

## BAZALT DOLGULU POLİMER KOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI

Akın Akıncı<sup>a,\*</sup>, S. Hakan Yetgin<sup>b</sup>, Şenol Yılmaz<sup>a</sup> ve Uğur Şen<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, 54187, Sakarya  
E-posta: akinci@sakarya.edu.tr, Tel: 0 264 2955777, Faks: 0 264 2955601

<sup>b</sup>Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Esentepe Kampüsü, 54187, Sakarya

### ÖZET

Bu çalışmada, volkanik kayalardan bazaltın takviye malzemesi olarak düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) matrikse, %10-70 arasındaki değişen oranlarında ilave edilmesiyle elde edilen partikül dolgulu polimer matriksli kompozitlerin değişik sürtünme hızları ve sabit yük altında pin on disk aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testleri, atmosferik ortamda, 20 N yük altında AISI 4140 çelik diskin 0.5 m/s ve 1.5 m/s dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma hızı ve sürtünme katsayısının, bazalt takviyesi ile azaldığı görülmüştür. Bazalt takviyeli DYPE malzemenin kayma hızına ve bazalt miktarına bağlı olarak, sürtünme katsayısı 0.11 ve 0.51, aşınma oranı  $7.18 \times 10^{-4}$ - $2.60 \times 10^{-2}$  mm<sup>3</sup>/m' arasında değişmektedir.

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

## WEAR PROPERTIES OF BASALT FILLED POLYMER COMPOSITES

### ABSTRACT

In this study, pin-on-disc wear tests of basalt filled, one of the volcanic rocks as a filler material, (10-70wt.%) LDPE polymer matrix composites were performed depending on various sliding speeds at 20 N loads under dry sliding conditions. Wear tests were carried out with configuration of a polymer pin on a rotating AISI 4140 steel disk in the atmospheric conditions under the loads of 20N and at the sliding speeds of 0.5 m/s and 1.5 m/s. The results showed that increase in basalt content of the basalt filled LDPE composites resulted in a decrease of the friction coefficient and wear rate. While the friction coefficient of LDPE composites was changing between 0.11 and 0.51 and basalt content of the polymer composites, and wear rates of the basalt filled LDPE composites ranged from  $7.18 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/m to  $2.60 \times 10^{-2}$  mm<sup>3</sup>/m, depending on sliding speeds and basalt quantity.

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

### 1. GİRİŞ

Termoplastik polimerik malzemelerden biri olan polietilen (PE) üzerinde yapılan son yıllardaki çalışmalar, malzemenin çok sayıdaki sektörde aşınmaya dirençli yapı malzemesi olarak kullanılabilmesini göstermektedir. Triboloji ile ilgili makalelerde polimerik malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarına yer verilmektedir. Elektriksel olarak temas eden malzemeler, sübaplar, nozullar ve polimer-metal yatak malzemeleri aşınma problemi yaşanan alanlardan bazılarıdır. Rehbein ve Wallaschek [1], çalışmalarında birbirine temas eden farklı polimer-çelik ve alümina-alümina

malzemelerin sürtünme ve aşınma davranış mekanizmalarını incelemişlerdir. Rajesh ve arkadaşları [2], poliamid ve poliamid kompozit çeşitlerinin aşınma davranışlarını moleküler ağırlık, kristalinite, mikro yapı ve mekaniksel özellikleri açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Gao ve diğerleri [3], etilentetrafloroetilen (ETFE), poliamid, poliimid, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) gibi kendi kendine yağlayıcı kompozitler gibi çeşitli polimerlerin çelik yüzeyindeki tribolojik özelliklerini incelemiştir. Bahadur ve diğerleri [4], çeşitli bakır oksit ve çinko bileşik dolguları içeren polyester malzemelerin, atmosferik koşullarda, 1 m/s kayma hızında, çelik yüzey üzerindeki aşınma



davranışını pin-on-disk aşınma test cihazı kullanarak incelemiştir. Yu ve arkadaşları [5],  $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$  ve  $Cr_4C_2$  gibi seramik partiküllerin polifenilen sülfid (PPS) matrikse ilavesi ile ürettikleri kompozit malzemelerin sürtünme aşınma özelliklerini pin-on-disk cihazı kullanarak incelemiştir. Bununla birlikte sertlik ile tribolojik özellikleri de karşılaştırmışlardır. Aşınma deneyinde 5x6 mm boyutlarında pinler ve AISI02 takım çeliği kullanarak, testleri 1 m/s kayma hızında ve 19.6 N yük altında uygulamışlardır. Suh ve diğerleri [6], ultra yüksek yoğunluklu polietilen (UYYPE) içeren polietilen malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının karakterizasyonu konusunda çalışmışlardır. Aokie ve arkadaşları [7], ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UYMAPE) disklerin tribolojik karakteristiklerini incelemişler, disklerin termal haritalarını çıkarmışlar ve hız ile sürtünme katsayısının değişimini araştırmışlardır. Guermazi ve arkadaşları [8], petrol ve gaz boru hatlarında kullanılan PE kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışlarını, malzemeleri saf su ve sentetik deniz suyu ortamlarında tuttuktan sonra karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Polietilen malzemeler konusunda bazı araştırmacılar erozif aşınma şartlarını da araştırmışlardır. Geleneksel partikül erozyon testleri olan kumlama [9], santrifüj [10] ve çamur erozyon testleri [11,12] erozyon dayanımı deneylerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Bazı araştırmacılar, çeşitli polimerik malzemelerin erozif hasarları ile partikül çarpma şartları arasındaki korelasyonu incelemektedir [13,14]. Walley ve Field [15], yüksek çarpma hızlarında polietilenin erozif davranışını incelemişler ve maksimum erozyon açısının düşük olduğunu göstermişlerdir. Knuuttila ve arkadaşları [16], kuru ve çamur ortamında yaptıkları aşınma direnci çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Oblozinsky ve arkadaşları [17], çamur destekli derin çukur kazma tekniğinde kullanılan diyafram duvarlarının dayanımını, elastoplastik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Mertiny [18], petrol kuyusu sondajında kullanılan ve çıkan kumun sıvı ortamında aktarılmasını sağlayan filaman örgülü fiber takviyeli polimer boruyu geliştirmiştir.

Yabuki ve arkadaşları [19], düşük yoğunluklu polietilen (DYPE), lineer düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE), orta yoğunluklu polietilen (OYPE), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), polietilen 100 (PE-100), çapraz bağlı polietilen (XL-YYPE), ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UYMA-PE), polivinilklorür (PVC), fenolformaldehid (PF), cam fiber takviyeli polimer (CTP), çelik ve dökme demir malzemelerden oluşan atık su ve yağmur yeraltı borularının erozif aşınma davranışlarını incelemiştir. Şehirlerin kanalizasyon sistemlerinde kullanılan düşük basınçlı

boru hatları korozif çözeltilerin yanı sıra evsel atıklar ile sulu çamur taşımakta ve yüksek temizleme basınçlarına maruz kalmaktadır. Özellikle çelik ve dökme demir malzemeler, korozif ortam dolayısıyla kısa sürede kullanım dışı kalmaktadır. Dolayısıyla, bu tür ortamlarda çalışan malzemelerin üstün korozyon özellikleri sebebiyle polimerik malzemeler grubundan seçilmesi uygun görülmektedir. Kolay kaynaklanabilirlik, dış basınçlara karşı esneklik ve eğme direnci, kolay montaj özellikleri, korozyona direnç, aşınmaya direnç, sızdırmazlık, çevre koşullarına direnç gibi üstün özellikleri sebebiyle polietilenler bu alanda kullanılan malzemeler arasında dikkat çekmektedir.

Bazalt, kimyasal olarak yaklaşık %50  $SiO_2$  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 [20-23].

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

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kompozit üretiminde kullanılan matriks malzemesi DYPE, Petkim A.Ş.' den, takviye malzemesi olan bazalt ise Konya' dan temin edilmiştir. Saf DYPE ve ağırlıkça %10, %30, %50 ve %70 oranlarında bazalt partikül takviyeli dört farklı bazalt oranına sahip DYPE matriksli kompozit olmak üzere toplam beş numunenin kuru sürtünme şartlarında, aşınma davranışı incelenmiştir.

Bileşimi Tablo 1' de verilen bazalt, önce öğütülmüş ve 90  $\mu$ m elekten elenerek sınıflandırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak dikdörtgen plakalar halinde hazırlanmıştır. Enjeksiyonla kalıplama sırasında kullanılan proses parametrelerinden; üç farklı ısıtma bölgesindeki sıcaklıklar 165, 175, 180  $^{\circ}C$ , enjeksiyon ve kalıp basınçları sırasıyla 5 MPa ve 9 MPa, kalıp sıcaklığı 30  $^{\circ}C$ , basınç uygulama süresi 30 s olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Bazalt' ın kimyasal kompozisyonu.



Bileşim	% Ağırlıkça
SiO <sub>2</sub>	45.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.95
CaO	9.28
MgO	6.62
K <sub>2</sub> O	1.64
Na <sub>2</sub> O	4.76
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.04
Yanma kaybı (YK)	2.63

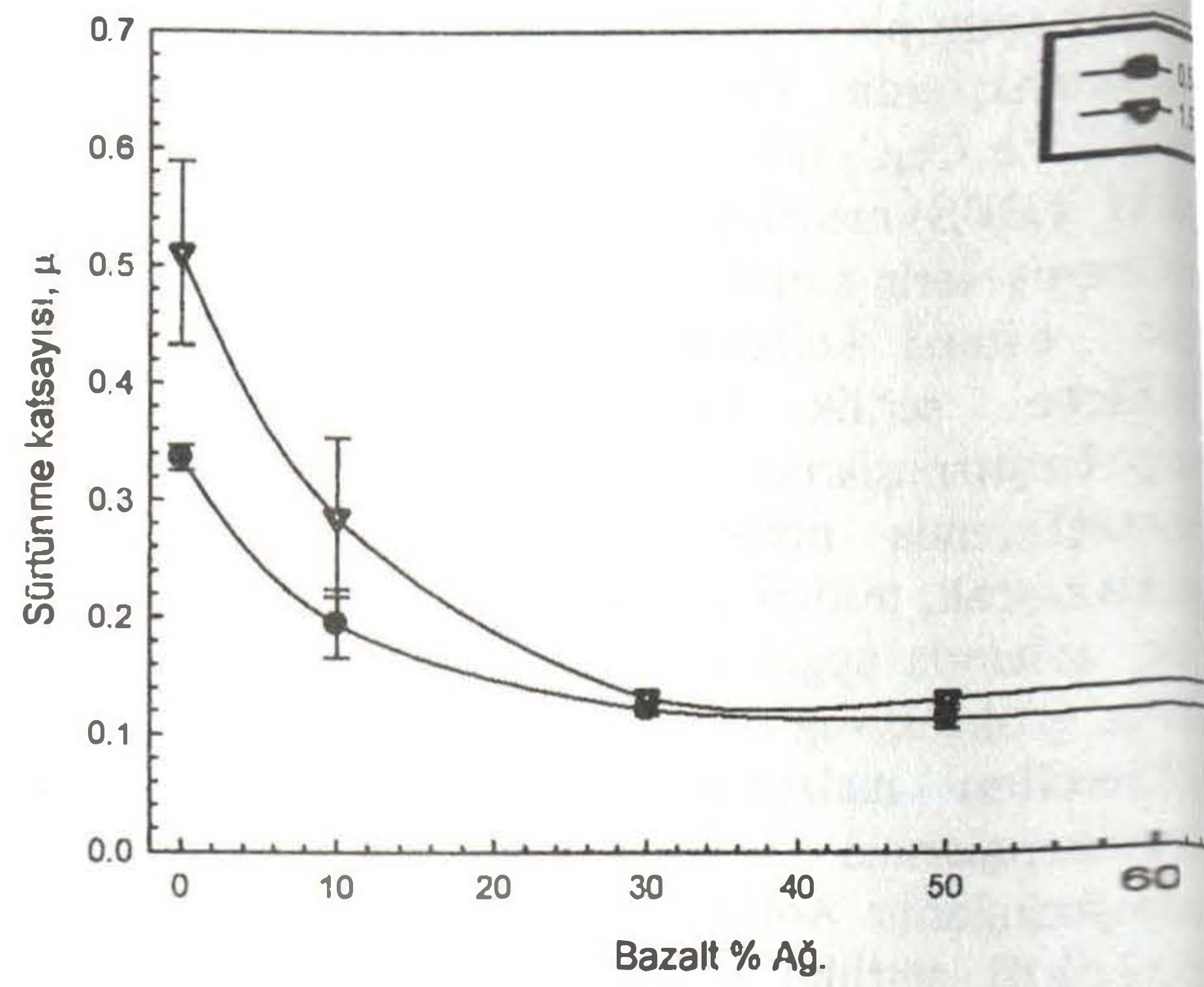
Aşınma deneyleri, pin-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak ASTM G 99 standardına göre uygulanmıştır. Deneysel proses parametreleri Tablo 2' de verilmektedir. Yoğunluk ve sertlik ölçümleri sırasıyla ASTM D 792 ve ASTM D 2240 standartlarına göre uygulanmıştır. Sertlik deneyinde Instron S1 Durotech, dijital Shore D cihazı kullanılmıştır.

Tablo 2. Aşınma deneyi için proses parametreleri.

Parametreler	Deneysel Şartlar
Uygulanan yük (N)	20
Hız (m/s)	0.5 ve 1.5
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, 20N yük altında, bazalt içeriği ve kayma hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi Şekil 1' de verilmektedir. %30 bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgulu DYPE kompozitlerin kararlı hal sürtünme katsayısı, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı sabit bir hal almaktadır. Bazalt takviyeli kompozitlerin bazalt içeriğine (%70 bazalt) bağlı olarak sürtünme katsayısı 0.5 m/s ve 1.5 m/s hızlara karşılık sırasıyla %64 ve %73 düşmüştür. İlave olarak, uygulanan kayma hızının %200 artırılmasıyla bazalt takviyeli DYPE kompozitin sürtünme katsayısı %35 artış göstermiştir. Bazalt konsantrasyonu arttıkça ve kayma hızı düştükçe DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısının düştüğü görülmektedir.

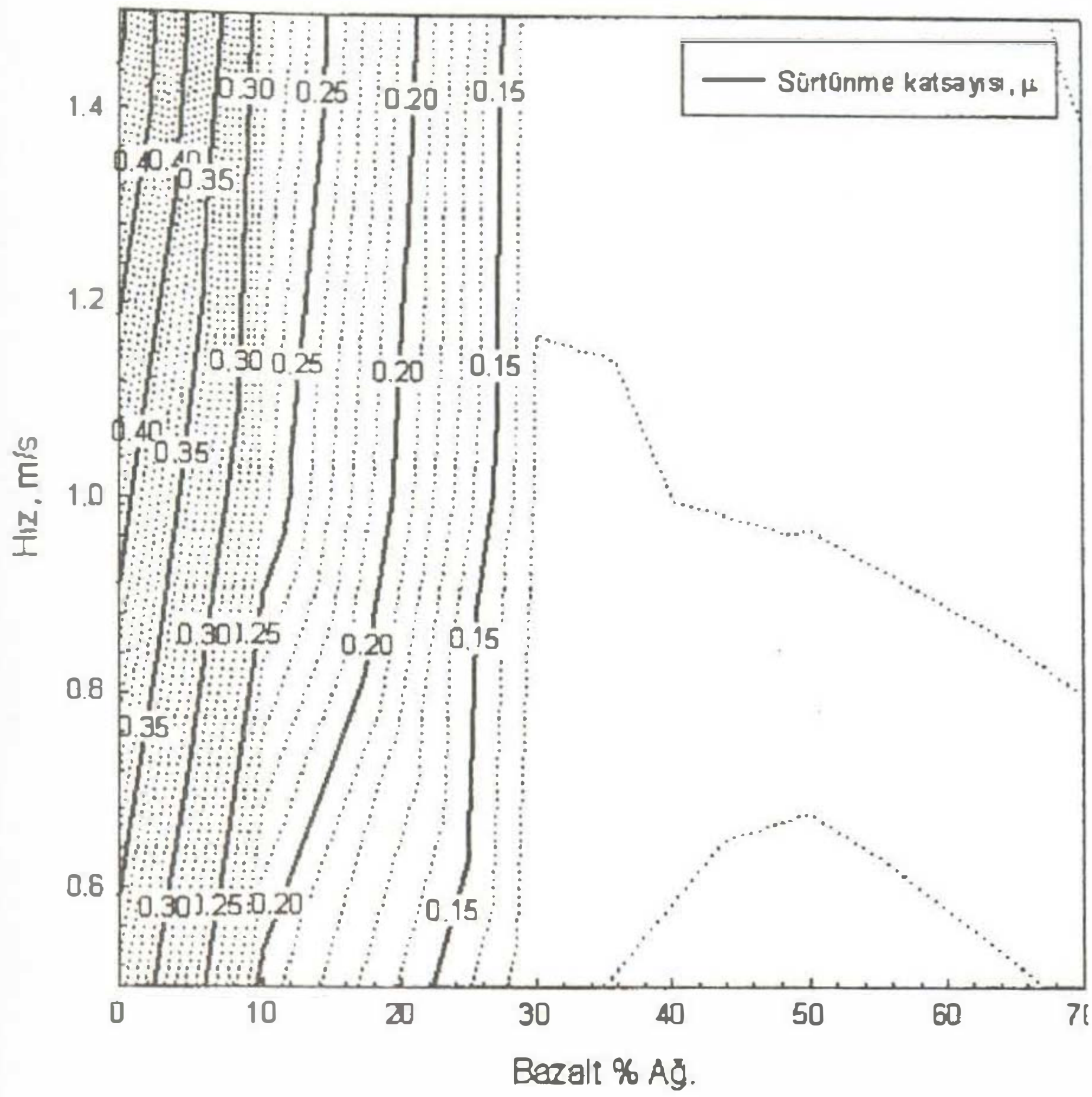


Şekil 1. 0.5 m/s ve 1.5 m/s kayma hızları için bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi (uygulanan yük 20 N).

DYPE kompozitin bazalt içeriğine ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Şekil 2' deki kontur diyagramda verilmiştir. 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 2' de verilen diyagram kullanılmaktadır.

Myshkin ve arkadaşları [24], aşınma şartlarının polimerin sürtünme katsayısını etkilediğini açıklamışlardır. Viskoelastik malzeme olarak polimerler, sürtünme ısılarına karşı oldukça hassastır. Bazalt konsantrasyonun, sürtünme katsayısına etkisinin uygulanan yükten çok daha fazla olduğu Şekil 1 ve 2' den görülmektedir. Saf DYPE' nin, düşük erime noktası, düşük sertlik ve yüksek basınç sebepleriyle çelik yüzey üzerinde yüksek aşınma hızları sergilediği düşünülmektedir [25]. DYPE kompozitin bazalt içeriğinin artmasıyla ve polimerin sertliği (Bkz. Tablo 3) artmıştır. Yang ve diğerleri [26], 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 sonucuna varılmıştır.



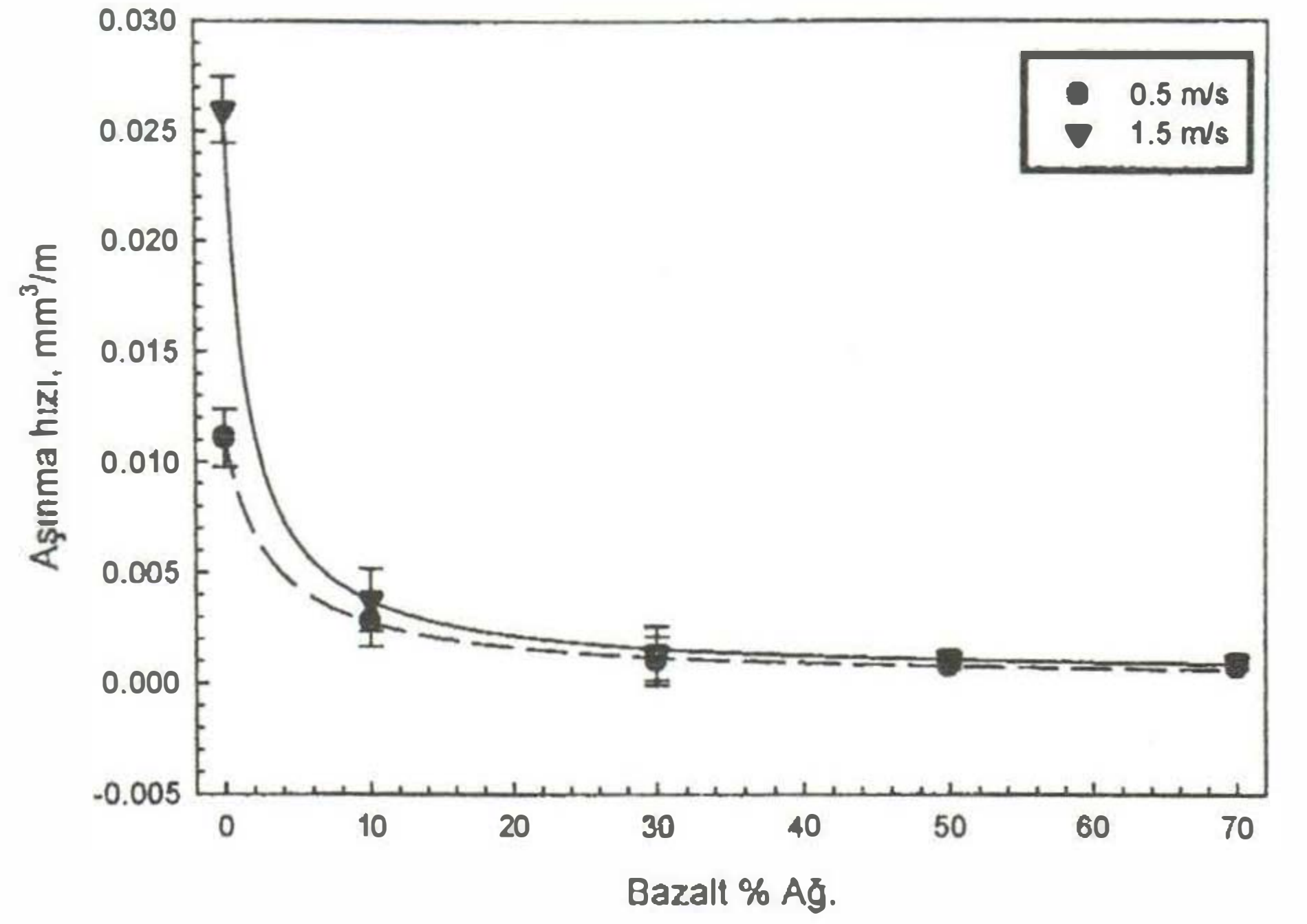


Şekil 2. Takviyeli DYPE kompozitin kayma hızı ve bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak, sürtünme katsayısının kontur diyagramı (uygulanan yük 20 N).

Tablo 3. DYPE kompozitin, bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak bağlı olarak sertlik ve yoğunluk değerlerinin değişimi.

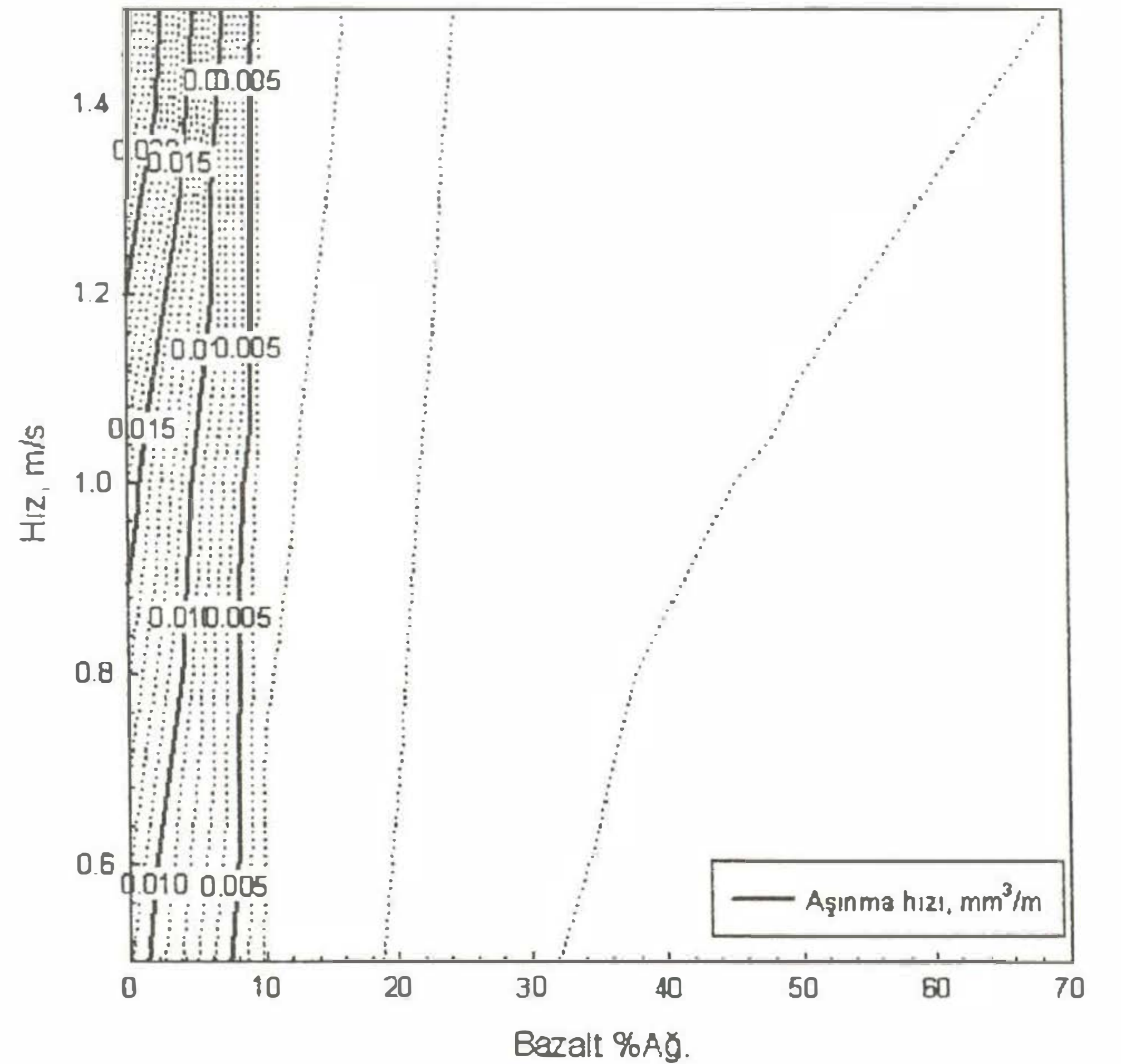
Bazalt konsantrasyonu (%)	Sertlik (Shore D)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Saf DYPE	45.50	0.94
10	48.00	1.01
30	49.70	1.17
50	55.30	1.42
70	68.70	1.81

DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin, 20 N yük altında, bazalt içeriği ve kayma hızlarına bağlı olarak aşınma oranının değişimi Şekil 3' de verilmektedir. %30 Bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgulu DYPE kompozitlerin aşınma oranı, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin aşınma oranı sabit bir hal almaktadır. %70 bazalt takviyesiyle kompozitin aşınma oranı 0.5 m/s ve 1.5 m/s hızlara karşılık orijinal duruma göre sırasıyla %94 ve %96 düşmüştür.



Şekil 3. 0.5 m/s ve 1.5 m/s kayma hızları için bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak aşınma oranının değişimi (uygulanan yük 20 N).

DYPE kompozitin bazalt konsantrasyonuna ve kayma hızlarına bağlı olarak aşınma oranındaki değişim Şekil 4' deki kontur diyagramda verilmektedir.



Şekil 4. Takviyeli DYPE kompozitin kayma hızı ve bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak, aşınma oranının kontur diyagramı (uygulanan yük 20 N).

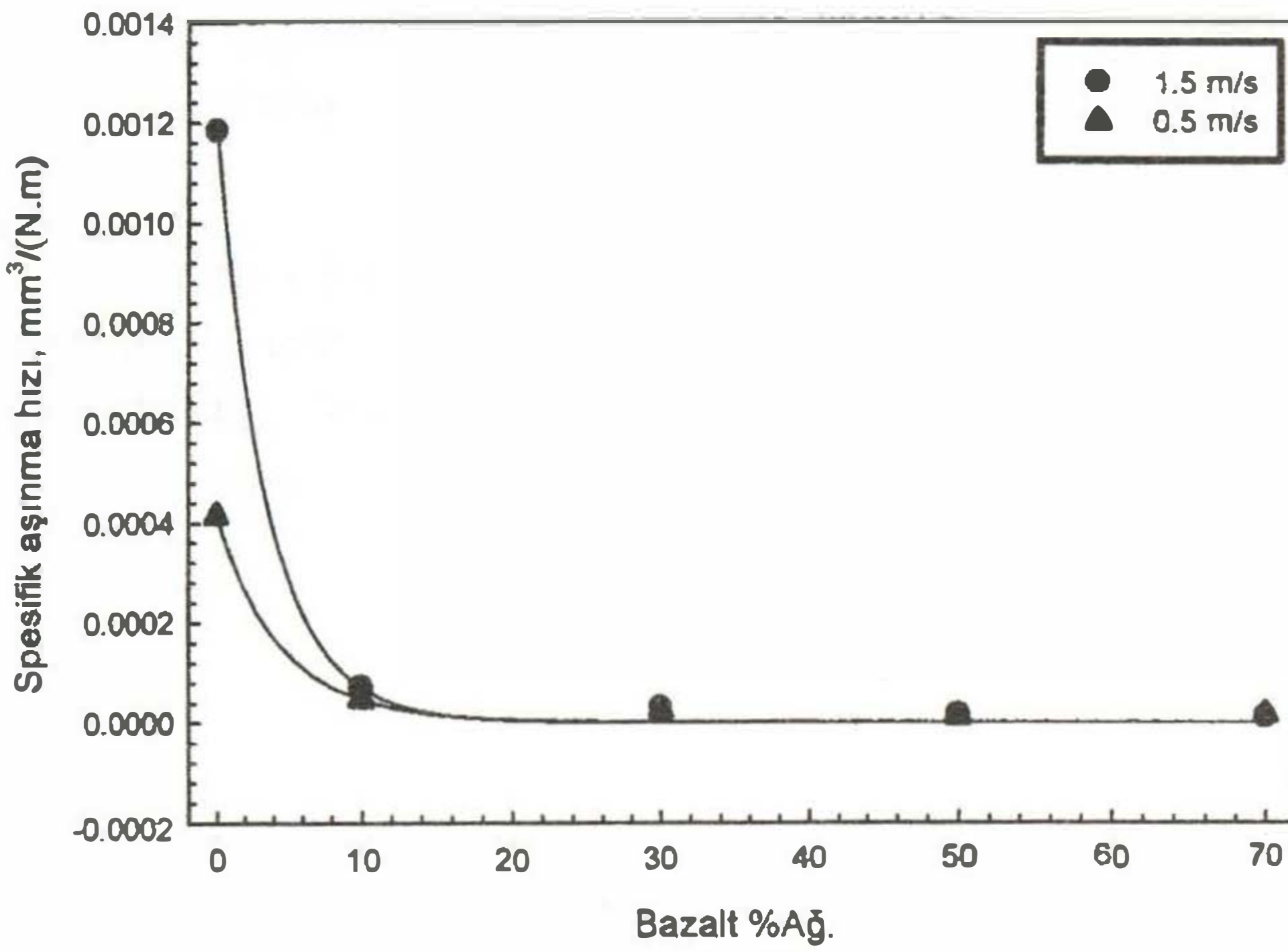
Bu haritalar, kompozitin uygun aşınma direnci için doğru çalışma şartının seçimini sağlamaktadır. Aynı zamanda, uygun kompozisyon, uygulanan yük ve kayma hızının seçimi ile bu kompozitin aşınma oranının kontrolü mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, en düşük aşınma oranına ulaşmak için, doğru malzeme kombinasyonu, uygulanacak yük ve kayma hızı seçiminde de Şekil 5' de verilen diyagram kullanılmaktadır.

Şekil 3 ve 4' den görüldüğü üzere DYPE kompozitin bazalt içeriğinin aşınma oranına olan



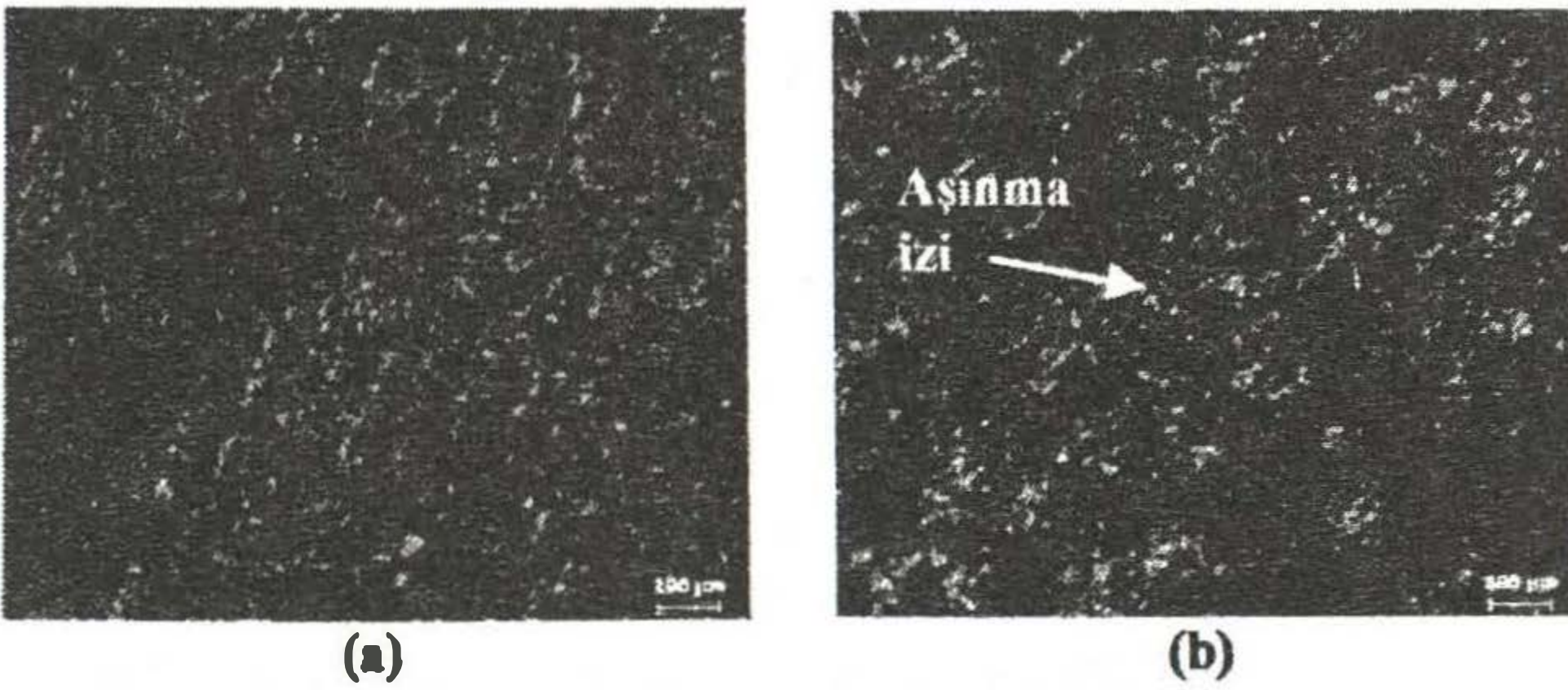
etkisi, uygulanan kayma hızından çok daha fazladır. Saf DYPE' nin, düşük erime noktası, düşük sertlik ve yüksek basınç sebepleriyle çelik yüzey üzerinde yüksek aşınma hızları sergilediğine inanılmaktadır. DYPE kompozitin bazalt içeriğinin artmasıyla, polimerin sertliği artmıştır. Bu sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir [26, 27].

DYPE ve bazalt ilaveli DYPE kompozitlerin 0.5 m/s ve 1.5 m/s kayma hızında, aşınma hızının uygulanan yüke bölünmesiyle hesaplanan ortalama spesifik aşınma oranının bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi Şekil 5' de verilmektedir. Şekil 5' den görüldüğü üzere spesifik aşınma oranı, bazalt konsantrasyonunun artışıyla düşmektedir.



Şekil 5. Bazalt konsantrasyonuna bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi (uygulanan yük 20 N).

0.5 m/s kayma hızında saf DYPE ve DYPE+%50 bazalt içeren kompozit malzemenin, aşınma deneyi sonrası, pin yüzeylerinin optik mikro yapıları Şekil 6' da verilmektedir. Şekil 6' dan görüldüğü üzere, saf DYPE yüzeyinde düzgün ve ince izler oluşmuştur. Aşınma deneyinde çelik ve polimer matrisli kompozit malzeme ara yüzeyinde oluşan sıcaklık sebebiyle polimerik malzemenin çelik yüzeye sıvandığı ve böylece pin yüzeyinde cilalama etkisi meydana getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 6. Aşındırılmış yüzeylerin optik mikro yapıları, a) 1.5 m/s kayma hızında saf DYPE, b) 1.5 m/s kayma hızında, DYPE+%50 bazalt.

#### 4. SONUÇLAR

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

1. %30 Bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgulu DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı sabit bir hal almaktadır.
2. Uygulanan hızın artışı ile saf DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı artmaktadır.
3. %30 Bazalt içeriğine kadar DYPE ve bazalt dolgulu DYPE kompozitlerin aşınma hızları, bazalt içeriğindeki artış ile düşmektedir. %30 bazalt ilavesinden sonra, bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin aşınma oranı sabit bir durum sergilemektedir.
4. Uygulanan hızın artışı ile saf DYPE ve bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin ortalama aşınma oranı artmaktadır.
5. Spesifik aşınma hızı %10 bazalt ilavesine kadar ani olarak düşü göstermekte ve %10 bazalt ilavesinden sonra lineer bir davranış göstermektedir.
6. Saf DYPE ve bazalt takviyeli DYPE yüzeylerinde düzgün ve ince izler oluşmuştur. Aşınan pin yüzeylerinden elde edilen optik mikro yapılardan bazalt takviyeli DYPE kompozitlerin, saf DYPE' den daha derin izlere sahip olduğu tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1]. Rehbein, P., Wallaschek, J., "Friction and wear behavior of polymer/steel and alumina/alumina under high-frequency fretting conditions", Wear 216, 97-105, 1998.
- [2]. Rajesh, J.J., Bijwe, J., Tewari, U.S., "Abrasive wear performance of various polyamides", Wear 252, 769-776, 2002.
- [3]. Gao, J., Mao, S., Liu, J., Feng, D., "Tribochemical effects of some polymers/stainless steel", Wear 212, 238-243, 1997.
- [4]. Bahadur S., Zhang L., Anderegg, J.W., "The effect of zinc and copper oxides and other zinc compounds as fillers on the tribological behavior of thermosetting polyester", Wear 203-204, 464-473, 1997.
- [5]. Yu, L., Bahadur, S., Xue, Q., "An investigation of the friction and wear behaviors of ceramic particle filled polyphenylene sulfide composites", Wear 214, 54-63, 1998.
- [6]. Suh, N.P., Mosleh, M., Arinez, J., "Tribology of polyethylene homocomposites", Wear 214, 231-236, 1998.
- [7]. Aoike, T., Yokoyama, D., Uehara, H., Yamanobe, T., Komoto, T., "Tribology of ultra-high molecular weight polyethylene disks molded at different temperatures", Wear 262, 742-748, 2007.



- [8]. Guermazi, N., Elleuch, K., Ayedi, H.F., Fridrici, V., Kapsa, P.H., "Tribological behaviour of pipe coating in dry sliding contact with steel", *Materials and Design*, doi: 10.1016/j.matdes.2008.12.003, 2009.
- [9]. Shipway, P.H., Hutchings, I.M., "Measurement of coating durability by solid particle erosion", *Surf. Coat. Technol.* 71, 1-8, 1995.
- [10]. Iwai, Y., Honda, T., Yamada, H., Matsubara, T., Larsson, M., Hogmark, S., "Evaluation of wear resistance of thin hard coatings by a new solid particle impact test", *Wear* 251, 861-867, 2001.
- [11]. Wood, R.J.K., Puget, Y., Trethewey, K.R., Stokes, K., "The performance of marine coatings and pipe materials under fluid-borne sand erosion", *Wear* 219, 46-59, 1998.
- [12]. Iwai, Y., Numbu, K., "Slurry wear properties of pump lining materials", *Wear* 210, 211-219, 1997.
- [13]. Hojo, H., Tsuda, K., Yabu, T., "Erosion Damage of Polymeric Material By Slurry", *Wear* 112, 17-28, 1986.
- [14]. Stack, M.M., Pungwiwat, N., "Slurry erosion of metallics, polymers, and ceramics: particle size effects", *Mater. Sci. Technol.* 15, 337-344, 1999.
- [15]. Walley, S.M., Field, J.E., "The Erosion and Deformation of Polyethylene By Solid-Particle Impact", *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 321, 277-303, 1987.
- [16]. Knuuttila, J., Ahmaniemi, S., Mantyla, T., "Wet abrasion and slurry erosion resistance of thermally sprayed oxide coatings", *Wear* 232, 207-212, 1999.
- [17]. Oblozinsky, P., Ugai, K., Katagiri, M., Saitoh, K., Ishii, T., Masuda, T., Kuwabara K., "A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elasto-plastic FEM" *Computers and Geotechnics* 28, 2145-2159, 2001.
- [18]. Mertiny, P., "Urethane-lined polymer composite pipe is designed to resist slurry hydrotransport abrasion and corrosion", *Materials Performance* 47, 16-18, 2008.
- [19]. Yabuki, A., Sugita, K., Matsumura, M., Hirashima, M., Tsunaga, M., "The anti-slurry erosion properties of polyethylene for sewerage pipe use", *Wear* 240, 52-58, 2000.
- [20]. Beall, G.H., Rittler, H.L., "Basalt glass-ceramics", *Am. Ceram. Soc. Bull.* 55, 579-582, 1976.
- [21]. Yilmaz, S., Ozkan, O.T., Gunay, V., "Crystallization kinetics of basalt glass", *Ceramic International* 22, 477-481, 1996.
- [22]. Znidarsic, V., Kolar, D., "The crystallization of diabase glass", *J. Mater. Sci.* 26, 2490-2494, 1991.
- [23]. Karamanov, A., Arrizza, L., Ergul, S., "Sintered material from alkaline basaltic tuffs", *Journal of the European Ceramic Society* 29, 4, 595-601, 2009.
- [24]. 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.
- [25]. Rosato, D.V., Schott, N.R., Rosato, M.G., "Plastics Engineering, Manufacturing and Data Handbook", *Plastics Institute of America, Springer*, 2006.
- [26]. 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.
- [27]. 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.