara karşı koruyucudurlar. Kompozit bünyeler zırh malzemesi olarak hazırlanmadıkları zaman ekstrüzyon kalıplarında, kum pişirme memelerinde, kağıt yapımında kullanılan makinelerin emme kutusu kapaklarında ve özel kaplar için şamandıra toplarında kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı değişen miktarlarda bor karbür ve silisyum karbür içeren kompozitlerin sıcaklıkta sertleşen fenolik esaslı novalak hegzamin reçine katkısıyla preslenerek şekillendirilmesi ve düşük sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi olmuştur.

Deneysel çalışmalara kompozit karışımlarının hazırlanmasıyla başlanmıştır. Toplam kompozit ağırlığı 150 gr'dır ve bunun % 80'ni ni karbürler oluşturmaktadır. Karbür karışımları, % 0 B<sub>4</sub>C-% 100SiC, % 20 B<sub>4</sub>C-% 80 SiC, % 40 B<sub>4</sub>C-% 60 SiC, %60 B<sub>4</sub>C-% 40 SiC, % 80 B<sub>4</sub>C-% 20 SiC, % 100 B<sub>4</sub>C-% 0 SiC karışım oranlarında hazırlanmıştır.

Elde edilen numuneler yoğunluk, sertlik, eğme mukavemeti gibi özellikleri belirlemek amacıyla incelenmiştir.

Üç seri halinde hazırlanan numunelerde  $2.17 \text{ g/cm}^3$  olan en yüksek yoğunluk değerine % 100 silisyum karbür içeren numunede ulaşılmıştır. En düşük yoğunluk değeri ise  $1.7 \text{ g/cm}^3$  olup % 100 bor karbür yapısında ölçülmüştür. Her üç seride de ölçülen yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluğa bölünmesiyle % 80 bor karbür içeren numunelerde en yüksek yoğunluk yüzdesine ulaşılmıştır. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değeri olan 99.35 Rockwell-B'ye % 100 silisyum karbür içeren en düşük tane boyutuna sahip numunede ulaşılmıştır. Bor karbür miktarının ve tane boyutunun artmasıyla sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde yapıdaki bor karbür miktarının artmasıyla eğme mukavemeti değerleri düşmektedir. % 100 silisyum karbür içeren numunede eğme mukavemeti 40.77 MPa iken % 100 bor karbür içeren numunede ise 1.03 MPa ölçülmüştür.

## PRODUCTION OF BORON CARBIDE SILICON CARBIDE COMPOSITES

### SUMMARY

Nowadays, composite materials are used in military and defense industry, nuclear technology industry, abrasives, automobile industry, electronic industry and in many other sectors with increasing demands.

By witnessing the weak and lacking parts of military arm industry in Second World War scientists started searching for more economic, resistant and useful materials, therefore boron carbide and silicon carbide composites are being used. Mostly boron carbide-silicon carbide composites are manufactured by pressing around temperatures 2000 °C to be used in armors, neutron absorber plates and abrasive materials. Such composite bodies may be quite suitable as armor for protection against low caliber, low velocity projectiles. Composite bodies may also be prepared which, even if not especially useful as armor, in suitable shapes, useful as extrusion dies, sandblast nozzles, suction box covers for paper making machines and buoyancy spheres.

The aim of this study is to prepare boron carbide-silicon carbide composites with the help of phenolic based novolac hexamine resins forming by pressing and sintering at low temperatures. Experiments were made by preparing the mixtures. Total weight of the composite is 150 grams and 80 % of it consists of carbides. Carbide mixtures are prepared by ratios, % 0 B<sub>4</sub>C-% 100SiC, % 20 B<sub>4</sub>C-% 80 SiC, % 40 B<sub>4</sub>C-% 60 SiC, %60 B<sub>4</sub>C-% 40 SiC, % 80 B<sub>4</sub>C-% 20 SiC, % 100 B<sub>4</sub>C-% 0 SiC.

Samples are examined to determine properties like density, hardness and strength. The highest density value 2.17 g/cm<sup>3</sup> is achieved by measuring 100 % silicon carbide sample within the three series. The lowest density value which is 1.7 g/cm<sup>3</sup> is calculated by measuring 100 % boron carbide sample. Dividing density values by theoretical densities in three series the highest theoretical percentage is achieved at values consisting of 80 %

boron carbide. 99.35 Rockwell-B hardness value is achieved by the lowest particulate composition of 100 % silicon carbide sample. Increasing boron carbide content and particulate dimension decreases the hardness values of the composite. whereas with the increase in the boron carbide content of the body decreases the flexure strenght values. 40.77 MPa value is measured in the sample having 100 % silicon carbide on the other hand value of 1.03 MPa is measured from 100 % boron carbide.



## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Tarih boyunca malzemelerin gelişimi, teknolojinin gelişmesinde anahtar rol oynamıştır. Taş devri, demir devri, endüstriyel devrim, nükleer çağ, elektronik devrim ve günümüzdeki uzay çağı, malzeme teknolojisinde meydana gelen değişimlerden ve sonuçlarından etkilenmiştir.

Günümüzde ileri teknoloji kompozitlerinin yönlendirdiği yeni bir devrimin ortasındayız. Bu yeni sınıf malzemeler farklı özelliklere sahip bileşimlerin biraraya gelmesiyle birlikte, tek başına kullanılan elementlerden daha fazla üstün özellikleri sağlayarak radikal bir değişime sebep olmuşlardır. Sahip oldukları üstün özellikler teknolojik gelişmeler için onları vazgeçilmez malzemeler yapmıştır. Endüstri temsilcileri bu malzemelerin 21'inci yüzyılda oluşacak ekonomik ticaret alanında kritik bir role sahip olacaklarına inanmaktadırlar [1].

İlk seramikler, onbin yıl önce insanların ateşi kullanarak çanak-çömlek yapmaları ile başladı. Bu basit çömleklerin yapımı günümüz seramiklerinin gelişmesinin başlangıç noktası olmuştur. Yüz sene öncesine kadar seramik kelimesi; mutfak aletlerinde, çatı malzemesi ve inşaat tuğlası gibi alanlarda kullanılan bir anlam ifade etmekteydi. Ancak 19'uncu yüzyılın ikinci çeyreğinden itibaren büyük oranlarda gelişen çelik ve demir endüstrisi, geleneksel olarak kullanılan seramiklerin yerine refrakter malzeme olarak silika, alumina, krom-magnezit ve magnezit gibi malzemelerin gelişmesini sağlamıştır. Seramikler ayrıca diğer birçok endüstriyel sektörün de gelişmesine olanak tanımıştır.

Bor karbür kimyasal dayanıma ve elmas kadar sertliğe sahip bir malzemedir. Bor karbür düşük termal iletkenlik, termal şoka karşı direnci, yüksek sertliği, yarı iletkenlik özelliği ve yüksek termal nötron yakalama kabiliyetinden dolayı kullanım alanları arasında; aşındırıcılarda taşlama ve parlatma; seramiklerde sert, çok hafif, yüksek performanslı,

aşınma direncine sahip seramik parçalar ve seramik zırh plakaların sıcak preslenmesi ve sinterlenmesi; nükleer endüstrisinde nükleer teknoloji için nötron emici ürünlerde; refrakter malzeme olarak silisyum karbür ve refrakter ürünleri için anti-oksijen bileşeni olarak; çeliklerde bor ihtivasi için modifikasyon bileşeni olarak, sayılabilmektedir [3].

Silisyum karbür aşındırıcı bir toz olarak özellikle tüm aşındırıcı uygulamalarında, aşındırıcı takım malzemelerinde ve parlatma işlemlerinde kullanılmaktadır. Silisyum karbür elmas ve bor karbürden daha düşük sertliğe sahip olmakla beraber, çok geniş bir biçimde metal dışı malzemelerin öğütülmesinde, tok ve sert malzemelerin son işleme kademelerinde ve seramik parçalarda üretim maliyetinin önemli olduğu zamanlarda dolgu olarak kullanılır [3].

Silisyum karbür: parlatma, işleme, öğütme işlemlerinde; seramik kaplamalarda, aşınma bileşenlerinde; ısıtma elemanlarında; kaplanmış aşındırıcılarda; seramik pompalarda; seramik ve metal matriks kompozitlerde; seramik conta ve halkalarda ve hafıza disklerinde kullanılmaktadır [4].

Silisyum karbür düşük termal iletkenliğe, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek termal şok dayanımına sahip, sert, yarı iletken ve elmastan daha büyük refraktif indeks değerine sahip bir malzemedir [5].

Bor karbür ve silisyum karbür kompozitlerin üretimi 1960'lı yıllarda başlamıştır. Genel olarak bor karbür silisyum kompozitler 2000 °C civarındaki sıcaklıklarda sıcak preslenerek nötron emici plakalarda, hafif zırhlı yapımında ve aşındırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Bor karbür-silisyum karbür-silika kompozitleri hafif personel zırhı ya da havacılıkta zırh malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca üretilen zırh malzemeleri düşük kalibreli, düşük hızdaki silahlara karşı koruyucu olurlar. Kompozit bünyeler zırh malzemesi olarak hazırlanmadıkları zaman ekstrüzyon kalıplarında, kum pişirme memelerinde, kağıt yapımında kullanılan makinaların emme kutusu kapaklarında ve şamandıra toplarında kullanılmaktadır [21].

Bu çalışmanın amacı, değişen miktarlarda bor karbür ve silisyum karbür içeren kompozitlerin sıcaklıkta sertleşen fenolik esaslı novalak hegzamin reçine katkısıyla preslenerek şekillendirilmesi ve dūřuk sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu ortaya çıkan numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu olmuştur. Numunelerin, yoğunluk, sertlik, mukavemet değerleri gibi mekanik özellikleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlara göre kompozitin aşındırıcı veya zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.



## 2. TEORİK İRDELEME

### 2.1. Kompozitler

En geniş tanımıyla kompozitler yüksek dayanımlı, yüksek sıkışabilir tanelere sahip bir malzemenin diğer bir malzeme ile birleşmesidir. Gelişmiş kompozit terimi ise yüksek performans karakteristiklerine sahip, genel olarak dayanım ve sıklığa sahip malzemeler için kullanılır. Modern yapısal kompozitler yani gelişmiş kompozitler iki veya daha çok malzemenin bir bağlayıcı yardımı (genellikle reçine) ile birleşmesiyle oluşur [6].

Mühendislik malzemelerinin geçerli bir tanımlamayla açıklanması 3 şekilde olur: bunlar [6],

1- Elementel veya basit seviye: Bu seviyede tek moleküllerin ve kristal kümelerin ve tüm malzemelerin iki veya daha fazla atomdan oluşmaları kompozit olarak adlandırılabilir. Bunlar bileşimleri, alaşımları, polimerleri ve seramikleri içerir; sade, saf elementler hariç tutulur.

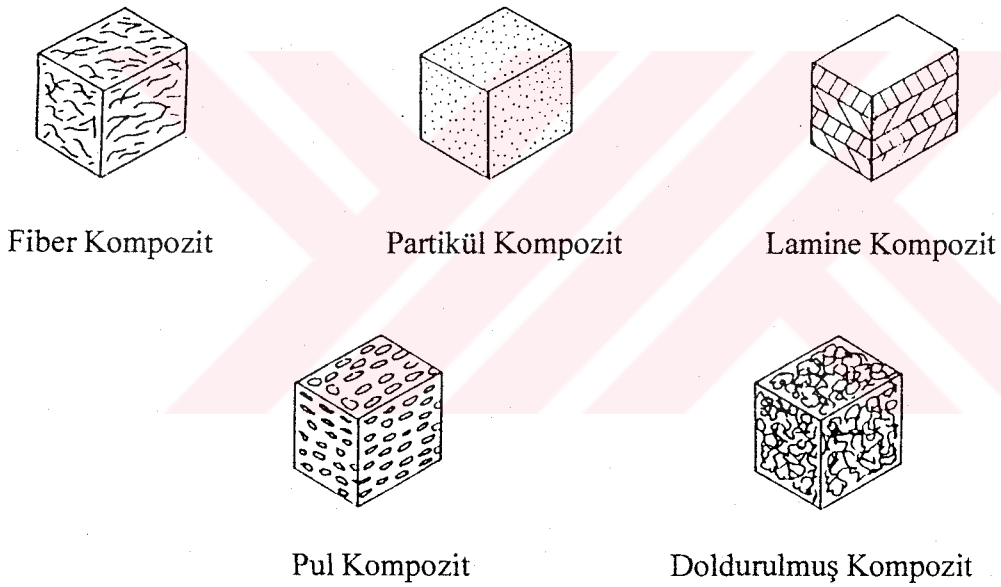
2- Mikroyapısal seviye: Bu seviyedeki kristaller, fazlar ve bileşimlerde, kompozit tanımlaması iki veya daha fazla farklı kristallerin, molekül yapılarının veya fazlarının birleşmesiyle oluşmuş bir malzeme diye tanımlanır. Bu tanımlamayla birçok malzeme geleneksel bir biçimde monolitik veya homojen olarak kompozit adıyla tanımlanır. Tek fazlı alaşımlardan örneğin, bronz bu tanımlamayla monolitik, çelik yani karbon ve demirin çok fazlı alaşımı ise kompozit olur.

3- Makroyapısal seviye: Bu seviyede ise farklı makro bileşenlerden oluşmuş malzeme sistemlerinden bahsedilir, bunlar ise matriksler, partiküller ve fiberlerdir.

Sonuç olarak kompozit malzeme, iki veya daha fazla makrobileşimlerin farklı şekil ve oranlarda karıştırılmasından oluşan bir malzeme sistemidir [6].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi literatürde kompozitler 5 grupta sınıflandırılmaktadır [6, 9]:

- 1- Fiber kompozitler,
- 2- Pul kompozitler,
- 3- Partikül kompozitler
- 4- Doldurulmuş kompozitler
- 5- Lamine kompozitler



Şekil 2.1. Kompozit çeşitleri [6].

Kompozitler çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptirler,

Avantajları:

- a- Ağırlık azalması (yüksek dayanım (veya sıklık)/ağırlık oranı),
- b- Çok farklı yükleme koşulları (fiber-fiber),
- c- Uzun ömür (yüksek korozyon direnci),
- d- Düşük üretim maliyetleri,
- e- Arttırılmış (veya azaltılmış) termal veya elektrik iletkenlikleridir.

Dezavantajları ise:

- a- Yüksek hammadde ve işleme maliyeti,
- b- Değişken özelliklerde olası zayıflıklar,
- c- Düşük tokluk ,
- d- Geri dönüşümünün olmaması,
- e- Birleştirmede görülen zorluklar,
- f- Analiz, yapımındaki zorluklardır.

## 2.2 Karbürler

Karbürler tipik kırılğan seramik malzemelerdir. Metallerin aksine karbürler belirgin bir tokluk göstermezler. Metallerin özellikleri olarak akma mukavemeti, yüksek dayanım ve tokluk verilirken, seramiklerin dayanımları uygulanan yüke bağlı hatanın fonksiyonunun olasılığı olarak Weibull noktası diye gösterilir. Karbürlerin ve diğer seramiklerin mekaniksel özellikleri, mukavemet sınırı hatalarının oluşması ile sınırlanır ve belirlenir [7, 10].

Seramiklerin etkili olduğu mukavemet seviyelerinde, dayanım sınırı hataları birkaç mikron mertebesinde. Nitekim karbürün mukavemeti üretim proseslerinin kontrolü ve tozun hazırlanmasıyla belirlenir.[7, 10]

Bu sınırlamalara ilaveten tüm seramik malzemelerin mekaniksel özellikleri, onların yüzeylerine, son işlem ve muhafaza durumlarına bağlıdır.

Üç genel karbür grubu vardır:

- 1- İyonik karbürler (Na, K, Ca, Al ile)
- 2- Kovalent karbürler ( $B_4C$ , SiC)
- 3- Geçiş metallere üretilmiş karbürler (Ti, Ta, Cr, Mo, Fe, Co, Ni ile) [7,10].

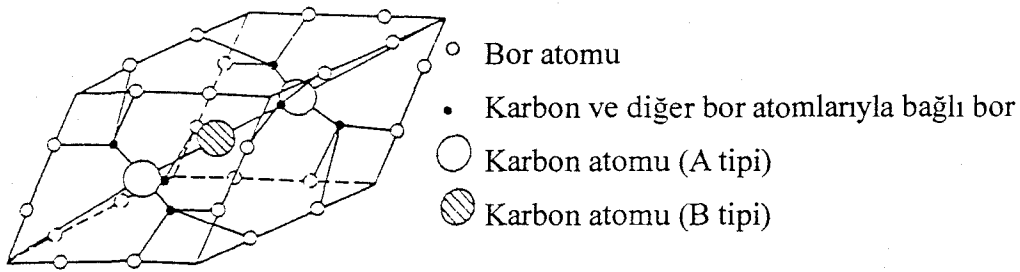
### 2.3. Bor Karbür

Çoğu ticari bor karbür tam olarak  $B_4C$  bileşiminde değildir, bor karbür ve karbon (grafit formunda) dan oluşmuş kompozittir [9].

İkinci faz grafitinin varlığı ticari bor karbürün mukavemetini sınırlayan genel faktörlerden birisidir [9].

#### 2.3.1. Bor Karbürün Yapısı

Bor karbür bileşimlerinin yapısal dağılımı köşegenlerden birisine paralel olarak uzayan bir küp şeklinde görülür (rombohedron). 3 karbon atomu bu eksen boyunca yerleşmiştir. Köşelerde ise on ikişer adet bor atomu içeren dodekahedronlar bulunur (Şekil 2.2) [7].



Şekil 2.2. Bor karbürün yapısı [7].

Bu yapı  $B_{12}C_3$  veya basitleştirilmiş haliyle  $B_4C$  şeklinde tariflenir. Diyagonalin iki tarafında bulunan 2 tip karbon bölgesi vardır ve bunlara A-B-A denir. Her A karbon atomu 1 adet yakın karbon komşuya, diğer taraftan B karbon atomu 2 eş yerleşmiş karbon komşulara sahiptir [7].

### 2.3.2. Bor Karbürün Stoikometrisi

$B_4C$ 'de bor konsantrasyonu % 78.25'den % 85 bora kadar değişir. En sık kullanılan ticari bor karbür ikinci faz olarak grafit içerir ve bu durum mukavemeti sınırlar. Bir başka mukavemeti sınırlayıcı durum ise bor karbür içinde bulunan ince, uzun ve geniş formdaki lamel grafitir ve bu da yüksek dayanımlı matrikslerde düzensizliklere ve sonuç olarak gevrek yapılı seramiklere yol açar [7].

### 2.3.3. Bor Karbür Üretimi

Ticari bor karbürün üretiminin esası borik oksit ve karbon karışımının bir elektrik ark ocağında ergitilip reaksiyona sokulması ile gerçekleşmektedir. Ark ocağında bulunan ürün genel olarak kısmen erimiş vaziyette bulunan  $B_4C$  bileşiminin çoğunluğunu oluşturan kısımdır. Bor karbürün uygun bir şekilde erimemesi katı bor karbürle temas halinde bulunan sıvı kısmının katı haldekiyle aynı bileşime sahip olmadığını gösterir. Ark ocağında bulunan ergiyik sıvı, katı ve sıvı faz dengeye ulaşmadan katılaştırılır. Ergiyik halde kalan malzeme en son sıvı katılaşana kadar karbonca artarak zenginleşir ve bileşiminde ötektik olarak bor karbür ve grafit karışımı bulunur. Her ne kadar pratikte bor karbür özenle hazırlansa da, tüm ark ocağı ürünleri belli bir miktar serbest grafit ihtiva ederler [7, 8].

### 2.3.4. Bor Karbürün Şekillendirilmesi

Bor karbür ve silisyum karbür gibi kovalent seramik malzemelerin tam olarak yoğunlaştırılması ve saf tek fazlı şekle getirilerek şekillendirilmesi oldukça zordur (Sıcak izostatik presleme HIP dahil) [7].

Laboratuvar ölçekli bor karbür yüksek yoğunluklara, aşırı derecede ince öğütölmüş bor karbür tozuna karbon ilavesi ile sinterlenmesiyle ulaşabilmıştır. Daha önceden de belirtildiği gibi karbon fazlası, ideal özelliklerin altında bir kompozite yol açar [7].

Günümüzde tüm ticari bor karbür parçaları sıcak presleme veya az da olsa sıcak izostatik presleme ardından yapılan sinterlemeyle üretilmektedir. 10 µm'den ince tozun tipik sıcak preslenme koşulları 2100 °C'de, 35 Mpa basınç altında, 30 dakika süreyle gerçekleşir [7].

1 µm'den ince, % 1-3 C içeren tozun tipik sinterleme ve sıcak izostatik preslenmesi 2200-2250 °C arası 30 dakika süreyle düşük basınçta (10 Pa) preslenmesi, ardından 2000 °C'de sıcak izostatik preslenmesi ve 200 Mpa basınç altında argon gazıyla 120 dakika süreyle sinterlenmesiyle elde edilir [7].

Sıcak presleme üretilecek boyutların ve şekillerin kompleksliğini sınırlamaktadır. Sıcak preslemeyle basit silindirler, bloklar, düz plakalar, eksenel simetrik memeler ve benzer basit şekiller elde edilir [7].

Bu basit şekillerin şekillendirilmesi elmas ile işlemeyi gerektirir. Fakat bu işlemler yüzey altında birçok mikroskopik hataya yol açar. Bu hatalarda genellikle işlenmiş şekilli parçalarda mukavemet sınırlayıcı hataların kaynaklarıdır [7].

### 2.3.5. Bor Karbürün Özellikleri

Bor karbürün tipik mekaniksel ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1’de listelenmiştir.

**Tablo 2.1.** Bor karbürün tipik özellikleri [7].

| Özellikler                            | Değerler    |
|---------------------------------------|-------------|
| Yoğunluk, gr/cm <sup>3</sup>          | 2.51        |
| Bor içeriği, %                        | 78.28       |
| Karbon içeriği, %                     | 21.72       |
| Yapısı                                | Rombohedral |
| Renk                                  | Siyah       |
| Ergime noktası, °C                    | 2450        |
| Eğme mukavemeti, MPa:                 |             |
| Oda sıcaklığında                      | 303-480     |
| 650 °C’de                             | 290         |
| 1100 °C’de                            | 241         |
| Sertlik, kg/mm <sup>2</sup> , Vickers | 3700        |

Bor karbür düşük termal iletkenliğe sahiptir ve termal şoka karşı hassastır. Sahip olduğu yüksek sertlik sadece elmas ve kübik bor nitrürden daha azdır. Tablo 2.2’de ise belli bazı aşındırıcıların sertlikleri gösterilmiştir.

**Tablo 2.2.** Bazı aşındırıcıların sertlikleri [7].

| Malzeme          | Knoop sertliği (100 gr), kg/mm <sup>2</sup> |
|------------------|---------------------------------------------|
| Safir (alumina)  | 2000-2050                                   |
| Tungsten karbür  | 2050-2150                                   |
| Silisyum karbür  | 2150-2950                                   |
| Bor karbür       | 2900-3100                                   |
| Kübik bor nitrür | 4500-4600                                   |
| Elmas            | 8000-8500                                   |

Mekaniksel dayanım ise işleme ve üretim metodlarından etkilenir. Karışımla ilgili problemlere ve serbest grafit fazın varlığına rağmen yoğun bor karbür, (sıcak preslenmiş ticari ürünlerden) kütle üretilmiş ticari skaladaki en sert malzemelerden birisidir. Bor karbürün sertliği silisyum karbür, tungsten karbür ve safirin sertliklerinden daha fazladır. Bor karbür sahip olduğu yüksek sertliğe rağmen aşındırıcı bağlayıcı olarak kullanışlı değildir (aşındırıcı öğütücü tekerlekler, kesici taşlar). Bor karbür aşırı derecede gevrek ve kırılgandır ve tüm bor karbür aşındırıcılar zayıf, gevşek ve çamurlu şekilde kullanılırlar [10].

Bor karbür bir yarı iletkenidir fakat yarı iletkenlik özellikleri için tam saf şekilde üretilmemiştir ne de elektriksel bir alet olarak kullanılması için bir yapıda değildir [10].

Bor karbür sahip olduğu yüksek termal nötron yakalama özelliğinden dolayı en çok nötron emici ve koruyucu malzemesi olarak kullanılır. Bor karbür nükleer reaktörlerde kontrol çubuklarında ve yakıt çubuklarında koruyucu olarak kullanılır [10].

#### **2.3.6. Bor Karbürün Kullanım Alanları**

Bor karbür birkaç uygulama da ve mekaniksel dayanımı öne çıkarmayan alanda kullanılır.

Termal nötron emici ve gevşek aşındırıcı olarak kullanılır. Sıcak preslenmiş şekliyle aşındırıcı çamurlarda meme olarak ve aşınma uygulamalarında yükün sıkıştırıcı veya kaydığı durumlarda kullanılır [7, 8, 10].

#### **2.4. Silisyum Karbür**

Silisyum karbür en çok kullanılan yapısal seramiklerden bir tanesidir. 1970'li yıllardan beri birçok yeni uygulamalar bulunmuştur. Sahip olduğu birçok özellik ve en önemlisi karmaşık mühendislik şekillerinde, silisyum karbür tungsten karbür yerine çekici bir aşınma direnci uygulayıcısı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Silisyum nitrürle kıyaslandığı zaman, silisyum karbürü elde etmek için kullanılan hammaddeler daha

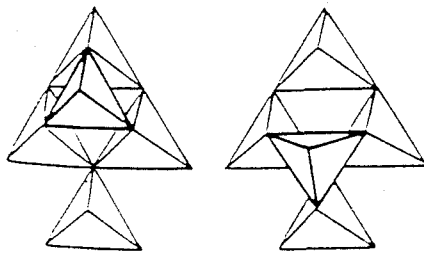
ucuzdur ve sonuç olarak elde edilen ürünlerdeki maliyetler tungsten karbürden düşük olduğu için rekabet koşulları yüksektir [11].

#### 2.4.1 Silisyum Karbürün Yapısı

Bor karbürün sahip olduğu birçok kimyasal kompozisyonda bor karbür yapısı bulunurken, birkaç yüz yapıya sahip silisyum karbür tespit edilmiştir. Bu karmaşık yapılar içinde silisyum karbürün sahip olduğu en basit yapı türü ise elmas yapısına sahiptir ve burada karbon atomlarının yerini silisyum atomları almıştır. Bu kübik yapı  $\beta$  yapısı olarak adlandırılmaktadır. Diğer bütün yapılar ise hegzagonal veya rombik simetri gösterirler ve bunlara kısaca  $\alpha$  denir.

Bu yapılarda görülen farklılıklar aslında kümeleşmede görülen dizilmelerdir. Bütün silisyum karbür yapıları hegzagonal çift katmanlardan meydana gelmiştir ve burada bir hegzagonal düzlemde bulunan bir katman karbon atomları diğer bir katmanda bulunan hegzagonal silisyum atomlarının üstüne yerleşmişlerdir. Bu silisyum karbür yapısında her karbon atomu 4 silisyum atomu tarafından tetrahedral biçimde çevrelenmiş ve her silisyum atomu ise 4 karbon atomu tarafından yine tetrahedral biçimde çevrelenmiştir.

Kristal simetrideki farklılıklar hegzagonal katmanlardaki farklı dizilmeler sonucu ortaya çıkmaktadır. Kübik silisyum karbürde her çift katman diğer alt katmandakiyle değişerek dizilirler. Şekil 2.3'de silisyum karbürün hegzagonal katmanları görülmektedir. Bu dizilmeler kübik simetriye yol açmaktadır.



Şekil 2.3. Silisyum Karbür Hegzagonal Katmanlar [7].

#### 2.4.2. Silisyum Karbür Üretimi

Yüzey kaplamaları ve silisyum karbürün infiltre edilmiş yapıları kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya kimyasal buhar infiltrasyonu (CVI) yöntemleriyle hazırlanmaktadır. silisyum karbürün büyük şekillerde üretimi ise silisin karbon redüksiyonu sonucu toz veya tane şeklinde elde edilir.

Zaman ve reaksiyon sıcaklığına göre silisyum karbür ince toz şeklinde veya geniş kütsel bağı şeklinde oluşur ve sonra çıkan ürün tipik aşındırıcı toz ve taneler olarak kullanılır.

Ezme, öğütme, dövme ve özel boyut oranlarına ayırma işlemlerinden sonra silisyum karbür tozları karbonun oksidasyonu için ısıtılır ve istenilen saflığa ulaşmak için silisi giderme işlemi, hidroflorik asit ile yıkama işlemi ile sonuçlanır [7, 12].

#### 2.4.3. Silisyum Karbürün Şekillendirilmesi

Ticari silisyum karbür ürünleri farklı kullanım koşullarına göre 3 farklı şekilde şekillendirilirler.

Birinci metotta silisyum karbür tozu reçine, cam, silisyum nitrür veya metal gibi bir ikinci malzemeye karıştırılır. Daha sonra bu kompozit malzeme ikinci fazın yeni bir bağ oluşturması için işleme tabi tutulur.

Silisyum karbür tozu karbon veya silisyum metal tozlarıyla karıştırılarak reaksiyon bağları oluşturulur. Karbon silisyum buharıyla reaksiyona girerek silisyum karbür bağı oluşturur veya silisyum metal tozu azotla reaksiyona girerek silisyum nitrür bağı oluşturabilir. Her iki durumda da bir reaksiyon bağı oluşmaktadır.

1960'lı yılların başlarında çok ince silisyum karbür tozların ( $<1 \mu\text{m}$ ) bor karbür katkısıyla yoğunlaştırılıp sinterlenebileceği bulunmuştu. 1970'li yılların ortalarında ise Prochaska ve arkadaşları prosesi optimize ederek yüksek yoğunluklu sinterlenmiş silisyum karbür elde etmişlerdir [7].

Her iki işlemde de avantajlar olduğu kadar sınırlamalarda bulunmaktadır. İkinci fazla meydana gelen bağlar birçok aşındırıcı veya çoğu refrakter uygulamalar için standarttır. Bağ fazlarının özelliklerine rağmen ürünler uygulamalarda sınırlı kalmışlardır. Buna rağmen bu ürünler en ekonomik olanlardır.

Kendinden bağlı silisyum karbür genellikle boşluklarında bir miktar serbest reaksiyona girmemiş silisyum metali içerir. Bu metal silisyumun ergime noktasının (1400 °C) üzerindeki sıcaklıklarda erir. Reaksiyon bağı oluştuktan sonra vakum ortamında tekrar pişirilerek veya karbon fazlası ortamda giderilebilir. Kendinden bağlı silisyum karbür sinterlenmiş malzemeye oranla daha iyi oksidasyon direnci sergiler. Sinterlenmiş silisyum karbür, özellikle tane büyüme olayını ve diğer mukavemet sınırlayıcı özelliklerini önlemek için özenle hazırlanmış hali, oksidasyonun sınırlayıcı faktör olmadığı durumlarda mekaniksel özellikler için bir seçenektir. Sinterlenmiş silisyum karbür, bor ve serbest karbon içerdiğinden dolayı reaksiyon bağı malzemedan daha düşük oksidasyon direncine sahiptir. Serbest karbon bünyede oksidasyona ve gözeneklerin gelişmesine yol açar. Oksidasyon sırasında bor, borik asit üretir ve bu da koruyucu silika katmanının akışkanlığını artırır ve dolayısıyla oksidasyon direnci düşer.

#### **2.4.4. Silisyum Karbürün Özellikleri**

Silisyum karbür refrakter uygulamalarındaki özellikleriyle iyi bilinmektedir. Mükemmel bir termal iletkenliğe ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Tablo 2.3'de silisyum karbürün genel özellikleri belirtilmiştir.

**Tablo 2.3.** Silisyum karbürün tipik özellikleri [4, 5, 7, 11, 20].

| Özellikler                            | Değerler  |
|---------------------------------------|-----------|
| Yoğunluk, gr/cm <sup>3</sup>          | 3.1-3.22  |
| Silisyum karbür içeriği, %            | 97.80     |
| Karbon içeriği, %                     | 0.20-0.80 |
| Renk                                  | Siyah     |
| Eğme mukavemeti, Mpa:                 |           |
| Oda sıcaklığında                      | 400-410   |
| 800 °C’de                             | 400-410   |
| Sertlik, kg/mm <sup>2</sup> , Vickers | 3100      |

Bu özellikler sonucunda muazzam bir termal şok dayanımı sergiler.

Termal iletkenlik kristal yapıda çözünen safsızlıkların varlığından etkilenir. Yüksek saflıkta ticari silisyum karbür elde etmek zordur; çünkü sinterleme için eklenen safsızlıklar (boron) veya reaksiyon bağlamada kullanılan silisyumda bulunan safsızlıklar bunu engeller.

Sinterlenmiş silisyum karbür seramik malzemeler içerisinde en dayanıklı olanlardan birisidir. Mukavemetinin sınırlandırılması kristalit aglomeratlara, aşırı büyümeye, uzamış tanelere ve porozite gibi farklı hatalara bağlıdır.

Silisyum karbürün ticarileşmesini sağlamış özelliklerinden birisi sertliğidir. Achosan silisyum karbürün sertliğini keşfettiği zaman elması dahi kesebilecek bir yetenekten bahsetmişti. Bu yetersiz bir açıklama dahi olsa silisyum karbür en etkili aşındırıcılardan birisidir. Bor karbür kadar sert değildir ancak silisyum karbür kabuksal bir bileşim sergileyerek malzeme sıyırma işlemlerinde etkili olmaktadır. Silisyum karbürün sertliği kristalografik yönlere, varolan safsızlıklara ve parlatılmış yüzeyler gibi farklı durumlara bağlı olarak değişir. Ölçüm ortamı dahi sertliği etkileyebilir.

Silisyum karbürün değerli bir mücevher taş olması gerektiği söylenmektedir. Çok geniş bir renk dağılımında; renksiz (saf  $\alpha$ /hegzagonal), sarı ( $\beta$ /kübik), yeşil (azot veya fosfor daldırılmış), mavi (alüminyum daldırılmış), kahverengi (bor daldırılmış) ve siyah (yoğun bir şekilde alüminyum daldırılmış) hazırlanabilir.

Silisyum karbür manyetik özellik göstermemektedir [7, 11].

#### **2.4.5. Silisyum Karbürün Kullanım Alanları**

Yüksek performans seramiklerinde bütün dikkatler ısı - motor uygulamalarına yöneldiyse de, en çok kullanılan reaksiyon sinterlenmiş ve sinterlenmiş silisyum karbür ticari uygulamalarında sertlik, kimyasal saflık ve aşınma dirençli karakteristiklerinden dolayı kullanılır.

Bu uygulamalardan birçoğu, kimyasal işlem endüstrisi için kaplamalar ve valflar, kum boruları için memeler, hidrosiklonlar, lens kalıpları, roket memeleri, spray kurutma için aşınma plakalarıdır.

Aşınma, erozyon dirençli silisyum karbür uygulamaları ise havacılık endüstrisinde pompa, taşıma, yağ, yakıt deposu, pompa malzemeleri ve kalıplarda kullanılır. Isı dayanımından dolayı uzay teknolojisinde de yüksek sıcaklık roket meme bağlantılarında, ısı değişim tüplerinde, difüzyon fırını parçalarında kullanılır.

Ayrıca seramik motorlarda ve turboşarj kısımlarda silisyum karbür uygulamaları deneme aşamasındadır. Türbin motorlarında uygulamaları artmaktadır. Silisyum karbür bilgisayar çiplerinde de kullanılır.

Yüksek termal iletkenliklerinden dolayı uzay teknolojisinde lazer aynaları olarak kullanılmakta ve silah savunma sanayinde çalışmalar yapılmaktadır. Silisyum karbürün balistik etki dayanımı düşük olmasına rağmen, seramik zırh malzemesi olarak da uygulamaları mevcuttur [7, 11].

## 2.5. Reçine

Belirsiz (kesin olmayan) ve genellikle yüksek moleküler ağırlığa sahip katı, yarı katı veya sıvı halindeki organik malzeme gerilime maruz kaldığı zaman akışkanlık eğilimi gösterir. genellikle yumuşatıcı veya eriyen bir dilime sahiptir ve kabuk şeklinde kırılır. Organik polimer bir sıvı olan reçine kullanım için son haline dönüştürüldüğü zaman reçine halini alır. Reçine, katalizör ve sulandırıcı gibi malzemelerin karışmasıyla reçine sistemi meydana gelir [14].

### 2.5.1. Fenolikler

Fenolikler formaldehid ve fenolün yoğunlaşmış ürünleridir. Farklı fenol veya aldehidler bazen reaktant olarak kullanılırlar.

Fenolik reçineler ilk olarak 1872 yılında A. Baeyer tarafından üretilmiştir. İlk fenolik reçine patenti ise 1899'da A. Smith tarafından çıkarılmıştır.

Bugün ise fenolikler ahşap yapıştırıcılar ve en büyük hacime sahip olan sentetik yapıştırıcılar alanında kullanılmaktadır. Fenolikler ayrıca yapıştırıcılar içerisinde en düşük maliyetli olanıdır. Fenolikler ahşap hücre yapılarına çok iyi şekilde nüfuz ederek mükemmel bir bağ yapısı oluştururlar.

Fenolikler ayrıca aşındırıcı ve döküm üretim hattı uygulamalarında kullanılmaktadır. Bir başka kullanım alanı ise fenolik kalıplama ürünleri ve kaplamalardır [15].

### 2.5.2. Reçine Kimyası

Birçok seçilmiş fenoller aldehidlerle reaksiyona girerek ilk fenol formaldehid işlemini gerçekleştirirler. Üretilen reçinenin tipini, işlemini ve uygulamasını belirleyecek kilit nokta fenolün aldehidde olan oranıdır. Ayrıca katalizörün varlığı, reaksiyon PH'ı, sıcaklık, zaman ve suyun varlığı reçinenin özelliklerini belirler [15].

### **2.5.3. Novalaklar**

İki adımda oluşan fenoliklere novalaklar denir. Fenol fazlası ile oluşmuş termoplastik fenol formaldehid reçineye novalak denir. Formaldehidin fenole olan oranı her zaman 1'den küçüktür [15].

### **2.5.4 Resoller**

Bir adımda oluşan fenoliklere ise resoller denir. Formaldehid fazlası ile oluşmuş termoset fenol formaldehid reçineye resol denir [15].

### **2.5.5. Ticari Formdaki Fenolikler**

Birçok katkı ve ilave maddesi ile yüzlerce fenolik formülasyona sahip ticari fenolikler mevcuttur. Genellikle fenolikler novalaklar veya resoller olarak bulunurlar [15].

Novalaklar genellikle durağandır ve sıvı (çözelti ilaveli katı novalak), toz, pul, topak şeklinde saklanabilirler [15].

Resoller ise katı veya sıvı halde mevcuttur [15].

### **2.5.6. Fenol Formaldehid Reçinelerin Üretimi**

Fenolün formaldehidle polimerizasyonu bir polikondensasyon işlemidir ve alkali veya asitlerle katalize edilir [15].

Orijinal bakalit malzemeleri bazik katalize edilmişken, novalaklar ise asitle katalize edilmiş polimerlerdir [15].

Bazik katalizasyon ile yoğunlaştırılmış fenol ve formaldehid düşük moleküler ağırlıklı sıvı polimerleri yani resollerini oluştururlar [15].

Novalakların oluşumu ise asitle katalize edilmiş ve sonuçta karbon - karbon bağ yapısını oluşturan bir yapıya sahiptir [15].

Fenol genellikle kömür külünde bulunur ve bir zamanlar ticari amaçlar için bu kaynaktan faydalanırdı. Bugünlerde ise dünya fenol üretiminin çok az bir kısmı doğal fenol ile karşılanmakta, genel olarak ise benzinden sentezlenerek üretimi gerçekleştirilmektedir [16].

Benzin yoğun bir şekilde petrol kaynaklarından elde edildiğinden fenol de ana petrol kimyasalı olarak adlandırılabilir [16].

İlk adımda benzin propilenle alkalize edilip izopropal benzin elde edilir. Bu reaksiyon buhar veya sıvı faz ortamında gerçekleştirilebilir. Buhar fazı prosesinde (daha yaygın) propilen ve benzin fazlası fosforik asit destekli bir katalizör işleminden 250 °C'de ve 2.5 MPa basınç altında geçirilerek elde edilir. Çıkan gazlar ayrılmış ve izopropil benzin bünayedden atılmıştır [16].

Hegzametilen tetramin (hegzamin veya HMT) ise amonyak ve formaldehidle hazırlanır.

Amonyak 20-30 °C sıcaklıkta formalinden karıştırılarak geçirilir. Elde edilen solusyon düşük basınç altında su atılana ve hegzametilen tetramin kristalize oluncaya kadar buharlaştırılır. % 95 amonyak ve formaldehid elde edilir [16].

#### **2.5.7. Reçinelerin Uygulama Alanları ve Maliyetler**

Ahşap, selülozik fiberler, sentetik fiberler, termoset fenolik, amino yapıştırıcı reçineler birleştirilerek endüstrilemiş ülkelerde kullanılmaktadır [14]. Fenolikler yapısal yapıştırıcılarda ahşap, metal, plastik ve kağıda metal yapıştırma uygulamalarında kullanılır [14]. Tozlaşmış novalaklar genellikle alüminyum oksit ve silisyum karbürün kullanıldığı aşındırıcılarda bağlayıcı olarak kullanılırlar [14].

Aşınma malzemelerinde fenolikler (novalaklar ve resoller) genellikle otomotiv endüstrisinde, fren takımları, blokları, disk pedalleri, otomatik transmisyon bıçaklarında kullanılır. Ayrıca zımpara kağıdı, zımpara diski ve zımpara kemeri gibi kaplanmış aşındırıcılarda ise genellikle resoller kullanılır. Fenoliklerin diğer bir kullanım alanı ise

döküm kalıplarında kullanılan bağlayıcı kumlardır. Bu kalıplarda toz, pul, tane şeklinde novalaklar yaygın bir şekilde kullanılır. Fenolikler havacılık endüstrisinde de ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Tipik uygulamalardan biri ise uçaklarda bitmiş yüzey uygulamalarında fenoliklerin kullanımudur. Diğer bir taraftan roket motorlarında püskürtücülerde fenoller kullanılmaktadır [14]. Tablo 2.4 ve 2.5’de fenoliklerin kullanımı ve maliyetleri gösterilmiştir.

**Tablo 2.4.** Fenoliklerin Kullanımı (1989) [14].

| Uygulamalar                      | Tüketim 10 <sup>6</sup> kg. |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Kaplanmış ve bağlı aşındırıcılar | 11                          |
| Ahşap, fiber ve taneli           | 122                         |
| Sürtünme malzemeleri             | 18                          |
| Döküm ve kalıplamada             | 22                          |
| İzolasyon malzemeleri            | 235                         |
| Laminatlama                      | 112                         |
| Kontrplak                        | 738                         |
| <b>Toplam</b>                    | <b>1258</b>                 |

**Tablo 2.5.** Fenoliklerin Maliyeti (1989) [14].

| Malzeme                                            | Maliyet \$/kg |
|----------------------------------------------------|---------------|
| <b>Monomerler</b>                                  |               |
| Fenol                                              | 0.88–0.95     |
| Formaldehid                                        | 0.25–0.28     |
| <b>Formaldehid yapıştırıcılar</b>                  |               |
| Fenol formaldehid ve endüstriyel reçineler         | 1.90-3.20     |
| Fenolik film yapıştırıcılar                        | 0.90-1        |
| <b>Diğer fenolikler</b>                            |               |
| Fenol formaldehid resol çözeltisi (% 60'ı alkolde) | 2–2.5         |
| Fenol formaldehid tozlar                           | 1.5-1.9       |

## 2.6. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitler

### 2.6.1. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerin Özellikleri

Silisyum karbürün özellikle mükemmel termal şok dayanımı, oksidasyon dayanımı, yüksek kırılma tokluğunun; bor karbürün sertlik, aşınma dayanımı ve düşük yoğunluk gibi özelliklerin birleşmesiyle silisyum karbür ve bor karbür tozları farklı oranlarda karıştırılarak arzulanan özelliklerde değişik amaçlar için kullanılmaktadır [17]. Bor karbür bu tip uygulamalar için uygun bir malzemedir ancak gevrek olması, düşük ısı dayanımı, yüksek sıcaklıklarda mukavemet azalması ve düşük termal şok dayanımı bor karbürün negatif yönleridir [22]. Bor karbürün kompozitteki varlığı elde edilen ürünün özelliklerini etkilemektedir. Kompozitteki bor karbür miktarının artması sinterlenmiş üründe yoğunluğun düşmesine, oksidasyon dayanımının azalmasına ancak daha hafif bir kompozit oluşmasına yol açar [23]. Ayrıca bu tür kompozitler yüksek ısı dayanımı ve çarpmaya karşı mukavemet sergilemektedir [22].

### **2.6.2. Bor Karbür - Silisyum Karbür Kompozitlerin Kullanım Alanları**

Bu tür kompozitler bazı tip memelerde, türbin motorlarında, ısı ileten tüplerde ve potalarda olduğu gibi çok farklı uygulamalarda kullanılabilmektedir [22].

### **2.6.3. Bor Karbür - Silisyum Karbür Kompozitlerin Üretim Teknolojileri**

Bor karbür silisyum karbür kompozitlerin üretimi 1962 yıllarında başlamıştır. İlk çalışmalarda % 10-90 arası değişen bor karbür-silisyum karbür tozları grafit kalıplarda 48.2 MPa basınç altında 2100 °C'de sıcak preslenmiştir [17]. Benzer bir çalışmada ise % 20-50 arası bor karbür içeren bor karbür-silisyum karbür plakaları 5 µm silisyum karbür ve 2 µm bor karbür tozlarının grafit kalıplarda 34.5 MPa basınç altında 2200 °C'de sıcak preslenmesiyle elde edilmiştir [17]. Basınçlı sinterleme tekniğiyle üretilen kompozitlerde karmaşık şekilli parçaların üretimi kısıtlıdır. Sadece küçük ve basit şekilli parçalar bu yöntemle üretilebilir. Ayrıca bu işlem çok yüksek enerji kullanımı ve kalıplama malzemesi gerektirmektedir. Kompozit malzemeler çok sert olduğundan elmas takımlarla yüzey işlemine tabi tutulması gerekmektedir ve bu da pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir [17]. Yapılan çalışmalar sonucu pahalı sıcak presleme işlemlerinden basınçsız sinterleme proseslerine geçiş olmuştur [17].

Talmy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma seramiklere ve daha çok oksit olmayan seramiklere dayalıdır [18]. Bor karbürün düşük oksidasyon dayanımı oksitleyici atmosferlerde 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamamasına yol açar [18]. Silisyum karbürün ilavesi, bor karbür seramiklerinin oksidasyon dayanımını geliştirmektedir. Talmy ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada gelişmiş oksidasyon dayanımı ve tokluğuna sahip bir bor karbür - silisyum karbür kompoziti elde etmeye, ayrıca yeni bir üretim metodu geliştirmeye çalışmışlardır [18]. Bu çalışmada silisyum karbür kaplanmış bor karbürün ve ardından silisyum karbür tanelerinin, silisyum karbür kaplanmış bor karbürü eşit olarak dağılımı gerçekleştirilmiştir. Bu kompozitin üretimi ise silisyum karbür tozunun karbonla reaksiyonu ile oluşur. Kullanılan silisyum borür

SiB<sub>4</sub>, SiB<sub>6</sub> veya her ikisinin karışımından; karbon tozu ise tercihen karbon isi, grafit tozu veya karışımlarından oluşmaktadır.

Reaksiyonlar aşağıda verildiği gibi oluşur:



Birinci denklemin sonucunda % 64 bor karbür ve % 36 silisyum karbür içeren (porozitesiz), ikinci denklemin sonucunda ise % 73 bor karbür ve % 27 silisyum karbür içeren (porozitesiz) bor karbür silisyum karbür kompoziti oluşur. Üretimin ilk aşamasında silisyum borür ve karbon karışımının inert ortamda ısıtılması tercihen 1600-1850 °C arası, daha çok 1750-1825 °C'de ve en çok da 1800 °C'de yapılır. 1800 °C'de bir saatlik pişirme işleminden sonra reaksiyon tamamlanır. Daha düşük sıcaklıklarda yapılan pişirme işlemlerinde ise reaksiyon süresi uzamaktadır. Reaksiyonlar 0-10 MPa basınç altında uygulanır. Basıncsız üretilen bor karbür-silisyum karbür kompoziti ise % 25 poroziteye sahiptir. Bu kompozit yapı ise uygun bir metalin veya seramik malzemenin infiltrasyonu için seramik ön yapı olarak kullanılabilir [18].

Üretimin ikinci aşamasında ise birinci aşamada oluşan bor karbür silisyum karbür kompoziti yoğunlaştırmak için sıcak presleme 1900-2300 °C arası inert atmosferde yapılır. Presleme sıcaklıkları 2000-2200 °C arası iyi, 2050-2150 °C arası çok iyi sonuç verir. Tam yoğunlaşmış kompozit ise 2100 °C'de 20 MPa basınç altında 30 dakika süreyle presleme sonucu elde edilir [18].

## **2.7. Bor Karbür-Silisyum Karbür-Reçine Kompozitler**

### **2.7.1. Bor Karbür-Silisyum Karbür-Reçine Kompozitlerin Özellikleri ve Kullanım Alanları**

Bor karbür-silisyum karbür-reçine kompozitler zırh malzemesi olarak sert, porozite içermeyen yapıya sahiptirler. Anti balistik uygulamalarda kurşun geçirmez personel yeleklerinde, anti tank silahlarına karşı koruyucu zırhlarda, kurşun geçirmez otomobillerde uygulanmakta olan bu kompozitler çarpmaya karşı dayanıklı, hafif ve düşük maliyetlidir. Ayrıca nötron emici plakalarda kullanılmaktadırlar. 5 mm'den kalın nötron emici plakalar yeterli bir mekanik dayanım sergilerler. Mekaniksel özellikler grafit ilavesi ile yükseltilebilir. Ancak 2 mm'den kalın ve köşegen uzunluğu 500 mm olan ince plakalarda sadece saf bor karbür tozunun kullanılması mekaniksel dayanımın artık yeterli olmamasına yol açtığı gözlenmiştir. Daha ince bor karbür tozunun kullanılması sadece eğme mukavemetinin artışına yol açmıştır. Ancak bu plakalar korozyona karşı hassastırlar ve plakalar kaynar suya 2000 - 3000 saat süreyle daldırıldıklarında eğme mukavemeti değerleri % 50 düşüş göstermiştir. Grafit ilavesi mukavemeti arttırmıştır. Ayrıca plakaların preslemesi sırasında oluşan hava akımları laminasyona ve çatlaklara yol açmaktadır. Bu plakalar koklama işlemine kadar düzgün şekil oluşturmazlar [19].

### **2.7.2. Bor Karbür-Silisyum Karbür-Reçine Kompozitlerin Üretim Teknolojileri**

Lipp ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada nötron emici plakalar % 40 bor karbür- % 60 silisyum karbür, % 10-20 serbest karbon ve geri kalan miktarda porozite olacak şekilde üretilmiştir [19].

En iyi yoğunlukta ve fiziksel özelliklere sahip nötron emici plakalar: % 15-25 bor karbür, % 25-35 silisyum karbür, % 10-20 serbest karbon, % geri kalan porozite olan kompozitlerle elde edilmiştir [19]. Bu çalışmada nötron emici plakalar ince taneli seramik tozların, grafit ve reçine yardımıyla oda sıcaklığında karıştırılarak kalıba

dökülmesi ve reçinenin 180 °C'ye kadar pişirilerek polimerleştirilmesi ve kalıplanmış plakaların havasız ortamda kontrollü sıcaklıklarda 1000 °C'ye kadar koklanmasıyla elde edilir. İstenen özellikleri elde etmek için bor karbür ve silisyum karbür tozlarının saflığı ve inceliği önemlidir [19]. Kullanılan bor karbür tozlarının kümülatif tane boyutu dağılımı; % 95'i 90 µm'dan ince, % 90'ı 80 µm'den ince, % 70'i 50 µm'den ince, % 50'si 30 µm'den ince, % 30'u 20 µm'den ince, % 10'u 6 µm'den incedir. SiC tozlarının kümülatif tane boyutu dağılımı ise, % 95'i 40 µm'dan ince, % 90'ı 30 µm'den ince, % 70'i 20 µm'den ince, % 50'si 10 µm'den ince, % 30'u 7 µm'den ince, % 10'u 4 µm'den incedir.

Kullanılan reçineler ise tercihen fenol formaldehid bazlı novalak veya resol olmalı ve 1000 °C sıcaklıkta çözünerek amorf karbona dönüşmelidir. Başlangıç malzemeleri tercihen; % 20-50 bor karbür, % 20-55 silisyum karbür, % 0-10 grafit tozu, % 12-20 organik reçine, % 3-5 ıslatıcı olmalıdır. 1000 °C'ye kadar ısıtma işlemi 20 saat süreyle, 1000 °C'de bekletme 4 saat ve yavaş soğutma işlemi ise 24 saat sürer [19].

Lipp ve arkadaşlarının yapmış oldukları birinci çalışmada; % 28 bor karbür, % 65 silisyum karbür, % 7 grafit, % 18 fenolik reçine, % 6 ıslatıcı kullanılmıştır. Bu oranlara göre elde edilmiş plakaların basma mukavemeti değeri 60 N/mm<sup>2</sup> eğme mukavemeti değeri ise 35 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Aynı numuneleri suda 93 °C'de 2000 ve 3000 saat beklettikten sonra elde edilen eğme mukavemeti değerleri sırasıyla 25 N/mm<sup>2</sup> ve 24 N/mm<sup>2</sup> bulunmuştur. [19].

İkinci çalışmada ise: % 60 bor karbür, % 20 silisyum karbür, %10 grafit, % 19 fenolik reçine, % 6 ıslatıcı karışımından oluşan plakaların basma mukavemeti değeri 50 N/mm<sup>2</sup>, eğme mukavemeti değeri ise 25 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Aynı numuneleri suda 93 °C'de 2000 ve 3000 saat beklettikten sonra elde edilen eğme mukavemeti değerleri sırasıyla 17 N/mm<sup>2</sup> ve 16 N/mm<sup>2</sup> bulunmuştur. [19].

Üçüncü çalışmada da % 93 bor karbür, % 7 grafit, % 19 fenolik reçine, % 5 oranlarında ıslatıcı kullanılmıştır. Bu oranlara göre elde edilmiş plakaların basma mukavemeti değeri  $50 \text{ N/mm}^2$ , eğme mukavemeti değeri ise  $16 \text{ N/mm}^2$  olarak ölçülmüştür. Aynı numuneleri suda  $93^\circ\text{C}$ 'de 2000 ve 3000 saat beklettikten sonra elde edilen eğme mukavemeti değerleri sırasıyla  $8.5 \text{ N/mm}^2$  ve  $7.5 \text{ N/mm}^2$  bulunmuştur [19].

Schwetz ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada alfa silisyum karbür, bor karbür ve serbest karbondan oluşan sinterlenmiş porozitesiz polikristal parçalar elde edilmiştir. Sistem trapezoid alana sahip bor-silis-karbondan oluşan üçlü bir sisteme sahiptir. Trapezoid alanın köşe noktaları a= % 89 bor karbür, % 9.9 alfa silisyum karbür, % 1.1 karbon, b= % 9.9 bor karbür, % 89 alfa silisyum karbür, % 1.1 karbon, c= % 9 bor karbür, % 81 alfa silisyum karbür, % 10 karbon, d= % 81 bor karbür, % 9 alfa silisyum karbür, % 10 karbondan oluşmaktadır. Ortalama tane boyutları  $20 \mu\text{m}$ 'den incedir. Bu karışımlar ince taneli alfa silisyum karbür, bor karbür ve karbonun (reçine) iki kademeli sinterleme prosesiyle koklanmasıyla üretilmişlerdir. İlk kademede tozlardan şekillendirilmiş ham bünyeler  $1950\text{--}2150^\circ\text{C}$  arası basınçsız sinterlenmişler, ikinci adımda sinterlenen parçalar sıcak izostatik presleme ile en az 10 Mpa basınç altında  $1850\text{--}2150^\circ\text{C}$  arası yüksek basınçlı sistemde sinterlenmişlerdir [17]. Yapılan çalışmada karbür tozları öğütülmüş ve başlangıç malzemeleri olarak kullanılmışlardır. Tane boyutları  $3 \mu\text{m}$  olan tozlar daha sonra aseton solusyonunda novalak içeren fenol formaldehid reçine ile karıştırılmış ardından akışkan hale gelen karışım, aseton çözeltisi buharlaşana kadar açık havada bekletilmiştir. Elde edilen tozlar homojenizasyon için jet öğütücüde 0.2 Mpa'lık hava basıncıyla aglomeratlarına ayrılması sağlanmıştır. Ardından öğütülmüş karışım 400 Mpa basınç altında lastik kalıpta izostatik presleme ile ham bünyeler oluşturulmuştur. Ham bünyeli plakalar koklama fırınında redükleyici atmosferde ısıtılmışlar, novalak reçinenin pirolizi oda sıcaklığından  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklığa yaklaşık 20 saat sürede çıkılarak ve kalsinasyonu için 8 saat beklendikten sonra koklanmış plakalar koruyucu atmosfer altında oda sıcaklığına 36 saatte soğutulmuşlardır. Daha sonra Tammann tipi bir fırında 10 Pa'lık vakum altında grafit bir potada  $2100^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika sinterlenmiştir. Fırın ısıtılmadan önce fırın bölmesi saf

argon gazıyla doldurulmuştur. Sinterleme periyodu sonrası fırın kapatılmış ve parçalar fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Sinterleme sonrası elde edilen sonuçlar şöyledir; % 80 SiC:% 20 B<sub>4</sub>C karışımlarında teorik yoğunluk % 99.7, eğme mukavemeti 420 N/mm<sup>2</sup>, % 60 SiC:% 40 B<sub>4</sub>C karışımlarında teorik yoğunluk % 98.6, eğme mukavemeti 449 N/mm<sup>2</sup>, % 40 SiC:% 60 B<sub>4</sub>C karışımlarında teorik yoğunluk %98.2, eğme mukavemeti 402 N/mm<sup>2</sup>, % 20 SiC:% 80 B<sub>4</sub>C karışımlarında teorik yoğunluk % 97.7, eğme mukavemeti 377 N/mm<sup>2</sup> olmuştur [17].



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalara öncelikle toz halindeki bor karbür, silisyum karbür ve fenolik esaslı novalak hegzaamin reçineden karışımlar hazırlanmasıyla başlanmıştır. Ardından sırasıyla şekillendirme, presleme, pişirme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen numuneler sertlik, mukavemet ve yoğunluk değerlerini belirlemek amacıyla incelenmiştir.

#### 3.1. Kullanılan Hammaddeler

Kullanılan bor karbür, silisyum karbür ve reçinelerin kimyasal analizleri ve elek analizleri Tablo 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8’de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Tüm deneylerde kullanılan Carborex firması ürünü silisyum karbürün kimyasal analizleri (SiC-1, SiC-2)

| Bileşenler                     | Ağırlıkça, % |
|--------------------------------|--------------|
| SiC                            | 99–99.5      |
| Serbest karbon                 | 0.15         |
| Si                             | 0.02–0.08    |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.20-0.30    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.02–0.03    |

**Tablo 3.2.** Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan (B<sub>4</sub>C-1)’in kimyasal analizleri

| Bileşenler     | Ağırlıkça, % |
|----------------|--------------|
| Bor karbür     | 98           |
| Serbest karbon | 2            |

B<sub>4</sub>C-1 İstanbul Teknik Üniversitesinde üretilmiştir.

**Tablo 3.3.** Üçüncü seri kompozit hazırlamada kullanılan H. C Starck GmbH&Co. KG ürünü bor karbürün kimyasal analizleri (B<sub>4</sub>C-2)

| Bileşenler   | Değerler                |
|--------------|-------------------------|
| B            | % 75.57                 |
| C            | % 22.09                 |
| B:C oranı    | 3.80                    |
| N            | % 0.41                  |
| O            | % 1.23                  |
| Fe           | 260 ppm                 |
| Si           | 590 ppm                 |
| Al           | 38 ppm                  |
| Diğer        | 3768 ppm                |
| BET          | 16.45 m <sup>2</sup> /g |
| Ham yoğunluk | 1.65 gr/cm <sup>3</sup> |
| Tane boyutu  | %90'ı 3 µm altı         |

**Tablo 3.4.** Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan Carborex firması ürünü silisyum karbürün elek analizi (SiC-1)

| µm       | Toplam elek altı, % |
|----------|---------------------|
| -250+180 | 0                   |
| -180+106 | 21.2                |
| -106+90  | 46.0                |
| -90+75   | 84.9                |
| -75      | 100                 |

**Tablo 3.5.** Üçüncü seri kompozit hazırlamada kullanılan 10 dk süreyle öğütülmüş Carborex firması ürünü silisyum karbürün elek analizi (SiC-2)

| $\mu\text{m}$ | Toplam elek altı, % |
|---------------|---------------------|
| -180+150      | 0                   |
| -150+106      | 6.7                 |
| -106+90       | 8.6                 |
| -90+75        | 18.8                |
| -75+53        | 46.6                |
| -53+38        | 60.9                |
| -38           | 100                 |

**Tablo 3.6.** Birinci ve ikinci seri kompozit hazırlamada kullanılan bor karbürün elek analizi (B<sub>4</sub>C-1)

| $\mu\text{m}$ | Toplam elek altı, % |
|---------------|---------------------|
| -250+180      | 0.4                 |
| -180+106      | 3.9                 |
| -106+90       | 11.7                |
| -90+75        | 60.8                |
| -75           | 100                 |

**Tablo 3.7.** Tüm deneylerde kullanılan Treibacher firması ürünü hegzaminli toz novalak reçinenin kimyasal analizleri

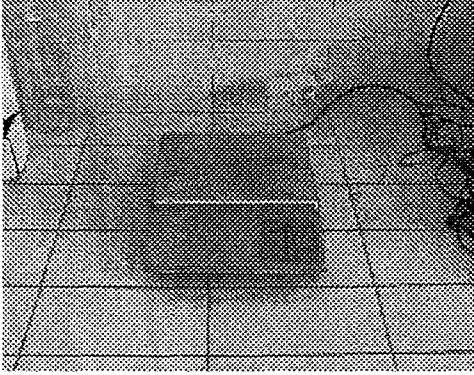
|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Ticari ismi                   | Leriphen SM 1112       |
| Akışkanlık DIN 16916          | 19-24 mm               |
| Hegzamin DIN 10147            | % 8.5-9.5              |
| Maksimum su miktarı DIN 10130 | % 1                    |
| Maksimum serbest fenol        | % 1                    |
| Raf ömrü                      | Kuru, serin yerde 6 ay |
| Paketleme                     | 20 kg'lık paketler     |

**Tablo 3.8.** Tüm deneylerde kullanılan Treibacher firması ürünü sıvı fenolik reçinenin kimyasal analizleri

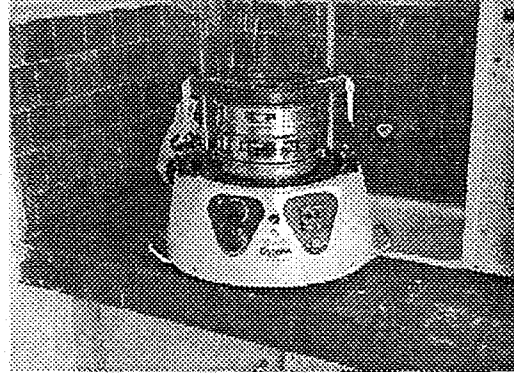
|                              |                                               |
|------------------------------|-----------------------------------------------|
| Ticari ismi                  | Leriphen 1329/2 sulu solusyonda fenolik reşol |
| Aktif miktar DIN 16916       | % 79-82                                       |
| 25 °C’de yoğunluk            | 1.26-1.28 gr/lt                               |
| PH                           | 6.7-7.0                                       |
| Serbest fenol                | % 12–14                                       |
| Serbest CH <sub>2</sub> O    | % 0.3-0.6                                     |
| Suda karışabilirliği (25 °C) | 10:4-10:10                                    |
| Raf ömrü                     | 20 °C’de 4 hafta<br>10 °C’de 2 ay             |
| Paketleme                    | Bidonlarda, tanklarda                         |

### 3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar

Bor karbür, silisyum karbür ve fenolik reçinelerin tartımları 0.01g hassasiyetli Sartorius marka otomatik terazi ile yapılmıştır (Şekil 3.1).

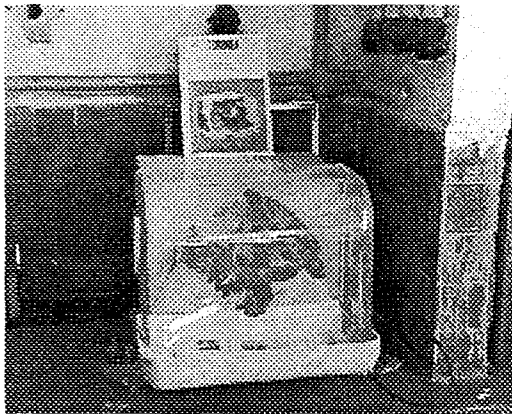


Şekil 3.1. Sartorius tartı cihazı

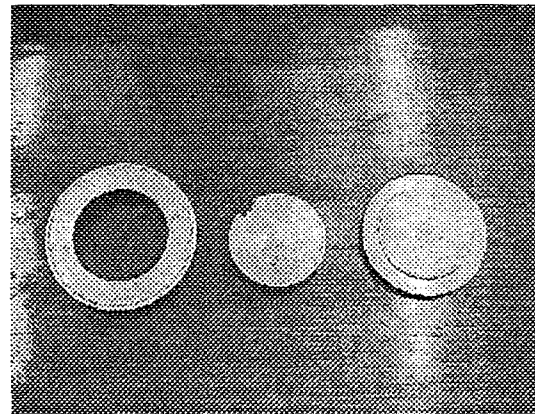


Şekil 3.2. Octagon elek cihazı

Bor karbür ve silisyum karbür tozlar karışım haline getirilmeden önce tane boyutlarının belirlenebilmesi için Endecotts Octagon 200 (Şekil 3.2) elek cihazı ile elenerek elek analizleri yapılmıştır. Shimadzu SA-CP2 cihazında öğütülmüş silisyum karbürün tane boyutu analizleri saptanmıştır. Homojen bir karışım sağlamak amacıyla Turbula T2C marka karıştırıcıda (Şekil 3.3) bor karbür, silisyum karbür ve fenolik tozlar karıştırılmıştır.

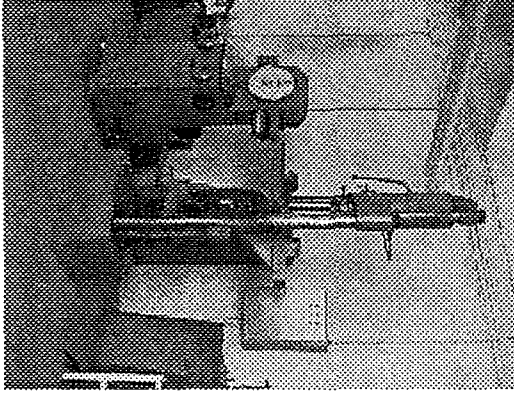


Şekil 3.3. Turbula marka karıştırıcı

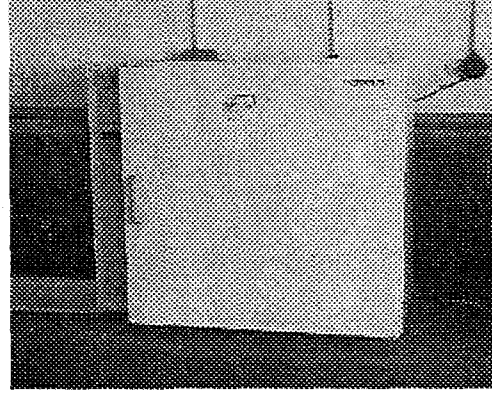


Şekil 3.4. Paslanmaz çelik kalıp

İ.T.Ü laboratuvarlarında öğütücüde silisyum karbür tozları öğütülmüştür. Şekillendirme işlemi 10 cm çaplı, 2.5 cm yüksekliğe sahip paslanmaz çelik kalıp (Şekil 3.4) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Mohr & Federhaff cihazı

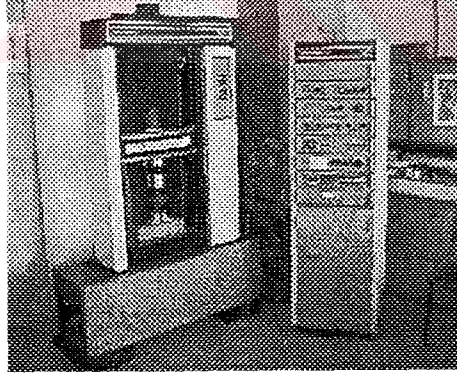


Şekil 3.6. Heraeus Etüv

Mohr&Federhaff AG marka çekme basma cihazında (Şekil 3.5) presleme işlemi yapılmıştır. Kompozit malzemeler Heraeus marka etüvde (Şekil 3.6) pişirilmiştir.

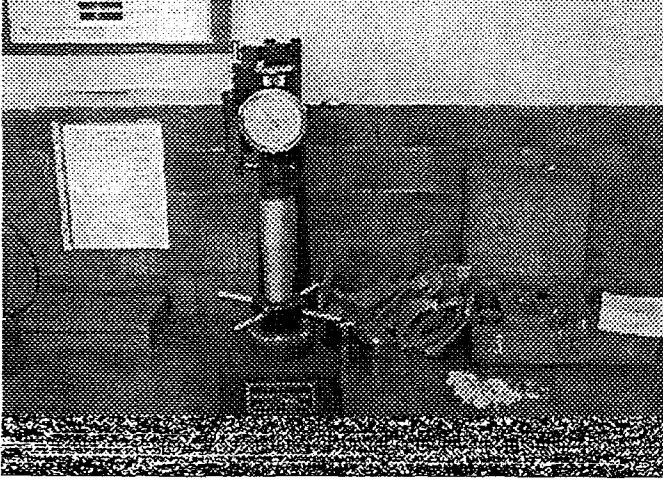


Şekil 3.7. Buehler kesici



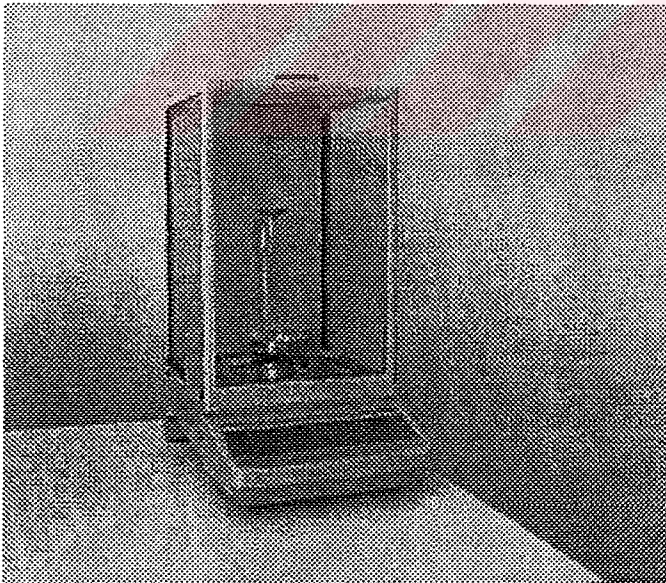
Şekil 3.8. Instron cihazı

Numuneler Buehler Isomet 2000 (Şekil 3.7) marka kesme cihazında elmas disk ile kesilmiştir. Instron 1195 (Şekil 3.8) marka çekme basma cihazında eğme mukavemeti ölçümleri yapılmıştır.



**Şekil 3.9.** MSS sertlik ölçüm cihazı

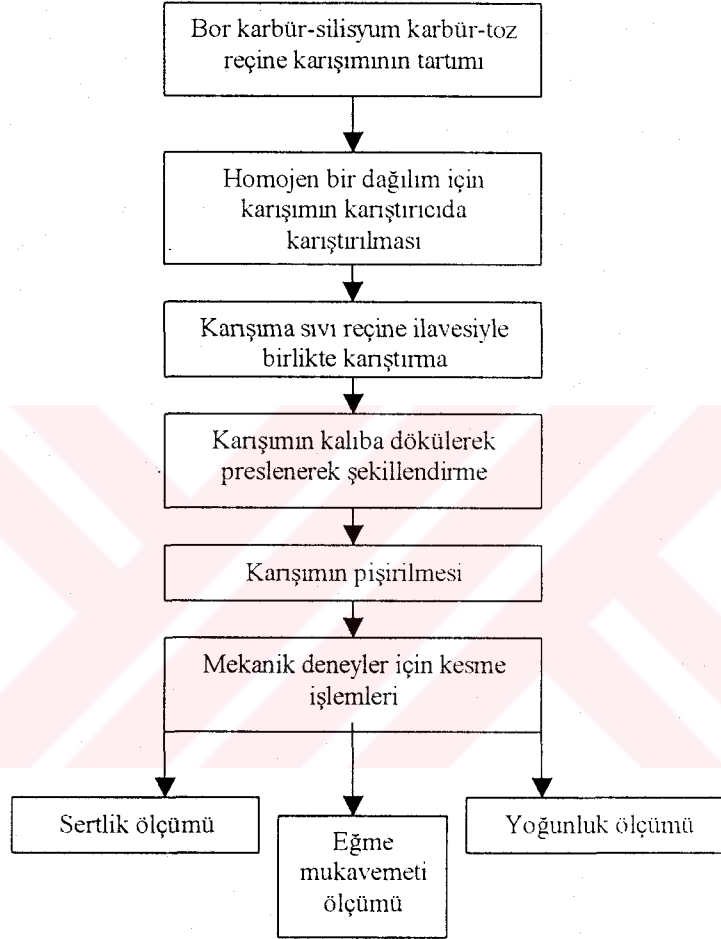
Misawa Seiki Seisakusho (MSS) (Şekil 3.9.) marka sertlik ölçüm cihazında Rockwell B sertlik ölçümü yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri ise Mettler Toledo PG 503-S (Şekil 3.10) marka cihazda belirlenmiştir.



**Şekil 3.10.** Mettler Toledo yoğunluk ölçme cihazı

### 3.3. Deneylerin Yapılışı

Bor karbür-silisyum karbür ve reçine karışımlarından kompozit malzeme üretimi Şekil 3.11’de verilen akış şeması takip edilerek yapılmıştır



Şekil 3.11. Deneylerin şematik gösterilişi

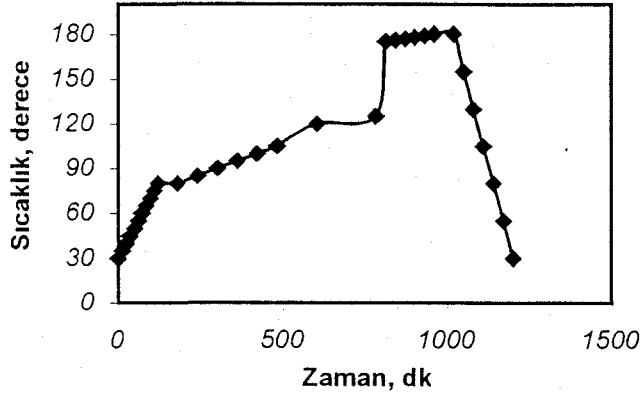
Deneyler üç seri halinde yapılmıştır. Birinci seri kompozit karışımı için  $B_4C-1$  ve  $SiC-1$  tozları kullanılmıştır. Şekillendirme 10 ton ( $127 \text{ kg/cm}^2$ ) yük uygulanarak yapılmıştır. İkinci seri kompozit karışımı için aynı oranlarda, aynı cins bor karbür ve silisyum karbür tozları kullanılmış ancak presleme işlemi 20 ton ( $255 \text{ kg/cm}^2$ ) yük ile gerçekleştirilmiştir. Üçüncü seri kompozit karışımı için ise ince taneli silisyum karbür ( $SiC-1$ ) ve bor karbür tozları ( $B_4C-2$ ) kullanılmıştır. Presleme işlemi 20 ton yükte

gerçekleştirilmiştir. Kullanılan paslanmaz çelik kalıbın hacmi hesaplanarak karışım miktarı 150 gr. olarak hesaplanmıştır. 150 gr'lık bu karışımın % 80'ini karbürler (120 gr) % 20'sini ise reçine oluşturmuştur (30 gr). 30 gr'lık reçinenin % 30'u sıvı reçine (9 gr), % 70'ı ise katı toz (21 gr) reçinedir. Homojen bir karışım sağlamak amacıyla bor karbür, silisyum karbür ve katı toz reçine bir saat süreyle karıştırıcıda karıştırılmış daha sonra sıvı reçinenin ilavesiyle karışım son haline getirilmiştir. Hazırlanan karışımda bor karbür ve silisyum karbürlerin oranı % 0-20-40-60-80-100 değerlerinde olmak üzere Tablo 3.9'daki miktarlarda hazırlanmıştır.

**Tablo 3.9.** Kompozit karışımların yüzde ve ağırlıkça miktarları

| Karışım | B <sub>4</sub> C |              | SiC |              |
|---------|------------------|--------------|-----|--------------|
|         | %                | Ağırlık (gr) | %   | Ağırlık (gr) |
| 1       | 100              | 120          | 0   | 0            |
| 2       | 80               | 96           | 20  | 24           |
| 3       | 60               | 72           | 40  | 48           |
| 4       | 40               | 48           | 60  | 72           |
| 5       | 20               | 24           | 80  | 96           |
| 6       | 0                | 0            | 100 | 120          |

Hazırlanan karışımlar daha sonra paslanmaz çelik kalıba dökülerek Mohr çekme basma cihazında preslenmiştir. Daha sonra preslenen numuneler seramik ve cam plaka arasına yerleştirilerek pişirme işlemi için Heraeus marka etüve konmuş ve Şekil 3.12'deki pişirme/sıcaklık sürelerine göre düşük sıcaklıkta sinterlenmiştir. Pişirme sıcaklıkları 30 °C'den 80 °C'ye kadar her 12 dakikada 5 derece artırılarak 2 saat süreyle pişirilmiştir. 80 °C'de 1 saat beklenmiş ardından 105 °C'ye kadar 1 saatte 5 derece artırılarak 5 saat pişirilmiştir. Ardından 120 °C'de 2 saat süreyle, 120-125 °C arası 3 saat pişirilmiş ve 175 °C'de 30 dakika bekleyen numuneler 175-180 °C arasında her 30 dakikada 1 derece artırılarak 150 dakika süreyle pişirilmiş, 180 °C'de 1 saat bekletilen numuneler daha sonra kademeli olarak 180-30 °C arası her 30 dakikada 25 derece azaltılarak soğutulmuştur. Bu pişirme periyodları Şekil 3.12'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Pişirme süresince sıcaklığının değişimi

Piştirilmiş numuneler tamamen soğuduktan sonra mekanik deneyler için standartlara uygun olarak kesilmiştir. Kesme işlemleri ile ASTM E 399 normuna uygun olarak 0,5x1x4,2 boyutlarına göre numuneler hazırlanmıştır. Kesme işlemleri elmas disk ile Buehler kesicide gerçekleştirilmiştir. Kesilen numunelere daha sonra Instron cihazında 3 noktalı eğme mukavemeti testi yapılmıştır ve elde edilen değerler 3.1 no'lu formülde yerlerine yerleştirilerek eğme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\text{emax}} = 3/2 \times (P_{\text{max}} \times L) / (B \times H^2) \quad (3.1)$$

B= Numune genişliği (mm)

H= Kalınlık (mm)

L= Mesnet mesafesi (mm)

P= Yük (kg)

Numuneler daha sonra sertlik ölçümleri için MSS marka sertlik ölçüm cihazında Rockwell B (100 kg) değerleri ile ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümü Mettler Toledo cihazında numunelerin önce havadaki ve sudaki ağırlıkları hesaplandıktan sonra 3.2 formülünde yerlerine konularak yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho = A / (A - B) \times \rho_0 \quad (3.2)$$

A= Katının havadaki ağırlığı

B= Katının sıvıdaki ağırlığı

$\rho_0$ = Sıvının (su) sıcaklığa bağlı yoğunluğu

Elde edilen bu değerlerden sonra 3.3 formülüne göre numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$100/d_T = m_1/d_1 + m_2/d_2 + m_3/d_3 \quad (3.3)$$

$m_1$ = Bor karbürün kütlece % oranı

$m_2$ = Silisyum karbürün kütlece % oranı

$m_3$ = Reçinenin kütlece % oranı

$d_1$ = Bor karbürün teorik yoğunluğu

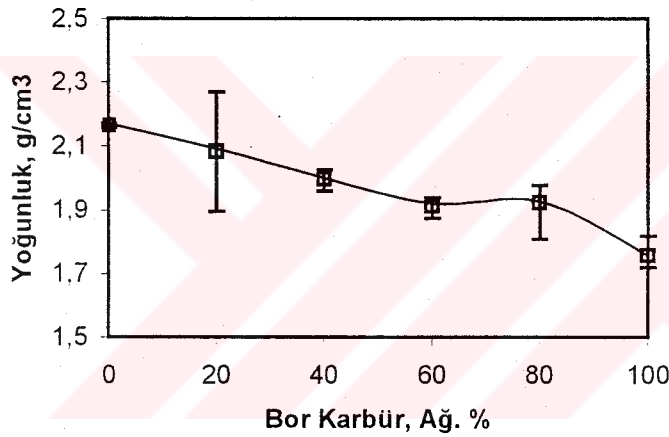
$d_2$ = Silisyum karbürün teorik yoğunluğu

$d_3$ = Reçinenin teorik yoğunluğu

## 4. DENEY SONUÇLARI

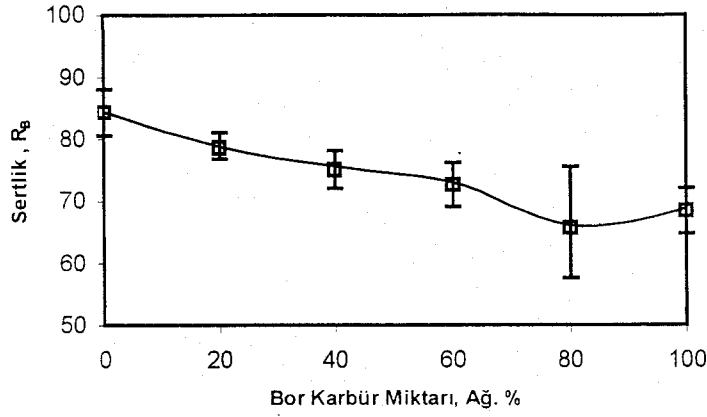
### 4.1. Birinci seri deney sonuçları

Bu seri deneylerde Tablo 3.9’da verilen bor karbür ( $B_4C-1$ ) ve silisyum karbür ( $SiC-1$ ) karışımlarına bölüm 3.3’de anlatıldığı gibi reçine katkısı yapılmış, 10 ton yükle ( $127 \text{ kg/cm}^2$ ) preslenmiş ve pişirilmiştir. Ürünün bor karbür içeriğine bağlı olarak yoğunluklardaki değişimi Şekil 4.1’de, sertlik değerlerindeki değişimi Şekil 4.2’de ve eğme mukavemetindeki değişimi Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



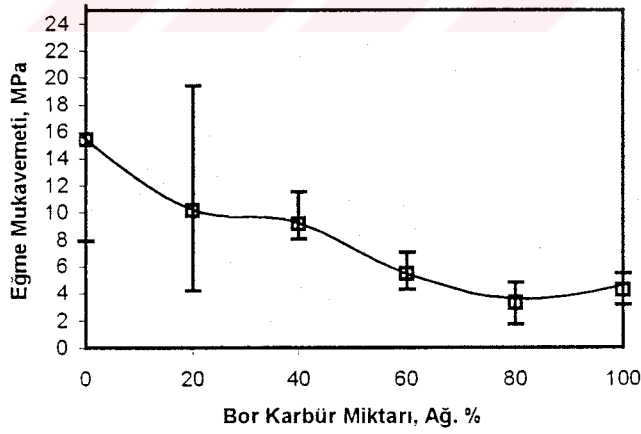
Şekil 4.1. Birinci seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bor karbür miktarı arttıkça ölçülen yoğunluk değerleri azalmaktadır.  $2.17 \text{ g/cm}^3$  olan en yüksek yoğunluk değerine % 100 silisyum karbür yapısında ulaşılmıştır. % 100 bor karbür yapısında ise yoğunluk  $1.76 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2. Birinci seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sertliğin bor karbür miktarının artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değerine % 100 silisyum karbürden oluşan yapıda 84.3 Rockwell-B sertlik değerinde ulaşılmıştır. % 100 bor karbür miktarında ise 68.4 Rockwell-B sertlik değeri bulunmuştur.

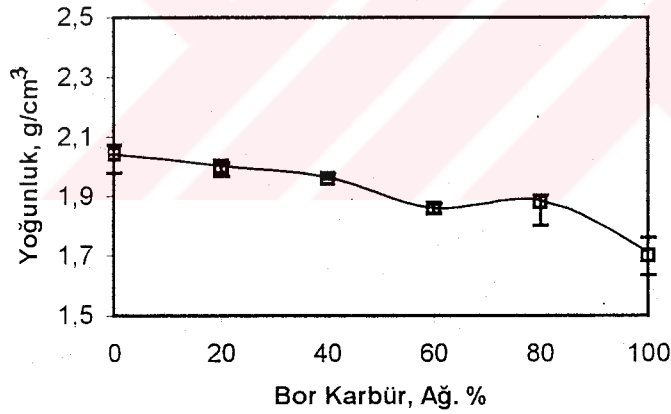


Şekil 4.3. Birinci seri deneylerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.3’de görüldüğü eğme mukavemetinin bor karbür miktarının artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek eğme mukavemeti değeri % 100 silisyum karbür miktarında 15.93 MPa bulunmuştur. %100 bor karbür miktarında ise 4.21 MPa ölçülmüştür.

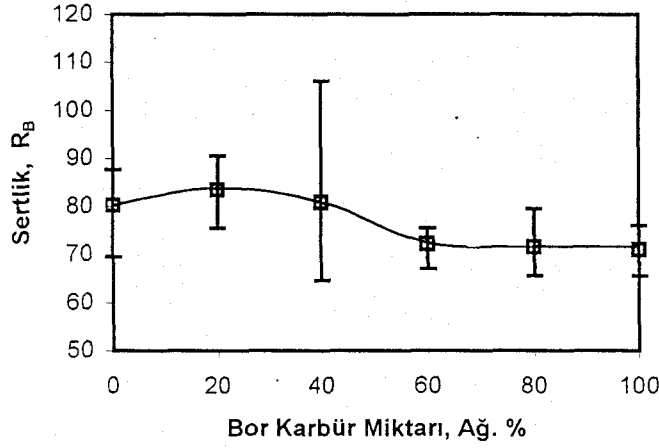
#### 4.2 İkinci seri deney sonuçları

Bu seri deneylerde Tablo 3.9’da verilen bor karbür ( $B_4C-1$ ) ve silisyum karbür ( $SiC-1$ ) karışımlarına bölüm 3.3’de anlatıldığı gibi reçine katkısı yapılmış, 20 ton ( $255 \text{ kg/cm}^2$ ) yük altında preslenmiş ve pişirilmiştir. Ürünün bor karbür içeriğine bağlı olarak yoğunluklardaki değişimi Şekil 4.4’de, sertlik değerlerindeki değişim Şekil 4.5’de, eğme mukavemetindeki değişim Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



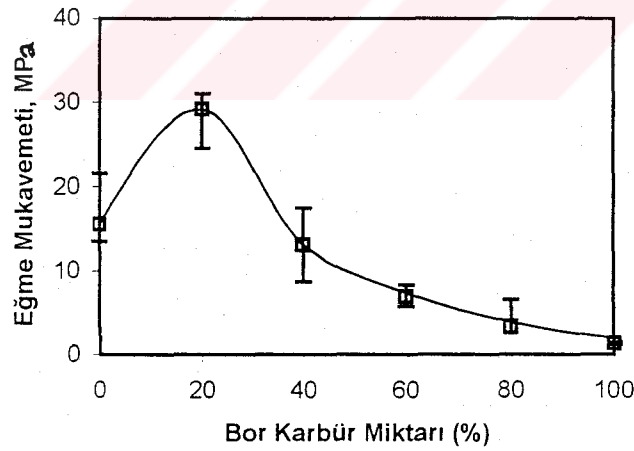
Şekil 4.4. İkinci seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi bor karbür miktarının artmasıyla birlikte yoğunlukta azalma olmuştur.  $2.04 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülen en yüksek yoğunluk değerine % 100 silisyum karbür yapısında ulaşılmıştır. % 100 bor karbür yapısında ise yoğunluk  $1.7 \text{ g/cm}^3$  ölçülmüştür.



**Şekil 4.5.** İkinci seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.5’de en yüksek sertlik değeri % 20  $B_4C$  içeren numunede 83.3  $R_B$  değerinde ölçülmüştür. % 100  $B_4C$  içeren numunede 71  $R_B$  değerine düşmüştür.



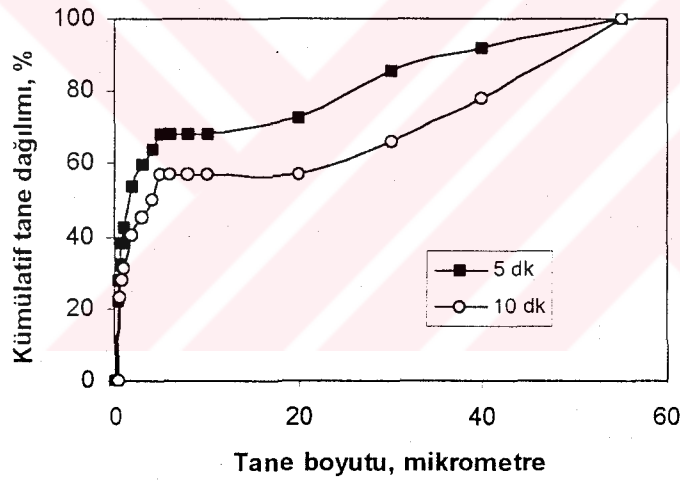
**Şekil 4.6.** İkinci seri deneylerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi eğme mukavemeti değerleride % 20 bor karbür içeren numunede 29.13 MPa değerine ulaşmış, ancak borkarbür içeriğinin artırılması ile

mukavemet deęerleri dūřmūřtır. %100 bor karbūr ięeren numunede ise 1.31 MPa'lık eęme mukavemeti deęerleri bulunmuřtır.

#### 4.3. Őnc seri deney sonuçları

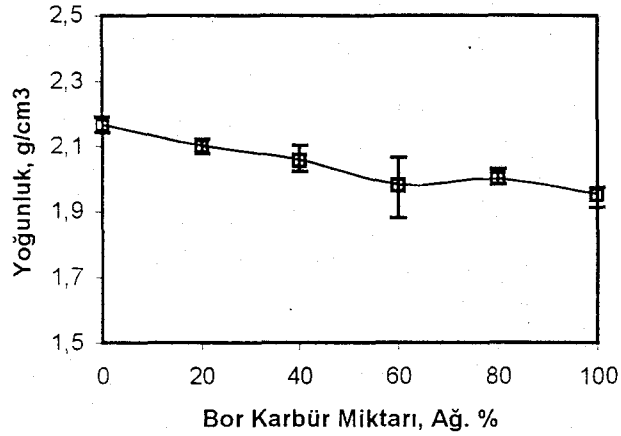
Bu seri deneylerde Tablo 3.9'da verilen bor karbūr ( $B_4C-2$ ) ve silisyum karbūr ( $SiC-2$ ) karışımlarına bölüm 3.3'de anlatıldığı gibi reçine katkısı yapılmıştır.  $SiC-2$  olarak adlandırılan numune  $SiC-1$ 'in öğütülmesiyle elde edilmiştir. Bu seride kullanılan  $SiC-2$  tozu 5 ve 10'ar dakikalık kuru öğütme işlemlerinden sonra Shimadzu cihazında tane boyutu analizleri yapılmış ve analiz sonuçları şekil 4.7'de verilmiştir. Görüldüęü gibi 5 dakikalık öğütme süresi 5  $\mu m$  altı boyutu toplam miktarın %.70'ine ulaşmıştır.



şekil 4.7. Silisyum karbür tozlarının öğütme sürelerine bağlı olarak tane boyut dağılımları.

5 dakika üzerinde yapılan öğütme işlemlerinde aglomerasyon meydana gelmiş ve bu sonuca dayanarak üçüncü seri kompozit hazırlamada 5 dakika ğtlmş  $SiC-2$  olarak adlandırılan silisyum karbür tozu kullanılmıştır. Hazırlanmış karışımlar 20 ton ( $255 \text{ kg/cm}^2$ ) yük altında preslenmiş ve pişirilmiştir. Őrnlerin bor karbür içeriğine bağlı

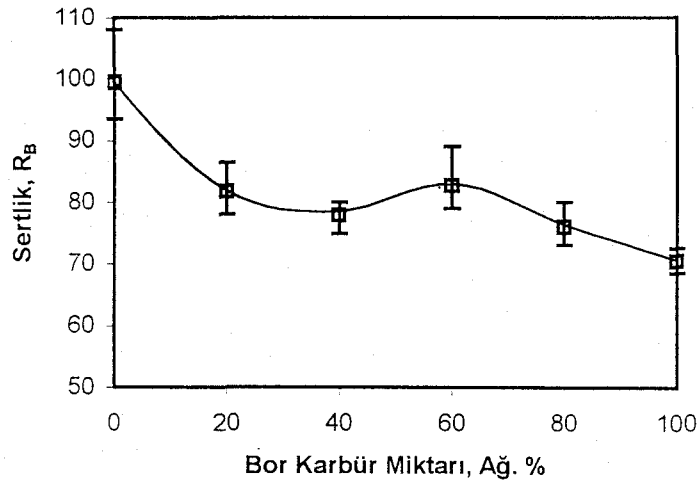
olarak yoğunluk, sertlik, eğme mukavemetlerindeki değişimler Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



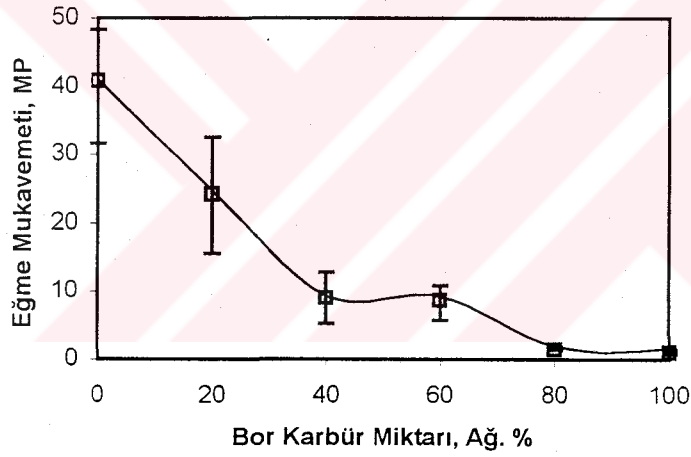
**Şekil 4.8.** Üçüncü seri deneylerde yoğunluğun bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.8'den bor karbür miktarının artmasıyla yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. % 100 silisyum karbür yapısında  $2.16 \text{ g/cm}^3$  olan yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Oysa % 100 bor karbür yapısında yoğunluk  $1.95 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi sertlik değerleri bor karbür miktarının artmasıyla birlikte düşmektedir. En yüksek sertlik değeri % 100 silisyum karbür içeren numunede 99.35 Rockwell B olarak ölçülmüştür. Artan bor karbür miktarıyla sertlik % 80 bor karbür içeren kompozitte 76 Rockwell B olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Üçüncü seri deneylerde sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi



Şekil 4.10. Üçüncü seri deneylerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi eğme mukavemeti bor karbür miktarının artmasıyla düşmektedir. Eğme mukavemeti değerleri en yüksek % 100 silisyum karbür içeren numunelerde 40.77 MPa değerine ulaşmış ancak bor karbür miktarının artmasıyla

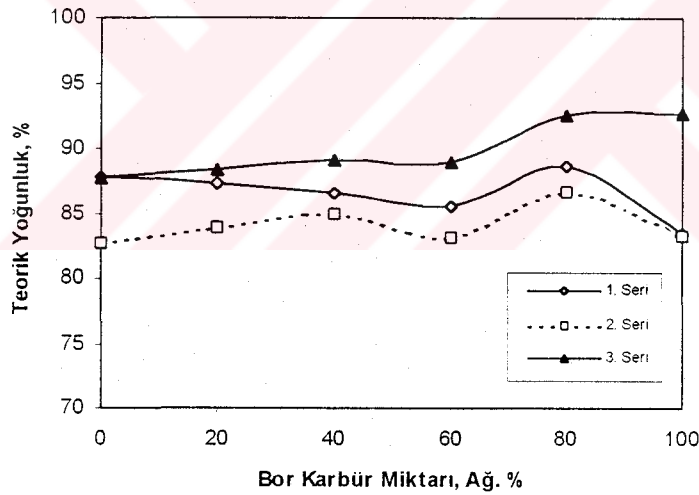
birlikte eğme mukavemeti değerleri düşerek % 100 bor karbürden oluşan numune için 1.03 MPa olarak ölçülmüştür.



## 5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

### 5.1. Yoğunluk Ölçüm Değerlerinin İrdelenmesi

Her üç seride elde edilen numuneler üzerinde yapılan yoğunluk ölçüm deneyleri sonucunda ölçülen yoğunluk değerleri 3.3 no.'lu eşitlikle hesaplanmış teorik yoğunluklara bölünerek teorik yoğunluklara yaklaşım değerleri bulunmuş ve Şekil 5.1'de verilmiştir.



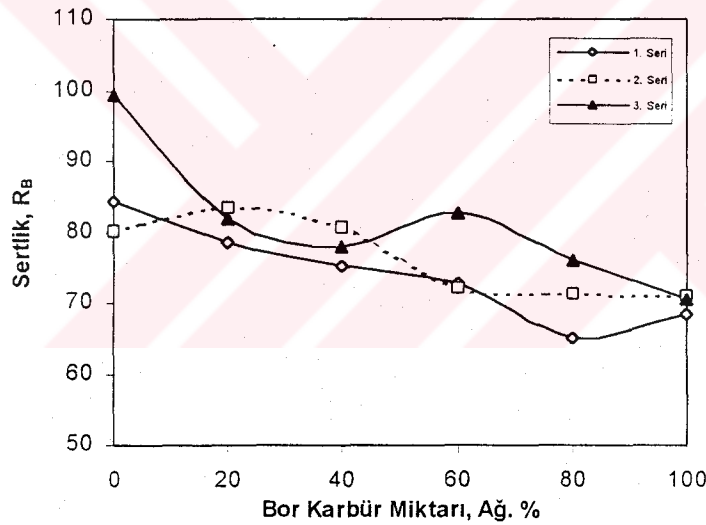
Şekil 5.1. Teorik yoğunluğa yaklaşım değerlerinin bor karbür miktarına bağlı olarak değişimi

Elde edilen teorik yoğunluk sonuçlarına göre her üç seride de % 80 bor karbür oranında en yüksek yoğunluğa ulaşılmıştır. Birinci ve ikinci seride aynı boyutta tozlar farklı basınçlar uygulanarak sıkıştırılmış, ancak artan sıkıştırma basıncıyla yoğunluklarda bir

artış gözlenmemiştir. Üçüncü seride ise birinci ve ikinci seride kullanılan tozlardan daha ince boyutlu tozlar kullanılmış ve ikinci seriyle aynı basınç uygulanmıştır. Üçüncü seride elde edilmiş % 60–80-100 bor karbür oranlarında diğer serilere göre daha yüksek yoğunluklara ulaşılmıştır. Her üç seride de % 80 bor karbür oranından % 100 bor karbür oranına doğru bir düşüş gözlenmiştir. İnce tozların kullanıldığı şartlarda yoğunluğu daha yüksek kompozitler üretilmiştir.

## 5.2. Sertlik Ölçüm Değerlerinin İrdelenmesi

Her üç seride elde edilen numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçüm değerleri Rockwell B skalasında Şekil 5.2’de verilmiştir.

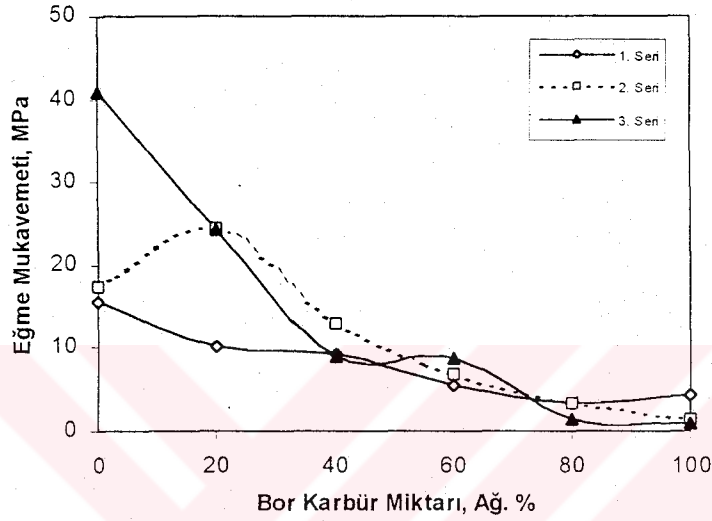


Şekil 5.2. Sertliğin bor karbür miktarına bağlı değişimi

Silisyum karbür-bor karbür kompozitlerinde bor karbür içeriğinin artırılmasıyla her üç seride de sertlik değerlerinde azalma gözlenmiştir. Aynı toz boyutunda daha yüksek presleme basınçlarının kullanılması sertlik değerlerini fazla değiştirmemiştir. Ancak daha inceli taneli tozların kullanılması daha yüksek sertlik değerlerinin ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır.

### 5.3. Eğme Mukavemeti Değerlerinin İrdelenmesi

Tüm serilerde elde edilen eğme mukavemeti değerleri Şekil 5.3'de toplu olarak verilmiştir.

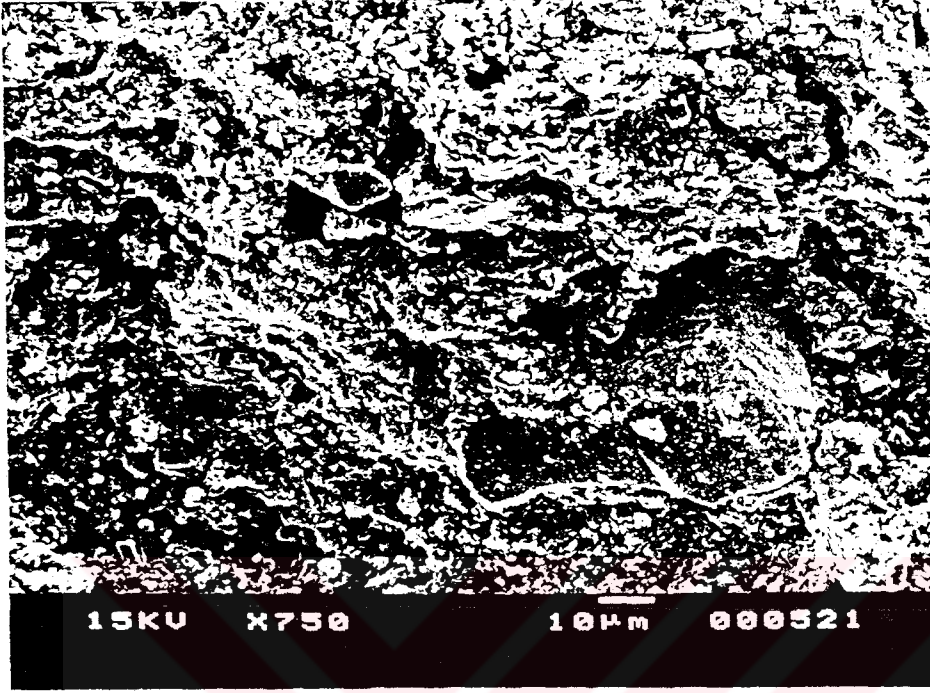


Şekil 5.3. Eğme mukavemetinin bor karbür miktarına bağlı değişimi

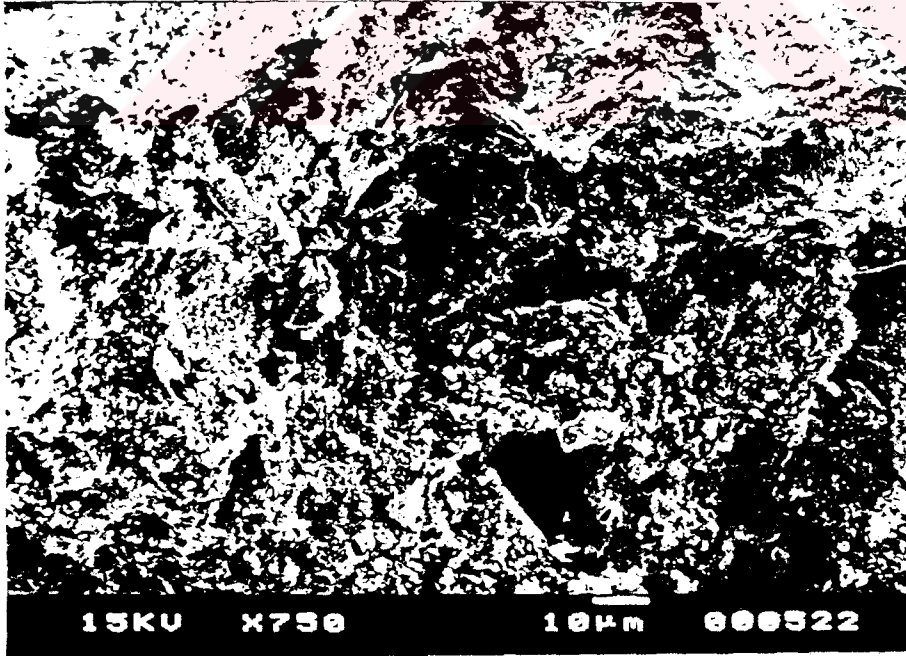
Elde edilen eğme mukavemeti sonuçlarına göre birinci ve üçüncü serilerde bor karbür miktarı arttıkça eğme mukavemeti değerleri düşmektedir. Sadece ikinci seride ise % 20 bor karbür miktarında mukavemet değeri artış göstermiş ancak bor karbür miktarının artmasıyla diğer serilere benzer şekilde mukavemet değerleri azalmıştır. Bu durum literatürdeki çalışmalarla da paralellik göstermiştir [17,19].

Yoğunluk ve sertlik değerlerinde olduğu gibi ince taneli toz kullanımı özellikle daha yüksek silisyum karbür içerikli numuneler için daha yüksek değerler vermiştir.

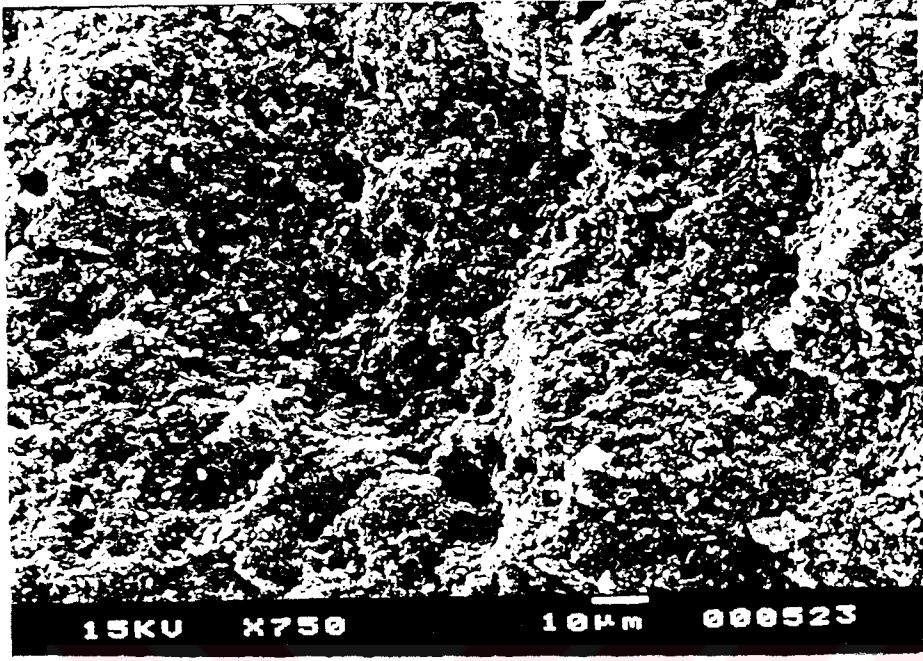
#### 5.4. SEM Fotoğraflarının İrdelenmesi



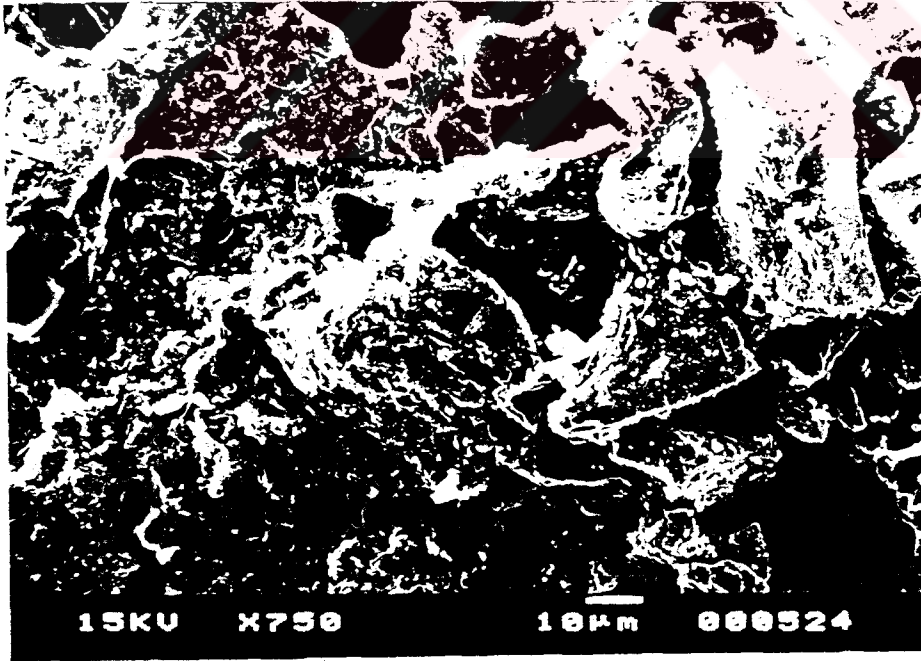
Şekil 5.4. % 40 B<sub>4</sub>C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750)



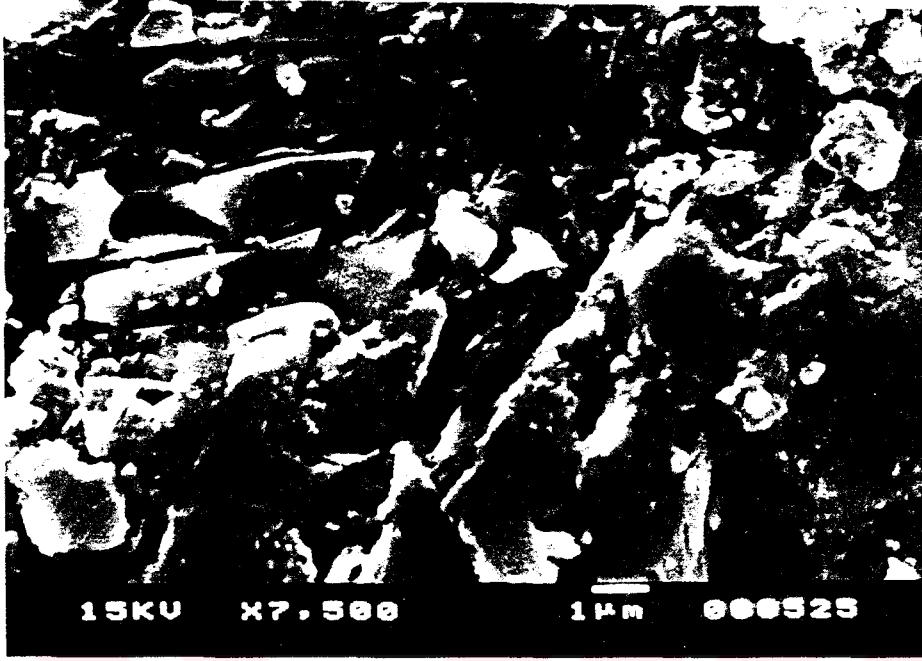
Şekil 5.5. % 60 B<sub>4</sub>C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750)



Şekil 5.6. % 100 B<sub>4</sub>C içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750)



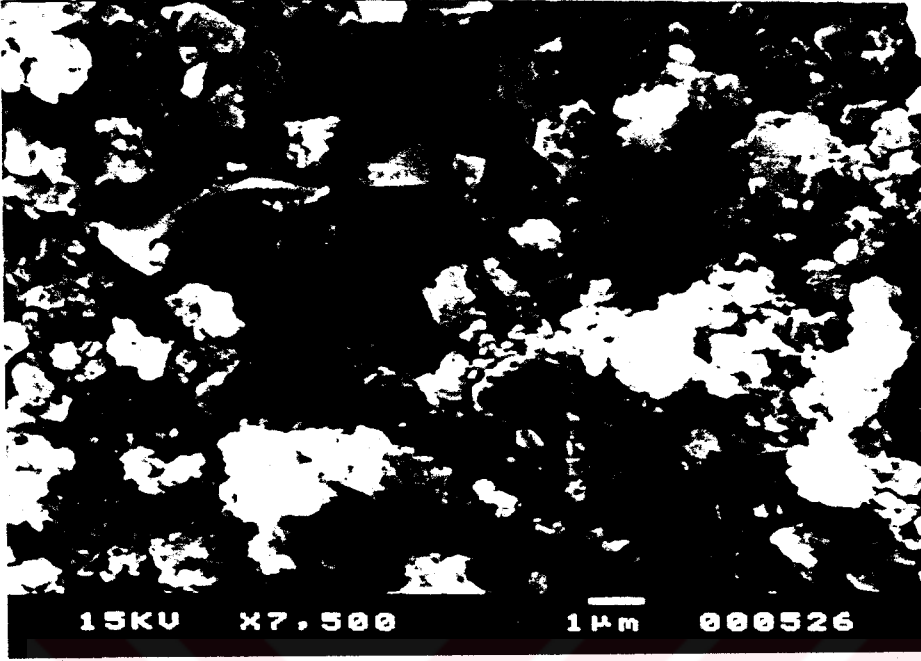
Şekil 5.7. %100 SiC içeren numunenin kırık yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 750)



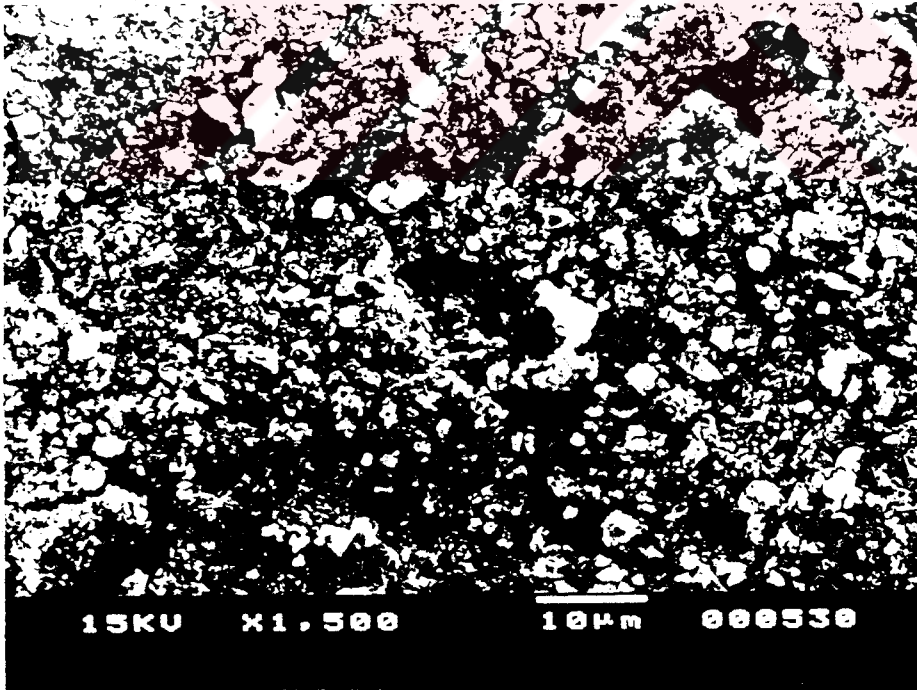
Şekil 5.8. % 100 SiC içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500)



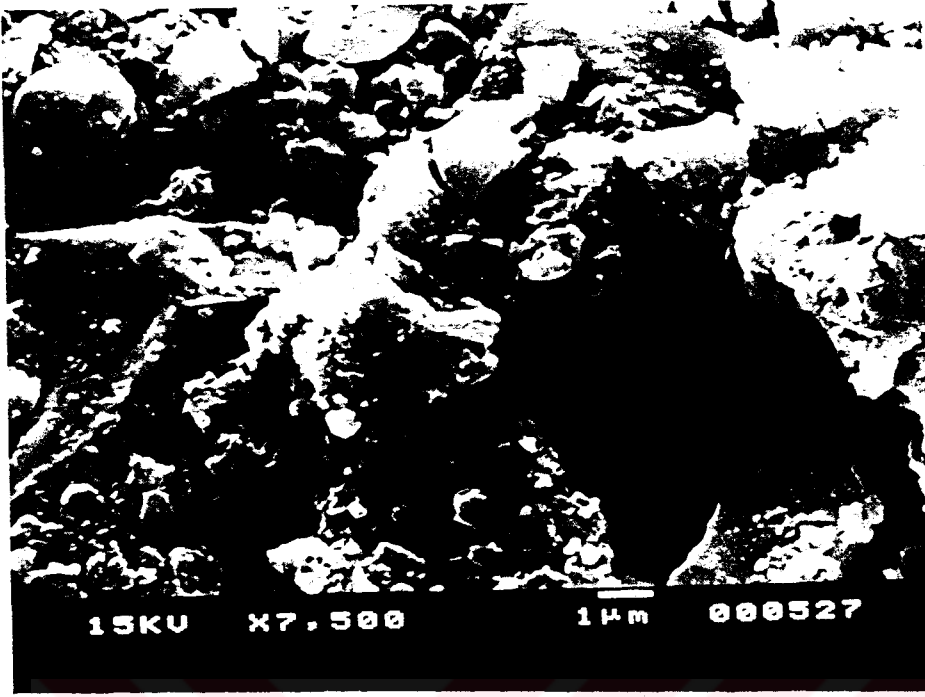
Şekil 5.9. % 100 SiC içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1500)



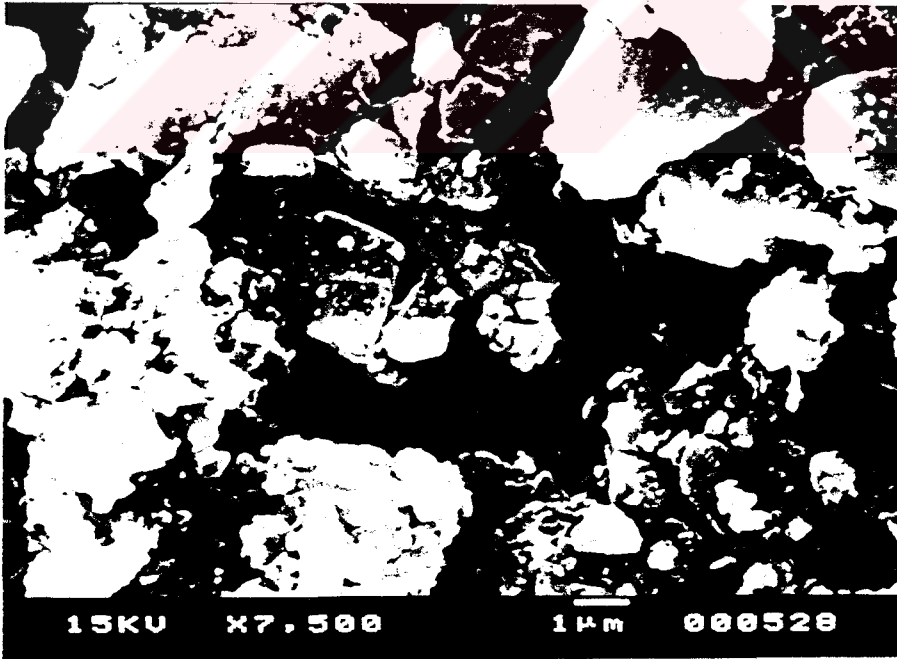
Şekil 5.10. % 100 B<sub>4</sub>C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500)



Şekil 5.11. % 100 B<sub>4</sub>C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 1500)



Şekil 5.12. % 60 B<sub>4</sub>C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500)



Şekil 5.13. % 40 B<sub>4</sub>C içeren numunenin yan yüzeyinin SEM fotoğrafı (X 7500)

SEM fotoğraflarında %40 B<sub>4</sub>C ve % 60 B<sub>4</sub>C içeren yapılarda kırık ve yan yüzeylerde görülen poroziteler sonucu ve reçinenin homojen şekilde dağılmamasından kaynaklanan düzensizlikler görülmektedir. %40 B<sub>4</sub>C ve % 60 B<sub>4</sub>C içeren yapılarda bor ve silis taneleri düzenli bir şekilde karışmamıştır. %100 B<sub>4</sub>C ve % 100 SiC yapılarda ise taneler arasında yaşanan düzensizlikler görülmemiştir. Sadece reçineye bağlı olarak karışımdan kaynaklanan boşluklar saptanmıştır. % 100 B<sub>4</sub>C içeren yapıda bor karbür taneleri arasında homojen bir dağılım saptanmış ancak reçinenin taneler arası homojen dağılmamasından kaynaklanan poroziteler görülmüştür.



## 6. GENEL SONUÇLAR

1. Bu çalışmanın amacı bor karbür-silisyum karbür ve fenolik bazlı novalak hegzamin reçine katkılı kompozitlerin düşük sıcaklık sinterlemesi sonucu oluşan numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi olmuştur

2. % 0-20-40-60-80-100 bor karbür içeren silisyum karbür karışımları reçine ilavesinden sonra preslenerek şekillendirilmiş ve 180 °C’de pişirilmiştir. Deneyler üç farklı seri halinde yapılmıştır. Birinci ve ikinci serilerde hazırlanan karışımlar sırasıyla 127 ve 255 kg/cm<sup>2</sup>’lik yükler uygulanarak sinterlenmiş ve pişirilmiştir. Üçüncü seride ise daha ince tozlar yine 255 kg/cm<sup>2</sup>’lik yüklerle sıkıştırıldıktan sonra sinterlenmiştir. Elde edilen numuneler yoğunluk, sertlik ve eğme mukavemeti değerlerini belirlemek amacıyla incelenmiştir.

3. Birinci seri numunelerde bor karbür miktarı arttıkça ölçülen yoğunluk değerleri azalmaktadır. 2.17 g/cm<sup>3</sup> olan en yüksek yoğunluk değerine % 100 silisyum karbür yapısında ulaşılmıştır. % 100 bor karbür yapısında ise yoğunluk 1.76 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. İkinci seri numunelerde bor karbür miktarının artmasıyla birlikte yoğunlukta azalma olmuştur. 2.04 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülen en yüksek yoğunluk değerine % 100 silisyum karbür yapısında ulaşılmıştır. %100 bor karbür yapısında ise yoğunluk 1.7 g/cm<sup>3</sup> ölçülmüştür. Üçüncü seri numunelerde bor karbür miktarının artmasıyla yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. % 100 silisyum karbür yapısında 2.16 g/cm<sup>3</sup> olan yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Oysa % 100 bor karbür yapısında yoğunluk 1.95 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Elde edilen yoğunluk sonuçlarının teorik yoğunluğa bölünmesiyle elde edilen sonuçlara göre her üç seride de % 80 bor karbür oranında en yüksek yoğunluk yüzdesine ulaşılmıştır. Birinci ve ikinci seride aynı boyutta tozlar farklı basınçlar uygulanarak sıkıştırılmış, ancak artan sıkıştırma basıncıyla yoğunluklarda bir

artış gözlenmemiştir. Üçüncü seride ise birinci ve ikinci seride kullanılan tozlardan daha ince boyutlu tozlar kullanılmış ve ikinci seriyle aynı basınç uygulanmıştır. Üçüncü seride elde edilmiş % 60-80-100 bor karbür oranlarında diğer serilere göre daha yüksek yoğunluklara ulaşılmıştır. Her üç seride de % 80 bor karbür oranından % 100 bor karbür oranına doğru bir düşüş gözlenmiştir. İnce tozların kullanıldığı şartlarda yoğunluğu daha yüksek kompozitler üretilebilmiştir.

4. Birinci seri numunelerde sertliğin bor karbür miktarının artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değerine % 100 silisyum karbürden oluşan yapıda 84.3 Rockwell-B değeriyle ulaşılmıştır. % 100 bor karbür miktarında ise 68.4 Rockwell-B sertlik değeri bulunmuştur. İkinci seri numunelerde sertlik değerleride bor karbür miktarının artmasıyla azalmaktadır. En yüksek sertlik değeri % 20 bor karbür içeren numunede 83.3 Rockwell B değerinde ölçülmüştür. Artan bor karbür içeriğiyle bu değer azalarak % 100 bor karbür içeren numunede 71 Rockwell B değerine düşmüştür. Üçüncü seri numunelerde sertlik değerleri bor karbür miktarının artmasıyla birlikte düşmektedir. En yüksek sertlik değeri % 100 silisyum karbür içeren numunede 99.35 Rockwell B olarak ölçülmüştür. Artan bor karbür miktarıyla sertlik % 80 bor karbür içeren kompozitte 76 Rockwell B olarak belirlenmiştir. Silisyum karbür-bor karbür kompozitlerinde bor karbür içeriğinin artırılmasıyla her üç seride de sertlik değerlerinde azalma gözlenmiştir. Aynı toz boyutunda daha yüksek presleme basınçlarının kullanılması sertlik değerlerini fazla değiştirmemiştir. Ancak daha inceli taneli tozların kullanılması daha yüksek sertlik değerlerinin ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır.

5. Birinci seri numunelerde eğme mukavemetinin bor karbür miktarının artmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek eğme mukavemeti değeri % 100 silisyum karbür miktarında 15.93 MPa bulunmuştur. %100 bor karbür miktarında ise 4.21 MPa ölçülmüştür. İkinci seri numunelerde eğme mukavemeti değerleride % 20 bor karbür içeren numunede 29.13 MPa değerine ulaşmış, ancak borkarbür içeriğinin artırılması ile mukavemet değerleri düşmüştür. %100 bor karbür içeren numunede ise 1.31 MPa'lık eğme mukavemeti değerleri bulunmuştur. Üçüncü seri numunelerde eğme mukavemeti bor karbür miktarının artmasıyla düşmektedir. Eğme mukavemeti değerleri en yüksek %

100 silisyum karbür içeren numunelerde 40.77 MPa değerine ulaşmış ancak bor karbür miktarının artmasıyla birlikte eğme mukavemeti değerleri düşerek % 100 bor karbürden oluşan numune için 1.03 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen eğme mukavemeti sonuçlarına göre birinci ve üçüncü serilerde bor karbür miktarı arttıkça eğme mukavemeti değerleri düşmektedir. Sadece ikinci seride ise % 20 bor karbür miktarında mukavemet değeri artış göstermiş ancak bor karbür miktarının artmasıyla diğer serilere benzer şekilde mukavemet değerleri azalmıştır.

Yoğunluk ve sertlik değerlerinde olduğu gibi ince taneli toz kullanımı özellikle daha yüksek silisyum karbür içerikli numuneler için daha yüksek değerler vermiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Schwartz, Mel M.**, 1997, Composite Materials, Vol 1, Prentice-Hall, pp 1, 2, 5.
- [2] **Bykuncu, Murat Güçlü**, 1998, İleri Teknoloji Seramiklerinin Uygulama Alanları, Yıl İçi Projesi, Yıldız Teknik niversitesi.
- [3] [www.ukabrasives.com/B4Cinfo.html](http://www.ukabrasives.com/B4Cinfo.html).
- [4] [www.exolon.com/carbolon.html](http://www.exolon.com/carbolon.html).
- [5] [www.ukabrasives.com/SiCinfo.html](http://www.ukabrasives.com/SiCinfo.html).
- [6] **Schwartz**, 1984, Composite Materials Handbook, Mc Graw-Hill, pp 1.2, 1.5, 1.6.
- [7] **Schneider, Samuel J.**, 1991, Ceramics&Glasses, Engineering Materials Handbook Vol 4, ASM Int, pp 804-808, 360, 47-48, 188, 191, 330, 360.
- [8] **Mc Colm**, 1983, Ceramic Science for Materials Technologists, pp 100, 104-107.
- [9] **Weimer, Alan W.**, 1997, Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing, Chapman-Hill, pp 10 - 15.
- [10] **Gekinli, A. Emel**, 1991, İleri Teknoloji Malzemeleri, İT Matbaası, pp 121-126, 131-133.

[11] **Srinivasan, M.**, 1989, The Silicon Carbide Family Of Structural Ceramics, Academic Press, Inc, pp 100-148.

[12] **Vassen, Robert; Stover, Detlev**, Processing and Properties of Nanograin Silicon Carbide, 1999, Journal of American Ceramics Society, Vol 82, pp 2585-2593.

[14] **Brinson, H.F.; Reinhart, Theodore J.**, 1990, Adhesives & Sealants, Engineering Materials Handbook, Vol 3, ASM Int, pp 24, 104-105

[15] **Ulrich, Henry**, 1982, Introduction to Industrial Polymers, Hanser Publishers, pp 118-120.

[16] **Saunders, K. J.**, 1988, Organic Polymer Chemistry, 2<sup>nd</sup> Ed., Chapman-Hall, pp 316-335

[17] **Schwetz, Karl A.; Reinmuth, Klaus; Hunold, Klaus; Iseman, Franz**, 1983, US Patent 4,524,138., Substantially pore-free sintered polycrystalline articles of alpha-silicon carbide, boron carbide and free carbon and process for their manufacture

[18] **Talmy, Inna G.; Zaykoski, James A.**, 1998, US Patent 5,894,066., Boron carbide-silicon carbide ceramics

[19] **Lipp, Alfred; Reinmuth, Klaus; von Struensee, Detlef**, 1984, US Patent 4,684,480., Ceramic bonded neutron absorber plates of boron carbide and free carbon

[20] **Watchman, Jr. John B.**, 1989, Structural Ceramics, Treatise on Materials Science and Technology, Vol 29, pp 189-226

[21] **Taylor; Kenneth M., Palicka; Richard J.**, 1974, US Patent 3,796,564., Dense Carbide Composite Bodies and Method of Making Same

[22] **Kondakov; Stanislav F.**, 1994, US Patent 5,554,328., Method of making heat and impact resistant composite ceramic material

[23] **Prochazka; Svante, Coblenz; William S.**, 1976, US Patent 4,081,284., Silicon carbide-boron carbide sintered body



Tablo A.1. 1. Seri Deney Sonuçları

| Numune No | %B <sub>4</sub> C | Yoğunluk g/cm <sup>3</sup> | Sertlik R <sub>B</sub> | Eğme Mukavemeti MPa |
|-----------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|
| 1         | 0                 | 2,174                      | 88,1                   | 7,889               |
|           |                   | 2,156                      | 83,1                   | 17,41               |
|           |                   | 2,156                      | 85,4                   | 7,53                |
|           |                   | 2,174                      | 80,6                   | 32,57               |
|           |                   | Ort: 2,165                 | Ort:84,3               | 13,67               |
|           |                   | SS: 0,01                   | SS:3,2                 | 18,31               |
|           |                   |                            |                        | 10,34               |
| 2         | 20                |                            |                        | Ort:15,39           |
|           |                   |                            |                        | SS:8,7              |
|           |                   | 2,098                      | 78,7                   | 11,93               |
|           |                   | 2,087                      | 77,5                   | 10,15               |
|           |                   | 2,069                      | 76,9                   | 5,17                |
|           |                   | 2,074                      | 81,1                   | 5,3                 |
|           |                   | Ort: 2,082                 | Ort:78,55              | 4,2                 |
|           |                   | SS: 0,013                  | SS:1,857               | 8,18                |
|           |                   |                            |                        | 19,42               |
|           |                   |                            |                        | 18,18               |
|           |                   |                            |                        | 9,54                |
|           |                   |                            |                        | 7,89                |
|           |                   |                            |                        | 14,98               |
|           |                   |                            |                        | 14,58               |
| 3         | 40                |                            |                        | 12,49               |
|           |                   |                            |                        | Ort:10,14           |
|           |                   |                            |                        | SS:4,89             |
|           |                   | 1,835                      | 74                     | 21,66               |
|           |                   | 2,1855                     | 73,5                   | 16,47               |
|           |                   | 2,132                      | 83,5                   | 16,33               |
|           |                   | 1,8121                     | 80                     | 24,55               |
|           |                   | 2,03                       | 82                     | 23,85               |
|           |                   | Ort:1,99892                | 76                     | 19,75               |
|           |                   | SS: 0,169                  | 70                     | 21,72               |
|           |                   |                            | 73,5                   | Ort:20,62           |
|           |                   |                            | 69,5                   | SS:3,28             |
|           |                   |                            | 70                     |                     |
|           |                   |                            | 74                     |                     |
| 4         | 60                |                            | 75                     |                     |
|           |                   |                            | Ort:75,08              |                     |
|           |                   |                            | SS:4,61                |                     |
|           |                   | 1,939                      | 69,08                  | 3,45                |
|           |                   | 1,921                      | 76,2                   | 4,27                |
|           |                   | 1,922                      | 74                     | 6,39                |
|           |                   | 1,873                      | 71,4                   | 6,98                |
|           |                   | Ort:1,913                  | Ort:72,67              | 6,12                |
|           |                   | SS: 0,028                  | SS:3,09                | Ort:5,44            |
|           |                   |                            |                        | SS:1,5              |
| 5         | 80                | 1,914                      | 63,4                   | 4,41                |
|           |                   | 1,958                      | 57,6                   | 4,68                |
|           |                   | 1,979                      | 75,6                   | 2,71                |
|           |                   | 1,807                      | 64,1                   | 2,67                |
|           |                   | 1,964                      | Ort:65,17              | 3,91                |
|           |                   | Ort:1,924                  | SS:7,53                | 2,44                |
|           |                   | SS: 0,069                  |                        | 3,26                |
|           |                   |                            |                        | 3,44                |
|           |                   |                            |                        | 3,19                |
|           |                   |                            |                        | 3,53                |
|           |                   |                            |                        | 4,5                 |
|           |                   |                            |                        | 2,89                |
|           |                   |                            |                        | 2,88                |
|           |                   |                            |                        | 1,72                |
|           |                   |                            |                        | 2,16                |
|           |                   |                            |                        | 2,41                |
|           |                   |                            |                        | 4,81                |
| 6         | 100               |                            |                        | Ort:3,27            |
|           |                   |                            |                        | SS:0,92             |
|           |                   | 1,753                      | 64,7                   | 4,28                |
|           |                   | 1,817                      | 69,5                   | 4,92                |
|           |                   | 1,8                        | 67,5                   | 5,43                |
|           |                   | 1,718                      | 72                     | 3,82                |
|           |                   | 1,688                      | Ort:68,42              | 4,19                |
|           |                   | 1,755                      | SS:3,09                | 4                   |
|           |                   | Ort:1,755                  |                        | 3,13                |
|           |                   | SS: 0,048                  |                        | 3,92                |
|           |                   |                            |                        | Ort:4,21            |
|           |                   |                            |                        | SS:0,7              |

Tablo A.2. 2. Seri Deney Sonuçları

| Numune No | %B <sub>4</sub> C | Yoğunluk g/cm <sup>3</sup> | Sertlik R <sub>B</sub> | Eğme Mukavemeti MPa |
|-----------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|
| 1         | 0                 | 2,04                       | 69,5                   | 15,94               |
|           |                   | 2,07                       | 84                     | 16,39               |
|           |                   | 1,979                      | 81                     | 13,88               |
|           |                   | 2,07                       | 87,5                   | 13,65               |
|           |                   | Ort:2,04                   | 80                     | 15,25               |
|           |                   | SS:0,042                   | 73                     | 13,45               |
|           |                   |                            | 84                     | 13,47               |
|           |                   |                            | 79,5                   | 21,49               |
|           |                   |                            | 84,5                   | Ort:15,44           |
|           |                   |                            | 78                     | SS:2,7              |
| 2         | 20                |                            | Ort:80,1               |                     |
|           |                   |                            | SS:5,5                 |                     |
|           |                   | 2,011                      | 81,5                   | 28,28               |
|           |                   | 2                          | 90,5                   | 30,79               |
|           |                   | 1,968                      | 84                     | 29,64               |
|           |                   | Ort:2                      | 84                     | 30,69               |
|           |                   | SS:0,02                    | 84,5                   | 24,51               |
|           |                   |                            | 75,5                   | 29,04               |
|           |                   |                            | Ort:83,33              | 30,66               |
|           |                   |                            | SS:4,86                | Ort:29,13           |
| 3         | 40                |                            |                        | SS:2,23             |
|           |                   | 1,959                      | 95                     | 17,4                |
|           |                   | 1,958                      | 89                     | 12,09               |
|           |                   | 1,976                      | 106                    | 8,67                |
|           |                   | Ort:1,96                   | 64,5                   | 13,49               |
|           |                   | SS:0,01                    | 78                     | 11,77               |
|           |                   |                            | 79                     | 15,7                |
|           |                   |                            | 74,5                   | 11,83               |
|           |                   |                            | 80,5                   | Ort:12,99           |
|           |                   |                            | 78,5                   | SS:2,86             |
| 4         | 60                |                            | Ort:80,78              |                     |
|           |                   |                            | SS:12,19               |                     |
|           |                   | 1,848                      | 67                     | 8,29                |
|           |                   | 1,857                      | 75,5                   | 6,05                |
|           |                   | 1,876                      | 74,5                   | 7,13                |
|           |                   | 1,8421                     | 71,5                   | 7,63                |
|           |                   | Ort:1,86                   | 71,5                   | 7,16                |
|           |                   | SS:0,01                    | 73                     | 5,97                |
|           |                   |                            | Ort:72,16              | 5,72                |
|           |                   |                            | SS:2,99                | Ort:6,85            |
| 5         | 80                |                            |                        | SS:0,96             |
|           |                   | 1,801                      | 67,5                   | 4,15                |
|           |                   | 1,848                      | 65,5                   | 2,82                |
|           |                   | 1,902                      | 79,5                   | 3,42                |
|           |                   | 1,891                      | 74                     | 3,5                 |
|           |                   | 1,894                      | 68                     | 3,14                |
|           |                   | 1,897                      | 74,5                   | 2,505               |
|           |                   | 1,8999                     | Ort:71,49              | Ort:3,25            |
|           |                   | Ort:1,88                   | SS:5,35                | SS:0,575            |
|           |                   | SS:0,037                   |                        |                     |
| 6         | 100               | 1,76                       | 75                     | 1,37                |
|           |                   | 1,703                      | 71                     | 1,18                |
|           |                   | 1,633                      | 69                     | 1,3                 |
|           |                   | Ort:1,70                   | 76                     | 1,27                |
|           |                   | SS:0,063                   | 65,5                   | 1,43                |
|           |                   |                            | 69,5                   | Ort:1,31            |
|           |                   |                            | Ort:70,99              | SS:0,095            |
|           |                   |                            | SS:3,93                |                     |

**Tablo A.3. 3. Seri Deney Sonuçları**

| Numune No | %B <sub>1</sub> C | Yoğunluk g/cm <sup>3</sup> | Sertlik R <sub>B</sub> | Eğme Mukavemeti MPa |
|-----------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|
| 1         | 0                 | 2,14                       | 93,5                   | 48,27               |
|           |                   | 2,15                       | 99,5                   | 36,85               |
|           |                   | 2,18                       | 95,5                   | 46,16               |
|           |                   | 2,15                       | 98,5                   | 31,6                |
|           |                   | 2,19                       | 108                    | 42,64               |
|           |                   | Ort:2,16                   | 102                    | 42,58               |
|           |                   | SS:0,02168                 | 99                     | 45,34               |
|           |                   |                            | 100                    | 32,6                |
|           |                   |                            | 95                     | Ort:40,77           |
|           |                   |                            | 102,5                  | SS:6,315            |
| 2         | 20                |                            | Ort:99,35              |                     |
|           |                   |                            | SS:4,23                |                     |
|           |                   | 2,11                       | 82,5                   | 29,28               |
|           |                   | 2,12                       | 82,5                   | 22,36               |
|           |                   | 2,1                        | 78                     | 32,49               |
|           |                   | 2,12                       | 79                     | 23,49               |
|           |                   | 2,07                       | 81,5                   | 27,5                |
|           |                   | Ort:2,10                   | 86,5                   | 18,81               |
|           |                   | SS:0,02                    | 82,5                   | 15,5                |
|           |                   |                            | 82,5                   | Ort:24,2            |
| 3         | 40                |                            | 80                     | SS:5,97             |
|           |                   |                            | 82,5                   |                     |
|           |                   |                            | Ort:81,75              |                     |
|           |                   |                            | SS:2,36                |                     |
|           |                   | 2,07                       | 79                     | 5,88                |
|           |                   | 2,14                       | 76                     | 8,85                |
|           |                   | 2,14                       | 80                     | 5,23                |
|           |                   | 2,08                       | 77                     | 8,56                |
|           |                   | 2,12                       | 79                     | 12,01               |
|           |                   | Ort:2,116                  | 80                     | 12,87               |
| 4         | 60                |                            | SS:0,033               | 9,71                |
|           |                   |                            | 77,5                   | Ort:9,02            |
|           |                   |                            | 79                     | SS:2,849            |
|           |                   |                            | 79                     |                     |
|           |                   |                            | 75                     |                     |
|           |                   |                            | 78                     |                     |
|           |                   |                            | Ort:77,87              |                     |
|           |                   |                            | SS:1,785               |                     |
|           |                   | 1,97                       | 80                     | 10,31               |
|           |                   | 1,99                       | 84                     | 7,03                |
| 5         | 80                | 2,02                       | 79                     | 10,7                |
|           |                   | 1,88                       | 89                     | 10,83               |
|           |                   | 2,06                       | 84,5                   | 5,62                |
|           |                   | Ort:1,987                  | 82                     | 7,44                |
|           |                   | SS:0,067                   | 83,5                   | Ort:8,66            |
|           |                   |                            | 81                     | SS:2,235            |
|           |                   |                            | 81                     |                     |
|           |                   |                            | 82                     |                     |
|           |                   |                            | Ort:82,6               |                     |
|           |                   |                            | SS:2,846               |                     |
| 6         | 100               | 2                          | 73                     | 1,5                 |
|           |                   | 2,01                       | 76,5                   | 1,4                 |
|           |                   | 1,98                       | 76                     | 1,37                |
|           |                   | 2                          | 80                     | 1,52                |
|           |                   | 2,03                       | 74,5                   | 1,72                |
|           |                   | Ort:2                      | Ort:76                 | 1,43                |
|           |                   | SS:0,018                   | SS:2,62                | Ort:1,49            |
|           |                   |                            |                        | SS:0,126            |
|           |                   | 1,949                      | 68,5                   | 1,35                |
|           |                   | 1,943                      | 70                     | 0,86                |
| 7         | 100               | 1,911                      | 72,5                   | 1,29                |
|           |                   | 1,977                      | 70                     | 0,85                |
|           |                   | 1,971                      | 72                     | 0,79                |
|           |                   | Ort:1,95                   | 70                     | Ort:1,03            |
|           |                   | SS:0,026                   | 70                     | SS:0,268            |
|           |                   |                            | Ort:70,45              |                     |
|           |                   |                            | SS:1,367               |                     |

## ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında İngiltere’de doğdu. 1993 yılında İzmir Amerikan Lisesi’nden mezun oldu. 1998 yılında Yıldız Teknik Üniversite’si Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Müh. Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Müh. Seramik Programında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İşletme Fakültesinde Endüstri ve İşletme Yöneticiliği programına başladı.