

Çok Tabakalı Sürekli Polyester Fiber Dokuma ve PTFE Partikül Takviyeli Polyester Kompozitin Aşınma Davranışı

Alpay Tamer ERTÜRK¹, Fahri VATANSEVER¹

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli

(Alınış / Received: 29.11.2017, Kabul / Accepted: 11.05.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 26.05.2018)

Anahtar Kelimeler

Polimer matrisli kompozit,
Elyaf takviye,
Aşınma,
Kuru sürtünme,
Sürtünme katsayısı

Özet: Bu çalışmanın amacı çok tabakalı polyester fiber dokuma ve PTFE partikül takviyeli polyester matrisli ortotropik yapıya sahip kompozit malzemenin kuru sürtünme koşullarındaki aşınma performansının sistematik olarak araştırılmasıdır. Aşınma testleri 380 mm dış çap, 300 mm iç çap ve 100 mm yükseklik ölçülerinde radyal silindir yataklar üzerinden kesilen 10 x 10 x 12 mm ölçülerinde numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma performansı mil üzerinde kütle aşınma test düzeneği kullanılarak 120 N yük altında ve 104,67 mm/s (200 rpm) karşıt yüzey diski hızında, kuru sürtünme şartlarında fiber yükleme yönüne bağlı deneysel olarak incelenmiştir. Aşındırıcı karşı yüzey diski sertleştirilmiş çelik malzemeden 60 mm çapta, 774 HV (62 HRC) sertlikte ve 0,5 µm yüzey pürüzlülüğünde ısıtılmış DIN100Cr6 (EN31) kalite silindirik elemandır. Kayma mesafeleri 2,26 - 4,52 - 6,78 ve 9,04 km ve test süreleri 1 - 2 - 3 ve 4 saat olarak belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerini incelemek ve aşınma analizi sonuçlarını doğrulamak için optik mikroskop (OM) kullanılmıştır. Genel olarak tüm kompozit numunelerde artan kayma mesafesiyle ağırlık kaybının arttığı görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda en iyi aşınma dayanımı fiber takviyeye dik doğrultuda olan B tipi aşınma yönünde elde edilmiştir. Fiber takviye tabakası ve polyester matris tabakası arasındaki geçiş sürecinde sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızının değiştiği tespit edilmiştir.

Wear Properties of Multi-layer Continuous Polyester Fiber Fabric and PTFE Particle Reinforced Polyester Composite

Keywords

Polymer matrix composite,
Fiber reinforcement,
Wear,
Dry sliding,
Friction coefficient

Abstract: The aim of this study is to systematically investigate the wear performance of composite materials with multi-layer polyester fiber weave and PTFE particle reinforced polyester matrix with the orthotropic structure under dry friction conditions. The wear tests were carried out on specimens measuring 10 x 10 x 12 mm, cutting through radial roller bearings with an outer diameter of 380 mm, an inner diameter of 300 mm and a height of 100 mm. Wear performance was experimentally investigated by using the block on ring test method, under the load of 120 N and at the surface disk speed of 104.67 mm/s (200 rpm), depending on the direction of fiber weaving under dry friction conditions. The abrasive counterface is a DIN100Cr6 (EN31) quality hardened steel cylindrical element with a diameter of 60 mm, a hardness of 774 HV (62 HRC) and a surface roughness of 0.5 µm. The slip distances were determined to be 2.26 - 4.52 - 6.78 and 9.04 km, and the test durations were 1 - 2 - 3 and 4 hours. An optical microscope (OM) was used to examine the wear surfaces and confirm the results of the wear analysis. In general, all composite specimens showed increasing weight loss with increased slip distance. The best wear resistance was shown in the direction of B wear which is perpendicular to the fiber reinforcement. It has been found that the transition layer between the fiber reinforcement and the polyester matrix changes the friction coefficient and the specific wear rate.

*İlgili yazar: tamererturk@gmail.com

1. Giriş

Aşırı sıcaklık, korozyon ve kuvvet etkileri altında kalan uzay, taşımacılık, kimya gibi endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan mühendislik problemlerinin çözülme ihtiyacıyla beraber insanlık daha üstün özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Yataklar da bu türden zorlu koşullara maruz makine elemanlarından biridir. Fiber takviyeli kompozitler burç, pompa, piston ve merdanelerde yatak malzemesi olarak kullanılırlar. Endüstriyel olarak büyük tonajlı ve askeri amaçlı üretimi yapılan gemi makinalarında elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Görece zayıf mekanik karaktere sahip polimer malzemelerin elyaf ve parçacık takviyesi ile iyileştirilmiş aşınma davranışı sergilediği birçok çalışmada bildirilmiştir [1].

Larsen ve ark. [1] epoksi matrisli cam fiber, karbon/aramid fiber ve PTFE, CuO partikül takviyeye sahip çeşitli tipte polimer kompozitlerin aşınma davranışlarına yönelik yürütmüş oldukları çalışmalarında elyaf ve partikül takviyesinin epoksi/cam fiber kompozite kıyasla 20 katı aşınma mertebesinde aşınma dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Kukureka ve ark. [2] poliamid-66 matrisli 3 farklı (karbon, cam, aramid) kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerin aşınma davranışını araştırmışlardır. Çalışmalarında karbon ve cam fiber takviyesinin olumlu, aramid fiberin ise çok az etkisi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Vinil ester matrisli karbon ve cam fiber takviyeli kompozitlerin kuru sürtünmede aşınma davranışı üzerine Suresha ve ark. [3] gerçekleştirdiği çalışmada ise yük ve hızdaki artışa paralel olarak sürtünme katsayı ve aşınma hızının arttığını, en iyi aşınma performansını vinil ester/karbon fiber kompozit numunelerinde tespit ettiklerini belirtmişlerdir.

Correa ve ark. [4] tarafından muz ağacı fiber takviyenin vinil ester kompozitin tribolojik özellikleri üzerine olan etkisini araştırmak üzere pin on disk test cihazı ile yaptıkları çalışmada aşınma davranışlarını belirlemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre kompozit malzemenin saf matris malzemesinden daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu ancak artan takviye miktarıyla aşınma davranışının bozulduğunu tespit etmişlerdir. Söz konusu kompozit yapının aşınma direnci için en uygun takviye oranının ise %10 olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Larsen ve ark. [5] hacimce %0—10 arasında farklı miktarlarda CuO nano-parçacıklar ve %7,5 PTFE mikro-parçacıklar ile takviyelendirilmiş epoksi matrisli kompozitin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında SEM ve TEM mikroskop analizleri ile takviye partiküllerin uygun homojenlikte dağılım gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Nano CuO takviyesinin camsı geçiş sıcaklığı ve sertlik değerlerinde bir değişim etkisi olmadığını diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ve Vickers sertlik ölçümleri ile ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, PTFE takviyesinin camsı geçiş sıcaklığı ve sertlikte azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir. Aşınma testleri pin-on-disk düzeneğinde kuru sürtünme, 0,25 MPa yükte 6,0 m/s'lik hız koşulları altında uygulandığında PTFE takviyesi bulunmayan numuneler için sürtünme katsayısının nano-CuO içeriğinden bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı koşullarda PTFE takviye ilavesiyle sürtünme katsayısının %0-0,4 CuO içeriği için ortalama %35 mertebesinde azaldığını tespit etmişlerdir. Daha yüksek CuO içeriği için bu etki görülmemiştir. CuO ilavesi tüm konsantrasyonlarda epoksi matrisin aşınma dayanımını arttırmıştır. PTFE'ye sahip kompozitler genel olarak iyi bir sürtünme ve aşınma performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Zhao ve ark. [6] çalışmalarında karbon, cam ve aramid fiber takviyeleriyle güçlendirilmiş poliamid matrisli kompozitlerin aşınma davranışını kuru sürtünme ve üç farklı aşındırıcı koşulunda karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. SEM incelemesi yaparak aşınma mekanizmalarının test koşullarına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Takviyelerin poliyamid matrisin tribolojik özelliklerini büyük oranda etkilediği kanıtlamışlardır.

Li ve ark. [7] polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla saf ve fonksiyonelleştirilmiş grafen ile takviye edilmiş polimer numuneleri araştırmışlardır. Polimer matris ile grafen takviye arasındaki ara yüzey etkileşimini incelemek için simülasyon kullanmışlardır. Nano tabaka halinde Fe atomları içeren moleküler katman modellemesinde polimer matris yüzey katmanı ile olan etkileşimin kompozitin tribolojik özelliğini geliştirdiğini ortaya koymuşlardır. Simülasyon sonuçlarında sürtünme katsayısının ortalama %13 ve %42,3'lük bir azalma gösterdiğini ve işlevselleştirilmiş grafen/polimer kompozitin aşınma davranışını geliştirdiğini bulmuşlardır.

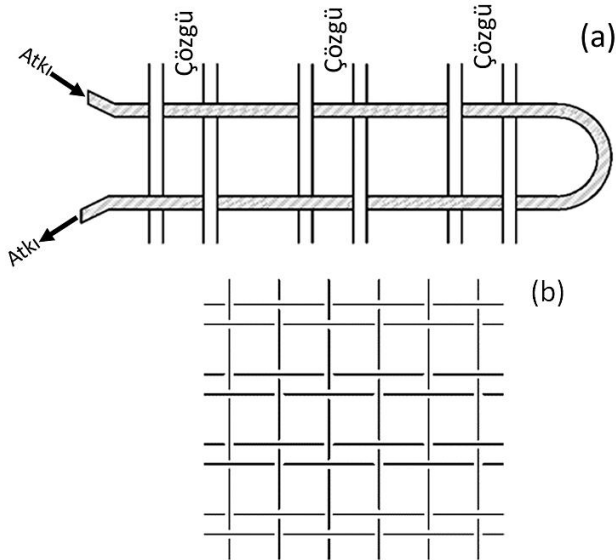
Mevcut çalışmalarda epoksi, poliamid, vinil ester benzeri polimer matris malzemelerinin cam, karbon, aramid hatta muz bitkisi gibi organik ve inorganik fiberler ve PTFE, CuO, grafen gibi partiküller ile takviyenlendirilerek aşınma performanslarının ele alındığı görülmektedir. Bu çalışmadaki amaç, çok tabakalı sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin kuru sürtünme koşullarındaki aşınma performansının sistematik olarak araştırılmasıdır. Çalışmada söz konusu malzemenin aşınma performansı mil üzerinde kütle aşınma test düzeneği kullanılarak 120 N yük altında ve 104,67 mm/s (200 rpm) karşıt yüzey diski hızında, kuru sürtünme şartlarında fiber yükleme yönüne bağlı olarak deneysel olarak incelenmiştir. 4 farklı kayma mesafesinde ağırlık kaybı belirlenerek aşınma

davranışları araştırılmıştır. Farklı kayma mesafeleri sonunda aşınma miktarı ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerini incelemek ve aşınma analizi sonuçlarını doğrulamak için optik mikroskop (OM) kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kompozit test malzemesi

Gerçekleştirilen çalışmada polyester fiber dokuma ile takviyelendirilmiş, PTFE partikül katkı polyester matristen oluşan ve ticari olarak Orkot ismiyle endüstriyel kullanımda olan tabakalı kompozit radyal yatak malzemeleri kullanılmıştır. Şekil 1'de polyester fiber dokumanın işlem şematigi ve elde edilen normal dokuma şekli görülmektedir. Test numuneleri 380 mm dış çap, 300 mm iç çap ve 100 mm yükseklik ölçülerinde radyal silindirik yataklar üzerinden Proxxon marka 27006 KS 230 model tezgah tipi daire testere ile kesilerek elde edilmiştir.

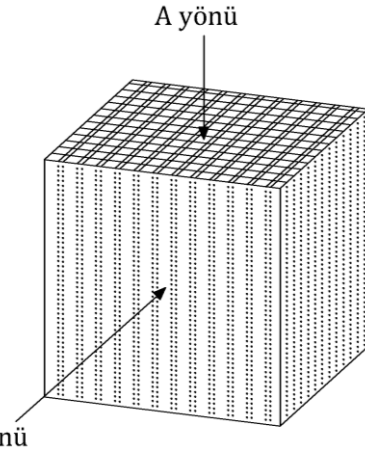


Şekil 1. Polyester fiber; (a) dokuma işlem şematigi, (b) normal dokuma tipinin şematik görünümü

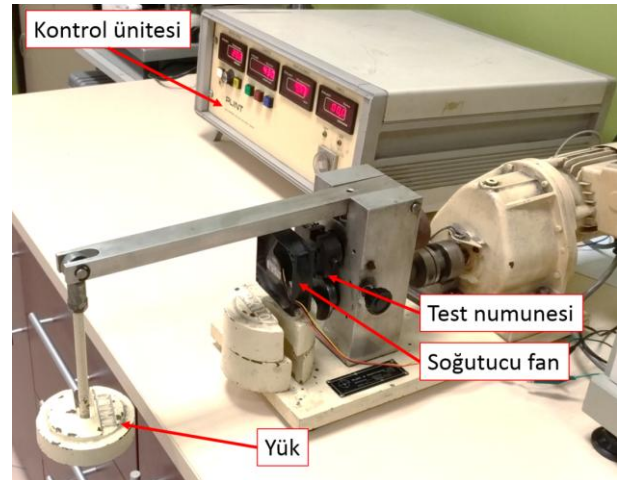
Şekil 2'de görüldüğü gibi tüm deneylerde 10 x 10 x 12 mm ölçülerinde numuneler kullanılmıştır. Söz konusu kompozit ortotropik yapıya sahiptir. Polyester matris malzemenin yoğunluk değeri 1,38 gr.cm⁻³, çekme mukavemeti 55 MPa ve sürekli çalışma sıcaklığı 230°C'dir. Termoplastik matris reçinenin içerisine aşınma karakteristiğini iyileştirme amacıyla katılan PTFE partikülleri 2,2 gr.cm⁻³ yoğunluk, 15 MPa çekme mukavemeti, 220°C çalışma sıcaklığı değerlerine sahiptir.

2.2. Test metodu

Kompozit malzemelerin aşınma testleri Şekil 3'de görülen Plint marka aşınma deney cihazıyla disk üzerinde blok (block on roller) yöntemi uygulanarak kuru sürtünme koşullarında yapılmıştır.



Şekil 2. Fiber yükleme yönüne paralel olan A ve dik olan B yönünün gösterimi



Şekil 3. Plint marka test düzeneği

Sertleştirilmiş çelik diske karşı aşınma testleri uygulanmıştır. Aşındırıcı karşı yüzey diski 60 mm çapta, 774 HV (62 HRC) sertlikte ve 0,5 µm yüzey pürüzlülüğünde ısıl işlem uygulanmış DIN100Cr6 (EN31) kalite silindirik elemandır. Karşı diske uygulanmış olan ısıl işlem prosedürü; östenitleştirme (910°C—45 dakika), soğutma (yağlı ortam) ve tavlama işlemi (150°C—300 dakika) adımlarını içermektedir.

Sistem üzerinde aşındırıcı disk AC motor tarafından 0-2000 dev/dk hız aralığında döndürülebilmektedir. Aşınma deneylerinde, diskin dönme hızı 200 dev/dk ve normal yük 120 N olarak uygulanmıştır. Numunelerin aşınma maruziyetleri 2,26 - 4,52 - 6,78 ve 9,04 km kayma mesafelerinde ve test süresi olarak 1 - 2 - 3 ve 4 saat olacak şekilde uygulanmıştır. Her bir test için kayma hızı 104,67 mm/sn dir.

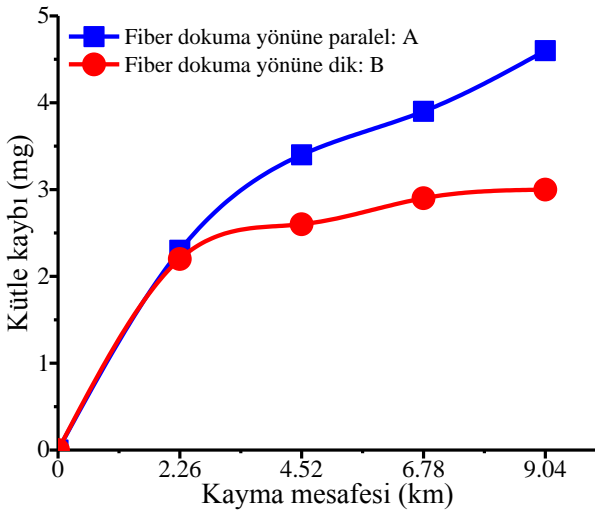
Hız, yük, basınç ve tipine göre aşınma ortamı kuru sürtünme koşulunda her testte muhafaza edilmiştir. Test atmosferinin nem ve sıcaklık değerleri sırasıyla %50 bağıl nem ve 22°C olarak tespit edilmiştir. Her testten önce aşındırıcı disk aseton ile temizlenmiştir. Precisa 125A marka hassas terazi kullanılarak 0,1 mg

hassasiyette her bir aşınma testi öncesi ve sonrası kütle kaybı ölçülmüştür.

3. Bulgular

Genel olarak malzemelerin aşınma davranışları üzerinde uygulanan yükün parametre olarak hıza göre daha etkili olduğu bilinmektedir. Uygulanan yük ile birlikte artan sıcaklık sebebiyle numune yüzeyinde gevrek tabaka kalınlığı artarak bu tabakaların numune yüzeyinden kopduğu bir aşınma mekanizması söz konusudur. Bu faktörün malzeme aşınma davranışını belirlemedeki bozucu etkisinden kaçınmak üzere test süresi boyunca soğutma için aşınma bölgesine etki eden bir soğutucu fan düzeneği kullanılmıştır.

Polyester matrisli kompozitin 2 farklı fiber yükleme yönünün (A ve B) fonksiyonu olarak aşınma özelliklerinin ortaya konduğu deneysel veriler Şekil 4'de grafik halinde sunulmuştur. Sonuçlarda A tipi fiber dokuma yönlenmesi için görece yüksek spesifik aşınma meydana gelmişken, B tipi yönlenmede (yükleme doğrultusuna dik) daha düşük bir aşınma oranı ile karşılaşmıştır.

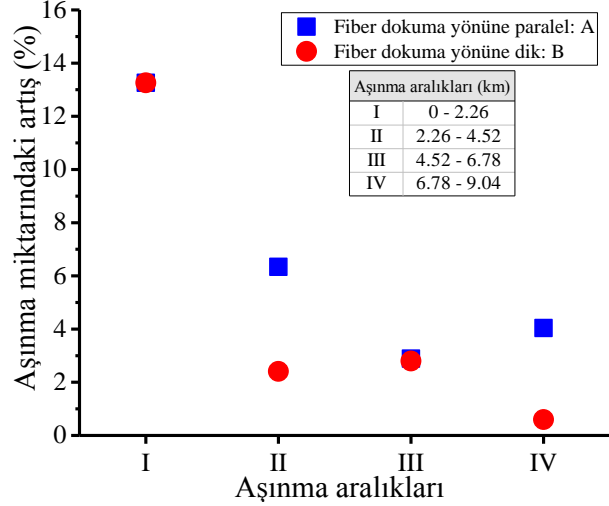


Şekil 4. Fiber yükleme yönüne bağlı kütle kaybı — kayma mesafesi değişimi

Kayma mesafesi 2,26 km'ye kadar olan aşınma sürecinde her iki yöndeki aşınma durumunda da ilerleyen kayma mesafelerinde elde edilen sonuçlara göre daha yüksek oranda aşınma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak 2,26 km'den sonra partikül takviyesi olan PTFE'nin aşınmaya karşı yağlayıcı etkisinin aşınan yüzey tabakasında daha etkin hale geldiği düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 4'de fiber yükleme yönüne paralel olan A tipi yükleme durumu için elde edilen eğri incelendiğinde 2,26 km aşınma mesafesi sonrasında her bir saatlik aşınma dilimi için farklı aşınma hızlarında gerçekleşen bir aşınma davranışı tespit edilmiştir. Şekil 5'te verilen her bir saatlik dilime karşılık gelen 2,26—4,52/ 4,52—6,78/ 6,78—9,04

km kayma mesafesi aralıkları için aşınma hızını ortaya koyan eğri eğimindeki farklılıklar dikkate alındığında bu tespit daha açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Şekil 5'te verilen yüzde aşınma artışı davranışları incelendiğinde I ve III aralığında her iki yönde (A ve B) aynı miktarda aşınma artışının meydana gelmiş olduğu görülmektedir.



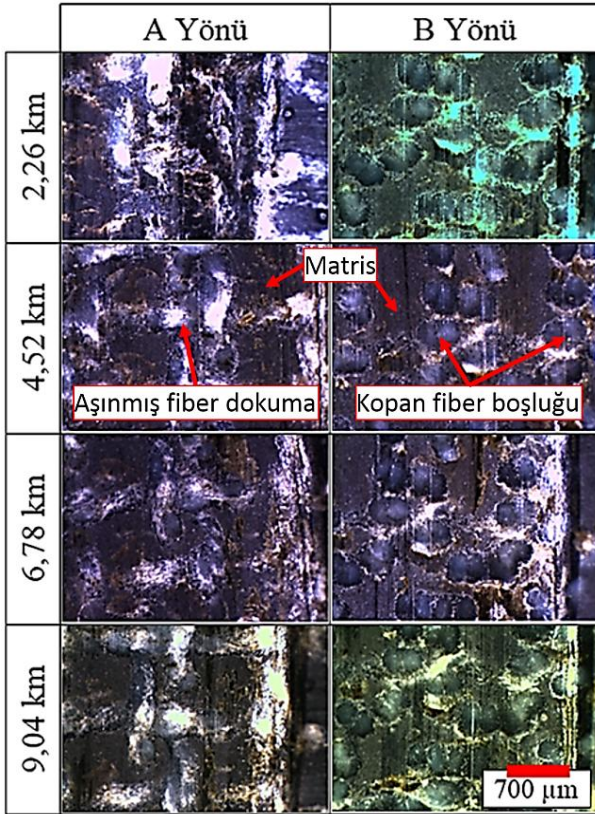
Şekil 5. Aşınma miktarındaki artışın fiber yükleme yönüne ve test mesafelerine bağlı değişimi

Dolayısıyla söz konusu aralıklarda meydana gelen sırasıyla yüzde 13 ve 2,8 oranlarındaki aşınma artışının kompozit yapı içerisinde bulunan matris tabakasında olduğu sonucuna varılmaktadır. Şekil 5'te II ve IV aralıklarında meydana gelen aşınmalarda ise fiber yükleme yönüne bağlı olarak A ve B yönleri için farklı oranlarda aşınmanın meydana gelmiş olduğu görülmektedir. II aralığında A tipi aşınma halinde %6 iken B tipi için %2,8 oranlarında aşınma miktarlarında artış meydana gelmiştir. IV aralığında ise A tipi aşınma hali için %2,8, B tipi aşınma hali için %0,6 oranında bir aşınma artışı meydana gelmiştir. Bu farklılıklar ve Şekil 4'te her iki yön için verilmiş olan aşınma eğrileri ele alındığında fiber yükleme yönüne bağlı olarak aşınma dayanımının fiber yönüne dik yönde olan B tipi konumlamada daha etkin olduğu sonucuna varılmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda en iyi aşınma dayanımı fiber takviyeye dik doğrultuda olan B aşınma yönünde elde edilmiştir. A aşınma yönünde fiber takviye tabakası ve polyester matris tabakası arasındaki geçiş sürecinde sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızının değiştiği tespit edilmiştir. Fiber dokuma yönlenmesindeki değişime bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop (OM) fotoğrafları üzerinden aşınma mekanizmaları incelenmiştir.

Tribolojik olarak A ve B tipi farklı fiber dokuma yönlenmelerinde sürtünme katsayısı (μ) ve spesifik aşınma oranı abrasif aşınma modunda meydana gelmiştir. Fiber dokumaya paralel konumda (A yönünde) aşınan numunelerde polyester matrisin

elyaf üzerine sıvanarak kaplanması nedeniyle sürtünme kuvvetinde ani düşüşler gözlemlenmiştir. Benzer şekilde aşınma etkisi altında bir süre düşük kalan sürtünme kuvveti Şekil 7b'de şematik olarak çizildiği gibi sıvanarak kaplanmış polyester tabakasından küresel geometride koparak uzaklaşıp geride küçük çukurcuklar bırakmıştır. Aşınma sürecinde meydana gelmiş olan küçük çukurcuk yapısının miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısında kademeli bir artış meydana gelmiştir. Yapılan mikro yapı incelemelerinde Şekil 6'da A yönünde uygulanan aşınma testi sonucunda matris ile beraber fiber aşınmasının gerçekleştiği görülmektedir. Aşınma sürecinde B yönü için fiberlerin koparak matrisin tek başına aşınmaya maruz kaldığı Şekil 6 ikinci sütununda sunulmuştur. Burada sunulan mikro yapısal görüntülerde kopan fiberler sonrası oluşan boşluk durumu görülmektedir. Tartışma ve sonuç kısmında B yönünde (yükleme doğrultusuna dik) tribolojik davranış şematiği ayrıca irdelenmiştir.



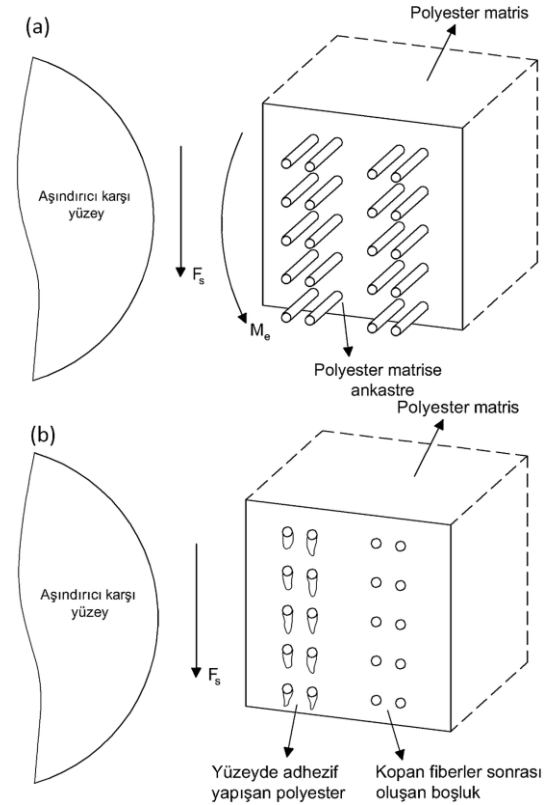
Şekil 6. A ve B yönlerindeki aşınmalar sonucu elde edilen yüzey görüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Uygulanan test şartlarında en iyi aşınma dayanımı fiber dokumaya dik aşınma yönünde görülmüştür. Söz konusu yapı irdelendiğinde aşındırıcı karşı yüzeyin etkisiyle test numunelerine iletilen sürtünme kuvveti fiber dokumayı normal çekme ekseninde eğilmeye zorlayarak etkilemektedir. Karşılaşılan bu aşınma durumu anizotropik mekanik davranış gösteren fiberlerde dokumaya paralel

yönlenme ekseninde çekme dayanımının daha yüksek olması olgusuyla açıklanabilir. Fiber dokumaya paralel konumda aşınan numunelerde sürtünme direnci daha ziyade fiber takviye ile karşı yüzey arasında gerçekleşmesi ve polyester matrisin aşınma davranışına etkisi kısıtlı olduğundan sürtünme katsayısı fiber dokumaya dik konumda görülen aşınma davranışına göre daha düşük dirençte gerçekleşmiştir.

Şekil 7a'da şematik gösterimi bulunan B tipi fiber dokuma yönlenmesinde (yükleme doğrultusuna dik) polyester matris içerisine gömülü olması sebebiyle ankastre mesnet serbestliğinde olan çok küçük uzunluklu fiberlerin eğilme etkisi altında zorlandığı bir yapı söz konusudur. Bu durumda eğilme zorlanması ile kırılmalar sonucu bünyeden kütle kaybı meydana gelerek ortaya çıkan bir fiber aşınması görülmektedir.



Şekil 7. B fiber dokuma yönlenmesinde (yükleme doğrultusuna dik) tribolojik davranış şematiği

Şekil 7b'de şematik olarak gösterilen fiber kopmaları sonucunda çukurcukların meydana geldiği yüzey yapısında fiber dokumalar arasında bulunan polyester matris tabakası üzerinde aşınma aktifleşmektedir.

Yüzey durumuna göre fiber ve polyester matrisin aşınması ile toplam kütle kaybı gerçekleşmektedir. A yönünde aşınmaya nazaran B yönünde kopan parçaların sebep olduğu mil ile numune yüzeyi arasındaki abrasif ortam etkisiyle aşınmanın artmasına rağmen toplam aşınma miktarında B yönünde aşınmanın daha az olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen aşınma testleri sonucu 9,04 km kayma mesafesi ile A yönünde toplam 4,6 mg ve B yönünde 3 mg kütle kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kompozit malzemelerin aşınma davranışlarının ele alındığı çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülmüş çalışmalar [1-7] incelendiğinde genel itibariyle takviye malzemelerinin aşınma dayanımını arttırmış olduğu görülmektedir. Bununla beraber takviye yönlenmesine bağlı olarak ortaya çıkan karakteristik tribolojik davranışın irdelenmesi çalışmamızın mevcut literatüre olan en belirgin katkısıdır. Önceki çalışmaların üstüne yapılan katkı detaylandırıldığında daha önce üzerinde deneysel bir çalışma yürütülmemiş söz konusu kompozit malzemenin aşınma davranışı ortaya konarak kompozit yapıda bulunan fiber takviyenin yükleme yönüne bağlı gösterdiği davranış şematik model üzerinden ele alınmıştır.

Teşekkür

Çalışmada malzeme temini konusunda yardım ve desteklerinden ötürü Gürdesan Gemi Makina San. Tic. A.Ş. nezdinde Mehmet ÖZKAYA'ya teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] Larsen, T.Q., Andersen, T.L., Thorning, B., Vigild, M.E. 2008. The effect of particle addition and fibrous reinforcement on epoxy-matrix

composites for severe sliding conditions. *Wear*, 264, 857-868.

- [2] Kukureka, S.N., Hooke C.J., Rao, M., Liao, P., Chen, Y.K. 1999. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107-116.
- [3] Suresha, B., Kumar, K.S., Seetharamu, S., Kumaran P.S. 2010. Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites. *Tribology International*, 43(3), 602-609.
- [4] Correa, C.E., Betancourt, S., Vázquez, A., Gañan, P. 2017. Wear performance of vinyl ester reinforced with Musaceae fiber bundles sliding against different metallic surfaces. *Tribology International*, 109, 447-459.
- [5] Larsen, T.Ø., Andersen, T.L., Thorning, B., Horsewell, A., Vigild, M.E., 2008. Changes in the tribological behavior of an epoxy resin by incorporating CuO nanoparticles and PTFE microparticles. *Wear*, 265(1-2), 203-213.
- [6] Zhao, G., Hussainova, I., Antonov, M., Wang, Q., Wang, T. 2013. Friction and wear of fiber reinforced polyimide composites, *Wear*, 301(1-2), 122-129.
- [7] Li, Y., Wang, S., Wang, Q. 2017. Enhancement of tribological properties of polymer composites reinforced by functionalized graphene, *Composites Part B: Engineering*, 120, 83-91.