



---

**Makale / Research Paper**

---

**Bor Nitrür Partikülleriyle Takviye Edilmiş Vinil Ester Matrisli  
Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**

İlyas KARTAL\*, Yalçın BOZTOPRAK

\*Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Göztepe, Kadıköy, İstanbul  
[ilyaskartal@marmara.edu.tr](mailto:ilyaskartal@marmara.edu.tr)

Received/Geliş: 03.08.2018

Accepted/Kabul: 05.12.2018

**Öz:** Son yıllarda inorganik partiküllerle takviyelendirilmiş polimer matrisli kompozitler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmaların birçoğu, polimer malzemelere inorganik yapıların ilavesiyle elde edilen hibrid malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, bor nitrür partikül takviyeli vinil ester kompozit malzemeler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak vinil ester reçinesi kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ise ortalama 70 nm boyutlarında olan hegzagonal bor nitrür partikülleri kullanılmıştır. Farklı oranlarda üretilen bor nitrür takviyeli vinil ester kompozit numunelerin çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı, aşınma dayanımı ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Test numunelerini hazırlamak için kalıp malzemesi olarak silikon tercih edilmiştir. Reaksiyon başlatıcı olarak %50 aktif metil etil keton peroksit, hızlandırıcı olarak ise % 6'lık kobalt naftalat kullanılmıştır. Partiküllerin homojen dağılımını sağlamak ve topraklanmayı engellemek için partikül miktarının 5 katı oranında MEG (mono etilen glikol) ilavesiyle elde edilen karışım, ultrasonik karıştırıcı içerisinde 30 dakika karıştırılmıştır. Vinil ester reçine içerisine bor nitrür ilavesi işlemine ağırlıkça % 0,5 oranından başlanmış ve % 2'ye kadar devam edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemenin darbe ve sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Çekme, % uzama ve eğilme özelliklerinde azalma gözlemlenmiştir. Aşınma miktarında ise azalma, dolayısıyla aşınma dayanımında artış olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Vinil ester reçinesi, bor nitrür, partikül takviyeli kompozit malzemeler.

---

**Investigation of Mechanical Properties of Vinyl Ester Composites  
Reinforced With Boron Nitride Particles**

**Abstract:** In recent years inorganic particles reinforced polymer matrix composites have been widely used. Many of the studies has focused on hybrid materials obtained by the addition of inorganic structures to polymer materials. In this work, boron nitride particle reinforced vinyl ester composite materials were produced. The vinyl ester resin as matrix material was used. Boron nitride particles having an average size of 70 nm were used as reinforcement material. Tensile strength, flexural strength, impact strength, abrasion strength and hardness of boron nitride reinforced vinyl ester composite specimens produced at different ratios were investigated. Silicone was preferred as a mold material to prepare the test specimens. 50% active methyl ethyl ketone peroxide was used as the reaction initiator and 6% cobalt naphthalate was used as the accelerator. The mixture obtained by adding MEG (mono ethylene glycol) at 5 times the amount of particles to ensure homogeneous distribution of the particles and to prevent agglomeration, was stirred in the ultrasonic mixer for 30 minutes. The addition of boron nitride into the vinyl ester resin was started with 0.5% by weight and continued until 2% by weight. Impact and hardness values increased. A decrease in tensile, % elongation and bending properties was observed. There was a decrease in the amount of wear and therefore an increase in wear resistance.

**Keywords:** Vinyl ester resin, boron nitride, particulate reinforced composite materials.

---

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Kartal, İ., Boztoprak Y., "Bor Nitrür Partikülleriyle Takviyelendirilmiş Vinil Ester Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 43-50.*

*How to cite this article*

*Kartal, İ., Boztoprak Y., "Investigation of Mechanical Properties of Vinyl Ester Composites Reinforced With Boron Nitride Particles" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(1); 43-50.*

## 1. Giriş

Kompozitler, hemen hemen tüm mühendislik uygulamalarında metallere ve diğer mühendislik malzemelerinin yerini almaktadır. Bu hızlı büyümesinin arkasındaki neden ise kendilerinin içinde bulunduğu geniş uygulama yelpazesidir. Polimer matrisli kompozitler yüksek özgül mukavemet, özgül modül ve hafiflik özellikleri sayesinde kompozit malzemeler içinde en hızlı büyüyen gruptur. Otomobil, denizcilik, uzay, savunma, havacılık ve inşaat gibi çok geniş alanda uygulamaları mevcuttur [1-2]. Polimer matris kompozitlerin mekanik özellikleri, parçacık takviyesi ile geliştirilebilir. Bu özellikler uygun matris ve takviye malzemesi seçilerek tasarlanabilir [3]. Genel olarak parçacık takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri takviyenin şekline, boyutuna, dağılımına ve ayrıca matris ile partiküllerin arasındaki yapışmanın durumuna bağlıdır [4]. Uçucu kül, alüminyum ve silikon karbür gibi çok sayıda inorganik dolgu maddesi takviye olarak kullanılmaktadır.

Dolgu/takviye edici olarak çoğunlukla kullanılan mikron altı parçacıklar daha yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Bu yüksek spesifik yüzey alanı, uzun zincirli polimer matris ile takviye arasında yüksek yüzey etkileşimi gerektirir. Kompozit yapıda mikron altı parçacıkların dağılım durumunun, polimer matrisli kompozitlerdeki özellikleri doğrudan etkilediği iyi bilinmektedir. Bu mikron altı parçacıkların küme oluşumu kontrol edilebilirse kompozitin hem mekanik hem de elektriksel özellikleri iyileştirilebilir [5-7].

Literatürde partikül takviyeli polimerik kompozitlerle alakalı birçok çalışma vardır. Polimer matrise ilave edilen alümina tozunun mekanik özelliklere etkisi [8], UV ile sertleştirilmiş polimerlere nano parçacıkların etkisi [9], SiO<sub>2</sub> parçacık şeklinin kompozitin mekanik özelliklerine etkisi [10], TiO<sub>2</sub> parçacık boyutunun ve ağırlık payının kompozitin bükülme direncine etkisi [11] bu çalışmalardan bazılarıdır.

Bu çalışmada matris malzemesi olarak vinil ester reçinesi tercih edilmiştir. Vinil ester reçinesi, diğer reçinelere göre daha fazla hidroksil uç reaktif çift bağlara sahiptir. Uzun zincirli yapılarından dolayı diğer epoksi reçinelerden daha esnektirler. Zincirin tamamında reaktif çift bağlara sahip olan doymamış poliester reçinesinin aksine, sadece zincirin sonundaki reaktif çift bağlara sahiptirler. Bu çift bağlı doğası, tokluğu yüksek vinil ester reçine kompozitlerin yapılmasına olanak sağlar. Vinil ester reçineleri kullanırken hem sertleşme hızı hem de reaksiyon koşulları kolayca kontrol edilebilir. Bu özellikler vinil ester reçinesini diğer epoksi reçinelerden daha çok yönlü hale getirir. Vinil ester reçineler ağırlıklı olarak kullanılan termosetlerden biri olup mükemmel tokluk, termal kararlılık ve kimyasal direnç sağlar [12]. Elektrikli bileşenler, askeri ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tekne gövdesi gibi su altında kalan gövdelerde, rüzgar türbini kanatlarında da sıklıkla kullanılmaktadır [13-14].

Bu çalışmada elde edilen kompozit malzemelerin aşınma kaybı ve aşınma dayanımı da incelenmiştir. Aşınma, endüstriyel uygulamalarda çok sık karşılaşılan bir problemdir. Servis şartlarının yanısıra malzemelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri gibi malzemelerin aşınma davranışlarını belirleyen birçok parametre vardır. Üretilen parça şekilleri, maruz kaldıkları yüklem biçimleri, servis koşulları ve malzeme özellikleri aşınmayı doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir [15]. Polimerik malzemelerin hem katkısız hem de takviye/dolgu maddeleri ilave edilerek aşınma davranışlarını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır [16-19].

## 2. Deneysel Çalışma

### 2.1 Malzemeler

Matris malzemesi olarak vinil ester reçinesi (Ercosin Resin-Coating) kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ise Turkom Cera firmasından temin edilen ortalama 70 nm boyutlarında olan bor

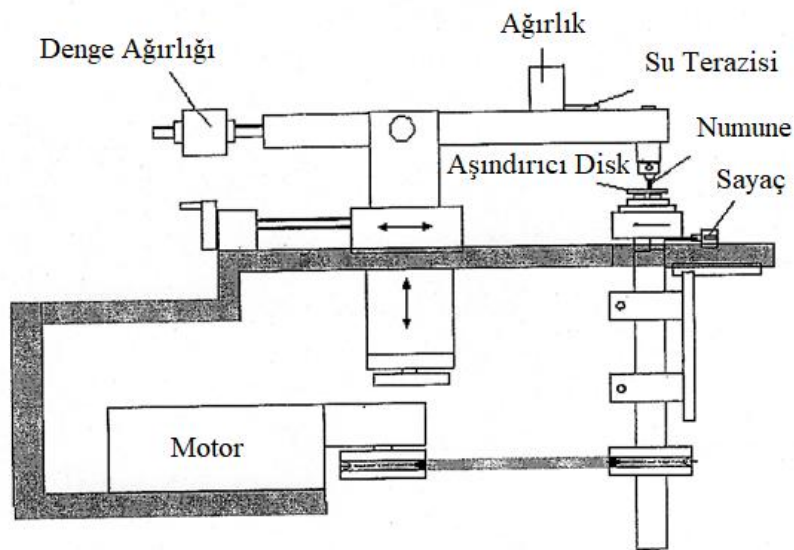
nitür partikülleri (MK-hBN-N70, Hex-Boron Nitride (hBN) Nano Powder) kullanılmıştır. Ayrıca standart çekme, darbe, aşınma ve sertlik numuneleri hazırlamak için kalıp malzemesi olarak silikon kullanılmıştır. Reaksiyon başlatıcı olarak %50 aktif metil etil keton peroksit (Aldrich), hızlandırıcı olarak ise % 6'lık kobalt naftalat (Aldrich) kullanılmıştır. Partiküllerin homojen dağılımını sağlamak ve topaklanmayı engellemek için Dow Chemical firmasından temin edilen MEG (monoetilen glikol) kullanılmıştır.

## 2.2 Numunelerin Hazırlanması

Vinil ester reçine içerisine bor nitür ilavesi işlemine ağırlıkça % 0,5 oranından başlanmış ve % 2'ye kadar ilave edilmiştir. Bu orandan sonra reçine, bor nitür takviyesini ıslatamaz duruma gelmiştir. Örneğin ağırlıkça % 0,5 bor nitür takviyesi içeren numune için numune hazırlama işleminde, öncelikle homojen dağılımını sağlamak ve topaklanmayı engellemek için partikül miktarının 5 katı oranındaki MEG (mono etilen glikol) içerisinde bor nitür partikülleri ultrasonik karıştırıcı ile 30 dakika karıştırıldı. Bir kap içerisine vinil ester reçinesi konuldu. Oluşacak toplam miktarın ağırlıkça % 0,5'i oranında MEG içerisinde disperse edilmiş bor nitür, reçine içerisine ilave edildi ve mekanik karıştırıcı ile yaklaşık 10 dakika karıştırma işlemi uygulandı. Karıştırma işleminden sonra sertleştirici olarak % 3 oranında % 50 aktif metil etil keton peroksit ilave edildi ve iyice karışması sağlandıktan sonra hızlandırıcı olarak % 1 oranında % 6'lık kobalt naftalat ilave edildi ve tekrar karıştırma işlemi yapıldı. Homojen bir karışım sağlandıktan sonra düzgün bir yüzey üzerine yerleştirilen ve su terazisi ile dengesi sağlanan silikon kalıp içerisine karışım döküldü. Silikon kalıp 85°C sıcaklıkta 10 dakika süreyle bekletildi ve sertleşen numuneler kalıptan çıkarıldı. Bu şekilde numune hazırlama işlemi diğer numune oranları içinde aynı şekilde tekrarlandı.

## 2.3 Mekanik Deneyler

TS 1398 standardına göre hazırlanan numunelerin çekme deneyi, Zwick Z010 üniversal çekme cihazında 5 mm/dakika çekme hızı ile yapılmıştır. 3 nokta eğilme testi de Zwick Z010 model cihaz da yapılmıştır. ISO 180 standardına göre hazırlanan çentiksiz numunelerin darbe mukavemeti, Zwick B5113.30 darbe cihazında 5,4 J'lük Izod çekici kullanılarak test edilmiştir. Sertlik ölçümleri Zwick Shore D cihazında yapılmıştır.



Şekil 1. Pin on disk aşınma test cihazı

Numunelerin aşınma testi, Pin On Disk Test Cihazında (Şekil 1) ASTM G-99 standardına göre 250 gr ağırlık yükü altında 72 rpm hızda her 100 metrede (100 m=398 tur) 1 ölçüm yapılarak, toplamda

ise 500 m (toplam 1990 tur) mesafede ağırlık ölçümü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinde sertliği 63 HRC ve yüzey pürüzlülük değeri 0,830  $\mu\text{m}$  olan aşındırıcı disk kullanılmıştır. Ağırlık kaybı,  $10^{-4}$  hassasiyete sahip hassas terazi ile ölçüm yapılarak belirlenmiştir.

Kırık yüzeylerin SEM incelemesi ise JEOL JSM-5910 LV cihazı ile yapıldı.

Yapılan testlerde her bir grup için 5 numune hazırlanmış olup ortaya çıkan değerlerin ortalaması alınmıştır ve testler oda sıcaklığında yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çekme testi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’den anlaşılacağı üzere vinil estere ilave edilen bor nitrür miktarı arttıkça çekme mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Çekme mukavemeti ile birlikte % uzama miktarı da azalmaktadır, bu da bor nitrür miktarının artmasıyla sünekliğin azaldığı, gevrekliğin arttığı dolayısıyla % 2 bor nitrür takviyeli kompozit malzemenin daha gevrek olmasından dolayı daha çabuk koptuğunu göstermektedir. Ayrıca çekme dayanımının azalmasına, aglomerasyon oluşumu da etki etmiştir.

**Tablo 1.** Bor nitrür miktarına bağlı olarak çekme mukavemetindeki değişim

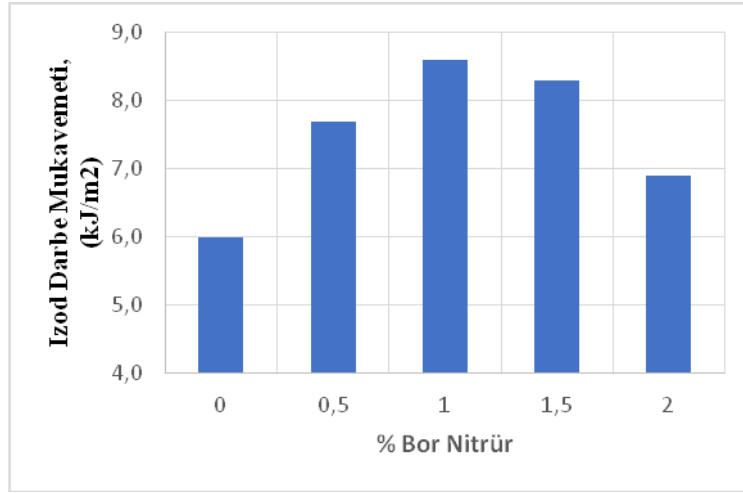
% Bor Nitrür (ağırlıkça)	Çekme Mukavemeti MPa	% Uzama
0 (Saf)	45,54	7,8
0,5	44,25	6,8
1	40,02	6,2
1,5	23,72	5,7
2	15,42	5,4

Tablo 2’de bor nitrür ilavesine bağlı olarak üç nokta eğilme testi sonuçları verilmiştir. Bor nitrür ilavesi arttıkça maksimum eğilme gerilmesi, eğilme E modülü ve % uzama değerlerinde azalma görülmüştür. Beklenildiği gibi en yüksek değerler saf vinil ester numunesinde elde edilmiştir. Bor nitrür oranının artmasıyla sertlik değerinin artışı ve yapıdaki aglomerasyon oluşumunu gözönünde bulunduracak olursak eğilme dayanımında azalma beklenildiği gibidir.

**Tablo 2.** Bor nitrür miktarına bağlı olarak eğilme özelliklerindeki değişim

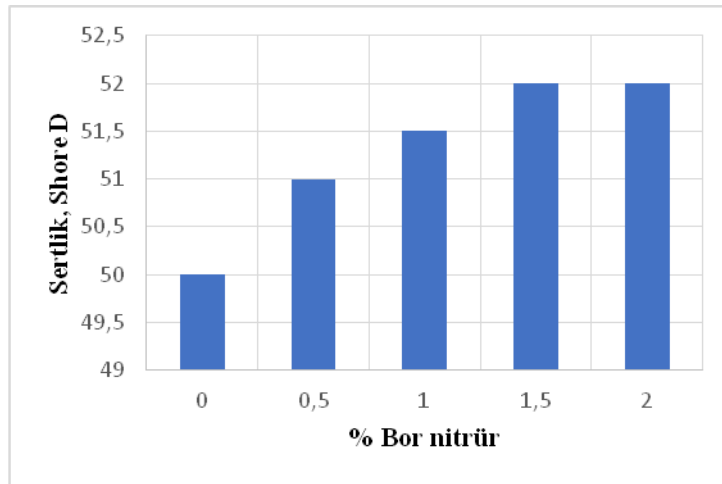
% Bor Nitrür (ağırlıkça)	Eğilmedeki Maksimum Gerilme, MPa	Eğilme Elastisite Modülü, MPa	Maksimum Gerilmedeki % Uzama
0 (Saf)	43	280	21
0,5	36	250	20
1	35	240	15
1,5	20	220	15
2	16	200	12

Şekil 2’de Bor nitrür miktarına bağlı olarak İzod darbe mukavemetindeki değişim verilmiştir. Bu çalışmada bor nitrür ilavesi ile %1,0 BN takviyeli oranda maksimum darbe mukavemeti elde edilmiştir. %1,0 BN ilavesi sonrasında diğer numunelerde darbe mukavemeti düşmüştür. Vinil ester matrisin kayda değer bir plastik deformasyona maruz kalmadan gevrek bir tarzda kırıldığı İzod darbe testinde görülmüştür.



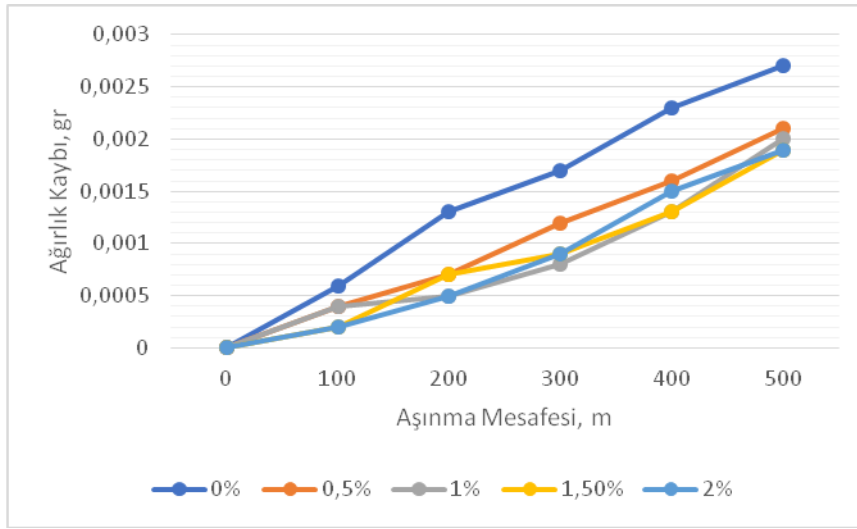
Şekil 2. Bor nitrür miktarına bağlı olarak İzod darbe mukavemetindeki değişim

Şekil 3’de Bor nitrür miktarına bağlı olarak sertlik değişim değerleri verilmiştir. Sertlik değerleri %1,5 oranına kadar artmış, % 2,0 oranı kayda değer bir artış göstermeyerek % 1,5 oranı ile sabit kalmıştır.



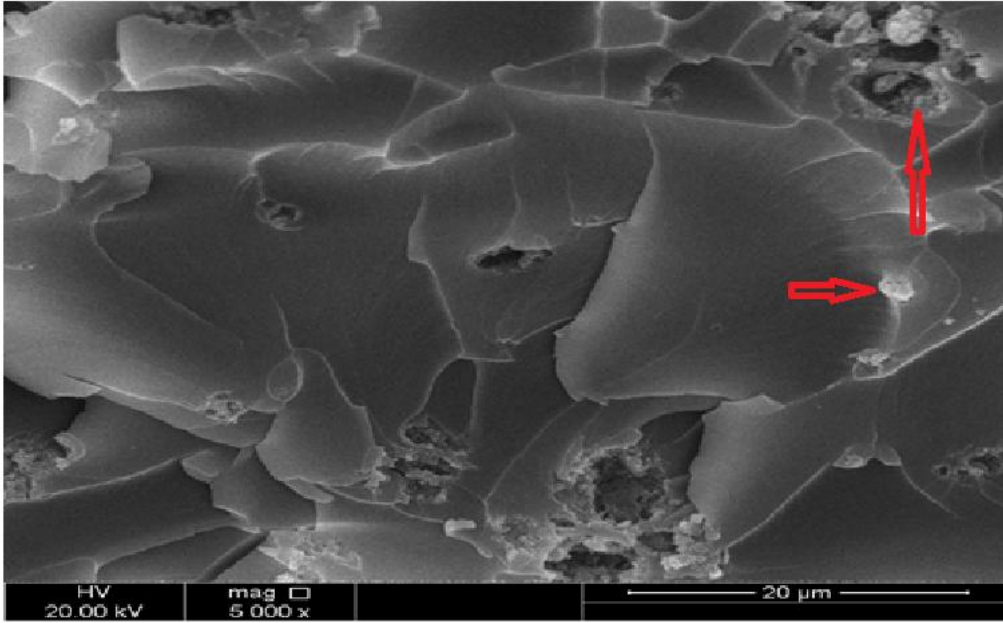
Şekil 3. Bor nitrür miktarına bağlı olarak sertlik değerleri

Aşınma testi sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları Şekil 4’de verilmiştir. Aşınma mesafesinin ve % bor nitrür oranının artmasına bağlı olarak ağırlık kaybı azalmıştır. En fazla aşınma miktarı BN takviyesiz saf vinil ester reçinede (% 0) görülürken bor nitrür ilavesi ile aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Aşınma oranını yüzdesel olarak ifade edecek olursak BN takviyesiz numunede %0,28 oranında aşınma görülürken %2,0 BN takviyeli numunede % 0,18 oranında aşınma olduğu görülmüştür. En az aşınma, %2,0 oranında bor nitrür ilavesi yapılmış olan numunede meydana gelmiştir. Dolayısıyla diğer numunelere göre %2,0 BN takviyeli numunenin aşınma dayanımı daha yüksektir.



Şekil 4. Bor nitrür miktarına bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

Şekil 5’de %1,5 BN ilaveli vinil ester kompozitin kırık yüzey görüntüsü verilmiştir. Partiküllerin yapıdaki dağılımlarına bakıldığında bazı bölgelerde partikül dağılımı görülürken bazı bölgelerde aglomerasyon olduğu görülmektedir. Her ne kadar aglomerasyon oluşumunu engellemek için MEK ilave edilmiş ve ultrasonik homojenizatörde karıştırma işlemi yapılmış olsa da yine de bazı bölgelerde aglomerasyon oluşmuştur.



Şekil 5. %1,5 BN ilaveli vinil ester kompozitin kırık yüzey görüntüleri

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Vinil ester reçinesine nano boyutta bor nitrür ilavesi ile elde edilen kompozit malzemenin çekme mukavemetinde ve % uzama değerlerinde azalma görülmüştür. Ayrıca aglomerasyon oluşumunun da çekme dayanımının azalmasında etkisi vardır. Darbe mukavemetinde ise beklenildiği gibi bir artış sağlanmıştır. Darbe mukavemetinde en ideal değer, %1,0 oranındaki bor nitrür ilavesinde elde edilmiştir. Çekme ve darbe testlerinde vinil ester matrisin plastik deformasyona maruz kalmadan gevrek kırılma davranışı sergilediği görülmüştür. Sertlik değerlerinde %1,5 oranına kadar artış görülürken %1,5 ve %2,0 oranlarında bu değer sabit kaldığı gözlenmiştir, %1,5 değerine kadar

sertlik değeri her ne kadar artmış olsa da bu artış kayda değer bir artış değildir. Eğilme dayanımında, çekme mukavemetinde olduğu gibi azalma görülmüştür. Aşınma miktarı göz önünde bulundurulduğunda ise %2,0 oranına kadar bor nitrür ilavesi arttıkça aşınma miktarının azaldığı ve %2,0 BN takviyeli kompozit numunede en az aşınmanın meydana geldiği dolayısıyla bu numunenin aşınma dayanımının en yüksek olduğu görülmüştür. BN partiküllerinin bazı bölgelerde birarada olması da aşınma dayanımının artmasına sebep olmuştur. SEM analizinde, BN partiküllerinin vinil ester içerisinde bazı bölgelerde dağıldığı bazı bölgelerde ise toplanarak aglomerasyon oluşturduğu görülmektedir. Vinil ester matrisin ağırlıkça %2 oranındaki numuneyi ele aldığımızda hacimce de çok az bir kısmı bor nitrürden oluşmaktadır. Bor nitrür, nano boyutta çok küçük bir ilave ile mekanik özelliklerde değişimlere sebep olmuştur. Boyutları küçük ve girintili çıkıntılı geometrilere sahip parçaların yönden bağımsız tarzda takviyelendirilerek üretilmesi için bu yöntem önerilir.

## Teşekkür

70 nm boyutlarında olan bor nitrür partiküllerini (MK-hBN-N70, Hex-Boron Nitride (hBN) Nano Powder) çalışmamızda kullanmak üzere veren TURKOM CERA firmasına teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Chauhan S.R. and Thakur S. “Effects of particle size, particle loading and sliding distance on the friction and wear properties of cenosphere particulate filled vinyl ester composites”, *Materials and Design*, 2013, 51, 398–408
- [2] Labella M., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., et al., “Mechanical and thermal properties of fly ash/vinyl ester syntactic foams”, *Fuel*, 2014, 121, 240–249
- [3] Tagliavia G., Porfiri M. and Gupta N., “Analysis of flexural properties of hollow-particle filled composites”, *Composites Part: B Engineering*, 2010, 41, 86–93
- [4] Kulkarni M.B. and Mahanwar P.A., “Effect of methyl methacrylate–acrylonitrile–butadiene–styrene (MABS) on the mechanical and thermal properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA)-fly ash”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012, 11, 365–383
- [5] Deepthi M.V., Sharmab M., Sailaja R.R.N. et al., “Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene–fly ash cenospheres composites”, *Materials and Design*, 2010, 31(4), 2051–2060
- [6] Kolay P.K. and Singh D.N., “Physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of cenosphere from ash lagoon”, *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(4), 539–542
- [7] Shunmugasamy V.C., Pinisetty D. and Gupta N., “Electrical properties of hollow glass particle filled vinyl ester matrix syntactic foams”, *Journal of Materials Science*, 2014, 49, 180–190
- [8] Laura M.M., Parnas R.S., King S.H., Schroeder J.L., Fischer D.A., Lenhart J.L., “Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina epoxy composites”, *Polymer*, 2008, 49, 999-1014
- [9] Kardar P., Ebrahimi M., Bastani S., “Study the effect of nano-alumina particles on physical–mechanical properties of UV cured epoxy acrylate via nano-indentation”, *Progress in Organic Coatings*, 2008, 62, 321–325
- [10] Noor A.F., Jaafar M., Palaniandy S., Azizi K. and Azizli M., “Effect of particle shape of silica mineral on the properties of epoxy composites”, *Composites Science and Technology*, 2008, 68, 346–353
- [11] Yuanxin Z., White E., Hosur M., Jeelani S., “Effect of particle size and weight fraction on the flexural strength and failure mode of TiO<sub>2</sub> particles reinforced epoxy”, *Materials Letters*, 2010, 64, 806–809
- [12] Mallick P.K., “Materials”, “Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design, Third Edition”, ISBN 9780849342059, CRC Press, Boca Raton, 2007

- [13] Raja R.S., Manisekar K., Manikandan V., “Study on mechanical properties of fly ash impregnated glass fiber reinforced polymer composites using mixture design analysis”, *Materials and Design*, 2014, 55, 499–508
- [14] Prabhu B.K., Dudse S. and Kulkarni S.M., “Statistical analysis of flexural modulus of cenosphere reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) using Taguchi method”, *Journal of Elastomers and Plastics*, 2014, 47(6), 611–622
- [15] Gülsoy H.Ö., Bilici M.K., Bozkurt Y., Salman S., “Bor katkılı demir esaslı toz metal parçaların aşınma davranışlarının incelenmesi”, 1. Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, 2005
- [16] Tevrüz T., “Tribological behaviours of carbon filled PTFE dry journal bearings”, *Wear*, 1999, 221 (1), 61-68
- [17] Liu C., Ren L., Arnell R.D., Tong J., “Abrasive wear behaviour of particle reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites”, *Wear*, 1999, 225-229 (1), 199-204
- [18] Rajesh J.J., Bijwe J., Tewari U.S., “Abrasive wear performance of various polyamides”, *Wear*, 2002, 252 (9-10), 769-776
- [19] Ünal H., Şen U., Mimaroglu A., “Abrasive wear behaviour of polymeric materials”, *Materials&Design*, 2005, 26 (8), 705-710