



# Epoksi Esaslı Polimerik Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Elif Tuğçe Yalnız<sup>1</sup>, Tezcan Şekercioğlu<sup>2</sup>, Ahmet Can Yıldız<sup>3\*</sup>

## ÖZ

Polimerik kaplamalar farklı malzemelere uygulanabilirliği, maliyeti ve etkinliği açısından diğer kaplama tekniklerine göre üstünlüğü bulunmaktadır. Epoksi esaslı polimerik kaplamaların yüksek aşınma ve korozyon direncine, iyi bir kimyasal ve termal kararlılığa, özellikle çok iyi yapıştırıcı özelliğine sahip olması nedeniyle otomotiv, imalat, inşaat, elektronik gibi endüstrilerde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, ASTM G99-17 standardına uygun olarak 5, 10 ve 15 N yük ve 300, 600, 900 s sürelerde çelik disk numunelere uygulanan epoksi kaplamaların aşınma davranışı incelenmiştir. Sürtünme katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Alüminyum dolgulu Epoksi 1'e kıyasla mineral dolgulu Epoksi 2, artan aşınma sürelerinde ve yüklerde daha iyi performans göstermiştir. Epoksi 1 kaplamalarda %10 bor karbür (B<sub>4</sub>C) katkısının uzun aşınma sürelerinde olumlu etkisinin olduğu, %20 B<sub>4</sub>C katkısının ise fiziksel yapıyı bozduğu, dolayısıyla aşınma direncini düşürdüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, uzun aşınma sürelerinde ve artan yüklerde en az kütle kaybeden mineral dolgulu Epoksi 2 olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Epoksi kaplama, aşınma direnci, pim-disk aşınma

## Investigation of Wear Behaviour of Epoxy-Based Polymeric Coatings

### ABSTRACT

Polymeric coatings have superiority over the other coating techniques in terms of applicability on different materials, cost and effectiveness. Epoxy-based polymeric coatings have become widespread application in industries such as automotive, manufacturing, construction, electronics, due to their high wear and corrosion resistance, good chemical and thermal stability, and especially very good adhesive properties. In this study, the wear behavior of epoxy coatings applied to steel disc specimens were investigated at 5, 10, and 15 N loads and 300, 600, and 900 seconds in accordance with ASTM G99-17 standard. The coefficients of friction were determined experimentally. Compared to aluminum-filled Epoxy 1, mineral-filled Epoxy 2 performed better at increased wear times and loads. It has been observed that 10% boron carbide (B<sub>4</sub>C) additive in Epoxy 1 coatings has a positive effect on long wear times, while 20% B<sub>4</sub>C additive deteriorates the physical structure, thus reducing the wear resistance. When the results obtained are evaluated, Epoxy 2 lost the least mass at long wear times and increasing loads.

**Keywords:** Epoxy coating, wear resistance, pin on disc wear

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 10.08.2022

Kabul/Accepted : 07.12.2022

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Denizli tugceyalniz@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8341-0854

<sup>2</sup> Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Denizli tsekerci@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9359-8843

<sup>3</sup> Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Denizli yildizacn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6631-414X



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Coatings are inevitably needed in many industries. Especially considering the electronic and digital age we live in, the use of electronics and their components is increasing day by day. In this regard, polymeric coatings are widely preferred, especially in the electronics and components industry. Apart from this, epoxy coatings are one of the most widely used methods in many sectors such as construction, automotive, and manufacturing, especially in repair applications. Considering the coatings, epoxy coatings have attracted the attention of many researchers due to their mechanical properties, cost, corrosion and wear resistance. Enhancements in distinct properties can be achieved by adding various particles to epoxy coatings. Since this situation attracted the attention of researchers, the effects of additives such as silica, alumina, graphite, titanium dioxide, polytetrafluoroethylene (PTFE), iron aluminate, silicon carbide, and boron carbide on the wear resistance of epoxy matrix composites were investigated.

In this study, adding 10% and 20% B<sub>4</sub>C filler by mass in order to increase the wear resistance of two basic epoxy-based polymeric coatings, wear tests has been conducted with regard to wear behavior of coatings were investigated at 300, 600 and 900 s wear times and three different loads of 5,10,15 N respectively.

### Materials and Method

In this study, a total of 4 different epoxy-based polymeric coatings, namely Epoxy 1, Epoxy 2, Epoxy 3, and Epoxy 4, were experimentally investigated. Denoted by aluminium-filled Epoxy 1 and mineral-filled Epoxy 2, 10% and 20% by mass of B<sub>4</sub>C were added for Epoxy 3 and Epoxy 4, respectively. Steel discs are epoxy coated with plastic moulds. All specimens were left for a minimum of 48 hours at room temperature for curing. Wear tests of steel disc specimens prepared with epoxy-based polymeric coating were carried out in a pin-disc test setup. Wear tests were carried out in accordance with ASTM G99-17 standard, with a disc-pin test setup. The test specimens were worn under 5 N, 10 N, and 15 N loads for 300 s, 600 s, and 900 s. In addition, experiments were carried out for Epoxy 2 under a load of 30 N. The rotation speed was kept constant at 60 min<sup>-1</sup> in all experiments. At least 3 specimens were used for each test parameter and the mass losses before and after the experiment were measured on a precision balance with an accuracy of 0.0001 g. After each experiment, the spherical tip on the pinned specimen was changed and the experiment was repeated. After the experiment, the surface was cleaned with alcohol again. Thus, the particles that emerged because of wear were removed from the disc specimen. The weights of the disc specimens were measured before and after the experiment. As a result of these measurements, the amount of wear due to the weight difference was recorded.

### Results and Discussion

It has been observed that Epoxy 1 material wears approximately 2 times more than Epoxy 2 material in 300 s wear time for 5 N load. It is seen that the amount of wear increases as the wear time increases for epoxy 1 under constant load. Epoxy 2, on the other hand, is highly resistant to wear. Approximately the same amount of mass was lost under constant load and increasing times. Experiments were carried out for 4 different epoxies at 10 N and variable time conditions. The wear amount of the epoxy 1 material increased as the wear time increased under constant load. Epoxy 2 was the least wearing epoxy compared to all other coatings. Epoxy 2 lost approximately the same amount of mass at 300 s and 600 s. In the 900 s wear time, a 94% increase was observed in the amount of wear. Epoxy 3 material showed similar results to Epoxy 1, with an increase in mass loss with increasing wear time. The most mass loss was seen in Epoxy 4. Epoxy 4 material lost about 5,6 times more mass in 900 s than Epoxy 2, which wore the least. When all these data were evaluated, it was concluded that the 10% B<sub>4</sub>C additive by mass had a positive effect on the wear resistance, but the 20% B<sub>4</sub>C additive by mass had a negative effect on the wear resistance since it significantly increased the surface roughness. When the test results are evaluated under 15 N and variable time conditions, Epoxy 2 material wears 3 times less in 300 s compared to Epoxy 1. In 900 s, this rate increases up to 10 times. It can be said that the increased time for Epoxy 2 has no effect on mass loss.

### Conclusion

When the data obtained from the experiments were evaluated, it was concluded that epoxy coatings are highly resistant to wear and are advantageous for long-lasting use because they are worn in very small amounts. When the wear test findings were examined, it was concluded that the most resistant material against wear was Epoxy 2. 10% B<sub>4</sub>C powder additive had a positive effect on Epoxy 1. It can be used as an alternative on surfaces that will be exposed to wear for a long time.

## 1. GİRİŞ

Kaplamalara pek çok sektörde kaçınılmaz olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Kaplama tekniklerinden biri olarak polimerik kaplamalar, farklı malzemelere uygulanabilirliği, efektif olması ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle ilgi çekmektedir. Özellikle yaşadığımız elektronik ve dijital çağ düşünüldüğünde, elektroniklerin ve bileşenlerinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu hususta polimerik kaplamaların yüksek korozyon ve aşınma direnci, iyi kimyasal ve termal kararlılık göstermesi, yüzeye çok iyi yapışma özelliği gibi niteliklere sahip olması nedeniyle özellikle elektronik ve bileşenleri endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun dışında örneğin inşaat, otomotiv, imalat gibi birçok sektörde özellikle tamirat uygulamalarında epoksi kaplamalar en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Polimerik kaplamalar göz önüne alındığında, epoksi kaplamalar mekanik özellikleri, korozyon direnci ve aşınma davranışı açısından pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Symonds ve Mellor açık denizde kullanılan su enjektör borularında epoksi esaslı polimerik kaplamaların korozyona karşı dayanımını incelemiştir [1]. Kaplamaların aşınma, korozyon gibi dayanım özelliklerini iyileştirmek ve farklı özellikler kazandırmak amacıyla çeşitli parçacıkların eklenmesi yaygın kullanılan bir tekniktir, Xu ve Mellor alümina katkılı epoksi ve termoset polimerik kaplamalarında, farklı yükler altında aşınma dayanımını değerlendirmiştir [2]. Epoksi matrisli kompozitlerde silika [3, 4], alümina [5], grafit [6], titanyum dioksit [7], politetrafloroetilen (PTFE) [8, 9], demir aluminat [10], silisyum karbür [11] ve bor karbür [12] gibi parçacık katkılarının aşınma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bello ve Wood dolgulu ve dolgunsuz termoplastik kaplamaların modifiye edilmiş pim-disk deney düzeneğinde tribolojik performansını değerlendirmişlerdir. Dolgu şeklinin, boyutunun ve tipinin kaplamaların aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dolgu çekme, dolgu kırılması ve zayıf aşınma direnci gibi faktörler dolgu maddelerinin yük taşıma elemanları olarak görev yapmadaki yetersizliği nedeniyle, dolgulu kaplamaların bazılarının zayıf aşınma direncinden dolgu maddesinin sorumlu olduğu ortaya konmuştur [13]. Basavarajappa ve Ellangovan, cam-epoksi içeren dolgularla mükemmel aşınma direnci elde edilmiştir [14]. Ayrıca grafen ve sıvı yağlayıcı takviyeli epoksi kompozitlerde en düşük sürtünme katsayısı ve en iyi aşınma ömrü elde edilmiştir [15]. Ancak, tüm dolguların aşınma direncini artırmaya yardımcı olmadığı ve daha düşük partikül boyutuna sahip dolgu maddelerinin malzemede süreksizliklere neden olarak, epoksi kaplamanın aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği durumlar da literatürde mevcuttur [16]. Tahir ve diğ., karbon-epoksi kompozitlerde kayma mesafesi ve sıcaklığın tribolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Aşınma hızı biraz artmasına rağmen, kayma mesafesi ile sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit etmişlerdir [17]. Bununla birlikte, çalışma sıcaklığı kritik bir sınırı aştığında hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı, kayma mesafesi ile



hızla artmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısının düşen sıcaklıkla birlikte önemli oranda azaldığı ortaya konmuştur [18]. Aviles ve diğ., yumuşak çeliklerde tek katmanlı ve çift katmanlı epoksi kaplamaların tribolojik performansını incelemiştir [19]. Grafen dolgulu epoksi kaplama, yalnızca epoksi kullanılan kaplamaya göre sürtünme katsayısı açısından %60 azalma meydana gelmiştir, dolayısıyla aşınma büyük oranda önlenmiştir. Taşyürek ve Düzcükoğlu tarafından yapılan çalışmada epoksi reçineye B<sub>4</sub>C partiküllerinin eklenmesinin kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tribolojik özelliklere en çok etki eden parametre B<sub>4</sub>C oranı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak epoksi reçineye B<sub>4</sub>C takviyesinin eklenmesiyle aşınma direncinin artırılması sağlanmıştır [20]. Yalnız, çeşitli dolgu malzemelerine sahip epoksi esaslı polimerik kaplamalarda B<sub>4</sub>C partikül katkısının aşınma dayanımına etkisini incelemiştir [21]. Nanopartiküller ve nanoteknolojinin daha ulaşılabilir olması ve bu nedenle yaygınlaşması sonucunda, kaplamalarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaları da artmaktadır. Kan ve Chang tarafından yapılan çalışmada, hibrit polimer nanokompozitlerin kayma aşınma davranışı, farklı yükleme koşulları altında ve farklı yüzey pürüzlülüğüne karşı incelenmiştir. Nanopartiküllerin ve diğer dolgu maddelerinin kombinasyonu, özellikle daha yüksek temas basınçlarında hem pürüzlü hem de pürüzsüz disklerle karşı düşük sürtünme ve aşınma ile sonuçlanmıştır [22]. Medabalimi ve diğ., nanopartikül katkılı kaplamaların aşınma dayanımına etkisini incelemiştir. 600 °C’de kaplanmamış çeliklere kıyasla kaplamalı çeliklerde aşınma oranının beş kat azaldığı görülmüştür. Kaplamadaki aşınma hızı sıcaklık artışı ile azalmıştır [23].

Bu çalışmada 300, 600, 900 s aşınma sürelerinde ve sırasıyla 5, 10 ,15 N üç farklı yük durumunda iki temel epoksi esaslı polimerik kaplamanın aşınma davranışları incelenmiştir. Ayrıca aşınma direncini iyileştirmek adına alüminyum dolgulu Epoksi 1 kaplamalara kütlece %10 ve %20 oranında B<sub>4</sub>C dolgu maddesi eklenmiştir. B<sub>4</sub>C bilinen en sert malzemelerden biridir. Yüksek sertlik, iyi korozyon direnci, termal ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerinden ötürü birçok uygulama alanı bulmaktadır. Yüksek sertliğinden dolayı yüksek aşınma direncine de sahiptir. Bu nedenle aşındırıcı toz olarak ve elektronik parçalarda koruyucu kaplama olarak kullanılmaktadır.

## 2. MALZEME ve YÖNTEM

### 2.1 Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada Epoksi 1, Epoksi 2, Epoksi 3 ve Epoksi 4 olmak üzere toplamda 4 farklı epoksi esaslı polimerik kaplama deneysel olarak incelenmiştir. Alüminyum dolgulu Epoksi 1 ve mineral dolgulu Epoksi 2 için teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir [24, 25]. Epoksi 3 ve Epoksi 4 için sırasıyla kütlece %10 ve %20 oranında B<sub>4</sub>C eklenmiştir.

**Tablo 1.** Epoksi 1 ve Epoksi 2'nin Teknik Özellikleri

Teknik Özellik	Epoksi 1	Epoksi 2
Viskozite (mPa.s)	880000	560000
Basma Mukavemeti (MPa)	61	115
Çekme Mukavemeti (MPa)	20	29
Eğilme Mukavemeti (MPa)	37	39
Shore Sertliği	84	89
Büzülme (%)	0.02	0.04
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°)	56.9	53.5
Dayanım Sıcaklık Aralığı (°)	-35 ile 120	-35 ile 120
Isı İletkenliği (W/m.K)	1.39	1.1

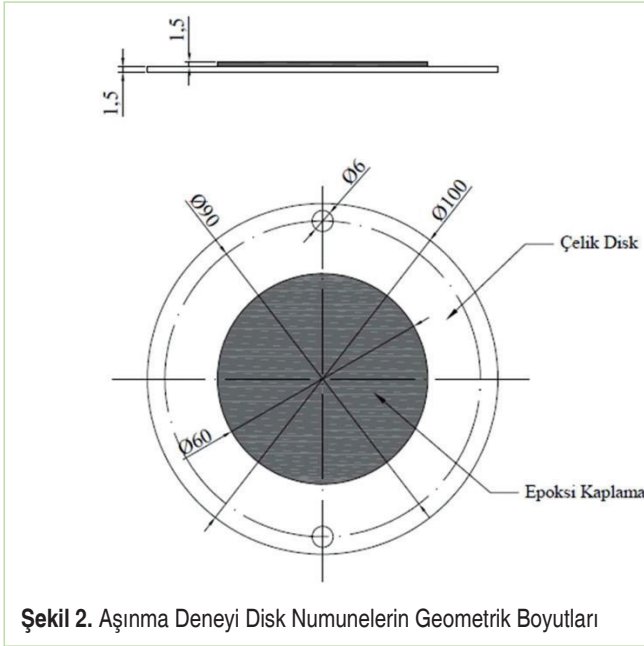
## 2.2 Aşınma Deneyi

Hazırlanan çelik diskler öncelikle alkol ile temizlenmiştir. Sonrasında yüzeyine epoksinin kaplanacağı sınırı belirleyen, plastik malzemeden bir kalıp yerleştirilmiştir. Epoksi malzeme ise reçetede belirtildiği gibi sertleştiricisi ve reçine uygun oranlarda karıştırılarak hazırlanmıştır. Bütün numuneler kürleşme için oda sıcaklığında minimum 48 saat bekletilmiştir. Kürleşme sonrasında aşınma deneylerine hazır hale gelmiştir. Aşınma deneyleri için hazırlanan disk numuneleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Epoksi esaslı polimerik kaplama ile hazırlanan çelik disk numunelerin, pim-disk deney düzeneğinde aşındırma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşındırma deneyleri, ASTM G99-17 standardına uygun olarak, disk-pim deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir [26]. Deneylerde kullanılmak üzere 100 mm çapındaki çelik disk üzerine 60 mm çapında epoksi malzeme 1.5 mm kalınlığında kaplanarak Şekil 2'de görüldüğü gibi deney numuneleri oluşturulmuştur. Bilye tutucu ise içi boş olarak tasarlanmıştır. İçerisine 10 mm çapında çelik bilye yerleştirilerek cıvata ile sabitlenmiştir. Çelik bilye, deneyler sırasında düzenli olarak değiştirilmiştir. Şekil 3'te şematik resminde Şekil 4'te deneysel kuruluma görüldüğü gibi küresel uç yerleştirilmiş bir pim ile aşındırılmıştır. Deney numuneleri, 5 N, 10 N ve 15 N yük altında, 300 s, 600 s, 900 s sürelerde aşındırılmıştır. Ek olarak Epoksi 2 için 30 N yük altında deneyler yapılmıştır. Dönme hızı tüm deneylerde 60 min<sup>-1</sup> olarak sabit tutulmuştur. Her deney parametresi için en az 3 numune kullanılmış olup 0.0001 g hassasiyetli hassas terazi ile deney öncesi ve sonrası kütle ölçümü yapılarak kütle kayıpları tespit edilmiştir. Deney parametreleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Deney sırasında sürtünme katsayısındaki değişim deney düzeneğine bağlı bir bil-

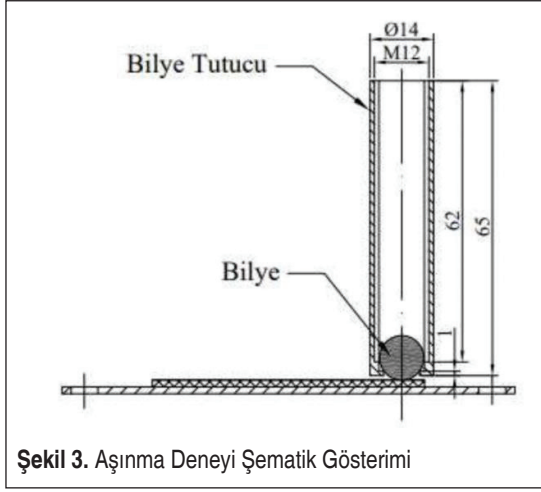


**Şekil 1.** Aşınma Deneyi İçin Epoksi Kaplanmış Disk Numuneleri



**Şekil 2.** Aşınma Deneyi Disk Numunelerin Geometrik Boyutları

gisayar programı yardımıyla kaydedilmiştir. Her deneyden sonra pim numunesinin üzerindeki küresel uç, deney numunesini daha fazla aşındırmasını önlemek için değiştirilerek deney tekrarlanmıştır. Deney sonrasında disk yüzeyinin tamamı tekrar alkolle temizlenmiştir. Böylelikle aşınma sonucu ortaya çıkan tanecikler disk numunesi



Şekil 3. Aşınma Deneyi Şematik Gösterimi



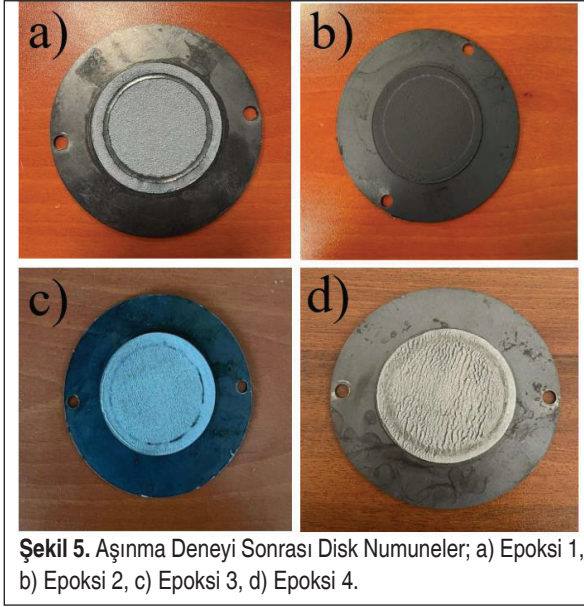
Şekil 4. Pim-Disk Deney Düzeneği

üzerinden uzaklaştırılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında disk numunelerin ağırlıkları ölçülerek aralarındaki fark, aşınma miktarı olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler sonucu ağırlık farkı dolayısıyla aşınma miktarı kaydedilmiştir. Deney sonrası aşınan epoksi numuneler Şekil 5'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Aşınma Deneyi Parametreleri

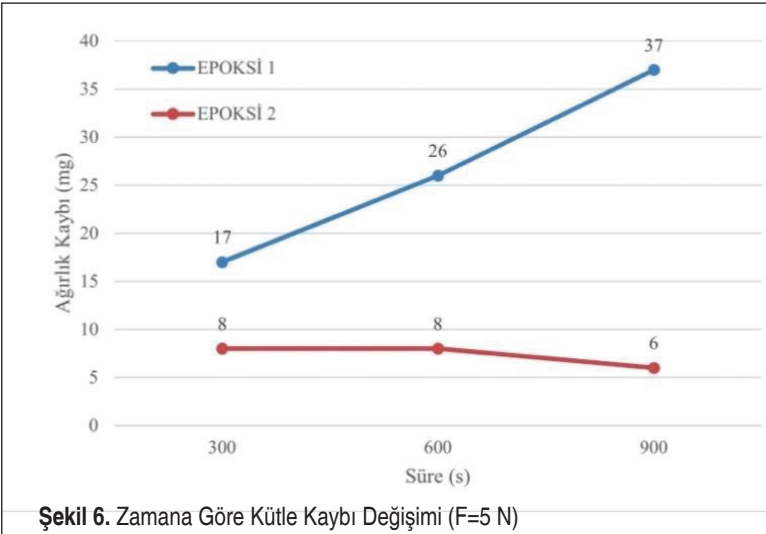
Deney NO	Kuvvet (N)	Aşınma Süresi (s)	Epoksi
1-3	5	300	1
4-6	5	600	1
7-9	5	900	1
10-12	10	300	1
13-15	10	600	1
16-18	10	900	1
19-21	15	300	1
22-24	15	600	1
25-27	15	900	1
28-30	5	300	2
31-33	5	600	2
34-36	5	900	2
37-39	10	300	2
40-42	10	600	2
43-45	10	900	2
46-48	15	300	2
49-51	15	600	2
52-54	15	900	2
55-57	30	300	2
58-60	30	600	2
61-63	30	900	2
64-66	10	300	3
67-69	10	600	3
70-72	10	900	3
74-75	10	300	4
76-78	10	600	4
79-81	10	900	4





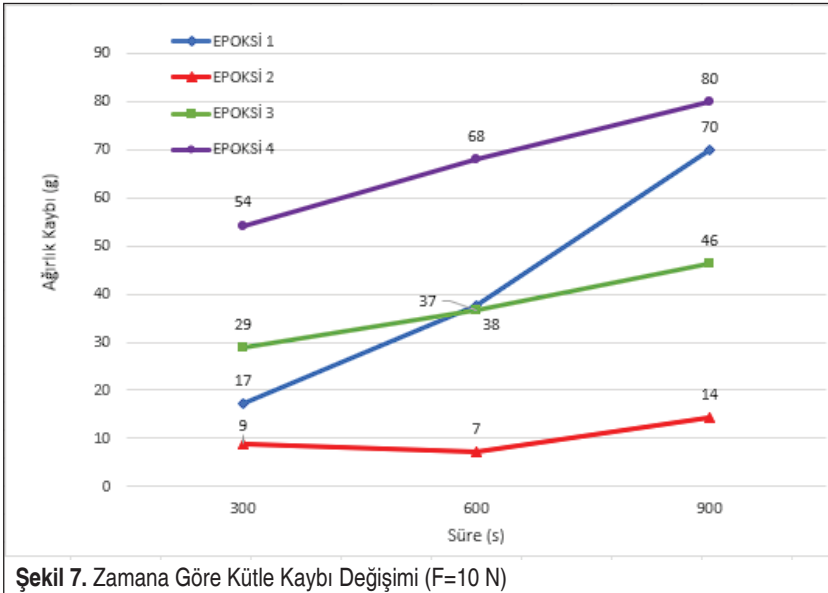
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

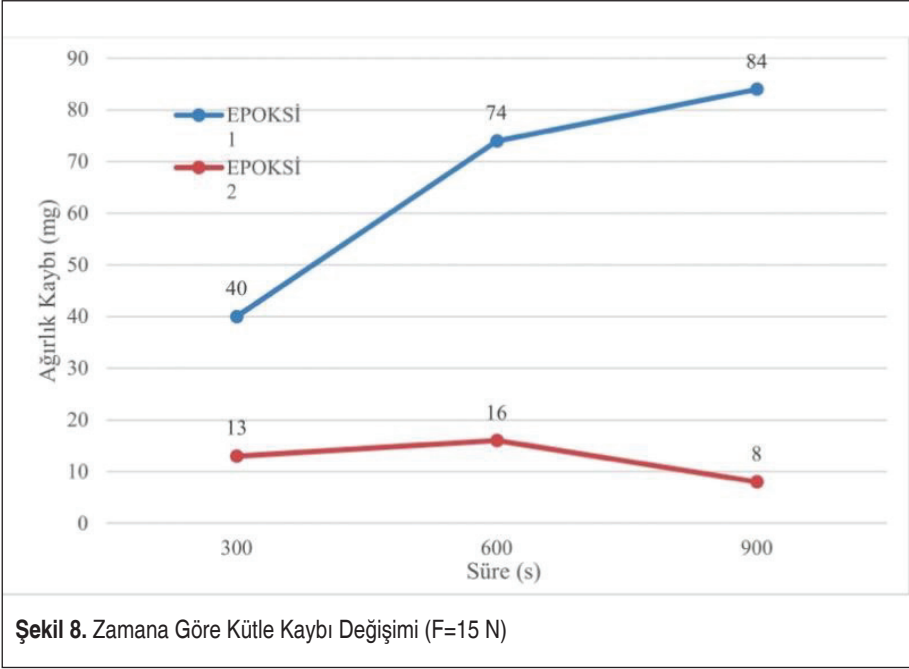
5 N'luk için deney sonuçları değerlendirildiğinde, Epoksi 1 malzemesinin 300 s aşınma süresinde Epoksi 2 malzemesine göre yaklaşık 2 kat daha fazla aşındığı görülmüştür. Epoksi 1 için sabit yük altında aşınma süresi arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmektedir. Aşınma süresi 2 kat arttığında aşınma miktarı yaklaşık %50, aşınma



süresi 3 kat arttığına ise yaklaşık %118 olmuştur. Epoksi 2 ise aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Sabit yük altında ve artan sürelerde yaklaşık aynı miktarda kütle kaybı olmuştur. Sabit yük altında aşınma süresinin artmasının aşınma miktarı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir. 5 N'lük yük için zamana göre kütle kaybı Şekil 6'da gösterilmektedir.

10 N kuvvet ve değişken süre koşullarında 4 farklı epoksi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucu elde edilen veriler Şekil 7'de gösterilmektedir. Sabit yük altında aşınma süresi arttıkça, Epoksi 1 malzemesinin aşınma miktarı, artmıştır. Epoksi 2 ise, diğer tüm kaplamalara göre en az aşınan epoksi olmuştur. Epoksi 2, 300 s ve 600 s sürelerde yaklaşık aynı miktarda kütle kaybetmiştir. 900 s aşınma süresinde ise aşınma miktarında %75 artış görülmüştür. Epoksi 3 malzemesi Epoksi 1 ile benzer sonuçlar göstermiştir ve artan aşınma süresinde kütle kaybı artışı olmuştur. Epoksi 3 malzemesi, 300 s sürede Epoksi 1'e kıyasla %68 daha fazla kütle kaybetmesine karşın uzun aşınma süresinde Epoksi 1'e kıyasla %50 daha az aşınma olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak %10 B<sub>4</sub>C partikül katkısının epoksi kaplamanın yüzeyinde pürüzlülük oluşturması, ilk aşınma aşamasında bu pürüzlerin aşınarak kütle kaybının fazla meydana geldiği sonrasında kaplamanın aşınmaya daha fazla direnç gösterdiği kanaatine varılmıştır. Ancak, %10 B<sub>4</sub>C katkılı Epoksi 3, Epoksi 2'ye kıyasla aşınmaya daha az dirençlidir. En çok kütle kaybı Epoksi 4'te görülmüştür. %20 B<sub>4</sub>C katkılı Epoksi 4 kaplandıktan sonra yüzeyinde fazlaca pürüz oluşması sebebiyle aşınma direncine olumsuz bir etkisi olmuştur. Epoksi 4 malzemesi en az aşınan Epoksi 2'ye göre 900 s aşınma süresinde yaklaşık 5.6 kat daha fazla kütle kaybetmiştir.

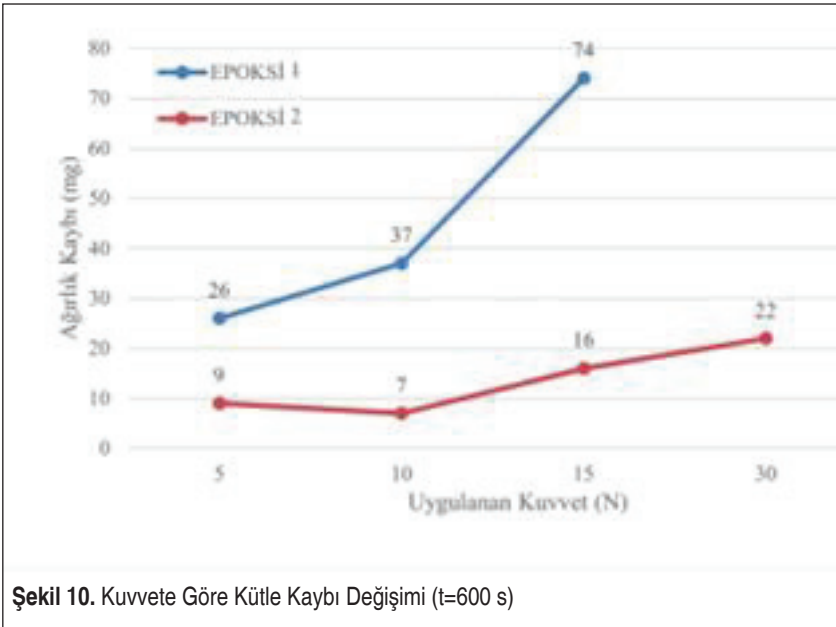
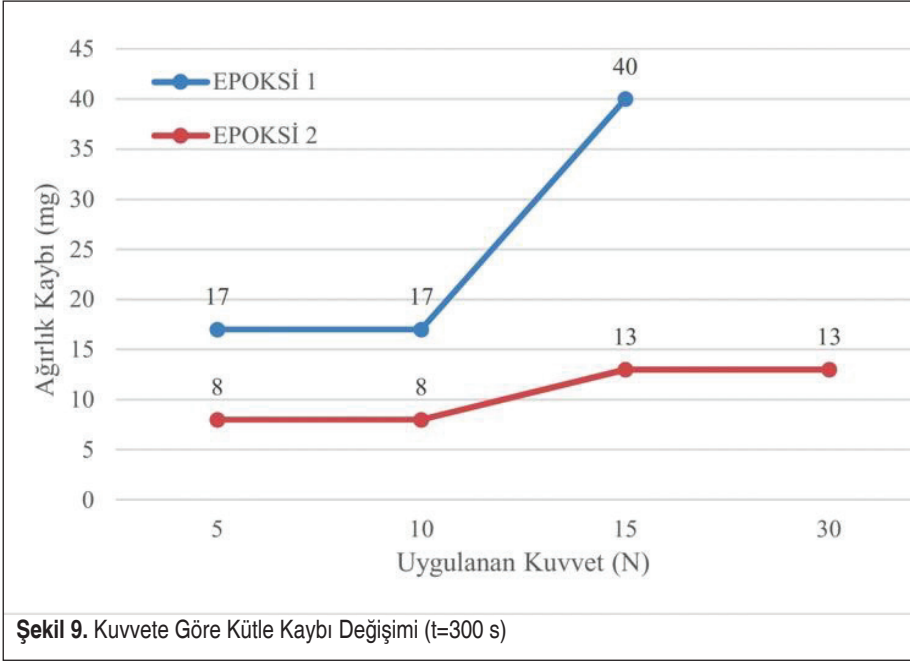




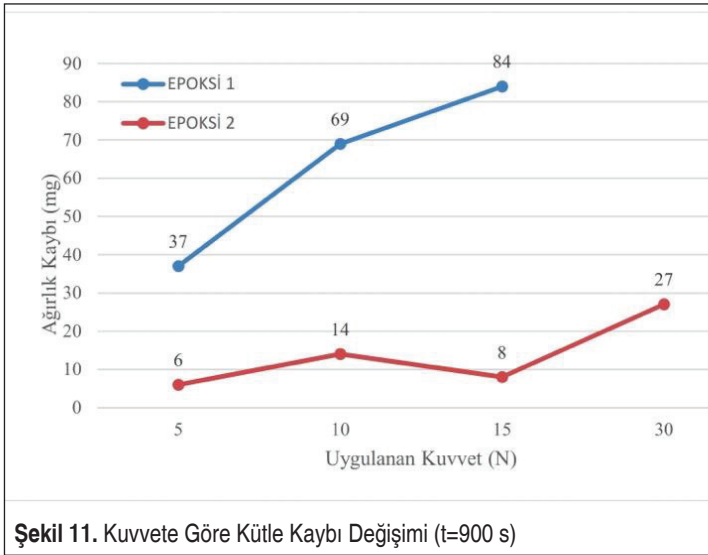
Aşınma süresinin artması ile aşınma miktarında da artış ilişkisi incelendiğinde, kütle kaybında en çok değişim olan malzeme Epoksi 1 olarak görülmüştür. Epoksi 1 malzemesi 900 s sürede, 300 s süreye göre yaklaşık 2.4 kat fazla kütle kaybetmiştir. Aynı durumda bu artış Epoksi 2 ve Epoksi 3 için yaklaşık 1.6 kat, Epoksi 4 için ise yaklaşık 1.5 kat olmuştur. Tüm bu veriler değerlendirildiğinde, kütlece %10 B<sub>4</sub>C katkısının aşınma direnci üzerinde pozitif bir etkisinin olduğunu, ancak kütlece %20 B<sub>4</sub>C katkısının yüzey pürüzlülüğünü ciddi biçimde arttırdığından dolayı aşınma direncine olumsuz etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

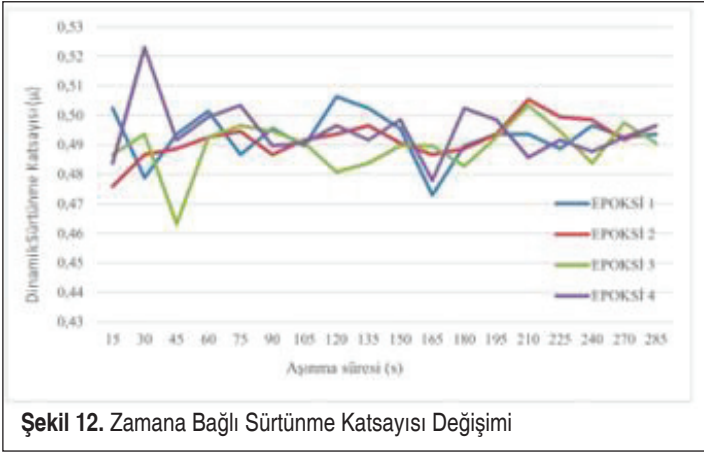
Şekil 8'e göre 15 N yük ve değişken süre koşullarında deney sonuçları değerlendirildiğinde, Epoksi 2 malzemesi Epoksi 1'e göre 300 s sürede 3 kat daha az aşınmıştır. 900 s sürede ise bu oran 10 kata kadar çıkmaktadır. Epoksi 1 malzemesi artan aşınma süresinde daha fazla kütle kaybetmiştir, aşınma süresinin 3 kat artması ile aşınma miktarı yaklaşık 2 kat artmıştır. Epoksi 2 malzemesi Epoksi 1 malzemesine göre aşınmaya karşı oldukça dirençlidir ve artan aşınma süresinde kütle kaybında yaklaşık %50 düşüş görülmüştür. Aşınma miktarı çok az olduğu için bu düşüş göz ardı edilebilecek seviyededir, Epoksi 2 için artan sürenin kütle kaybına etkisinin olmadığı söylenebilir.

Epoksi 2 tüm deney şartlarında en az kütle kaybeden malzeme olduğu için ek olarak F = 30 N yük altında da deneyler gerçekleştirilmiştir. 300 s sabit sürede uygulanan kuvvete göre gerçekleşen kütle kaybı değişimi ise Şekil 9'da verilmiştir.



Aşınma zamanı 300 s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, 5 N ve 10 N uygulanan kuvvetin aşınma miktarı üzerinde etkisinin her iki epoksi içinde yaklaşık aynı olduğu, ancak 15 N uygulanan kuvvette belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artış Epoksi 1 için 2.3 kat, Epoksi 2 için 1.55 kat artış olarak gerçekleşmiştir. Epoksi 2 için 30 N uygulanan durumda ise 15 N uygulanan durumla yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiştir. Her iki epoksi uygulanan aynı yüklere göre değerlendirildiğinde ise aynı sürede Epoksi 2'nin daha az kütle kaybettiği, böylece aşınmaya karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. Şekil 10'da 600 s sabit süre içerisinde kuvvete göre meydana gelen aşınma miktarı verilmiştir. 600 s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, her iki malzeme içinde aşınma miktarının kuvvet artışı ile arttığı söylenebilir. Epoksi 1, 5 N yük altında Epoksi 2'ye göre 2.9 kat daha fazla kütle kaybetmiştir. 15 N yük altında ise bu oran 4.6 kata kadar artmıştır. Epoksi 1 malzemesi 10 N yük altında 5 N yüke göre 1.4 kat daha fazla aşınmıştır. Ancak 15 N yük ile kıyasarsa bu değişim 2.85 kat olmuştur. Epoksi 2 için ise 5 N ve 10 N yük altında aşınma miktarının yaklaşık aynı olduğu, ancak 15 N yük altında kütle kaybının %75 arttığı görülmüştür. Uygulanan kuvvet 2 katına çıkarıldığında ise kütle kaybı yalnızca %34 artmıştır. Bu bulgulara göre her iki epoksi içinde 5 N ve 10 N yükün aşınma direncine etkisinin düşük olduğu, 15 N yükün ise kritik bir eşik değer olduğu söylenebilir. Şekil 11'de ise 900 s içerisinde uygulanan kuvvete göre meydana gelen aşınma miktarı verilmiştir. 900 s için deney sonuçları değerlendirildiğinde, 5 N yük altında Epoksi 1 malzemesinin Epoksi 2'ye göre 5.6 kat fazla aşındığı görülmektedir. Bu değer 15 N yük altında yaklaşık 10 kat olmaktadır. Epoksi 1 malzemesinde artan yük altında artan kütle kaybı net olarak görülmüştür. Kuvvet 2 kat arttığında aşınma miktarı %86 artmıştır. Kuvvet 3 kat art-





tığında ise bu artış %124 olmuştur. Epoksi 2 için değerlendirildiğinde aşınma miktarı tüm yükler için Epoksi 1'e kıyasla oldukça düşüktür. 5 N yük ile 30 N yük karşılaştırılırsa, aynı aşınma süresinde uygulanan kuvvet 6 kat arttığında aşınma miktarı 4.4 kat artmıştır. Mineral dolgulu Epoksi 2 kaplaması yapısından dolayı diğer epoksi kaplamalara göre çok daha yüksek aşınma direnci sergilemektedir. 30 N altındaki yüklenme koşullarında aşınma davranışında kayda değer bir değişim elde edilememiştir. Bu nedenle aşınma direnci mineral katkılı Epoksi 2'ye göre daha düşük olan alüminyum katkılı Epoksi 1'e kütlece %10 ve %20 B<sub>4</sub>C partikül eklenerek aşınma direncinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. %10 B<sub>4</sub>C katkılı alüminyum dolgulu Epoksi 3 için aşınma direncinde artış sağlanırken, %20 B<sub>4</sub>C katkılı alüminyum dolgulu Epoksi 4 için pürüzlülük artışı ve fiziksel yapının bozulması nedeniyle aşınma direncinin azaldığı görülmüştür. Epoksi 3 ve Epoksi 4 için yüksek yük altında aşırı aşınma görülürken, düşük yük altında düşük aşınma meydana gelmiştir, bu nedenle kritik yük 10 N için aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme kuvveti, temas eden iki cisim arasında oluşan ve harekete karşı koyan kuvvettir. Sürtünme katsayısı ise iki cisim arasındaki sürtünme kuvvetinin iki cisim birbirine bastırılan kuvvete oranıdır. 10 N yük altında ve 300 s aşınma süresinde test edilen numunelere ait dinamik sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Elde edilen verilerle oluşturulan zamana bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 12'de gösterilmiştir.

Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, Epoksi 1 için sürtünme katsayısı değeri 0.47-0.51 aralığındadır. Bu katsayı Epoksi 2 için 0.48-0.51, Epoksi 3 için 0.46-0.50 ve Epoksi 4 için 0.48-0.52 aralığında ölçülmüştür. Tüm kaplama malzemeleri için yaklaşık benzer sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bilye ve epoksi deney numuneleri arasındaki sürtünme katsayısının aşınma miktarına doğrudan etkisi olacağından güvenilir bir deney ortamı sağlanması açısından sürtünme katsayılarının birbirine çok



yakın değerler olması önemlidir. Bu durum, aynı sürtünme şartlarında testlerin gerçekleştirildiği sonucunu vermektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, dört farklı epoksi kaplamaya ait tribolojik özellikler ASTM G99-17 standardına göre test edilmiştir. Epoksi 1 ile kaplanmış numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük aşınma miktarı 10 N yük altında 300 s aşınma süresinde görülmüştür. En yüksek aşınma miktarı ise 15 N yük altında 900 s aşınma süresinde ölçülmüştür. Aşınma süresindeki artış, aşınma direnci üzerinde kuvvet artışına göre daha fazla etkiye neden olmuştur. Epoksi 2 ile kaplanmış numuneler diğer tüm epoksi kaplamalarla kıyaslandığında en az kütle kaybeden malzemedir. En düşük aşınma miktarı 5 N yük altında ve 900 s aşınma süresinde görülmüştür. En yüksek aşınma ise 30 N yük altında ve 900 s aşınma süresinde ölçülmüştür. Epoksi 2 üzerinde aşınma süresinin önemli bir etkisinin olmadığı ancak uygulanan yükün artmasıyla kütle kaybının arttığı görülmüştür. Epoksi 3 malzemesinde B<sub>4</sub>C katkısının uzun aşınma sürelerinde aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Epoksi 1'e kıyasla Epoksi 3, 900 s aşınma süresinde %50 daha az aşınmıştır. Epoksi 4 malzemesinde ise B<sub>4</sub>C katkısı epoksinin fiziksel yapısını olumsuz etkilemiştir ve uygulanmasını zorlaştırmıştır. Epoksi 4, pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve aşınma direnci oldukça düşüktür. Bu nedenle tüm epoksilere kıyasla en çok kütle kaybeden malzeme olmuştur.

Yapılan deneylerden elde edilen veriler değerlendirildiğinde, epoksi kaplamaların aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğu ve uzun ömürlü kullanım için avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kaplamalar hasar görmesi istenmeyen yüzeylere uygulanması halinde, aşınma kaynaklı oluşacak hasarları minimuma indirmektedir. Aşınmaya karşı en dirençli malzemenin mineral dolgulu olan Epoksi 2 olduğu sonucuna varılmıştır. Uzun aşınma sürelerinde ve kuvvet artışlarında minimum kütle kaybı görülmüştür. Aşınmaya karşı dirençli yüzeyler oluşturmak için uygulanabilir. %10 B<sub>4</sub>C partiküllü katkısının Epoksi 1 üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Uzun süre aşınmaya maruz kalacak yüzeylerde alternatif olarak önerilebilir.

#### KAYNAKÇA

1. **Symonds, N., Mellor, B.G.** 1999. "Polymeric coatings for impact and wear resistance", *Wear*, 225-229, 111-118.
2. **Xu, Y.M., Mellor, B.G.** 2003. "A comparative study of the wear resistance of thermoplastic and thermoset coatings", *Wear*, 255, 722-733.
3. **Xing, X.S., Li, R.K.Y.** 2004. "Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles", *Wear*, 256, 21-26.



4. **Kanchanomai, C., Noraphaiphaksa, N., Mutoh, Y.** 2011. "Wear characteristic of epoxy resin filled with crushed-silica particles", *Composites Part B: Engineering*, 42, 1446- 1452.
5. **Shi, G., Zhang, M.Q., Ronga, M.Z., Wetzel, B., Friedrich, K.** 2004. "Sliding wear behavior of epoxy containing nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles with different pretreatments", *Wear*, 256, 1072-1081.
6. **Li, X., Gao, Y., Xing, J., Wang, Y., Fang, L.** 2004. "Wear reduction mechanism of graphite and  $\text{MoS}_2$  in epoxy composites", *Wear*, 257, 279-283.
7. **Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F., Friedrich, K.** 2006. "Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms", *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2375-2398.
8. **Kim, S.S., Lee, H.G., Lee, D.G.** 2007. "The tribological behavior of polymer coated carbon composites under dry and water lubricating conditions", *Composite Structures*, 77 (3), 364-372.
9. **McCook, N.L., Burris, D.L., Kim, N.H., Sawyer, W.G.** 2007. "Cumulative damage modeling of solid lubricant coatings that experience wear and interfacial fatigue", *Wear*, 262, 1490-1495.
10. **Amiriyani, M., Alamdari, H. D., Blais, C., Savoie, S., Schulz, R., Gariépy, M.** 2015. "Dry sliding wear behavior of  $\text{Fe}_3\text{Al}$  and  $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{TiC}$  coatings prepared by HVOF", *Wear*, 342-343, 154-162.
11. **Srinivas, K., Bhagyashekar, M.S.** 2014. "Wear behaviour of epoxy hybrid particulate composites", *Procedia Engineering*, 97, 488-494.
12. **Abenojar, J., Martínez, M. A., Velasco, F., Pascual-Sánchez, V., Martín-Martínez, J. M.** 2009. "Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin", *The Journal of Adhesion*, 85(4,5), 216-238.
13. **Bello, J.O., Wood, R.J.K.** 2009. "Wireline wear resistance of filled and unfilled polymeric coatings for downhole applications", *Wear*, 267, 661-668.
14. **Basavarajappa, S., Ellangovan, S.** 2012. " Dry sliding wear characteristics of glass–epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles", *Wear*, 296, 491- 496.
15. **Kumar, V., Sinha, S.K., Agarwal, A.K.** 2017. "Tribological studies of epoxy composites with solid and liquid fillers", *Tribology International*, 105, 27-36.
16. **Jakab, B., Panaitescu, I., Gamsjäger, N.** 2021. "The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings", *Polymer Testing*, 100.
17. **Tahir, N.A.M., Abdollah, M.F.B, Hasan, R., Amiruddin, H.** 2016. "The effect of sliding distance at different temperatures on the tribological properties of a palm kernel activated carbon–epoxycomposite", *Tribology International*, 94, 352-359.





18. **Lan, P., Gheisari, R., Meyer, J.L., Polycarpou, A.A.** 2018. “Tribological performance of aromatic thermosetting polyester (ATSP) coatings under cryogenic conditions”, *Wear*, 398-399, 47-55.
19. **Avilés, M.D., Jiménez N. Saurín, A.E., Carrión, F.J., Sanes, J., Bermúdez, M.D.** 2018. “Tribological characterization of epoxy coatings modified with ionic liquids and graphene”, *Tribology International*, 149.
20. **Taşyürek, M., Düzcukoğlu, H.** 2022. “Epoksi reçinesinin bor karbür takviyeli aşınma davranışının iyileştirilmesi”, *İran Polym*, 31, 169–184.
21. **Yalnız, E.T.** 2022. “Epoksi Esaslı Polimerik Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
22. **Kan, W.H., Chang, L.** 2021. “The mechanisms behind the tribological behaviour of polymer matrix composites reinforced with TiO<sub>2</sub> nanoparticles”, *Wear*, 474-475.
23. **Medabalimi, S.R., Ramesh, M.R., Kadoli, R.** 2021. “Developing partially oxidized NiCr coatings using the combined flame spray and plasma spray process for improved wear behaviour at high temperature”, *Wear*, 478-479.
24. [https://www.weicon.com.tr/media/pdf/17/f6/60/TDS\\_10300005\\_TR\\_WEICON\\_WR.pdf](https://www.weicon.com.tr/media/pdf/17/f6/60/TDS_10300005_TR_WEICON_WR.pdf)
25. [https://www.weicon.com.tr/media/pdf/34/75/56/TDS\\_10150005\\_TR\\_WEICON\\_F.pdf](https://www.weicon.com.tr/media/pdf/34/75/56/TDS_10150005_TR_WEICON_F.pdf)
26. **ASTM G99-17.** 2017. “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus1”, American Society for Testing and Materials.