

THE VARIATION OF PIN-ON-DISK WEAR PROPERTIES OF PARTICLE
FILLED POLYMER MATRIX COMPOSITES WITH APPLIED LOADS

Akın AKINCI*, S. Hakan YETGİN, Şenol YILMAZ, Uğur ŞEN

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SAKARYA

Received/Geliş: 03.02.2009 Revised/Düzeltilme: 30.03.2009 Accepted/Kabul: 15.05.2009

ABSTRACT

In this study, Basalt filler particles added to pure LDPE as LDPE+10wt.% basalt, LDPE+30wt.% basalt, LDPE+50wt.% basalt and LDPE+70wt.% basalt and composite materials were produced using injection moulding methods. Wear tests were carried out at the sliding speed of 0.5 m/s on AISI 4140 steel disk with the configuration of pin on disk test in the atmospheric conditions. The tests were realized under the loads of 5N, and 20N for four different basalt content included LDPE composites and friction and wear properties of these materials were studied. When the comparison of wear behaviours of the composites with basalt free LDPE, wear resistance of the LDPE increased with increase of the basalt content. The results showed that increase in basalt content of the basalt filled LDPE composites up to 30wt.% basalt resulted in a decrease of the friction coefficient and wear rate. While the friction coefficient for pure LDPE were changing between 0.29 and 0.34, the friction coefficient for LDPE+70wt.% basalt composites were changing between 0.10 and 0.12, depending on applied load. Over 30 wt.% basalt, friction coefficient and wear rates exhibit steady state behavior. Depending on applied load, while wear rate for pure LDPE ranged from 4.57×10^{-3} mm³/m to 1.11×10^{-2} mm³/m, the wear rate for LDPE+30wt.% basalt composites ranged from 4.97×10^{-4} mm³/m to 7.18×10^{-4} mm³/m.

Keywords: Low density polyethylene, basalt, wear, pin-on-disc.

POLİMER MATRİKSİLİ PARTİKÜL DOLGULU KOMPOZİTLERİN UYGULANAN YÜK İLE PİN-
ON-DİSK AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİ

ÖZET

Bu çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) matrisine bazalt partikül takviyesi ağırlıkça %10, %30, %50 ve %70 oranlarında yapılmış ve kompozit malzemeler enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Aşınma testleri 0.5 m/s hızda, AISI 4140 çelik disk üzerinde pin-on-disk aşınma test yöntemiyle atmosferik şartlarda yapılmıştır. Testler 5N ve 20N yük altında uygulanmış ve dört farklı kompozisyondaki malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Kompozitlerin aşınma davranışları katkısız DYPE malzemeyle karşılaştırıldığında, aşınma özelliklerinin bazalt ilavesiyle iyileştiği görülmektedir. % 30 Bazalt ilavesine kadar kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı hızla düşmektedir. Uygulanan yüke bağlı olarak, saf DYPE malzemenin sürtünme katsayısı 0.29 ve 0.34 arasında değişirken, %70 bazalt takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı 0.1 ve 0.12 arasında değişmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra sürtünme katsayısı ve aşınma hızı sabit davranış göstermektedir. Uygulanan yüke bağlı olarak, saf DYPE'nin aşınma hızı 4.57×10^{-3} m³/m' den 1.11×10^{-2} mm³/m' ye değişirken, %70 bazalt takviyeli malzemenin aşınma hızı 4.97×10^{-4} mm³/m ile 7.18×10^{-4} mm³/m arasında değişmektedir.

Anahtar Sözcükler: Düşük yoğunluklu polietilen, bazalt, aşınma, pin-on-disk.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: akinci@sakarya.edu.tr, tel: (264) 295 57 77

1. GİRİŞ

Polimerik ve polimer esaslı kompozit malzemelerin çeşitli endüstri dallarında kullanım oranı her geçen yıl hızla artmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre hafiflik, düşük maliyet ve üstün mekanik, termal, kimyasal ve elektriksel özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Polipropilen (PP), polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), akrilonitrilbütadienstiren (ABS), polikarbonat (PC), polimetilmetakrilat (PMMA) ve polistiren (PS) gibi termoplastik esaslı matris malzemeleri düşük fiyatları, kolay üretilebilmeleri ve geri dönüştürülebilir olmaları açısından, polyester, epoksi ve poliüretan gibi termoset matris malzemelerinden daha fazla miktarlarda kullanılmaktadır. Termoplastik polimerlerin, poliolefinler grubunda bulunan PE, liner düşük yoğunluklu (LDYPE), düşük yoğunluklu (DYPE), orta yoğunluklu (OYPE), yüksek yoğunluklu (YYPE), ultra yüksek molekül ağırlıklı (UYMAPE) polietilen gibi çeşitli alt dallara ayrılmaktadır. Polimerler özellikle korozyon tipi aşınma davranışı açısından avantajlıdır [1]. Fakat düşük mekanik özellikleri kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı polimerler çeşitli dolgu ve takviye malzemeleri ile modifiye edilerek kullanılmaktadır [2]. Etilen monomerlerinden meydana gelen DYPE, dallanmış yapıdaki polietilen zincirleri sebebiyle düşük kristaliniteye sahiptir [3-5]. İlaç, otomotiv, uçak ve uzay sanayi ile elektronik endüstrisi DYPE kullanım alanlarından bazılarıdır [6]. Düşük tokluk, esneklik, düşük sıcaklık direnci, kimyasallara karşı yüksek direnç DYPE' nin avantajlı özellikleridir. Erime noktası (T_m) 106-112 °C arasındadır ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) düşük olduğundan oda sıcaklığında esnektir [7].

Partikül dolgu/takviye malzemeleri, genellikle maliyet ucuzlatmak için polimerik malzemelerde kullanılsa da, üstün özellikli partiküllerin kullanımıyla, üretilen kompozit malzemelerin mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal özellikleri gelişmektedir. Örneğin, grafit, karbon ve metalik partiküllerin ilavesiyle iletken, partikül bor ve genişletilmiş grafit ilavesiyle yanmaya dirençli, cam küre, cam bilye gibi partiküllerin ilavesiyle de aşınmaya dirençli polimerik kompozitler üretilmektedir [8]. Metallerle karşılaştırıldığında dolgunsuz polimerler düşük aşınma davranışı göstermektedir [9]. Polimerler ve kompozitler, yağlama olmaksızın aşınma dirençli malzemeler sınıfını oluşturan önemli malzemelerdendir [10]. Saf polimerlerin aşınma direnci yeterli olmadığından, modifiye edilmelerine gereksinim bulunmaktadır [11]. Evans ve diğerleri [12], orta karbonlu pürüzlü çelik yüzey üzerinde test ettikleri 18 adet polimerik malzeme içinde DYPE' in en az aşınma hızına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Bazalt, kimyasal olarak yaklaşık %50 SiO₂ içeren bir doğal volkanik kayadır. Yer kabuğundaki çatlaklar, yarıklar ya da volkan bacaları aracılığı ile yeryüzüne çıkan magmatik bir kayaç olan bazalt; koyu gri-siyah renkli, ince taneli, sert, mukavemetli ve özellikle alkalilere karşı yüksek kimyasal dirençlidir. Bu özellikleri ile yapı malzemesi üretiminde ve karayollarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirken, aşınmaya ve korozyona dirençli polimerik esaslı kompozit malzeme üretiminde, mineral yünü üretiminde, ses ve ısı yalıtımında da kullanılabilir [13-16].

Polimerik malzemelerin ve polimer esaslı kompozit malzemelerin aşınma davranışı ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Rehbein ve Wallaschek [17], yaptıkları çalışmada, yüksek frekanslı osilasyon hareketinde polimer-çelik ve alüminyum-alüminyum temasında malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemektedir. Temas halindeki yüzeylerin arasındaki moment iletiminin temas noktalarındaki pürüzlerin çarpışması sonucu olduğunu ve bu mikro çarpışmaların hem normal hem de teğetsel doğrultuda lokal olarak titreşen numuneler yarattığını, bunun da temas alanını azalttığını ve yüksek frekansta elde edilen sürtünme katsayısının, alçak frekansta elde edilenden daha düşük olduğunu ifade etmektedirler. Van de velde ve Baets [18], çelik üzerinde lineer gidip gelme hareketi ile kayan plastik numunenin sürtünme ve aşınma davranışını incelemektedirler. Normal ve teğetsel titreşimin sürtünme kuvvetinde azalmaya neden olduğu için sürtünme kuvvetinin düzgün hareketten daha düşük çıktığını ve sürtünme katsayısının artan yükte azaldığını belirlemişlerdir. Uzuner ve Gediktaş

[19], polimerler üzerine yaptığı çalışmada, kayma hızı arttıkça malzemenin temas yüzeyi, sıcaklığı ve sürtünme katsayısının arttığını ve sürtünme işinin, ısıya dönüşmesiyle ortaya çıkan yüzey sıcaklığının, hızla bağlı olarak artış gösterdiğini ifade etmektedirler. Bunun yanı sıra yüzey sıcaklığının artmasıyla ısıl genleşme katsayısı büyük olan plastiğin, boyutlarının değişeceğini dolayısıyla izafi boşluk azalacağı için temas alanının artacağını belirtmişlerdir. Bowden ve Tabor [20], da temas alanındaki artışın sürtünme katsayısını arttıracakları belirlemiştir. Rajesh ve diğerleri [21], yaptıkları çalışmada uygulanan yükün artmasıyla, buna bağlı olarak malzemedeki spesifik aşınma oranlarının lineer olarak azaldığını belirtmişler. Bijwe ve diğerleri [10], polieterimid esaslı kompozit malzemeler ile yaptıkları çalışmada uygulanan yükün artmasıyla spesifik aşınma oranının azaldığını tespit etmiştir.

Bu çalışmada, saf DYPE ve ağırlıkça %10 ile %70 arasında bazalt içeren DYPE matrisli dört farklı kompozisyona sahip kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı incelenmiştir. Dolgu malzemesi ilavesinin DYPE' in tribolojik özelliklerine etkisi sabit hız ve değişken yükler altında karakterize edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemesi DYPE, Petkim A.Ş.' den, takviye malzemesi olan bazalt ise Orta Anadolu' dan temin edilmiştir. Saf DYPE ve ağırlıkça %10, %30, %50 ve %70 oranlarında bazalt partikül takviyeli dört farklı bazalt oranına sahip DYPE matrisli kompozit olmak üzere toplam beş numunenin aşınma davranışı incelenmiştir. DYPE matris malzemesi kullanılmadan önce bu işlemi ticari olarak gerçekleştirmekte olan bir firmada toz haline getirilmiş ve numune üretiminde bu şekilde kullanılmıştır.

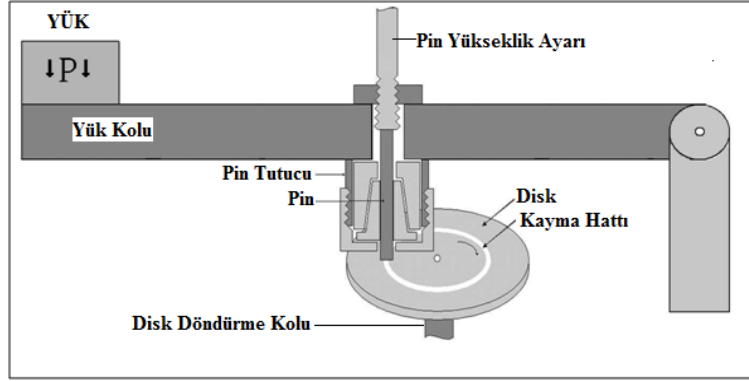
Bileşimi Çizelge 1' de verilen bazalt, önce öğütülmüş ve 90 µm elekten elenerek boyutlandırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler ram enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak dikdörtgen plakalar halinde hazırlanmıştır. Enjeksiyonla kalıplama sırasında kullanılan proses parametrelerinden; üç farklı ısıtma zonundaki sıcaklıklar 165, 175, 180 °C, enjeksiyon ve kalıp basınçları sırasıyla 5 MPa ve 9 MPa, kalıp sıcaklığı 30 °C, basınç uygulama süresi 30 s olarak seçilmiştir. Enjeksiyon ile kalıplama prosesinde ağırlıkça hassas olarak hazırlanan karışım, homojen karışımın sağlanabilmesi için öncelikle enjeksiyon cihazı nozulundan kusturulmuş, daha sonra boyut küçültme işlemine tabi tutularak tekrar cihaza beslenmiş ve numuneler üretilmiştir.

Çizelge 1. Bazalt' ın kimyasal kompozisyonu

Bileşim	% Ağırlıkça
SiO ₂	45.88
Al ₂ O ₃	18.20
Fe ₂ O ₃	9.95
CaO	9.28
MgO	6.62
K ₂ O	1.64
Na ₂ O	4.76
P ₂ O ₅	1.04
LOI	2.63

Aşınma deneyleri, pin-on-disk yöntemi kullanılarak ASTM G 99 standardına göre uygulanmıştır. Aşınma testinde kullanılan deney düzeneği Şekil 1' de gösterilmektedir. Pin on disk aşınma deney düzeneğinde, dikey bir pin tutucu üzerine deney numunesi sabitlenmektedir. Bunun altına malzeme türüne göre seçilen bir aşındırıcı disk döndürülmektedir. Disk bir düşey eksen etrafından yatay tabla üzerinde döndürülerek numunelerde belirli bir süre sonunda meydana gelen değişimler ölçülmektedir. Deneysel proses parametreleri Çizelge 2' de verilmektedir.

Yoğunluk ve sertlik ölçümleri sırasıyla ASTM D 792 ve ASTM D 2240 standartlarına göre uygulanmıştır. Sertlik deneyinde Instron S1 Duotech, dijital Shore D cihazı kullanılmıştır.



Şekil 1. Aşınma deneyinde kullanılan deney cihazı şeması.

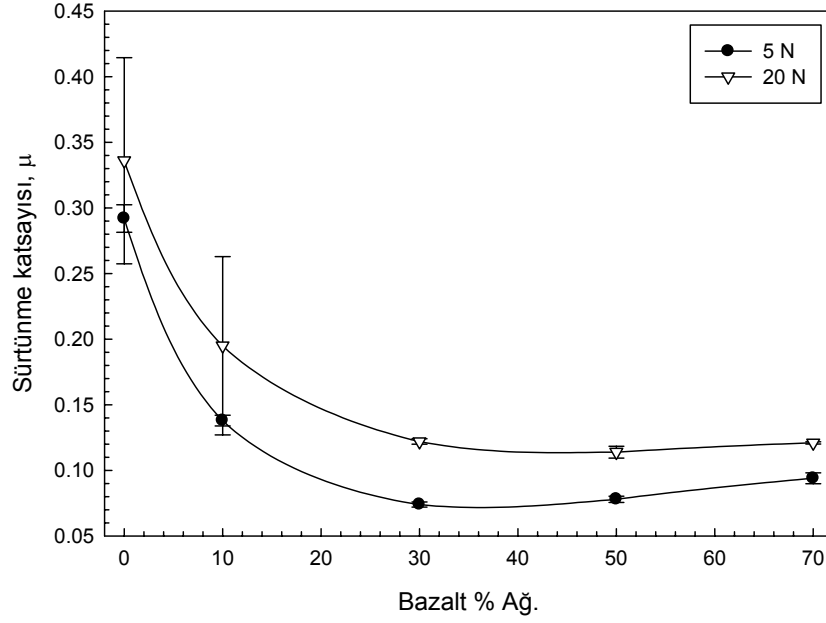
Çizelge 2. Aşınma deneyi için proses parametreleri.

Parametreler	DeneySEL Şartlar
Uygulanan yük (N)	5 ve 20
Hız (m/s)	0.5
Sıcaklık (°C)	23±2
Nem (%)	65±1
Kayma mesafesi (m)	1000
Yüzey pürüzlülüğü, Ra (µm)	0.28

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin, 0.5 m/s kayma hızında, bazalt içeriği ve uygulanan yüklere bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi Şekil 2' de verilmektedir. %30 Bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgu DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı sabit bir hal almaktadır. %70 bazalt takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı 5N ve 20N yüklere karşılık sırasıyla %58,5 ve %65,5 düşmüştür. İlave olarak, uygulanan yükün %300 arttırılmasıyla bazalt takviyeli DYPE kompozitin sürtünme katsayısı %31 artış göstermiştir. Bu sonuç Wang and Lee [22]' nin yaptığı çalışma ile uyum göstermektedir.

Myshkin ve diğerleri [23], aşınma şartlarının polimerin sürtünme katsayısını etkilediğini açıklamışlardır. Viskoelastik malzeme olarak polimerler, sürtünme ısılarına karşı oldukça hassastır. Bazalt konsantrasyonun, sürtünme katsayısına etkisi uygulanan yükten çok daha fazla olduğu Şekil 2 ve 3' den görülmektedir. Saf DYPE' nin, düşük erime noktası, düşük sertlik ve yüksek basınç sebepleriyle çelik yüzey üzerinde yüksek aşınma hızları sergilediğine inanılmaktadır [7]. DYPE kompozitin bazalt içeriğinin artmasıyla, polimerin sertliği (Bkz. Çizelge 3) ve basma mukavemeti artmıştır. Yang ve diğerleri [24], farklı polimer kompozitler üzerine yaptıkları çalışmada, seramik bazlı dolgu konsantrasyonundaki artış ile polimer kompozitin sertliğinin arttığını göstermişlerdir. Aşınma deneyinde, DYPE kompozitin aşınma davranışı bazalt partiküllerin performansı ile iyileşmiştir. Aşınma deneyinde çelik disk ve DYPE kompozit ara yüzeyinde oluşan sıcaklık sebebiyle eriyen matriksin ara yüzeye sıvandığı ve bunun bir yağlayıcı gibi davranarak sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenebilir.

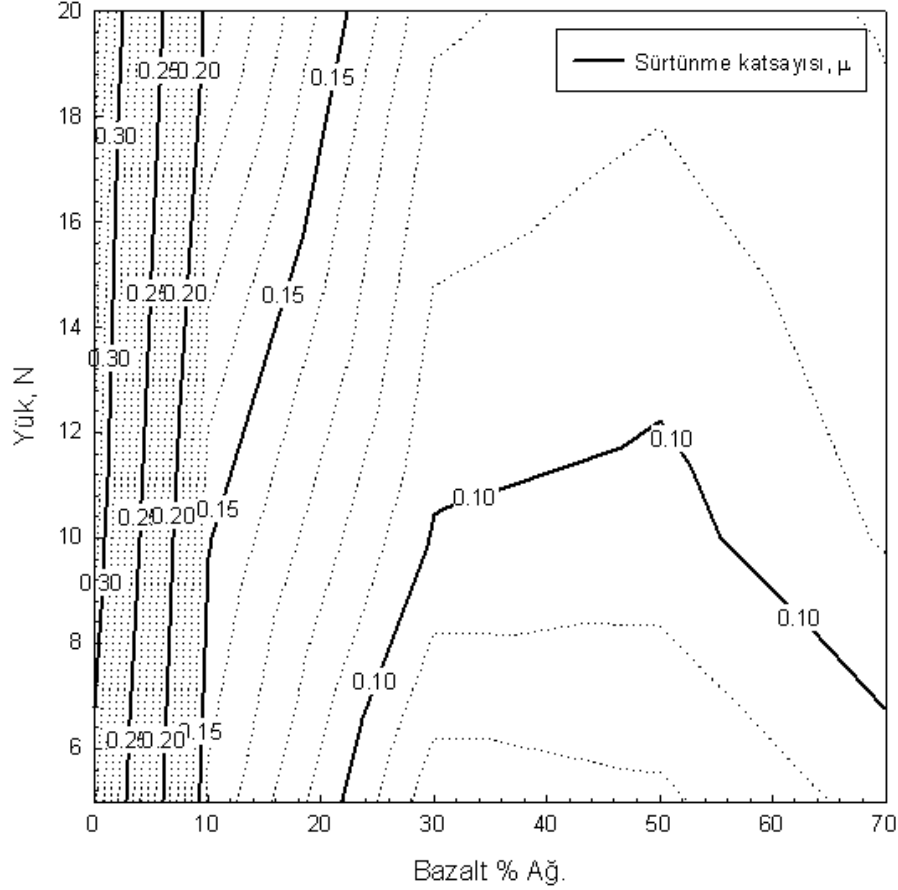


Şekil 2. 5 N ve 20 N yükler için bazalt ilavesiyle sürtünme katsayısının değişimi (kayma hızı 0.5 m/s)

Çizelge 3. DYPE kompozitin, bazalt takviyesine bağlı olarak sertlik ve yoğunluk değerlerinin değişimi

Bazalt konsantrasyonu (%)	Sertlik (Shore D)	Yoğunluk (g/cm ³)
Saf DYPE	45.50	0.94
10	48.00	1.01
30	49.70	1.17
50	55.30	1.42
70	68.70	1.81

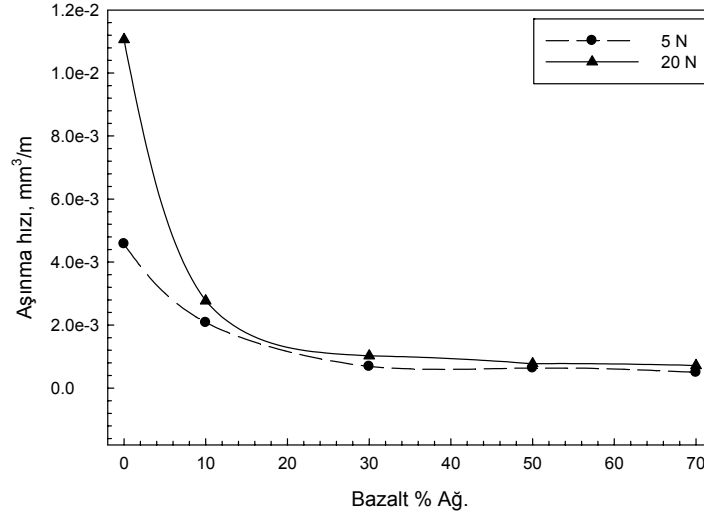
DYPE kompozitin bazalt konsantrasyonuna ve uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Şekil 3' deki kontur diyagramda verilmektedir. Bu haritalar, kompozitin uygun kayma şartları için doğru çalışma şartının seçimini sağlamaktadır. Aynı zamanda, uygun kompozisyon, uygulanan yük ve kayma hızının seçimi ile bu kompozitin sürtünme katsayısının kontrolü mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, en düşük sürtünme katsayısına ulaşmak için, doğru malzeme kombinasyonu, uygulanacak yük ve kayma hızı seçiminde de Şekil 3' de verilen diyagram kullanılmaktadır.



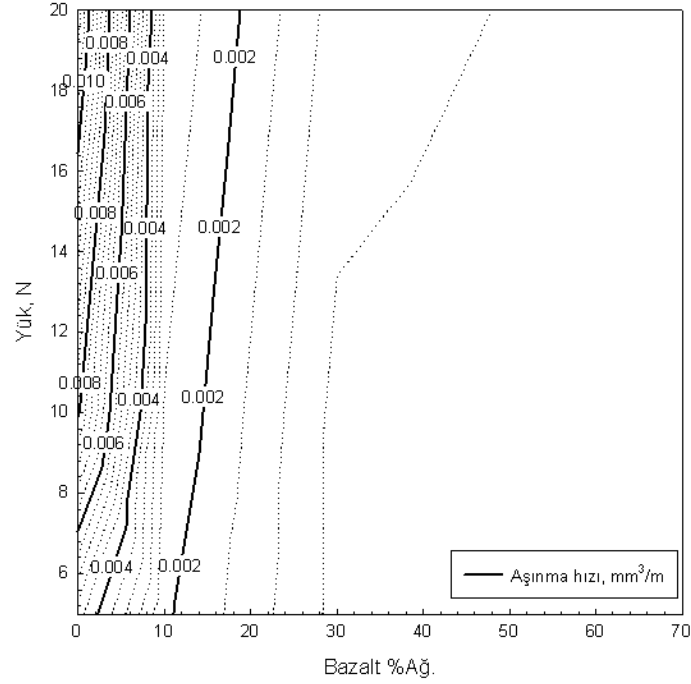
Şekil 3. Takviyeli DYPE kompozitinin uygulanan yük ve bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak, sürtünme katsayısı kontur diyagramı, 0.5 m/s.

DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin, 0.5 m/s kayma hızında, bazalt içeriği ve uygulanan yüklere bağlı olarak aşınma hızının değişimi Şekil 4' de verilmektedir. %30 Bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgulı DYPE kompozitlerin aşınma hızı, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin aşınma hızı sabit bir hal almaktadır. %70 bazalt takviyeli kompozitinin aşınma hızı 5N ve 20N yüklere karşılık sırasıyla %89 ve %94 düşmüştür. İlave olarak, uygulanan yükün %300 arttırılmasıyla, bazalt takviyeli DYPE kompozitinin aşınma hızı ortalama %94 artış göstermiştir.

DYPE kompozitinin bazalt konsantrasyonuna ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hızındaki değişim Şekil 5' deki kontur diyagramında verilmektedir. Şekil 4 ve 5' den görüldüğü üzere DYPE kompozitinin bazalt içeriğinin aşınma hızına olan etkisi, uygulanan yükten çok daha fazladır. Saf DYPE' nin, düşük erime noktası, düşük sertlik ve yüksek basınç sebepleriyle çelik yüzey üzerinde yüksek aşınma hızları sergilediğine inanılmaktadır. DYPE kompozitinin bazalt içeriğinin artmasıyla, polimerin sertliği ve basma mukavemeti artmıştır. Bu sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir [24, 25].

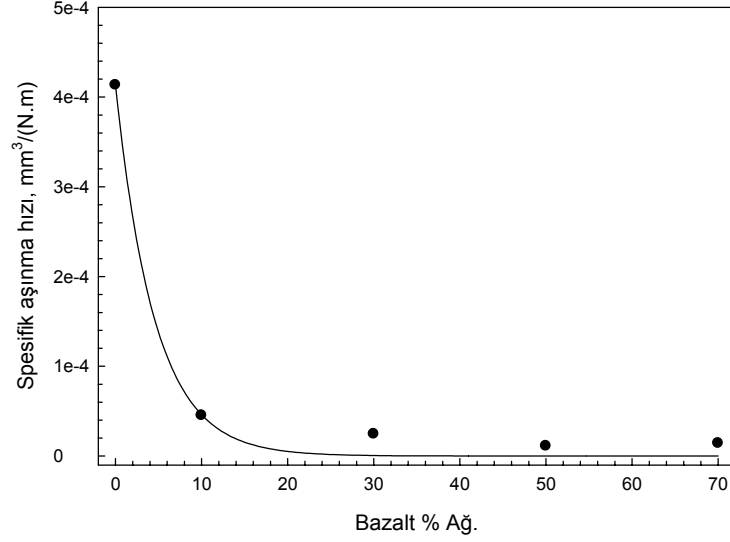


Şekil 4. 5 N ve 20 N yükler için bazalt ilavesiyle aşınma hızının değişimi (kayma hızı 0.5 m/s).

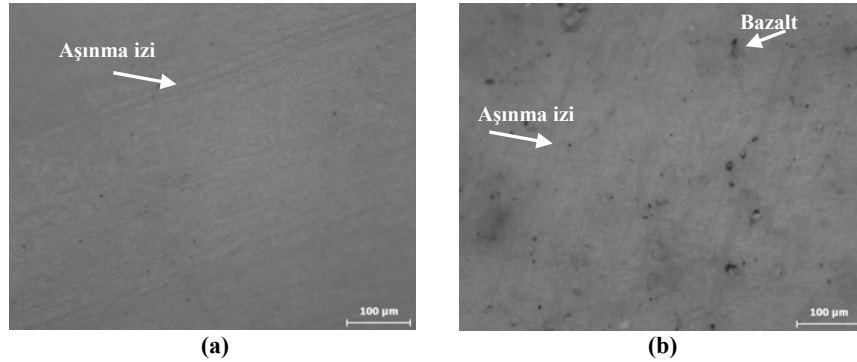


Şekil 5. Takviyeli DYPE kompozitin uygulanan yük ve bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak, aşınma hızının kontur diyagramı, 0.5 m/s.

DYPE ve bazalt ilaveli DYPE kompozitlerin 0.5 m/s kayma hızında spesifik aşınma hızının bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi Şekil 6' da verilmektedir. Şekil 6' den görüldüğü üzere spesifik aşınma hızı, bazalt konsantrasyonunun artışıyla düşmektedir. 20 N yük altında saf DYPE ve DYPE+%10 bazalt içeren kompozit malzemenin, aşınma deneyi sonrası, pin yüzeylerinin optik mikro yapıları Şekil 7' de verilmektedir.



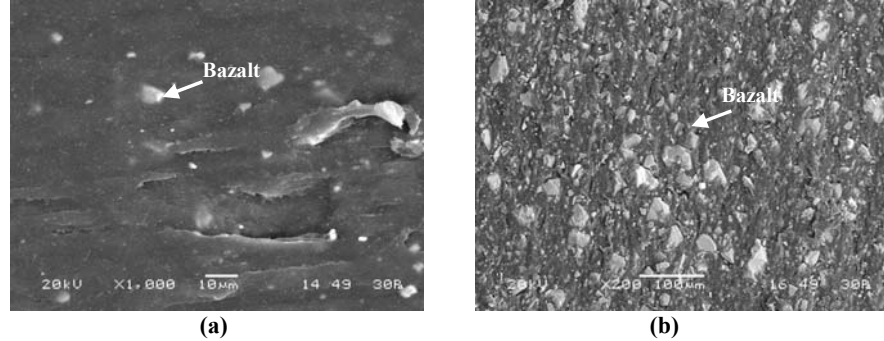
Şekil 6. DYPE, DYPE+%10bazalt, DYPE+%30bazalt, DYPE+%50bazalt, DYPE+%70bazalt için bazalt konsantrasyonu ile spesifik aşınma hızının değişimi (kayma hızı = 0.5 m/s).



Şekil 7. Aşındırılmış yüzeylerin optik mikro yapıları a) saf DYPE, 20 N yük altında, b) DYPE+%10 bazalt, 20 N yük altında

Şekil 7' den görüldüğü üzere, saf DYPE yüzeyinde düzgün ve ince izler oluşmuştur. Aşınma deneyinde çelik ve polimer matrisli kompozit malzeme ara yüzeyinde oluşan sürtünmeye bağlı olarak sıcaklık artışının sonucunda polimerik malzemenin çelik yüzeye sıvanmaktadır. Bunun da pin yüzeyinde cilalama etkisi meydana getirdiği düşünülmektedir. % 10 ve %70 Bazalt dolgululu LDPE matrisli kompozit malzemenin SEM mikroyapıları sırasıyla Şekil 8 a ve b' de verilmektedir. Şekil 8' den görüldüğü üzere toz DYPE matrisi kullanılarak üretilen

kompozit malzemenin SEM mikroyapısında bazalt dolgunun homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Homojen dağılım hem %10 gibi düşük oranlarda hem de %70 gibi yüksek oranlarda yakalanmıştır. DYPE matrisli malzemeler üzerinde yapılmış farklı aşınma deneyi çalışmalarında, bazalt partiküllerinin polimerin aşınma özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir [26].



Şekil 8. a) % 10 bazalt dolgulı DYPE matrisli kompozit malzemenin X1000, b) % 70 bazalt dolgulı DYPE matrisli kompozit malzemenin X200 SEM mikroyapıları

4. SONUÇLAR

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

1. %30 Bazalt ilavesine kadar polimer kompozitlerin sürtünme katsayısı, bazalt ilavesiyle artmaktadır. %30 bazalt ilavesinden sonra, sürtünme katsayısı lineer bir davranış sergilemekte olup, çok fazla değişim göstermemektedir.
2. Aşınma deneyinde kompozit üzerine uygulanan yükün artırılması sonucunda kompozitlerin sürtünme katsayısı artmaktadır.
3. %30 Bazalt içeriğine kadar kompozitlerin aşınma hızları, bazalt içeriğindeki artış ile düşmekte olup, %30 bazalt ilavesinden sonra sabit bir hal almaktadır. Uygulanan yükün artışı ile saf DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin aşınma hızı artmaktadır.
4. DYPE matrisli kompozit malzemede bazalt takviye oranı arttıkça spesifik aşınma hızı düşmektedir.
5. Saf DYPE ve bazalt takviyeli DYPE yüzeylerinde düzgün ve ince izler oluşmuştur.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Bekhet N.E., "Tribological Behavior Of Drawn Polypropylene", Wear 236, 55-61, 1999
- [2] Unal H., Mimaroglu A., Serdar V., "Dry Sliding Performance of Thermoplastics Against Reinforced Unsaturated Polyester (BMC): In Use in Electrical Contact Breakers Components", Wear 261, 841-847, 2006.
- [3] Guiot O., Tighertz L., Coqueret X., "Electron Beam Cross Linking of Extrusion-Blown LDPE Films: 1. Mechanical Properties", European Polymer Journal 35, 565-570, 1999.
- [4] Taekx P. and Taex J.C., "Chain Architecture of LDPE as a Function of Molar Mass Using Size Exclusion Chromatography and Multi-Angle Laser Light Scattering", Polymer 39, 14, 3109-3113, 1998.
- [5] Zhiyonga Y., Mielczarski E., Mielczarski J., Laub D., Buffat P., Klehm U., Albers P., Lee K., Kulik A., Kiwi-Minsker L., Renken A., Kiwi J., "Preparation, Stabilization and

- Characterization of TiO₂ on Thin Polyethylene Films (LDPE): Photocatalytic Applications”, *Water Research* 41, 862–874, 2007.
- [6] Sanchis R., Fenollar O., Garci D., Sanchez L., Balart R., “Improved Adhesion of LDPE Films to Polyolefin Foams for Automotive Industry Using Low-Pressure Plasma”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 28, 445–451, 2008.
- [7] Rosato D.V., Schott N.R., Rosato M.G., “Plastics Engineering, Manufacturing and Data Handbook”, *Plastics Institute of America, Springer*, 2006.
- [8] Weidenfeller B., “Internal Friction Studies of Particulate Filled Polypropylene”, *Materials Science and Engineering A* 442, 371-374, 2006.
- [9] Unal H., Sen U., Mimaroglu A., “Abrasive Wear Behavior of Polymeric Materials”, *Materials and Design* 26, 705–710, 2005.
- [10] Bijwe J., Indumathil J., Rajesh J.J., Fahim M., “Friction and Wear Behavior of Polyetherimide Composites in Various Wear Modes”, *Wear* 249, 715–726, 2001.
- [11] Indumathi J., Bijwe J., Ghosh A.K., Fahim M., Krishnaraj N., “Wear of Cryo-Treated Engineering Polymers and Composites”, *Wear* 225–229, 343–353, 1999.
- [12] Evans D.C., Lancaster J.K., “The Wear of Polymers, in: D. Scott (Ed.)”, *Treatise on Materials Science and Technology* 13, 85–139, 1979.
- [13] Beall G.H., Rittler H.L., “Basalt Glass-Ceramics”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 55, 579–582, 1976.
- [14] Yilmaz S., Ozkan O.T., Gunay V., “Crystallization Kinetics of Basalt Glass”, *Ceramic International* 22, 477–481, 1996.
- [15] Znidarsic V., Kolar D., “The Crystallization of Diabase Glass”, *J. Mater. Sci.* 26, 2490–2494, 1991.
- [16] Karamanov A., Arrizza L., Ergul S., “Sintered Material from Alkaline Basaltic Tuffs”, *Journal of the European Ceramic Society* 29, 4, 595-601, 2009.
- [17] Rehbein P., Wallaschek J., “Friction and Wear Behavior of Polymer/Steel and Alumina/Alumina under High-Frequency Fretting Conditions”, *Wear* 216, 97-105, 1998.
- [18] Van de Welde F. and De Baets P., “The Friction and Wear Behaviour of Polyamide 6 Sliding Against Steel at Low Velocity under Very High Contact Pressure”, *Wear* 209, 106-114, 1997.
- [19] Uzuner F. ve Gediktaş M., “Salınım Hareketi Yapan Radyal Kaymalı Plastik Yataklarda Sürtünme”, *İ.T.Ü. Dergisi*, cilt. 3 sayı. 6, 91-98, Aralık 2004.
- [20] Bowden E.P. ve Tabor D., “The Friction And Lubrication of Solids”, *Oxford University Press, London*, 1954.
- [21] Rajesh J.J., Bijwe J., Tewari U.S., “Abrasive Wear Performance of Various Polyamides”, *Wear* 252, 769–776, 2002.
- [22] Wang Y.Q., Lee J., “Sliding Wear Behavior And Mechanism of Ultra-High Molecular Weight Poly Ethylene”, *Materials Science Engineering A* 266, 156-160, 1999.
- [23] Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V., “Tribology of Polymers: Adhesion, Friction, Wear, and Mass-Transfer”, *Tribology International* 38, 11-12, 910-921, 2005.
- [24] Yang J.M., Chen H.S., Hsu Y.G., Lin F.H., Chang Y.H., “Organic-Inorganic Hybrid Sol-Gel Materials: 2 Application for dental composites”, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 251, 61-72, 1997.
- [25] Vina J., Garcia M.A., Castrillo M.A., Vina I. and Arguelles A., “Wear Behavior of a Glass Fiber-Reinforced PEI Composite”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 21, 279-286, 2008.
- [26] Akinci A., Yetgin, S.H., Yilmaz S. ve Sen U., “Bazalt Dolgulu Polimer Kompozitlerin Aşınma Davranışları”, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2009) (basım aşamasında).