



Konferans Bildirisi

Otomotiv Sektöründe Bilyalı Mafsal Yatak Uygulamaları İçin Polioksümetilen (POM) Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Karşılaştırmalı Analizi

Ali Yazgan^{1,2*}, Yaşar Sert³, Tevfik Küçükömeroğlu³, Mustafa Enes Taşcıoğlu³, Kutay Çava⁴, Mustafa Aslan^{4,5*}

¹Teknorot Otomotiv Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş., Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0003-4914-7575>, E-mail: ali.yazgan@teknorot.com,

²Atatürk Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0003-4914-7575>, E-mail: ali.yazgan@teknorot.com,

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0001-7742-0335>, E-mail: ysert@ktu.edu.tr,

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0002-4392-9966>, E-mail: tkomer@ktu.edu.tr,

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Medikal Cihaz Tasarım ve Üretim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Orcid ID:<https://orcid.org/0009-0009-5264-9753>,

⁴Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0001-3438-5418>, E-mail: cavakutay@ktu.edu.tr,

⁴Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid ID:<https://orcid.org/0000-0003-2299-8417>, E-mail: maslan@ktu.edu.tr,

* Ali YAZGAN: ali.yazgan@teknorot.com; Tel.: 0507-186-5785

(First received September 23, 2023 and in final form December 25, 2023)

3rd International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2023)
December 13 - 15, 2023

Reference: Yazgan, A., Sert Y., Küçükömeroğlu, T., Taşcıoğlu, M., E., Çava, K., Aslan, M. Otomotiv Sektöründe Bilyalı Mafsal Yatak Uygulamaları İçin Polioksümetilen (POM) Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Karşılaştırmalı Analizi. Orclever Proceedings of Research and Development,3(1), 197-206.

Özet

Bu çalışma, otomotiv endüstrisinde bilyalı mafsal rulman uygulamaları için tasarlanmış Polioksümetilen (POM) malzemelerin aşınma özelliklerini incelemektedir. İki farklı POM malzemesi; ticari olarak kullanılan homopolimer yapıdaki Delrin marka POM (Homopolimer POM) ve Kevlar elyaf takviyeli homopolimer yapıdaki Delrin marka POM (Kevlar Takviyeli POM)



olarak adlandırılacaktır) ele alınmıştır. Bu malzemeler laboratuvar tipi bir enjeksiyon cihazı kullanılarak şekillendirilmiş ve pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak laboratuvar koşullarında aşınma davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Aşınma testleri, 20 N yük ve 150 rpm dönme hızında, atmosferik ortamda ve Al₂O₃ aşındırıcı karşı yüzey kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerindeki aşınma izleri, aşınma hacimlerini belirlemek için temasız optik profilometre ile incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, Homopolimer POM'un 0,11 sürtünme katsayısına sahip olduğunu, buna karşın Kevlar Takviyeli POM'un daha düşük bir sürtünme katsayısı olan 0,07'ye sahip olduğunu göstermiştir. Homopolimer POM için aşınma oranı 9.7×10^{-6} mm³/Nm olarak belirlenirken, Kevlar Takviyeli POM'da bu oran biraz daha düşük, 8.97×10^{-6} mm³/Nm olarak ölçülmüştür. Bu aşınma oranları, aşınma testlerinde kullanılan Al₂O₃ bilyelerin yüzeylerinin optik profilometre ile incelenmesiyle desteklenmiştir. Özellikle, Kevlar Takviyeli POM ile yapılan aşınma testinde kullanılan aşındırıcı bilyenin yüzeyinde 0,6 mm çapında bir transfer tabakası oluşurken, Homopolimer POM'u aşındıran karşı yüzeyde 0,97 mm çapında daha büyük bir transfer tabakası oluşmuştur. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri, sıvanma ve kılcal yanal çatlaklarla birlikte delaminasyonların etkin aşınma mekanizmaları olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, Kevlar Takviyeli POM, bilyalı mafsallarda uygulamalarında Homopolimer POM'a kıyasla yaklaşık %10 daha yüksek aşınma performansı sergilemekte olup, otomotiv uygulamalarında artırılmış dayanıklılık için uygun bir seçenek olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar: Polioksimetilen; Homopolimer; Kopolimer; Enjeksiyon kalıplama; Tribolojik özellikler



Conference Article

Comparative Analysis of Wear Characteristics in Polyoxymethylene (POM) Materials for Ball Joint Bearing Applications in the Automotive Sector

Abstract

This study investigates the wear properties of Polyoxymethylene (POM) materials, specifically designed for ball joint bearing applications in the automotive industry. Two distinct types of POM materials were examined: a commercially used homopolymer POMs, known as Delrin with homopolymer composition (Delrin 100NC010), and a kevlar fiber-reinforced homopolymer POM (Delrin 100KM NC000). These materials were molded using a laboratory-type injection molding device and their wear behaviors were comparatively analyzed using a pin-on-disk wear test apparatus under laboratory conditions. The wear tests were conducted at a load of 20 N and a rotational speed of 150 rpm, using Al₂O₃ as the abrasive counter surface in an atmospheric environment. The wear tracks on the sample surfaces were examined using a non-contact optical profilometer to determine the wear volumes.

The findings revealed that the Homopolymer POM exhibited a friction coefficient of 0.11, while the Kevlar-Reinforced POM showed a lower coefficient of 0.07. The wear rate for the Homopolymer POM was determined to be $9.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, whereas the Kevlar-Reinforced POM demonstrated a slightly lower wear rate of $8.97 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. These wear rate values were further corroborated by examining the Al₂O₃ ball surfaces used in the wear tests with an optical profilometer. Notably, the abrasive ball surface used with the Kevlar-Reinforced POM developed a transfer layer with a diameter of 0.6 mm, in contrast to a larger 0.97 mm diameter transfer layer formed on the counter surface abrading the Homopolymer POM. SEM images of the wear tracks indicated that delamination accompanied by smearing and micro-cracking were the predominant wear mechanisms.

In conclusion, the Kevlar-Reinforced POM demonstrates approximately 10% higher wear performance compared to the Homopolymer POM in ball joint bearing applications, highlighting its suitability for enhanced durability in automotive applications.

Keywords: Polyoxymethylene; Homopolymer; Copolymer; Injection molding; Tribological characterization



1. Giriş

Polioksimetilen (POM) malzemeler, özellikle otomotiv sektöründe bilyalı mafsallarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kevlar gibi elyaflarla güçlendirilmiş POM malzemeleri, artan mekanik mukavemet ve iyileştirilmiş aşınma direnci sağlamak amacıyla araştırılmıştır. Bu çalışma, homopolimer POM ve Kevlar ile takviyeli POM malzemelerinin aşınma özelliklerini karşılaştırmaktadır.

Gelişen otomotiv teknolojileri, malzeme bilimindeki yenilikleri de beraberinde getirmekte ve bu yenilikler, özellikle bilyalı mafsallarda yaygın olarak kullanılan Polioksimetilen (POM) malzemelerin, Kevlar gibi takviyelerle nasıl iyileştirilebileceğini incelemektir. POM malzemelerin tribolojik özellikleri, yani sürtünme ve aşınma dirençleri, bu uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

Araştırmalar göstermiştir ki, POM'un takviye edilmiş versiyonları, özellikle Kevlar elyaf ile güçlendirildiğinde hem mekanik dayanıklılıkta hem de aşınma direncinde önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Hariprasad [1] gibi öncü çalışmalar, takviye oranının ve elyaf yöneliminin, polimerik kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Bu bulgular, yüksek hacim oranlarının ve normal elyaf yönelimlerinin, daha düşük aşınma oranlarına yol açtığını göstermektedir.

Liao ve arkadaşları [2] tarafından yapılan bir çalışmada, ortalama 64.69 µm boyutunda ultra ince atık aramid elyaf tozu (AFW) kullanılarak POM matrisi arasındaki uyumluluğun artmasına katkıda bulunmuştur. Belirlenen mekanik özellik test sonuçları, %20 ağırlık oranında AFW eklenmesiyle eğilme mukavemetinin 52.69 MPa'dan 80.12 MPa'ya arttığını göstermiştir. Sürtünme modifikatörü olarak AFW'nin eklenmesi, POM/AFW kompozitlerinin tribolojik özelliklerini iyileştirebilir ve %20 ağırlık oranında AFW içeren kompozitlerin sürtünme katsayısı %53.02 ve aşınma oranı %69.52 oranında azalabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Özellikle otomotiv sektöründeki bilyalı mafsallarda yaygın olarak kullanılan Kevlar gibi elyaf takviyelerinin eklenmesi, malzemenin yük altında ve yüksek sıcaklıklarda gösterdiği performansı iyileştirebilir. Bu çalışma kapsamında kevlar tozu ile takviye edilen homopolimer POM malzemelerin bilyalı mafsallarda yaygın olarak kullanılan uygulamalarında kullanımının hem aşınma direnci hem de sürtünme katsayısı açısından etkisi araştırılmıştır.



2. Materyal ve Yöntem

Malzemeler

Ticari olarak mevcut enjeksiyon kalıplama derecelerindeki homopolimer polioksümetilen (POM A, Delrin 100 NC010 ve kevlar katkılı POM (100KM NC010, ABD) Dupont firmasından temin edilmiştir.

2.1. Numune Üretimi

İlk olarak, bu çalışmada kullanılacak Polioksümetilen Asetal Kopolimer ve Homopolimer (POM) granülleri, granüllerdeki çoğu nem içeriğini gidermek için 90°C'de 5-8 saat süresince bir vakum fırınında kurutuldu. Test numunelerini hazırlamak için, 10 ton kapasiteli bir enjeksiyon makinesi (Permak Makine) kullanıldı. Kalıp, numunelerin sıcaklığını bir su sıcaklık kontrol cihazıyla kontrol eden bir ısıtma-soğutma sistemine sahipti. Tribolojik testler için 70 mm çapında ve 5 mm kalınlığında dairesel geometriye sahip bir kalıp kullanıldı. Üretimde kullanılan kalıpların sıcaklıkları, kalıp ısıtıcı kullanılarak üretim parametrelerine ayarlandı. Numunelerin üretiminde kullanılan üretim parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Plastik kanal çubuğu çıkarıldıktan ve pin deliklerinin kesilmesi yapıldıktan sonra, polimer test numuneleri test için hazır hale getirildi.

Table 1. Production parameters of the specimen manufacturing in the injection machine

Parametreler	Homopolymer POM (A-Delrin 100 NC010)	Kevlar takviyeli POM (B-Delrin 100KM NC010)
Arka Sıcaklık	210 °C	210 °C
Orta Sıcaklık	210 °C	210 °C
Ön Sıcaklık	220 °C	220 °C
Nozul Sıcaklığı	210 °C	210 °C
Kalıp Sıcaklığı	100 °C	90 C
Tutma Basıncı	120 Bar	120 Bar
Enjeksiyon Hızı (m/s)	45	8 - 10
Tutma Süresi (s)	35	20
Soğutma Süresi (s)	75	70

2.2. Aşınma Deneyleri

Numunelerin aşınma performanslarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen aşınma testleri için şematığı Şekil 1'de görülen bilye disk esaslı aşınma test cihazı (Ducom Tr-201V) kullanılmıştır. Numunelerin yüzeyleri 1500 numara SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanarak aşınma testlerine uygun hale getirilmiştir. Aşınma deneylerinde karşı

yüzey (aşındırıcı) olarak 6 mm çapında Al_2O_3 seramik bilye kullanılmıştır. Ayrıca aşınma testleri 20 N yük altında 150 rpm dönme hızında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testleri sonucunda numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre incelemeleri neticesinde aşınma hacim değerleri tespit edilmiştir. Söz konusu aşınma hacmi değerlerinin Archard denkleminde kullanılmasıyla numunelerin aşınma oranları belirlenmiştir.

Numune yüzeylerinde oluşan aşınma mekanizmaları ise aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri neticesinde karakterize edilmiştir.

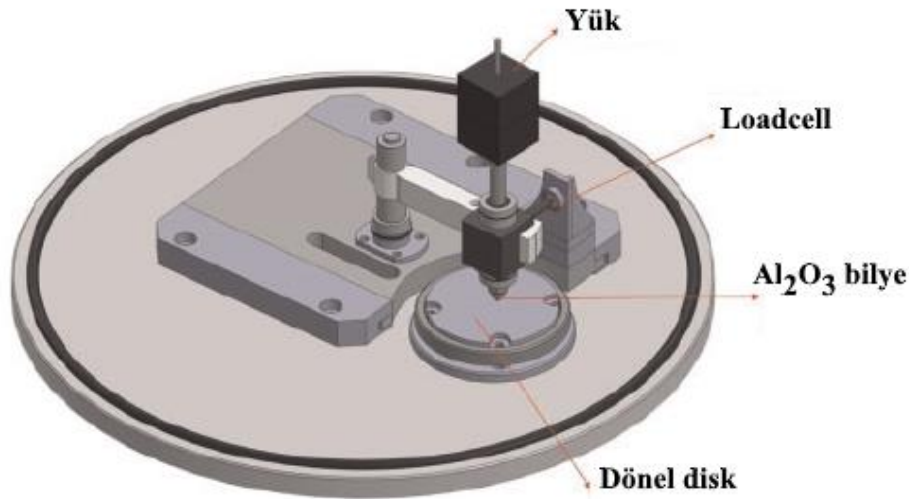
$W: V / (F \times S) \text{ (mm}^3/\text{Nm)}$

W: Aşınma Oranı

V: Aşınma Hacmi

F: Yük

S: Kayma mesafesi

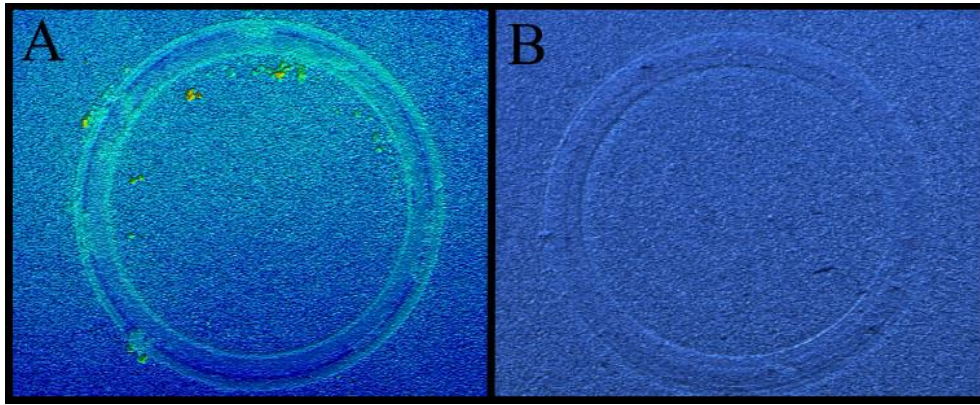


Şekil 1: Aşınma Test Düzenegi Şematiği

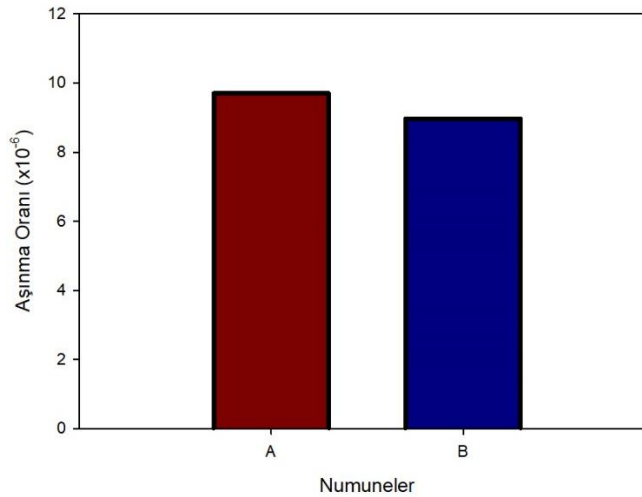
3. Sonuçlar ve Tartışma

Aşınma testleri sonucunda numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre görüntüleri Şekil 2'de görülmektedir. Optik profilometre incelemeleri neticesinde elde edilen aşınma oranı değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3'te görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere kevlar elyaf katkılı homopolimer malzemenin aşınma performansının katkısız homopolimer malzemeden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Katkısız homopolimerde $9,7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde aşınma

oranı tespit edilirken, kevlar elyaf katkılı homopolimerde bu değer $8,97 \times 10^{-6}$ mm³/Nm olarak belirlenmiştir. Literatüre de bakıldığında, güçlendirici dolgu maddelerinin eklenmesiyle birlikte polimer matrisin aşınma dayanımını artırdığı birçok çalışmada ortaya konulmuştur [3-5]. Dolayısıyla elde edilen bulgunun literatürü destekleyici nitelikte olduğu söylenebilmektedir. Polimer matrisine katılan kevlar takviyesinin yüksek yük taşıma kapasitesinin, matrise aşınma önleyici özellikler sağladığı düşünülmektedir. Literatürce kabul edildiği üzere triboloji, sürtünen yüzeyler arasında meydana gelen tribo-fiziksel ve kimyasal eylemler tarafından yönetilen bir sistem davranışdır [6-7]. Polimer matris yapılarına takviye edilen dolgu malzemelerinin özelliklerinin, sürtünme ara yüzeyinde transfer film oluşumuna öncülük edeceği belirlenmiştir [8]. Söz konusu transfer filmi yapısı ise kendinden yağlayıcılık özellikleri sergileyerek aşınma dayanımını artırmaktadır.

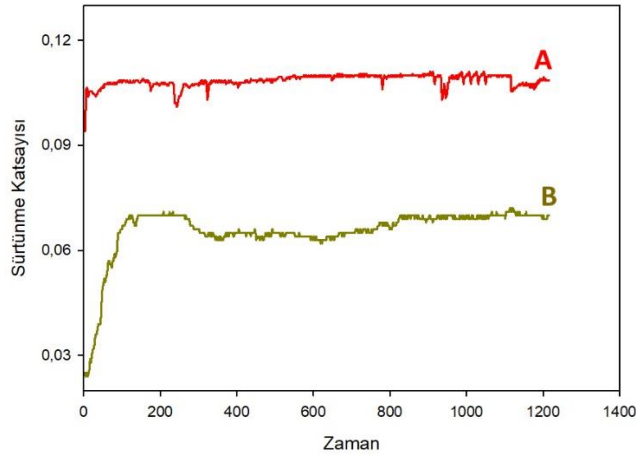


Şekil 2. Numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik profilometre görüntüleri A) Homopolimer POM B) Kevlar Takviyeli POM

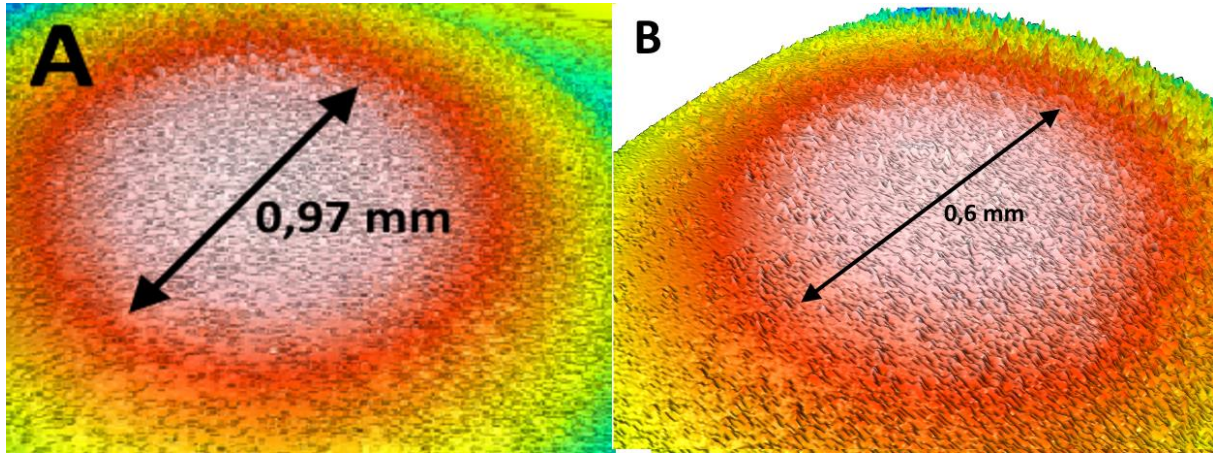


Şekil 3. Aşınma oranı değerleri A) Homopolimer POM B) Kevlar Takviyeli POM

Aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere deney başlangıcından yaklaşık 100. saniyeye kadar sürtünme katsayısında ani bir artış meydana gelmiştir. Rodaj evresi de denilen bu evrede sürtünen yüzeylerin pürüzleri, oluşan yüksek Hertz basınçlarına maruz kalarak sürtünme kuvvetinde ani artışlara neden olmaktadır. Rodaj evresinden sonra ani artan sürtünme katsayısı, numunelerin pürüzlerinin ezilmesi ve kendinden yağlayıcı özellikli transfer filmlerinin de oluşmasıyla birlikte kararlı duruma geçmektedir. POM matrisindeki ana C-O zinciri yüksek esnekliğe sahip olduğundan, aşınma testi sırasında kolaylıkla yüzeyler arasından aktarılabilirler [9]. Bu durum Şekil 5'te verilen karşı yüzey optik profilometre görüntülerinden de görülmektedir. Katkısız POM malzemesinin aşınma testinde kullanılan karşı yüzeyde 0,97 mm çaplı bir aşınma izi elde edilirken, kevlar takiyesi ile birlikte matriste artan yük taşıma kabiliyeti ve kendinden yağlayıcılık özelliği sayesinde aşınma performansının da artmasından ötürü karşı yüzeyde 0,6 mm'lik bir iz meydana gelmiştir.

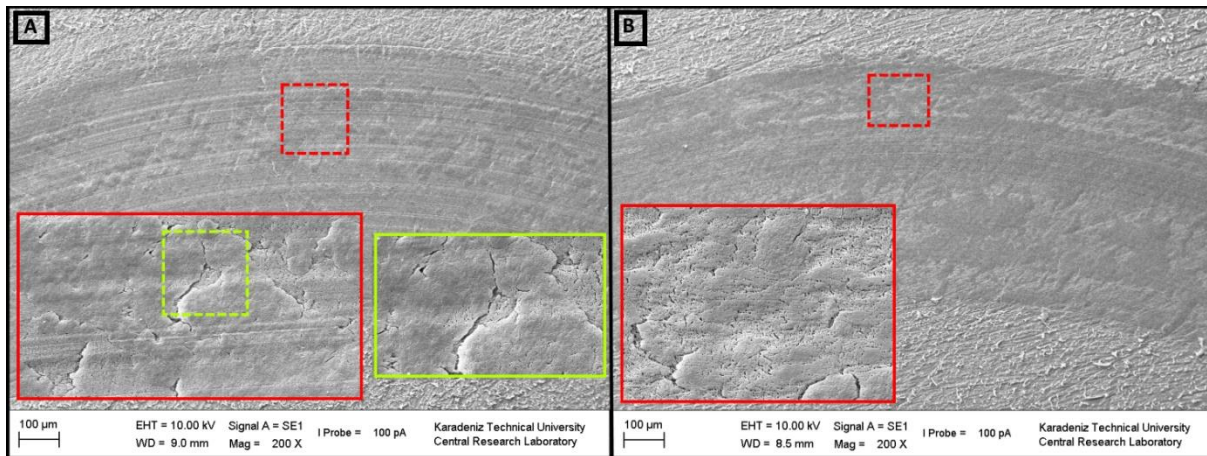


Şekil 4. Sürtünme katsayısı-Zaman grafiği A) Homopolimer POM B) Kevlar Takviyeli POM



Şekil 5. Aşındırıcı bilye optik profilometre görselleri A) Homopolimer POM B) Kevlar Takviyeli POM

Aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 6'da görülmektedir. Homopolimer POM malzemesinde detay görüntüsünde görüldüğü üzere oluşan transfer filmleri kararlı yapıya ulaşamayıp, kılcal çatlaklar eşliğinde numune yüzeyinin pürüzlülüğünü de artırarak aşınmaya neden olmuştur. Homopolimer malzemede oluşan tribo-film düzensiz ve parçalı (patchy-like) yapıdadır [10]. Ayrıca, söz konusu çatlaklar nedeniyle yüzeyden kopan parçacıklar sürtünen yüzeyler arasına girerek 3 elemanlı abrazif aşınmayı tetiklemiştir. Bu durum ise yüzeyde keskin abrazif çizikler ortaya çıkarmaktadır. Kevlar takviyeli POM malzemesinde ise oluşan tribo-film daha kararlı yapıdadır.



Şekil 6. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri A) Homopolimer POM B) Kevlar Takviyeli POM



Sonuç olarak, ön çalışma sonuçları ile ortaya çıkan düşük sürtünme katsayıları ve nispeten daha düşük aşınma miktarı değerleri Kevlar takviyeli POM malzemelerin otomotiv sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Bu çalışmada ele alınan bulgular, otomotiv endüstrisinde kullanılan malzemelerin seçiminde ve tasarımında önemli bir kaynak olarak hizmet edebilir.

Referanslar

- [1] Hariprasad, N., Yogeswaran, M., Girirajan, K. S., & Raviraj, V. (2020). Friction and Wear Properties of Polymeric Composite Materials for Bearing Applications.
- [2] Liao, Y., Chen, C., Wei, B., Yang, S., & Bai, S. (2022). Green recycling of aramid fiber waste as the friction modifier of POM by solid state shear milling technology. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022. DOI: 10.1002/pat.5808.
- [3] A.K. Bledzki, A.A. Mamun, M. Feldmann, Polyoxymethylene composites with natural and cellulose fibres: toughness and heat deflection temperature, *Compos Sci Technol* 72 (2012) 1870–1874.
- [4] W. Luo, Q.M. Ding, Y. Li, S.T. Zhou, H.W. Zou, M. Liang, Effect of shape morphology on mechanical, rheological and tribological properties of polyoxymethylene/aramid composites, *Polym Sci Ser A* 57 (2015) 209–220.
- [5] D.H. Gordon, S.N. Kukureka, The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding-rolling contact, *Wear* 267 (2009) 669–678.
- [6] G. Zhang, I. Häusler, W. Österle, B. Wetzels, B. Jim, Formation and function mechanisms of nanostructured tribofilms of epoxy-based hybrid nanocomposites, *Wear* 342–343 (2015) 181–188.
- [7] G. Zhang, Structure-tribological property relationship of nanoparticles and short carbon fibers reinforced PEEK hybrid composites, *J Polym Sci Polym Phys* 48 (2010) 801–811.
- [8] Q.H. Wang, X.R. Zhang, X.Q. Pei, Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites, *Mater Design* 31 (2010) 3761–3768.
- [9] M.D. Barnes, K. Fukui, K. Kaji, T. Kanaya, D.W. Noid, J.U. Otaigbe, V.N. Pokrovskii, B.G. Sumpter, *Advances in polymer science*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, Germany, 2001.
- [10] L. Zhang, H. Qi, G. Li, G. Zhang, T. Wang, Q. Wang, Impact of reinforcing fillers' properties on transfer film structure and tribological performance of POM-based materials, *Trib Int* 109 (2017) 58–68.