



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PTFE ALAŞIMLARINDAN YAPILMIŞ PERNO YATAKLARININ BOZULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL ANALİZİ

Seyit Mehmet DEMET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2013
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PTFE ALAŞIMLARINDAN YAPILMIŞ PERNO YATAKLARININ BOZULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL ANALİZİ

Seyit Mehmet DEMET

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin İMREK

2013, 97 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Hüseyin İMREK
Doç. Dr. Hüseyin ARIKAN
Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Bu çalışmada, PTFE matrisli, bronz, karbon ve cam elyaf katkılı kompozit malzemelerden hazırlanmış perno yataklarının aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde, AISI 1040 çeliğinden imal edilmiş pernolar kullanılmıştır. Yüzey basıncı ve kayma mesafesindeki değişimlerin, perno yataklarının aşınması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kompozit perno yatakları farklı iç çaplarda imal edilerek iç çap değişiminin aşınma üzerine etkisi incelenmiştir. Deney numunelerinin yüzey analizleri elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların ve yüzey analizlerinin sonuçları kıyaslamalı olarak açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kayma aşınması, takviye edilmiş kompozit, perno, PTFE alaşımları.

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FAILURE BEHAVIOUR OF PIVOT PIN BEARINGS MADE OF PTFE ALLOYS

Seyit Mehmet DEMET

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK

2013, 97 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Asst. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

In this study, wear tests of pivot pin bearings made of composite materials having PTFE as matrix and reinforced with carbon, bronze and glass fibers were conducted. The pivot pins used in the experiments were made of AISI 1040 steel. The effects of surface pressures and sliding distances on the pivot pin bearings were investigated. The composite pivot pin bearings were manufactured at different inner diameters so that effects of diameter variations on wear could be studied. Surface analysis for this experimental study was done by using electron microscope. The results of the tests and those from the surface analysis were compared and presented.

Keywords: Pivot pin, PTFE alloys, reinforced composite, sliding wear.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sürecinde her türlü konuda bana yardımcı olan sayın Doç. Dr. Hüseyin İMREK'e, çalışmalarım sırasında tecrübesiyle bana yardımcı olan sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI'ya, deneylerin yapılmasında laboratuar imkânlarından faydalandığım Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam sürecinde bana destek olan Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Seyit Mehmet DEMET
KONYA-2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **2**

3. TEORİK ESASLAR **9**

3.1. Sürtünme 9
3.1.1. Kuru sürtünme 14
3.1.2. Sınır sürtünme 18
3.1.3. Sıvı sürtünme 19
3.2. Aşınma 20
3.2.1. Adezyon aşınması 20
3.2.2. Abrazyon aşınması 23
3.2.3. Yorulma aşınması 24
3.2.4. Korozyon aşınması 25
3.2.5. Kayma aşınması 26
3.2.5.1. Kayma aşınması teorisi 26

4. KOMPOZİT MALZEMELER **30**

4.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı 30
4.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları 31
4.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj Ve Dezavantajları 31
4.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 32
4.4.1. Fiber takviyeli kompozitler 32
4.4.2. Tabakalı kompozitler 35
4.4.3. Tanecikli kompozitler 36
4.5. Kompozitlerde Matris Çeşitleri 36
4.5.1. Plastik matrisli kompozitler 36
4.5.1.1. Termoplastikler 37
4.5.1.2. Elastomerler 38
4.5.1.3. Termosetler 38
4.5.2. Metal Kompozitler 40
4.6. Kompozitlerin Aşınma Davranışları 40
4.6.1. PTFE matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışı 43
4.6.2. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin aşınma ve sürtünmesi 45

5. KAYMALI YATAKLAR VE PERNOLAR 49

5.1. Kaymalı Yataklar 49
5.2. Pernolar 50

6. MATERYAL VE METOT 53

6.1. Deney Düzeneği 53
6.2. Test Metodu 55
6.3. Yataklara Uygulanacak Yüklerin Tespiti 55
6.4. Deney Numuneleri 57
6.5. Deney Numunelerindeki Ağırlık Kaybının Tespit Edilmesi 58
6.6. Deneyin Yapılışı 58

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 60

7.1. Deneysel Sonuçlar 60
7.2. Kayma Mesafesi Değişiminin Aşınma Üzerine Etkisi 75
7.3. Yüzey Basıncı Değişiminin Aşınma Üzerine Etkisi 75
7.4. Takviye Malzemesinin PTFE Kompozit Yatakların Aşınmasına Etkisi 76
7.2. Aşınmış Yüzeylerin SEM Analizi 77

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 93

8.1. Sonuçlar 93
8.2. Öneriler 93

KAYNAKLAR 94

ÖZGEÇMİŞ 97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Temas alanı (mm^2)
A_g	Gerçek temas alanı (mm^2)
E	Elastisite modülü (N/mm^2)
F_{adh}	Adezyon kuvveti (N)
F_{def}	Deformasyon kuvveti (N)
F_N	Normal kuvvet (N)
F_s	Sürtünme kuvveti (N)
K	Aşınma katsayısı
L	Kayma mesafesi (m)
M	Aşınma miktarı (gr)
P	Plastik deformasyondaki akma basıncı (N/mm^2)
R_{t1} ve R_{t2}	Yüzeylerin maksimum yüzey pürüzlülüğü
V	Aşınan malzeme hacmi (mm^3)
W	Toplam normal yük (N)
δW	Birim normal yük (N)
δQ	Toplam aşınma oranı
μ	Sürtünme katsayısı
μ_{adh}	Adezyon sürtünme katsayısı
μ_{def}	Deformasyon sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
σ_{ko}	Kopma mukavemeti (N/mm^2)
τ_{km}	Kesme mukavemeti (N/mm^2)
υ	Poisson oranı
κ	Temas alanı oranı

Kısaltmalar

DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Norm Enstitüsü)
KKE	Kısa Karbon Elyaf
MMK	Metal Matrisli Kompozit

PA	Poliamid
PE	Polietilen
PEEK	Polietereterketon
PES	Polieter sülfon
POM	Polioksimetilen
PPS	Polifenilin sülfür
PTFE	Politetrafloroetilen
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron mikroskobu)

1. GİRİŞ

Temasta olan yüzeylerin birbirine göre izafi hareketleri sonucunda, temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana gelir. Sürtünen yüzeylerden malzemenin kopup ayrılmasına aşınma denir. Yağlama bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin başında gelir. Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olayları inceleyen bilim dalına "triboloji" denir. Triboloji sözcüğü ilk defa Prof. H. Peter Jost tarafından 1966 yıllarında yayınlanmıştır.

Dünya çapında yapılmış istatistiklere göre makine elemanlarının büyük çoğunluğu aşınma sonucu fonksiyonunu yitirmektedir. Yüksek orandaki bu kaybı azaltmak amacıyla, aşınmanın önlenmeye çalışıldığı yağlama sistemleri uzun süredir kullanılmaktadır. İlerleyen teknoloji ile birlikte malzeme biliminde de önemli gelişmeler olmuştur.

Malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek için yapılan çalışmalarda, bir malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerinden çok daha üstün özelliklere sahip, çeşitli metal alaşımlar ve polimer kompozit malzemeler üretilmiş, üretilen bu kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri araştırılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, polimer kompozit malzemeler içerisinde düşük sürtünme katsayısı ile öne çıkan PTFE ve kompozit türevleriyle ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. PTFE matrisine farklı oranlarda cam elyaf, karbon elyaf, bronz, karbon, grafit ve molibden disülfür gibi takviye elemanları katılarak kompozit malzemeler üretilmiş, üretilen kompozitlerin tribolojik özellikleri araştırılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, aşınma direnci yüksek bir malzeme olan PTFE (politetrafloroetilen) polimer malzemesine, ağırlıkça % 40 bronz, % 35 karbon ve % 15 cam elyaf dolgu malzemeleri takviye edilerek oluşturulan kompozit malzemelerin aşınma özellikleri incelendi. Malzemelerin mekanik özelliğini geliştiren dolgu malzemelerinin, tribolojik özelliklerine nasıl bir katkı sağladığı deneysel olarak araştırıldı.

Perno yatağı şeklinde hazırlanan deney numuneleri, perno yatağı deney setinde kayma aşınması testine tabi tutuldu. Yüzey basıncı ve kayma mesafesi parametrelerindeki değişimin, kompozit perno yataklarının aşınma performansına etkisi araştırıldı. Deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası yüzey yapıları incelenerek yorumlandı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Erten (2011) yüksek lisans çalışmasında karbon elyaf kaplı çelikten imal edilmiş pernolar ile çelik pernoların çelik yatak içerisinde değişik yükleme şartları altında bozulma durumlarını incelemiş ve birbiriyle mukayese etmiştir. Yaptığı çalışma için perno testlerinin yapılacağı özel bir deney seti tasarlanıp imal edilmiş ve sonrasında bu deney seti üzerinde planlanan çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyleri, perno üzerine uygulanan yükleri ve aşınma mesafelerini değiştirerek yapmıştır. Farklı iki tip perno numunesinin yük ve aşınma mesafeleri karşısındaki aşınma ve bozulma durumlarını incelemiştir.

Özsaraç (1999) yüksek lisans çalışmasında yatak malzemesi olarak kullanılan fosfor bronzu, kurşunlu kalay bronzlarını ve çinko-alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmaları biri pin-on-disk diğeri yatak aşınmaları için imal edilmiş deney seti olmak üzere iki tip deney setinde gerçekleştirmiştir. Çalışmalar sonucunda çinko-alüminyum alaşımlarının bronz alaşımlarından daha düşük sürtünme katsayılarına sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Golchin (2010) yüksek lisans tezinde saf PTFE, % 25 siyah cam takviyeli PTFE, % 40 bronz takviyeli PTFE, % 25 karbon takviyeli PTFE, % 20 cam elyaf takviyeli PTFE, % 5 molibden takviyeli PTFE ve beyaz metal malzemelerinin yağlı kayma aşınması ortamında aşınma özelliklerini incelemiştir. Deneyleri block-on-plate deney setinde ve 1MPa'dan 8 MPa' a kadar değişen basınç aralığında test etmiş, tribometre ile sürtünme katsayısı değerlerini elde etmiştir. Karbon takviyeli PTFE ve saf PTFE'nin sürtünmeye karşı daha dirençli olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Khoddamzadeh ve ark. (2009), kaymalı yatak uygulamaları için PTFE bazlı bir grup kompozit malzeme geliştirmişlerdir. Numuneleri basınçla kalıplama tekniği ile ürettiler ve numunelerin mekanik, tribolojik ve korozif özelliklerini araştırmışlardır. Bu özelliklerin PTFE matrisli malzeme içine katılan dolgu malzemesine ve dolgu malzemelerinin matris içindeki oranlarına göre değiştiğini göstermişlerdir. Geliştirdikleri PTFE matrisli kompozit malzemelerin saf PTFE'den daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Rezaei ve ark. (2011), denizcilik uygulamalarında kullanılan PTFE ve polyester fiber takviyeli fenolik bazlı kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini deneysel ve nümerik çalışmalar ile araştırmışlardır. Deney setini, büyük ölçekli yataklarda tribolojik özellikleri araştırabilmek için tasarlamışlardır. Nümerik çalışmalar

için Eulerian–Lagrangian formüllerini kullanmışlardır. Nümerik çalışmalar ile deneysel çalışmaların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Franke ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada PTFE-Poliamid kompoziti reaktif ekstrüzyon yoluyla üretmişlerdir. Poliamid 6, Poliamid 6.6, Poliamid 12, karbon fiber takviyeli PTFE ve bronz malzemelerinden üretilen yatak malzemelerinin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen PTFE-Poliamid kompozit malzemelerinin kolayca işlenebilme özelliğinin yanında, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin de düşük olduğu sonucunu bulmuşlardır.

Tevruz (1996) çalışmasında saf ve cam elyaf takviyeli politetrafloroetilen radyal yatakların tribolojik davranışlarını incelemiştir. Cam elyaf takviyeli numunelerin saf PTFE numunelerinden daha az aşındığını, bununda cam elyaf takviyesinin numunelerde dayanımı desteklemesinin sonucu olduğunu kaydetmiştir.

Tevruz (1998) çalışmasında % 35 karbon dolgulu PTFE kompozit radyal yataklarda kayma mesafesinin, yatak basıncının, orta ve düşük hızların sürtünme ve aşınma üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu çalışması sonucunda, eş çalışan parçaların yüzeyleri arasında oluşan transfer film tabakası kalınlığının sürtünme katsayısı ve aşınma miktarını etkilediğini bulmuştur.

Tevruz (1999) çalışmasında % 60 bronz dolgulu PTFE kompozit radyal yataklarda kayma mesafesinin, yatak basıncının, orta ve düşük hızların sürtünme ve aşınma üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu çalışması sonucunda, parçaların sürtünen yüzeyleri arasında oluşan transfer film tabakası kalınlığının sürtünme katsayısı ve aşınma miktarını önemli ölçüde etkilediğini bulmuştur.

Ünal ve ark. (2010) saf PTFE ve % 60 bronz takviyeli PTFE malzemelerinin aşınma ve sürtünme performanslarını ortam sıcaklığında ve pin-on-disk deney setinde incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda düşük yükte yapılan deneylerde yükün artmasıyla sürtünme katsayısının arttığını, yüksek yükte yapılan deneylerde yükün artışının aşınma üzerine etkisinin daha az olduğunu ve sürtünme katsayısı ve aşınma oranının kayma hızından daha çok uygulanan yüke duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Çalışmalarında PTFE ve kompozitlerinin aşınma mekanizmalarının, adezif ve abrasif aşınma mekanizmalarını içerdiğini de kaydetmişlerdir.

Jia ve ark. (2007), poliamid 6.6 (PA6.6), politetrafloroetilen (PTFE) ve polifenilin sülfürün (PPS) kendi kendileriyle kuru aşınma ve yağlı aşınma durumlarındaki aşınma ve sürtünme özelliklerini pin-on-disk tribometre ile test etmişlerdir. Deneyler sonucunda PTFE ve PPS malzemeleriyle hazırlanmış numunelerin

aşınma özelliklerinin yağlama ile iyileştirilebileceğini, fakat PA6.6 numunelerinin yağlı aşınma sonucu aşınma özelliğinin kötüleştiği sonucunu elde etmişlerdir. Aşınma esnasında oluşan ısının, yağlama sonucu dağıtılıp aşınma direncinin geliştirileceğini göstermişlerdir. Deneylerinde; kuru sürtünme durumunda adezif aşınma mekanizmasının baskın olduğunu kaydetmişlerdir.

Friedrich ve ark. (2005), çalışmalarında çeşitli dolgu malzemeleri takviye edilmiş polimer kompozit malzemelerin kayma aşınması özelliklerini ve kompozit malzemelere takviye edilen dolgu malzemelerinin aşınmaya etkisini incelemişlerdir. Oluşturduğu kompozit kombinasyonları içerisinde % 80 PTFE - % 10 karbon elyaf - % 10 bronz takviyeli PTFE numunelerinde en iyi aşınma direncini elde etmişlerdir. Özellikle ısıl iletkenlik özelliğinin iyi olması nedeniyle bronz takviyesinin tribolojik özellikleri iyileştirdiğini kaydetmişlerdir.

Ünal ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada saf PTFE, cam elyaf takviyeli, bronz takviyeli ve karbon takviyeli PTFE kompozit malzemelerde kayma hızının ve uygulanan yükün aşınma ve sürtünme özellikleri üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda; sürtünme katsayısının yükün artışı ile azaldığı, en iyi aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerini cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerde elde edildiği sonucuna varmışlardır. PTFE'ye karbon, cam elyaf ve bronz takviye etmenin aşınma oranını azaltmada etkili olduğunu, aşınma oranının kayma hızından daha çok yük değişimine duyarlı olduğunu vurgulamışlardır.

Wang ve Yan (2007), çalışmalarında % 5'den % 30'a kadar değişen oranlarda bronz takviye edilmiş PTFE kompozit deney numunelerinde, kayma süresinin sürtünme yüzeyleri arasında oluşan transfer film kalınlığına ve yüzey morfolojisi üzerinde etkisini incelemişlerdir. Kompozit yapı içerisinde bronz oranının artışının transfer film kalınlığını çok az etkilediğini belirtmişlerdir. Kayma süresinin artmasının arayüzey sürekliliğini ve sünekliğini iyileştirdiğini fakat transfer filminin tribolojik özelliklerine etkisinin olmadığını vurgulamışlardır. Kompozit yapıdaki bronzun iyi süneklik özelliğinin, uygulanan yük altında transfer film yüzeyinin tribolojik özelliklerini geliştirdiğini kaydetmişlerdir.

Klaas ve ark. (2005) cam elyaf ve cam türevleri takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinde düşük ve yüksek başınç değerlerindeki kayma aşınması sonucu aşınma durumunu incelemişlerdir. Farklı cam türevleri ile takviye edilmiş PTFE kompozit numunelerin kayma özelliğinin, karşı yüzey üzerinde transfer film oluşturma kabiliyetlerine bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Boncuksu cam takviyeli PTFE

numunelerinde, daha kalın transfer film oluşumuna ve daha yüksek aşınma oranı değerlerine ulaşmışlardır. Kompozit içinde bulunan boncuksu camın kayma işlemi esnasında dağılması sonucunda bu durumun ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Ünal ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada % 25 bronz takviyeli PTFE numunelerinde, uygulanan yükün ve kayma hızının sürtünme ve aşınma üzerine etkisini deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Deneyleri kuru sürtünme ortamında ve pin-on-disk deney setinde gerçekleştirmişlerdir. Uygulanan yükteki ve kayma hızındaki değişimlerin aşınma davranışına etkisini açıklamak amacıyla, denklem geliştirmek için dağılım analizi yapmışlardır. Düşük ve yüksek kayma hızlarında kompozit numunenin sürtünme katsayısının yükün artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Buna ilaveten uygulanan yükteki değişmenin sürtünme katsayısı üzerinde kayma hızından daha etkin olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde aşınma oranı değişiminin de uygulanan yükün artmasıyla azaldığını kaydetmişlerdir. Deneysel sonuçlarla analitik sonuçların oldukça yakın değerlerde olduğunu ispatlamışlardır.

Ünal ve ark. (2007) çalışmalarında, saf PTFE ve % 25 bronz, % 35 grafit ve % 17 cam elyaf takviyeli PTFE numunelerinin abrazif aşınma haritasını oluşturmak amacıyla, pin-on-disk deney setinde abrasif aşınma deneyleri yapmışlardır. Deneylerinde takviye malzemelerinin, yüzey pürüzlülüğünün ve uygulanan yükün aşınma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda cam elyaf takviyeli numunelerde en düşük aşınma hacmini elde etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün ve uygulanan yükün artmasının aşınma oranını da artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Sonuç olarak abrazif aşınma mekanizmasının çizme ve kesme mekanizmalarını içerdiğini göstermişlerdir.

Tekin ve Akkök (2011), iş makinelerinde ağır yüke maruz kalan pim ve yatakların aşınma durumlarını incelemişlerdir. Ekskavatör yataklarının çalışma koşullarının simüle edileceği deney düzeneği tasarlamış ve üretmişlerdir. Hidrolik kontrol sistemi ile pime ve yatağa, kuvvet ve hareketin aynı anda iletilmesi sonucu gerçek çalışma koşullarını sağlamışlardır. Farklı yatak malzemeleri için, kayma hızının ve yataklara uygulanan kuvvetin aşınma üzerine etkilerini inceleyip deneylerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Grün ve ark. (2012) çalışmalarında % 10 bronz takviyeli PTFE ile % 20 oranında kalay içeren AlSn20 heterojen deney numunelerinin tribolojik özelliklerini sonlu elemanlar metoduyla simüle ederek araştırmışlardır. Bronz takviyeli PTFE kompozit için, PTFE matrisin yük taşıma kapasitesini, sıcaklık ve sürünme özelliklerini

analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, heterojen malzemelerin tribolojik özelliklerinin homojen malzemelerden daha üstün olduğunu göstermişlerdir.

Conte ve ark. (2012) PTFE'nin tribolojik özelliklerini geliştirmek için, saf PTFE ve PTFE'nin bronz, grafit, cam elyaf ve molibden disülfür ile oluşturduğu kompozit lerinin tribolojik özelliklerini, spesifik enerji formülünü temel alarak incelemişlerdir. Kompozit PTFE kombinasyonları arasında, sert partikül takviyesinin PTFE'nin aşınma özelliğini kötüleştirdiğini, fakat dayanımın artması sonucu saf PTFE'nin aşınma özelliğinin geliştiğini ispatlamışlardır.

Bagale ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, saf PTFE, % 40 bronz takviyeli PTFE ve % 40 karbon takviyeli PTFE kompozit malzemelerinde uygulanan yük değişiminin, kayma hızının ve kayma mesafesinin PTFE matrisli polimerik kompozit malzemelerin aşınma özelliğine etkilerini pin-on-disk deney setini kullanarak araştırmışlardır. Bronz ve karbon takviyesinin aşınma oranını önemli ölçüde azalttığını fakat sürtünme katsayısını artırdığını göstermişlerdir. En yüksek aşınma direncinin % 40 karbon takviyeli PTFE kompozit numunelerde elde edildiğini açıklamışlardır.

Bijwe ve ark. (2002) saf PTFE ve % 25 karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemelerinden hazırladıkları deney numunelerinin ağır çalışma şartları altında sürtünme ve aşınma performanslarını incelemişlerdir. Yüksek hızlarda, değişen yüklerde, artan sıcaklıklarda ve uzun kayma sürelerinde, deney numunelerinin sürtünme katsayılarını ve spesifik aşınma oranlarını kaydetmişlerdir. Deney sonuçlarının kıyaslanması sonucunda, saf PTFE numunelerine nazaran karbon elyaf takviyeli numunelerin aşınma performansının önemli bir ölçüde geliştiğine işaret etmişlerdir. Fakat aşınma oranlarının tam tersine karbon elyaf takviyesinin sürtünme katsayılarında artışa neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aşınma mekanizmalarının tespiti için test edilmiş numunelerin SEM analizlerinin incelenmesiyle, abrasif aşınma mekanizmasının % 25 karbon elyaf takviye edilmiş numunelerde çok az etkili olduğunu ispatlamışlardır.

Bijwe ve ark. (2005) çalışmalarında, % 0- 30 aralığında değişen PTFE takviyeli polyether-ether-ketonen (PEEK) kompozit deney numunelerinin ve saf PTFE deney numunelerinin tribolojik özelliklerini ve aşınma modlarını, pin-on-disc ve düşük frekanslı salınım ile aşındırma deney setlerinde araştırmışlar, mekanik özellikleri ile tribolojik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. PTFE takviye edilmiş numunelerin adezif aşınmasının geliştiğini, kompozit içinde PTFE miktarındaki artışın sürtünme katsayısını azalttığını gözlemlemişlerdir. Spesifik aşınma oranının en düşük değerini %7,5 PTFE takviyeli PEEK-PTFE kompozit deney numunelerinde elde

etmişlerdir. % 30 PTFE katkılı numunelerin sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve P.v limit değerleri açısından mükemmel bir kombinasyon oluşturduğunu kaydetmişlerdir. Saf PEEK numunelerinin aşınmaya karşı iyi direnç gösterdiğini fakat sürtünme katsayısının yüksek, P.v limit değerinin düşük olduğunu kanıtlamışlardır. Sertlik, kopma mukavemeti ve aşınma oranı arasında bağıntı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sharma ve Bijwe (2010) yaptıkları çalışmalarında, polieter sulfon matris malzemesinin yüzeyini, ağırlıkça % 67- 70 karbon elyaf ve ağırlıkça % 2 PTFE ile kaplanmışlardır. Yüzeyi kaplanmış kompozit numunelerin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneyler neticesinde, dolgu malzemeleri ile takviye edilmiş numunelerin daha az aşındığını, aşınma oranının ve sürtünme katsayısının uygulanan yükün artmasıyla azaldığını, karbon elyaf takviyesinin aşınma ve sürtünmeyi azalttığını, yüzeyi PTFE ile kaplamanın az da olsa aşınma ve sürtünmeyi iyileştirdiğini bulmuşlardır.

Kulkarni ve Chapkhhane çalışmalarında türbin pompalarında kullanılan kompozit mil yataklarının aşınma durumlarını araştırmışlardır. Lastik mil yatakları ile % 35 cam elyaf takviyeli PTFE, % 55 bronz - % 5 molibden disülfür takviyeli PTFE ve % 35 karbon takviyeli PTFE kompozit yatak numunelerinin aşınma özelliklerini karşılaştırmalı olarak çalışmışlardır. En iyi aşınma direncine, % 55 bronz - % 5 molibden disülfür takviyeli PTFE kompozit yatak numunelerinin sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. PTFE kompozit yatakların kuru sürtünme ortamı için eşsiz bir özelliğe sahip olduğu ifade edilmiştir.

Chenga ve ark. (2003), ağırlıkça % 60 kurşun – yüzeyi modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş % 5 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinin yağlı ortamda aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Modifiye edilmiş cam elyaf takviyeli numunelerin, modifiye edilmemiş cam elyaf takviyeli kompozit numunelere göre aşınmayı daha fazla azalttığını bulmuşlardır. PTFE matrise kurşun ve modifiye edilmiş cam elyaf takviyesinin, ara yüzey bağını geliştirmesi sonucu PTFE'nin aşınma ve sürtünme özelliklerinin iyileştiğini ifade etmişlerdir.

Burris ve Sawyer (2006) yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100 polietereterketon (PEEK) takviyeli PTFE kompozit malzemelerinin kuru sürtünme durumunda tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit deney numunelerinin saf numunelerden daha az aşınma oranına sahip olduğunu, % 20 PEEK takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinin en az aşınma oranına sahip olduğunu bulmuşlardır. Kayma mesafesinin artışıyla hacim kaybının da arttığını göstermişlerdir.

En düşük sürtünme katsayısının % 50 PEEK takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinde meydana geldiğini ispatlamışlardır. PEEK takviyeli kompozit numunelerin hepsinin, saf PEEK ve saf PTFE deney numunelerinden daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirtmişlerdir.

Shi ve ark.(2005) molibden ve bakır- alüminyum kaplamalı metalik yüzeye, saf PTFE, %10 molibden takviyeli PTFE ve % 10 bakır – alüminyum takviyeli PTFE kaplayarak oluşturdukları kompozit deney numunelerinin tribolojik özelliklerini kuru sürtünme ortamında araştırmışlardır. Üst yüzeydeki kaplama malzemesine eklenen dolgu malzemelerinin aşınmayı azalttığını ispatlamışlardır. En iyi aşınma değerlerine bakır- alüminyum kaplamalı metalik yüzeye kaplanmış % 10 molibden takviyeli PTFE kompozit numunelerinde ulaşmışlardır. Alt tabakada bulunan metalik yüzey sayesinde yatağın yük kapasitesinin arttığını, takviyeli PTFE ile yüzeyi kaplamanın aşınma direncini artırdığını belirtmişlerdir.

Koike ve ark. (2013) çalışmalarında PEEK-PTFE hibrid radyal yatakların aşınma özelliklerini incelemişleridir. Yük değişiminin, kayma hızının ve çevrim sayısının aşınma üzerine etkisini araştırmışlardır. En iyi aşınma dayanımını PTFE'li hibrid radyal yatak deney numunelerinde elde etmişlerdir. Yük ve kayma hızındaki artışın, aşınma direncini artırdığını ispat etmişlerdir.

Dapeng ve ark. (2012), yaptıkları PTFE- Kevlar hibrid kompozit deney numunelerinde örgü yapısının tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Deneyler neticesinde yaptıkları değişik örgülü hibrid kompozit numuneler için yükün ve kayma hızının artışının sürtünme katsayısını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Örgü şeklinin aşınma üzerindeki etkisinin ise, yüke ve kayma hızına göre değiştiğini bulmuşlardır. Numunelerin çalışma bölgelerinde, takviye malzeme ile matrisin ayrışma gösterdiğini ve elyaf kırılması oluştuğunu göstermişlerdir.

Martini ve ark. (2010) Ti–6Al–4V alaşımlı çubuklara, plazma elektrolitik oksitleme yöntemiyle alümina yönünden zengin elektrolit, fosfat yönünden zengin elektrolit ve PTFE kaplama işlemlerini uygulamışlardır. Hazırladıkları deney numunelerinin kuru kayma aşınması ortamında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Alümina yönünden zengin elektrolit ile kaplanmış numunelerde yük taşıma kapasitesinin yüksek olması sebebiyle aşınma direncinin yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aşınma direnci en düşük numunelerin, fosfat yönünden zengin elektrolit ile kaplanmış numuneler olduğunu göstermişlerdir. PTFE kaplamanın, düşük yüklerde malzemenin aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

3. TEORİK ESASLAR

Temasta olan ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana gelir. Sürtünme halinde bulunan yüzeylerden malzemenin kopup ayrılmasına aşınma denir. Bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin başında yağlama gelir. Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olayları inceleyen bilim dalı "triboloji" olarak isimlendirilir.

Tribolojinin yaklaşık olarak 50 yıllık bir tarihi görünmesine rağmen tarihi geçmişi çok eskilere dayanmaktadır. Triboloji kavramı ilk defa 1960 yıllarında çeşitli bilim dallarından bilim adamlarının sürtünme, aşınma, yağlama ve temas mekaniği problemlerini bir araya getirmek için bu kelimeyi kullanmasıyla ortaya atılmıştır. Triboloji sözcüğünü ilk olarak Prof. H. Peter Jost yayınlamıştır. Ona göre triboloji; disiplinler arası bilim ve teknoloji ile, etkileşim halindeki yüzeylerin hareketiyle ilgili konular ve uygulamalarını kapsar. Triboloji alanındaki çalışmaların amacı, teknolojinin her aşamasında yüzeylerin sürtünmesini konu alan durumlarda, sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları anlaşılır bir biçimde en aza indirmektir. Triboloji kayan ve yuvarlanan yüzeyler kullanan makineler için oldukça önemlidir. Aşınma ve sürtünmeyi verimli ve verimsiz olarak ikiye ayırırsak, verimli sürtünme ve aşınma için; frenler, debriyajlar, somunlar ve vidalarda karşılaşılan sürtünme durumlarını örnek gösterebiliriz. Verimsiz sürtünme ve aşınma için ise; motorlar, dişliler, yataklar ve sızdırmazlık elemanlarında karşılaşıldığı gibi aşınmanın olmasını istemediğimiz sürtünme durumlarını örnek olarak gösterebiliriz (Kaleli, 2011).

Dünya çapında yapılmış istatistiklere göre makine elemanlarının %70'i aşınma sonucu fonksiyonunu yitirmektedir. Bu nedenle, aşınma kayıplarının en aza indirildiği sistemlerin kullanılması oldukça önemlidir.

3.1. Sürtünme

Sürtünme, katı gövdelerden birinin diğer katı yüzey üzerinde taşınmaya veya kaymaya gösterdiği dirençtir. Sürtünme, cismin harekete başlamasına, yönünü değiştirmesine ve durmasına yardımcı olur. Sürtünme olmadan cisimler üzerinde kontrole sahip olunamaz. Sürtünmenin olmasını istediğimiz ve sürtünmeyi azaltmaya çalıştığımız çeşitli makine elemanları uygulamaları bulunmaktadır. Cisimlerde dâhili ve

harici olmak üzere iki tip sürtünme çeşidi vardır. Yüzey etkileşimleri harici sürtünme çeşitleri içerisindedir. Bir cismin molekülerinin kinetik enerjisinin sebep olduğu enerji kaybı ise dâhili sürtünme tipine bir örnektir.

Orta çağda Leonardo da Vinci, 17. Yüzyılın sonunda Amontons, 18. Yüzyılın sonunda Coloumb sürtünmeyle ilgili temel kurallar üzerinde çalışmışlardır ve bügün kullandığımız

$$F_s = \mu . F_N \qquad (3.1)$$

(F_s: Sürtünme kuvveti, μ: Sürtünme katsayısı, F_N: Sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvvet) kuralı 19. Yüzyıldan itibaren Coloumb – Amontons Sürtünme kanunu olarak genel kabul görmeye başlamıştır. Daha sonraki yıllarda Newton, Navier, Poiseuille, Hagen, Stokes ve Reynold sıvı sürtünme üzerinde çalışarak bugünkü bilgilerin temelini oluşturmuşlardır.

Coloumb'un 1785'de ifade ettiği sürtünme kuralları:

- Sürtünme kuvveti, temas yüzeylerine etkiyen normal kuvvetle doğru orantılıdır
- Temas yüzeyinin büyüklüğünün sürtünme kuvvetine etkisi yoktur
- Hareket anındaki sürtünme kuvveti (dinamik sürtünme), temas yüzeylerinin birbirlerine göre hızlarından bağımsızdır
- Statik sürtünme diğer koşullar değişmiyorsa dinamik sürtünmeden büyüktür şeklindedir.

Statik sürtünmede, birbirlerine temas eden elemanlar arasında bir izafi hareket yoktur yani iki elemanın birbirine göre konumu değişmez. Dinamik sürtünmede ise temas eden yüzeyler birbirine göre hareket halindedir. Dinamik sürtünmede birbirine temas eden yüzeylerin her ikiside öteleme hareketi yapıyor, birbirleri üzerinde kayıyorsa kayma sürtünmesinden, birbirleriyle nokta yada çizgisel temas halinde olup birbirleri üzerinde kaymadan yuvarlanıyorlarsa yuvarlanma sürtünmesinden bahsedilir. Eğer eş çalışan cisimler birbiri üzerinde yalnızca dönme hareketi yapmıyor az da olsa kayma hareketi de yapıyorlarsa bu durum da kayma–yuvarlanma sürtünmesi kombinasyonu olarak ifade edilir.

Kayma sürtünmesi için Bowden ve Tabor modelinde iki yüzey arasında gerçek temas alanında gelişen bir adezyon kuvveti ve bir deformasyon kuvveti oluştuğu farz edilir. Bunları beraber olarak düşünmek daha aydınlatıcı ve uygun olur. Sürtünme

kuvveti F_s , bu iki kuvvetin yani adezyon kuvveti F_{adh} ve deformasyon kuvveti F_{def}'in nihai bileşkesidir.

Adezyon kuvveti, temas alanında pürüzlülük temaslarının kesit alanı (A) ve bütün bileşenlerinde aynı kesme gerilmesinin (s) olduğu kabul edilirse, adezyon nedeniyle oluşan sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi verilir

$$F_{adh} = A \times s \tag{3.2}$$

Yüzeyler arasındaki temasın elastik mi yoksa plastik mi olduğuna ve gerçek temas alanının uygulanan yükle orantılı olduğuna dikkat edilmelidir. Mühendislik işlemleriyle imal edilen metal yüzeyler arasındaki temas için, ilk pürüzlülük daha çok plastik olacaktır. Yüzeye gelen normal yük (W)

$$W \cong A \times H \tag{3.3}$$

şeklinde ifade edilir. Burada H malzemenin sertliğidir. Adezif ve normal kuvvetlerden sürtünme kuvvetine geçiş yapılırsa;

$$\mu_{adh} = F_{adh} / W \cong s / H \tag{3.4}$$

olarak yazılabilir. Metaller için sertlik akma gerilmesinin yaklaşık üç katıdır. Bu durumda

$$H \cong 3 \times Y \tag{3.5}$$

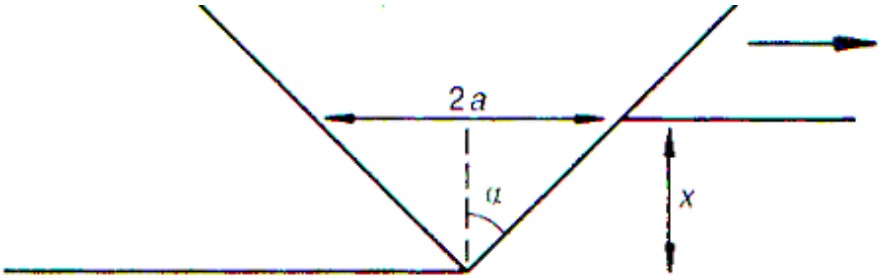
olur. Gerilme (Y), normal kesme gerilmesinin (s) yaklaşık 1.7–2 katı olacaktır. Kesin faktör nihai ölçüte bağlıdır. Bu nedenle H sertlik ifadesi,

$$H \cong 5 \times s \tag{3.6}$$

şeklinde yazılır. Sürtünme katsayısı ise

$$\mu_{adh} \cong s / H \cong 0.2 \tag{3.7}$$

olarak elde edilir.



Şekil 3.1. Sürtünen parçanın deformasyon modeli

Konik bir yüzey, düzlem bir yüzey üzerinde kayarsa, yer değiştirme için gerekli teğetsel kuvvetin değeri düşük olacaktır. H, yüzey malzemesinin çentik sertliği olarak alınıp yivin kesit alanı ile çarpılırsa (Şekil 3.1)

$$F_{def} = H \cdot a \cdot x = H \cdot x^2 \cdot \tan \alpha \qquad (3.8)$$

olur. Pürüzlü iki yüzey aracılığıyla desteklenen normal yük aşağıdaki gibi verilir.

$$W = (H \cdot \pi \cdot a^2) / 2 = (H \cdot \pi \cdot x^2 \cdot \tan^2 \alpha) / 2 \qquad (3.9)$$

buradan sürtünme katsayısı,

$$\mu_{def} = F_{def} / W = (2 / \pi) \cdot \cot \alpha \qquad (3.10)$$

olur. Bir düzlem modelde pürüzlülük bir yarı açılı takoz olarak alındığında,

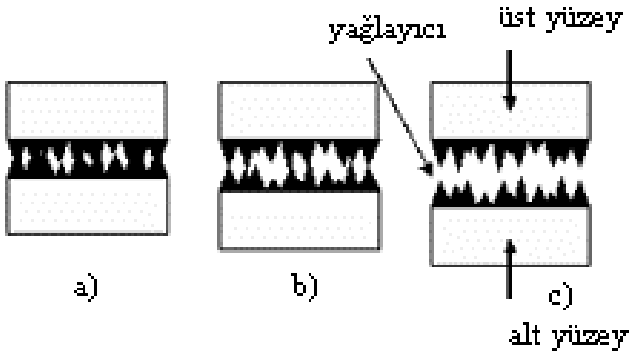
$$\mu_{def} = \cot \alpha \qquad (3.11)$$

olur. Gerçek yüzeylerin eğimleri daima 10° den daha azdır ve (3.10) ve (3.11) denklemlerinden, μ_{def}'in 0.1'den daha küçük olması beklenir. Bu basit modelden hareketle sert bir metal daha yumuşak bir metal üzerinde kayarsa, toplam sürtünme katsayısının 0.3' ü geçmeyeceği sonucu çıkarılabilir. Bazı metallerin yağsız ortamdaki sürtünme katsayıları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Havada ve yağsız durumda çeşitli metaller için statik sürtünme katsayısının değerleri

(a) Havada Kendi İle Eş Çalışan Metaller	μ_s
Altın	2
Gümüş	0.8 – 1
Kalay	1
Alüminyum	0.8 – 1.2
Bakır	0.7 – 1.4
İndiyum	2
Magnezyum	0.5
Kurşun	1.5
Kadmiyum	0.5
Krom	0.4
(b) Havada (0.13% C) Çelik Üzerinde Saf Metallerin ve Alaşımların Kayması	μ_s
Gümüş	0.5
Alüminyum	0.5
Kadmiyum	0.4
Bakır	0.8
Krom	0.5
İndiyum	2
Kurşun	1.2
Bakır – 20% Kurşun	0.2
Beyaz Metal (Sn Temelli)	0.8
Beyaz Metal (Pb Temelli)	0.5
α Pirinç (Cu – 30% Zn)	0.5
Kurşun Kaplı α / β Pirinci (Cu – 40% Zn)	0.2
Gri Dökme Demir	0.4
Yumuşak Çelik (0.13% C)	0.8

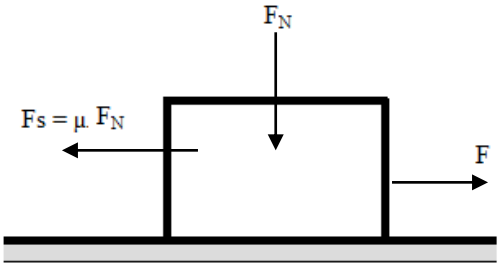
Sürtünmeyi kuru, sıvı, sınır (yarı sıvı) sürtünme olarak üç sınıfa ayırabiliriz. Kuru sürtünme, hiçbir şekilde yağlanmamış iki katı cisim birbiri üzerinde kayma hareketi yaptığında karşılaşılan sürtünmedir. Sıvı sürtünmede, iki cisim arasında hiçbir yüzey pürüzü karşı tarafa temas etmeyecek şekilde yağ filmi oluşturulur. Bu durumda sürtünmeyi oluşturan faktör yağın viskozitesidir. Eğer iki cisim arasında yağ filmi yetersiz kalıyorsa, cisimlerin yüzeylerindeki bazı pürüz tepecikleri temas ediyorsa bu sürtünme şeklide sınır (yarı sıvı) sürtünme olarak ifade edilir. (Babalık, 2008)



Şekil 3.2. a) Kuru sürtünme, b) Sınır sürtünme, c) Sıvı sürtünme

3.1.1. Kuru sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 3.3'de gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_N) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı Denklem 3.1'de verilen formüldeki gibi bir sürtünme kuvveti oluşur.

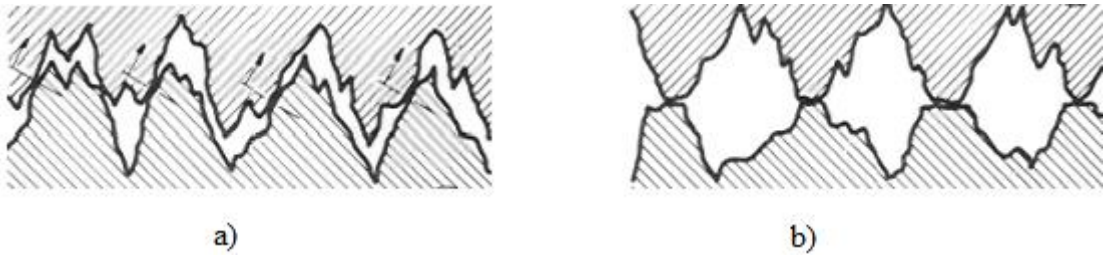


Şekil 3.3. Kuru sürtünme modeli

Şekil 3.3'deki gibi herhangi bir cisme teğetsel bir F kuvveti uygulandığında $F_s >$ F yani sürtünme kuvveti uygulanan kuvvetten büyük ise cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar. Bu durumda yüzeyler arasında "statik sürtünme" denilen bir direnç meydana gelir. $F_s <$ F olduğunda ise cisimler birbiri üzerinden kayabileceği için "dinamik sürtünme" durumu oluşur.

Bütün metallerin yüzeyleri her ne kadar parlak ve düz bir görünüşe sahip olsa da mikroskobik olarak bir pürüzlülük değerine sahiptir. Yüzey pürüzlülüğüne sahip iki cisim sürtündüğü zaman cisimler arasındaki temas, bu pürüzlü kısımların uçlarından gerçekleşir dolayısıyla çok küçük alanlarda temas gerçekleşir. Statik sürtünmede sürtünme katsayısı değeri yüksektir. Uygulanan yükün etkisiyle pürüz uçlarının

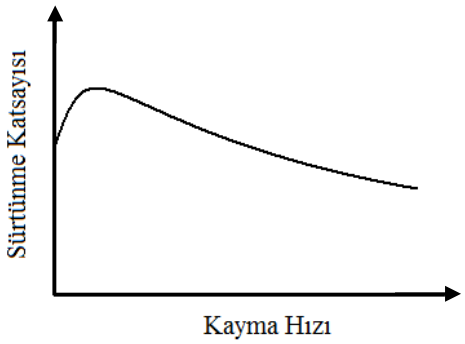
birbirine kaynaması ve cismin hareket etmesiyle kopması sonucu temas alanı artar, bu sayede birim yüzeye uygulanan yük azalır, sürtünme katsayısı da azalmış olur (Şekil3.4).



Şekil 3.4. a) Statik sürtünme, b) Dinamik sürtünme

Sürtünme katsayısı; sürtünme kuvvetinin cisme uygulanan normal kuvvete oranı olarak ifade edilir. Dinamik sürtünmedeki sürtünme katsayısına "kinematik sürtünme katsayısı" denir ve statik sürtünme katsayısından daha küçüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı azalır (Şekil 3.5).

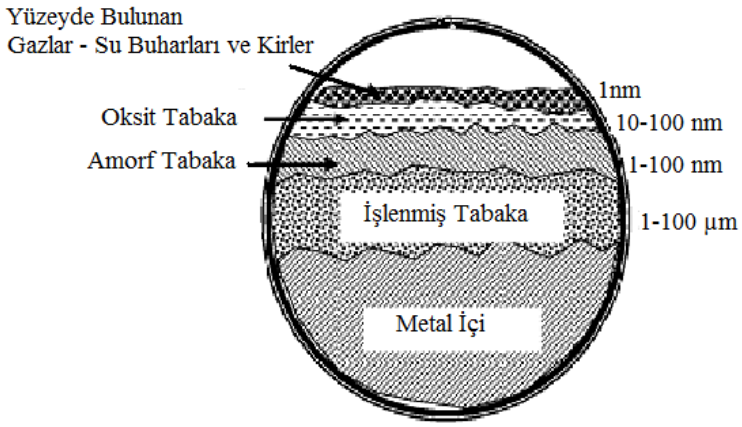
$$\mu = F_s / F_N \qquad (3.12)$$



Şekil 3.5. Kinematik sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi

Kuru sürtünmede temas halinde olan yüzeylerin durumuna gelince, kuru olarak tarif edilen cisimlerin yüzeyleri aslında atmosferde bulanan elemanların etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vb. yüzey tabakaları ile kaplıdır (Şekil 3.6). Adsorpsiyon yoluyla oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar cisimlerin yüzeylerine kuvvetli şekilde bağlanabilirler. Ancak etkili fiziksel ve kimyasal

yöntemlerle temizlenebilirler. Cisimlerin yüzeylerinde oksit tabakası ani olarak oluşabilmektedir.



Şekil 3.6. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu

Malzeme üretimine bağlı olarak, işleme sırasında yüzeyde oluşan akma ve ergime sonucu işlenmiş tabakanın üst yüzeyinde amorf bir bölge oluşur.

Kuru sürtünme teorileri:

Kuru sürtünmenin açıklandığı teorilerin bazıları şöyledir:

- **Mekanik kilitlenme:**

Amontons metal sürtünmesinin yüzeyi pürüzlü elementlerin mekanik kilitlenmesinden oluşabileceğini ileri sürmüştür. Mekanik kilitlenme teorisi, statik sürtünme katsayısının varlığını ve dinamik sürtünmenin yüzeylerdeki pürüzlülüğü kaldıran kuvvet olduğunu ileri sürer.

- **Moleküler çekim:**

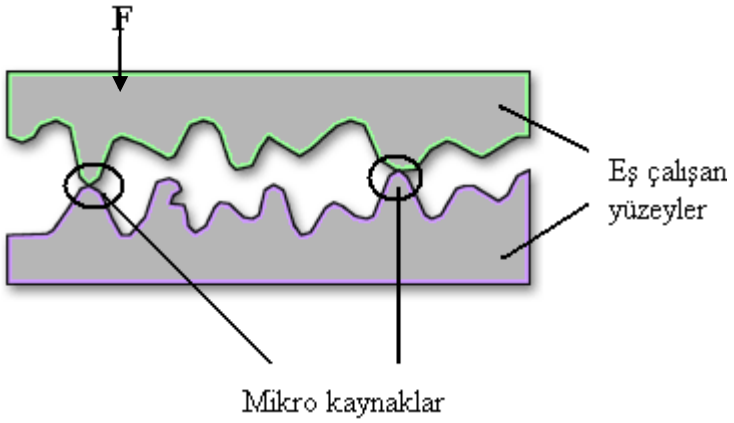
1929'da Tomlinson ve 1936'da Hardy, sürtünme kuvvetlerini, cisimlerden birinin temas eden yüzeyleri üzerindeki atomların çekim alanı dışında kopartılmış olması halinde ortaya çıkan enerji kaybı olarak tanımlamıştır. Daha sonraki çalışmalar adezyon sürtünmesini, moleküllerin gerilme, kırılma ve gevşeme döngüsü içinde kaybolan kinetik bant kırılmasıyla ilişkilendirmiştir.

- **Elektrostatik kuvvetler:**

Elektrostatik kuvvetler teorisi, iç yüzeyler arasında karşıt kutuplaşmalar üreten elektron akışının meydana gelmesiyle açıklanan, yüzeyler arasındaki yapışma – kayma olayı olarak ifade edilmiştir.

- **Kaynak bağları teorisi:**

Sürtünme olayını gerçeğe en yakın olarak açıklayan bu teori Bowden ve Tabor tarafından ileri sürülmüştür. Teoriye göre yüzeyler belirli pürüzlülük noktalarından temasta bulunurlar (Şekil 3.7). Bu noktalarda Şekil 3.6'da açıklanan tabakalar arasında bağlar oluşur. Yük uygulandıktan sonra çok küçük temas alanlarında çok yüksek basınçlar ortaya çıkar. Oluşan basınçların etkisi altında bazı temas noktalarındaki tabakalar kopar, metalik temas oluşur ve metal yüzeyler arasında mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar üst yüzey tabakalarında oluşan bağlardan daha kuvvetlidir. Yüzeyleri temasta olan cisimlerin hareket etmesi bu bağların kopmasıyla mümkün olur. Bu bağların kopması için gereken kuvvet sürtünme kuvvetidir.



Şekil 3.7. Mikro kaynakların oluşumu

Bu teoriye göre sürtünme katsayısını analitik hesap etmek mümkündür. Yükü taşıyan temas alanında oluşan bağların yüzdesi α, bu bağların kesme mukavemeti τ_{km}, kayma mukavemeti τ_{ko} ve kopma mukavemeti σ_{ko} ile ifade edilerek Bowden ve Tabor'a göre;

$$\mu = F_s / F_N = \alpha.(\tau_{km} / \sigma_{ko}) + (1- \alpha).(\tau_{ko} / \sigma_{ko}) \qquad (3.13)$$

olarak bulunur. Gerçek temas alanına ulaşıldığında $\alpha = 1$ olur ve

$$\mu = \tau_{km} / \sigma_{ko} \tag{3.14}$$

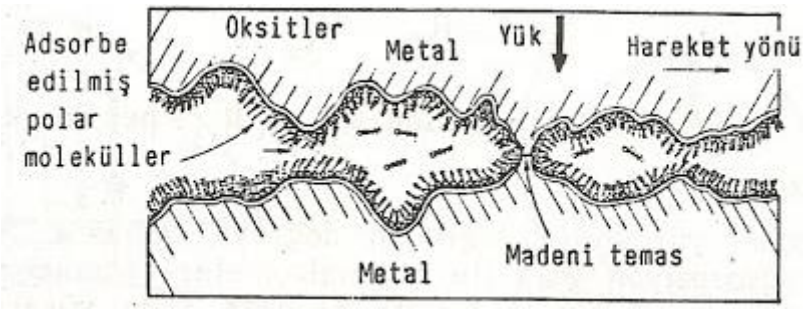
sadece tabakalar arası mikro bağlar varken ise $\alpha = 0$ olur ve

$$\mu = \tau_{ko} / \sigma_{ko} \tag{3.15}$$

olarak ifade edilir.

3.1.2. Sınır sürtünme

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi oluşturulamadığı durumda sınır sürtünme oluşur (Şekil 3.8). Yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulduğunda, yağlayıcı maddenin molekülleri adsorpsiyon sonucunda cisimlerin yüzeylerine yapışarak birkaç yüzey tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluştururlar. Yağın bu özelliğine "yapışma kabiliyeti" denir. Uygulanan yükle birlikte yağ tabakalarında oluşan yapışmanın kopması için gerekli kuvvet, sınır sürtünme durumu için sürtünme kuvveti olarak kabul edilir (Akkurt, 1990).



Şekil 3.8. Sınır sürtünmesi

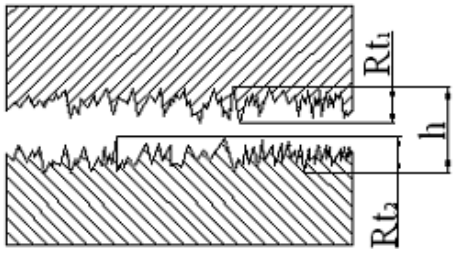
Sınır sürtünme için sürtünme katsayısı;

$$\mu = \tau_{ko} / \sigma_{ko} \tag{3.16}$$

formülü ile hesap edilir (τ_{ko}: yağ tabakasının kayma mukavemeti, $\sigma_{ko:}$ yağ tabakasının kopma mukavemeti).

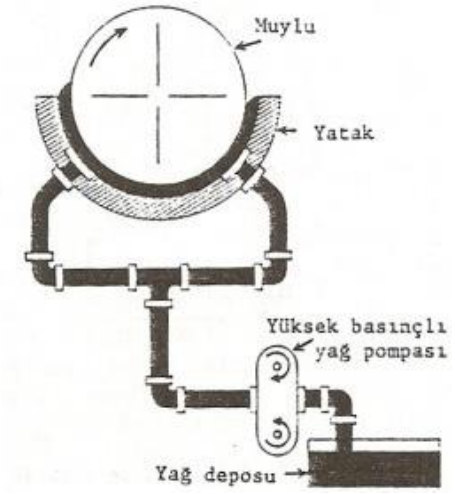
3.1.3. Sıvı sürtünme

Cisimlerin yüzeylerinin bir yağ tabakası ile tamamen ayrılmış olduğu sürtünme şeklidir (Şekil 3.9). Analitik olarak sıvı sürtünmesi $h > R_{t1} + R_{t2}$ bağıntısı ile ifade edilir. Burada R_{t1} ve R_{t2} her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür.



Şekil 3.9. Sıvı sürtünme

Sıvı sürtünmesi hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere ikiye ayrılır. Hidrodinamik sıvı sürtünmesinde; yüzeylerin kinematiğine ve geometrisine bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Bu kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre izafi hıza sahip olması ile yağ tabakasının hareket yönünde daralması durumudur. Hidrostatik sıvı sürtünmesinde ise, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için yağ yüksek basınçlı pompa vasıtasıyla dışarıdan sağlanır ve basınçlı olarak yüzeyler arasına gönderilir (Şekil 3.10).



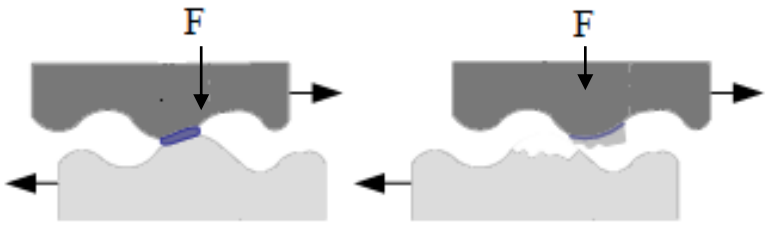
Şekil 3.10. Hidrostatik sıvı sürtünme

3.2. Aşınma

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin, istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır. Aşınma sonucunda yüzeyler ilk şekillerini kaybederler, parçalar arasındaki boşluklar büyür, makinenin hassasiyeti azalır, gürültü ve titreşimler meydana gelir. Aşınma, ya yüzey hasarıdır ya da iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden parçacık kopartılmasıdır. Çoğu durumda aşınma, yüzey pürüzlerinin uç kısımlarındaki etkileşimler sonucu oluşur. Aşınma üzerinde dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle birden çok aşınma çeşidi vardır. Bunların içinde en çok karşılaşılanlarını; adezyon aşınması, abrazif aşınma, yorulma aşınması, korozyon aşınması şeklinde sınıflanmaktadır. Bunlara ek olarak, birkaç aşınma mekanizmasının birlikte görüldüğü kayma aşınması da bilinen aşınma çeşitlerindendir.

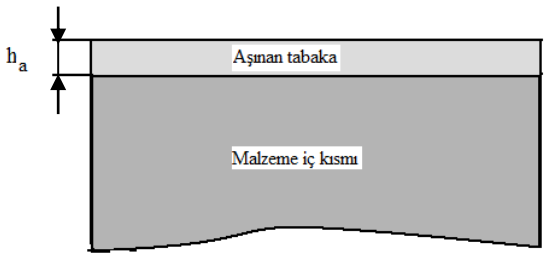
3.2.1. Adezyon aşınması

Adezyon aşınması en yaygın aşınma türüdür. Bu aşınmanın esası kaynak bağı teorisi ile açıklanır. Yüzeyler arasındaki temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları yüksek basınç altındadır. Yüksek basınç sebebiyle cisimlerin yüzeyinde oluşan tabakalar parçalanır ve malzemelerin molekülleri birbirlerine doğrudan temas ederek bölgesel kaynak bağları oluşturur. Bu kaynak bağlarının kopması sonucu adezyon aşınması meydana gelir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Adezyon aşınması

Adezyon aşınmasında yüzeyden bir tabaka kaldırılmaktadır. Teorik olarak bu tabaka Şekil 3.12'de gösterildiği gibi olur. Aşınan tabakanın kalınlığına h_a ve aşınma alanı A_h ile ifade edilirse aşınma hacmi $V_h = h_a \, . \, A_h$ ile hesap edilir.



Şekil 3.12. Adezyon aşınmasıyla kaldırılan tabaka

Adezyon aşınması, temas yüzeylerinde meydana gelen basınç $P = F_N / A$ ve v kayma hızı tarafından önemli şekilde etkilenmektedir. Ayrıca aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önünde tutulursa, analitik olarak adezyon aşınması

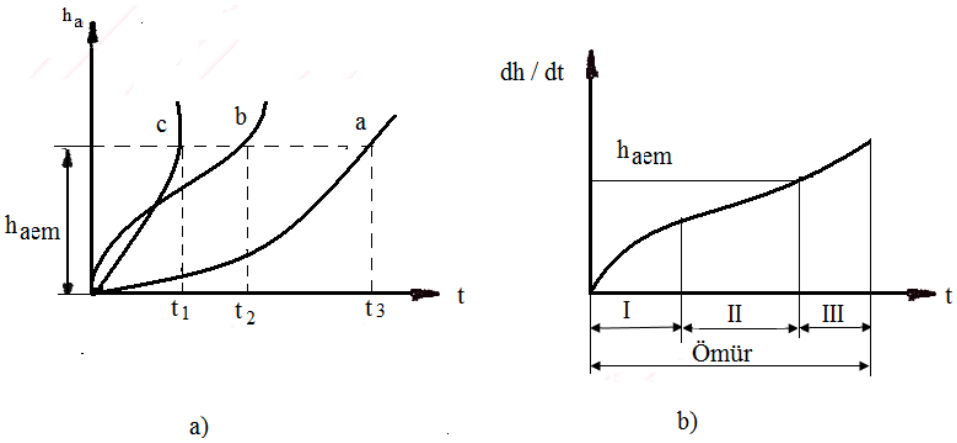
$$h_a = k_a . P . v . t \qquad (3.17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada k_a temasta bulunan malzeme çiftine bağlı olan ve deneylerle tayin edilen bir faktördür. Aşınmanın yanı sıra pratikte aşınma hızı

$$dh/dt = k_a . P . v \qquad (3.18)$$

de önem taşımaktadır. Belirli bir P.v değeri için zamana bağlı olarak aşınma, Şekil 3.13a'da gösterildiği gibi çeşitli şekilde gelişebilir. Bunlardan Şekil 3.13b'deki model seçilirse, aşınmanın esas üç bölgeden meydana geldiği görülür. I. bölgede; yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu safha parçaların birbirine alıştırılma safhasıdır. Bazen imalatın devamı olarak sayılan bu safhada pürüzlükler eşitlenir.

Rodaj, parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle parçaların rodajlarının iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi gerekir. Genellikle rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızda yapılır. Rodajın iyi ve kısa süre içinde tamamlanması için bu safhaya ait olan özel yağlar kullanılır. II. bölge, esas çalışma sırasındaki meydana gelen aşınmadır, burada aşınma hızı az ve sabittir. Ancak zaman geçtikçe parçalar arası boşlukların büyümesi, dinamik titreşimlerin artması ve yağlama koşullarının kötüleşmesi sonucu aşınma gittikçe artar. Artan aşınma sonucunda şiddetli aşınma denilen aşınmanın III. bölgesine girilir. Bu safhada parçaların kırılması veya tüm makinenin bozulması beklenebilir.



Şekil 3.13. Adezyon aşınmasının zamanla gelişmesi

Çalışan parçalara ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı (h_{em}) tayin edilirse, aşınma-zaman diyagramından elemanın normal çalışma zamanı veya ömrü hesaplanabilir. Şekil 3.13a'dan görüldüğü gibi aynı h_{em} için aşınma şiddetine bağlı olarak çeşitli ömürler karşılık gelir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir edilmelidir. Yukarıda açıklanan zamana bağlı aşınmanın yanı sıra, yenme adını taşıyan ani aşınma tipi de vardır. Genellikle yenme; eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan, basınç veya kayma hızlarının çok büyük ve yağlamanın yetersiz olmasından kaynaklanır. Yenmede görülen şiddetli kaynama, o noktanın sıcaklığının artmasından ileri gelir. Sıcaklık arttıkça, yapışmış tabakanın düzeni bozulmaya başlar, belirli bir sıcaklıkta kopar ve metalik kaynak bağları oluşur. Bu sıcaklığa tabakanın kritik sıcaklığı da denilir. Adezyon aşınmasında emniyetli yüzey basıncı hesapları:

$$P_m = F/A \leq P_{em} \text{ veya } (P_m \,.\, V) \leq (P_m \,.\, V)_{em} \qquad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada P_m, ortalama yüzey basıncı, F, temas yüzeyine normal kuvvet, A, temas yüzey alanı, P_{em}, emniyet yüzey basıncı, v, kayma hızıdır. P_{em} ve $(P_m \,.\, v)_{em}$ değerleri aşınmaya maruz kalan makine elemanına bağlı olarak verilmektedir.

Adezyon aşınmasını önlemek için alınması gereken önlemler şu şekilde sıralanabilir:

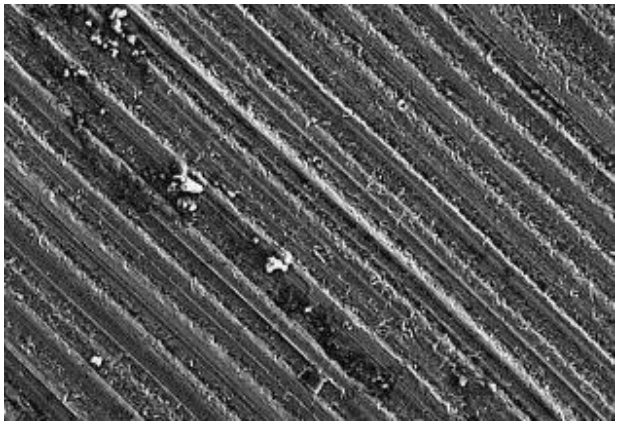
- Adezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu bakımdan malzeme çiftinin birisi sert diğeri yumuşak olacak şekilde seçilmelidir.

- Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katıklı bir yağ konulursa, aşınma ve bilhassa yenme önlenebilir. Buna göre adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katıklar kullanılmalıdır (Akkurt, 1990).

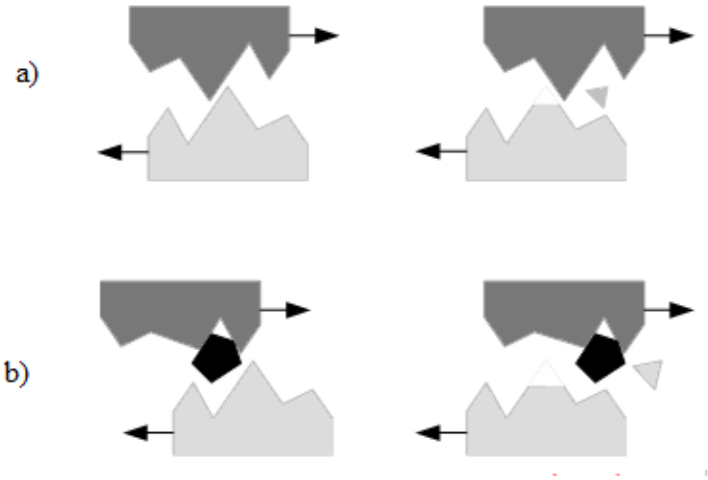
3.2.2. Abrazyon aşınması

Abrazyon aşınması, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya eş çalışan parçaların yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların yüzeylerde oluşturduğu aşınma türüdür. Bu sert parçacıklar yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak malzeme kaybına sebep olurlar (Şekil 3.14). Abrazif aşınmada yüzeylerin sertliği önemlidir. Cisimlerin yüzeyleri ısıl işlem uygulanarak veya yüzey kaplaması yapılarak sertleştirilebilir. Abrazif aşınmayı önlemek için şu önlemler alınabilir:

- Yüzeyler sertleştirilmelidir
- Dışarıdan partikül maddelerin ara yüzeye girmesini önlemek için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır
- Eş çalışan yüzeyler sık bir şekilde temizlenmelidir.



Şekil 3.14. Abrazif aşınma izlerinin elektron mikroskobu görüntüsü



Şekil 3.15. Abrazif aşınma çeşitleri a) İki gövdeli abrazif aşınma, b) üç gövdeli abrazif aşınma

Abrazif aşınma iki sınıfa ayrılır (Şekil 3.15). Birincisi iki gövdeli aşınmadır. Bu aşınma türünde aşındırıcı bir yüzey boyunca aşındırır. İkincisi ise üç gövdeli aşınmadır. Aşındırıcı iki yüzey arasına hapsolur ve yüzeyi aşındırır. Aşınma hızı, aşındırıcı parçacığın bir yüzeye gömülü olmasından etkilenir. Eğer parçacık bir yüzeye gömülü ise diğer yüzeyde aşınma şiddetli olur.

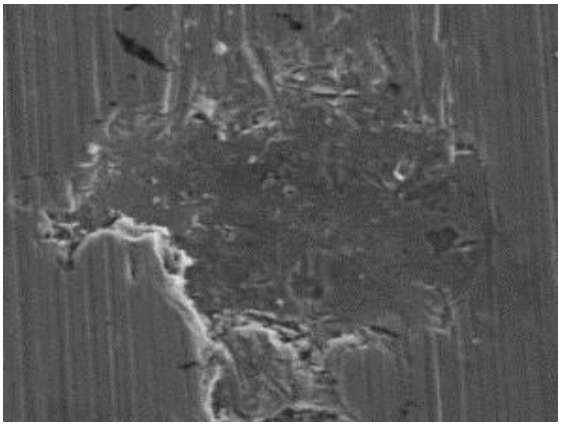
En şiddetli aşınma çeşidi abrazyon aşınmasıdır. Abrazif aşınma ile beraber diğer aşınma çeşitlerinin de olduğu durumda, yüzeylerde abrazyon aşınması daha fazla görülmektedir.

3.2.3. Yorulma aşınması

Temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması halinde yorulma aşınması kendini gösterir. Bu durum, özellikle rulmanlar, dişli çarklar gibi makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu çeşit basınçların etkisi altında yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir (Şekil 3.16). Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana

getirmektedir. Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynayabilir.

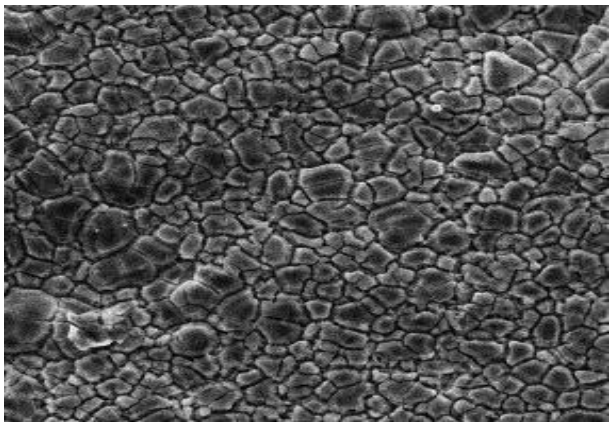
İki türlü yorulma aşınması vardır. İlkinde çukurcuklar çok küçük olup büyümezler ve yüzeye yayılmazlar. Diğerinde ise, çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar. Bunun sonucunda parçalar işe yaramaz hale gelir. Yorulma aşınması oluşumunda malzemelerin sertliği önemli rol oynar. Malzemelerin yüzeyi sertleştirilirse yorulma aşınması engellenebilir.



Şekil 3.16. Yorulma aşınması izlerinin elektron mikroskobu görüntüsü

3.2.4. Korozyon aşınması

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları oluştururlar. Buna ilaveten, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç, yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler (Şekil 3.17). Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Oksidasyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat veya sülfit ile işleme tabi tutulur veya oksitlenmeyi önleyen özel yağlayıcı maddeler kullanılır.



Şekil 3.17. Korozyon aşınması izlerinin elektron mikroskobu görüntüsü

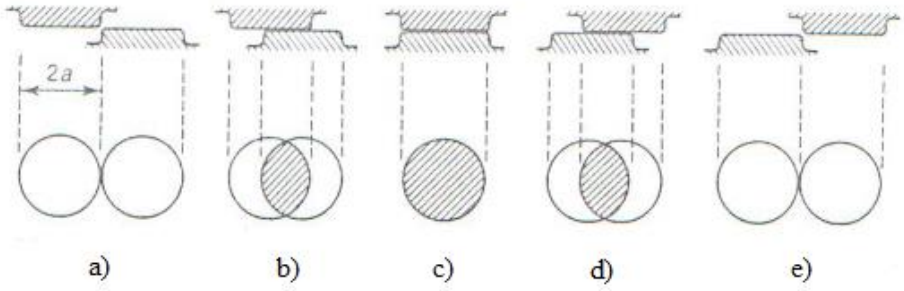
3.2.5. Kayma aşınması

Genellikle kayma uygulamalarında kayma yüzeyi yağlanır. Bazı mühendislik uygulamalarında ve birçok laboratuar araştırmalarında ise yüzeyler aralarında herhangi bir yağlayıcı madde olmaksızın birbiri üzerinde kayarlar. Bu şekilde meydana gelen aşınmalara kuru kayma aşınması denir. Adezif aşınma terimi kayma aşınmasını tanımlamak için de kullanılır. Fakat bu kullanım aldatıcı olabilir. Adezif aşınma mekanizması, kayma aşınmasında önemli bir rol oynasa da bu rol kayma aşınmasında oluşan mekanizmalardan yalnızca bir tanesidir. Bu nedenle kayma aşınması tercihen genel bir terim olarak kullanılır. Scuffing, scoring, galling terimleri şiddetli kayma aşınmaları için kullanılır. Fakat bunlar tam olarak tanımlanamazlar ve bu terimler kullanım açısından farklılık gösterirler.

3.2.5.1. Kayma aşınması teorisi

Temas halindeki iki yüzey birbiri üzerinde kaydıkları zaman, yüzeylerden biri veya her ikisi de aşınmaya maruz kalır. Holm ve Archard'ın kayma aşınması teorisi, kayma aşınmasını etkileyen ana değişkenlere ışık tutar. Aynı zamanda, önemli ve geniş ölçüde kullanılan aşınma katsayısı K ile aşınma şiddetini tanımlayan bir metot sağlar. Bu model asıl olarak metaller için geliştirilse de diğer malzemelerin aşınmalarının anlaşılabilmesi için de kolaylıklar sağlar. İki yüzey arasındaki temas, pürüzlülüklerin birbirine dokunduğu yerlerde olur ve böylece temas alanı pürüzlülüklerin temas

alanlarının toplamına eşittir. Bu alan normal yükle doğru orantılıdır. Çoğu zaman metallerin pürüzlülükleri, bölgesel plastik deformasyona uğrarlar.



Şekil 3.18. Birbiri üzerinde kayarak hareket eden iki pürüzlülüğün temasının değişimini gösteren basit bir şematik diyagram

Şekil 3.18, kaymanın değişik aşamalarında, yarıçapı "a" olan, dairesel basit bir pürüzlülük temasını göstermektedir. Bu temas Şekil 3.18c'de maksimum temas alanına ulaşıyor ve buradan normal yük (W);

$$\delta W = P_a \cdot \pi \cdot a^2 \text{ olur.} \qquad (3.20)$$

Burada P_a, plastik deformasyona uğrayan pürüzün akma basıncıdır. Kayma devam ederken yüzeyler Şekil 3.18d ve Şekil 3.18e' deki gibi yer değiştirirler. Sürekli kayma, pürüzlülük temasındaki sürekliliğe ve tahribata sebep olur. Aşınma, pürüzlülüklerden malzeme parçacıklarının ayrılmasıyla gerçekleşir. Aşınma ile taşınan malzeme hacmi V, temas boyu a'nın küpü ile orantılıdır.

$$\delta V = (2 \cdot \pi \cdot a^3) / 3 \qquad (3.21)$$

Her pürüzlülük temasıyla parçacık ayrılması gerçekleşmez. Bu orantıyı κ olarak kabul edelim ve buna orantı sabiti diyelim. Böylece bir çift yüzeyin (2 x a) mesafesi boyunca kaymasından dolayı birim kayma mesafesine düşen ortalama aşınmış malzeme hacmi;

$$\delta Q = (\kappa \cdot \delta V) / (2 \cdot a) = (\kappa \cdot \pi \cdot a^2) / 3 \qquad (3.22)$$

ve toplam aşınma oranı;

$$Q = \Sigma\delta Q = (\kappa / 3) . (\Sigma \pi . a^2) \quad (3.23)$$

Toplam normal yük ise;

$$W = P_a . (\Sigma \pi . a^2) \text{ bulunur.} \quad (3.24)$$

Buradan;

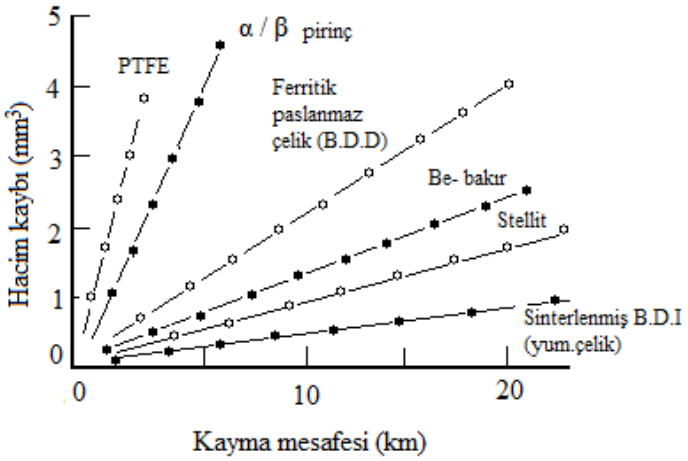
$$Q = (\kappa . W) / (3 . P_a) \quad (3.25)$$

denklemini elde ederiz. 1/3 faktörünü orantı sabiti içine alarak (κ / 3 = K) şeklinde kullanabiliriz ve iz bırakma sertliği H içinde (P_a = H) diyebiliriz. Bu değişikliklerden sonra denklem yeniden yazılırsa;

$$Q = (K . W) / H \quad (3.26)$$

elde edilir.

Bu denklem Archard aşınma denklemi olarak adlandırılır. Belli bir kayma mesafesindeki aşınma hacmi Q, normal yük W ve yumuşak yüzeyin sertliği H arasında bağlantı kurar. K sabiti ise aşınma katsayısı olup boyutsuzdur ve her zaman 1'den küçük değer alır. Aşınma katsayısı K, farklı sistemlerdeki aşınma miktarlarının karşılaştırılmasını sağlayan önemli bir faktördür. Ama yinede mühendislik uygulamalarında K / H'ın kullanılması daha uygundur. Bu değer k sembolünü verir. Boyutlu aşınma katsayısı denilen k'nın birimi mm^3/Nm'dir. Temastaki birim yük (N) ve birim kayma mesafesi için aşınmadan dolayı taşınan malzeme miktarını (mm^3) temsil eder. Boyutlu aşınma katsayısı olan k ile sağlanan aşınma miktarı farklı malzeme sınıflarının aşınma oranlarını karşılaştırmamıza yardımcı olur. Bazı malzemelerde örneğin elastomerlerde H sertliği tanımlanamadığı için boyutsuz K katsayısını kullanmak problem yaratabilir. Denklem 3.26'ya göre eğer K değeri verilen bir kayma sistemi için sabitse, aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kaybı ile kayma mesafesi orantılı olacaktır. Normal yük değiştirilirse bununla orantılı olarak aşınma oranı da değişecektir.



Şekil 3.19. Yağlamasız pim–halka testi sonuçlarından elde edilmiş kayma mesafesi - aşınma değişimi grafiği

Aşınma oranı ve normal yük arasında tam bir orantı yoktur. Birçok sistemde aşınma oranı yükün belirli bir sınırına kadar yükle hemen hemen aynı oranda değişmesine rağmen, yük bu sınırın üzerine çıktığında düşük aşınma oranından yüksek aşınma oranına ani geçişler olur.

Kuru kayma aşınmaları için Pim–halka testinde ölçülen K (aşınma katsayısı) değerleri çeşitli malzemeler için Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelge 3.1'deki bazı malzemeler için listelenmiş sürtünme katsayıları ile Çizelge 3.2'deki değerler karşılaştırıldığında: Aşınma katsayısı değerleri 10^{-2} ile 10^{-7} mertebeleri civarında değişiklik gösterirken, sürtünme katsayısındaki sapmalar buna göre daha düşüktür ve bu iki veri grubu arasında görünen bir bağ yoktur.

Çizelge 3.2. Yağlamasız pim–halka testinde takım çeliğinden yapılmış halka üzerinde kayan çeşitli malzemelerin boyutsuz aşınma katsayısı K değerleri (Ludema 1996)

Malzeme	**Aşınma Katsayısı (K)**
Yumuşak Çelik (Yumuşak Çeliğe Karşı)	7×10^{-3}
α / β Pirinç	6×10^{-4}
PTFE	2.5×10^{-5}
α Pirinç	1.7×10^{-4}
PMMA	7×10^{-6}
Bakır – Berilyum	3.7×10^{-5}
Sert Takım Çeliği	1.3×10^{-4}
Stellit	5.5×10^{-5}
Paslanmaz Çelik (Ferritik)	1.7×10^{-5}
Polietilen	1.3×10^{-7}

4. KOMPOZİT MALZEMELER

4.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı

Malzeme alanındaki ilerlemeler ve yeni buluşlar teknolojik gelişmelerin temelini oluşturmaktadır. Günümüzde malzeme bilimi tek bir mühendislik dalı olmaktan çıkmış, alt branşları olan metaller, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler, polimerler vb. gibi kollara ayrılmıştır. Kompozit malzemeler ise bu gruplar içinde en önemlilerinden biri olarak çok geniş bir uygulama sahası kaplamaktadır. Havacılık, otomotiv, tekstil gibi önemli endüstri kolları kompozit malzemelerin önemini benimsemiş ve gelişmelerden kendilerine düşen payı almışlardır. Genel olarak kompozit malzeme fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu çok üstün özelliklere sahip olan malzemelerdir.

Kompozitler, çatı ve matris diyebileceğimiz iki farklı yapının uygun usullerle bir araya getirilmesiyle oluşurlar. Çatı, kompozit yapının mekanik mukavemetini sağlamakla yükümlüdür. Kompozitlerde çatıyı oluşturan, malzemelerin iplikçik halindeki formlarıdır. Matris ise fiberleri bir arada tutan, kompozit yapının mekanik özelliklerini dolaylı olarak etkileyen, fiberleri fiziksel ve kimyasal dış etkenlerden koruyarak kompozit yapının bir sistem olarak ortaya çıkmasını sağlayan kısımdır. Matris malzemesi olarak uygun metal alaşımları kullanılabileceği gibi daha yaygın olarak reçineler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin, metal malzemelere tercih edilmelerinin nedeni ağırlık olarak % 25'lere ulaşan miktarda malzeme tasarrufu sağlamalarıdır. Bununla birlikte aşağıda sıralanan avantajlar bu malzemelere olan talebin nedenlerini göstermektedir. Bunlar;

- İyi bir görünüm vermeleri
- Diğer malzemelere uyumluluğu
- Kolay imal edilebilirlik ve yüksek üretim miktarlarına sahip olması
- Düşük maliyet ve kalite
- Uzun kullanım süresi ve iyi performans
- Ham malzeme temin kolaylığı
- Çok iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

4.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Cam elyaflı kompozitlerin, mukavemet, hafiflik, düşük maliyet ve korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılması oldukça yaygındır. Günümüzde ise uzay sanayinde kullanılan malzemelerden spor malzemelerine kadar çok geniş bir spektrum içerisinde uygulama alanı bulmuştur. Kompozit malzemelerin uygulama alanlarından belli başlıları;

Uçak Sanayi: Elyaf destekli kompozitlerle uçak parçaları çok cazip hale gelmiştir. Bu alanda en çok kullanılan elyaf; karbon, aramid ve camdır. Matris malzemesi olarak 120-170ºC arasında polimerleşen epoksiler kullanılmaktadır.

Uzay ve Roket Sanayi: Roket sanayinde kompozitlerin ilk kullanım alanı roket kılıfı uygulamasıdır. Böylelikle roketlerin taşıma kapasitesi ve menzili artırılmıştır. Uzay mekikleri metal matrisli kompozitlerinin bol miktarda kullanıldığı ilk uygulamalardan birisidir. Uzay mekiğinin ana çatısı, 242 tek yönlü borun elyaflı alüminyum ana yapılı tüplerden oluşmuştur.

Otomotiv Sanayi: Otomotiv uygulamaları görünüş ve yapısal dayanıklılık olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Mesela kaporta için görünüş önem arz eder. Ancak şasi gibi yük taşıyan elemanlarda mukavemet önemlidir.

Denizcilik Sanayi: Boyu 50 metreye kadar olan gemi ve tankerlerin gövdelerinin kompozitlerden imalatı ekonomik olarak mümkündür. Diğer taraftan lüks yatlar ve sürat motorları kompozitlerden imal edilirler.

4.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj Ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin, metallere göre avantaj ve dezavantajları şu şekilde sıralayabiliriz.

Avantajları;

- Çatlak ilerlemesi olayı minimize edilmiştir.
- Titreşimleri absorbe edebilme özelliği sağlanmıştır.
- Kompozitlerden bazıları yüksek akma sınırı değerlerine sahiptir.
- Korozyon problemi yoktur. Bunda matris ve takviye malzemesinin uygun seçilmesinin önemi büyüktür.
- Kopma uzaması metallere göre daha yüksektir.

- Yorulma dirençleri oldukça yüksektir.
- Ağırlıkça tasarruf edilmiştir.

  Dezavantajları;
- Metallere yapışmazlar.
- Fırınlamadan (pişirmeden) kullanılamazlar.
- Değişik doğrultuda, değişik mekanik özelliklere sahiptir. Aynı kompozit malzemeler için çekme, basma, kesme, eğilme mukavemeti değerleri farklı farklıdır. Elyaf doğrultusundaki elastik modülü, elyafa dik doğrultudaki elastik modülünden daha büyüktür.
- Üretimi nispeten pahalıdır.
- Nem ve hava zerrecikleri, kompozitlerin mekanik ve yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkiler.
- Delme ve kesme türü işlemler liflerde açılmaya yol açmaktadır.

4.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzeme, matris adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastik modülüne sahip olan takviye edici (fiber, tane, tanecik, dolgu, kat) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşur. Kompozitleri başlıca üç ana grupta inceleyebiliriz.

1-Fiber takviyeli kompozitler
2-Tabakalı kompozitler
3-Tanecikli kompozitler

4.4.1. Fiber takviyeli kompozitler

Cam elyaf:

Cam elyafı, silika, alüminyum oksit, soda, magnezyum oksit gibi cam üretim hammaddelerinden üretilen bir malzemedir. Uçakların panellerinde kullanıldığı gibi, roket motorlarında da kullanılmaktadır. Temel olarak üç tip cam elyaf bulunmaktadır. Bunlar “E-Camı”, “S-Camı” ve “C-Camı” dır.

E- Camının moleküler yapısı Kalsiyum Oksit / Alümina-Borasilkat esaslıdır. En yaygın kullanılan cam elyaf türüdür.

S-Camı, bir "Siliko-Alümino-Magnezya" kompozisyonudur. Alümina içeriği ve mukavemeti, E camına göre daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini iyi korumaktadır. Çok yüksek dayanım gereken yerlerde kullanılır.

C-Camı yapısında Soda-kireç-borasilikat içerir. Kimyasal stabilitenin en önemli faktör olduğu alanlarda kullanılır.

Organik elyaf:

Diğer fiber türlerinden farklı olarak para-aramid fiberi, aromatik poliamid yapıda bir organik polimerdir. Para-aramid mevcut organik ve inorganik fiberlerden en yüksek çekme mukavemetine sahip fiberlerdendir. Para-aramid malzemenin en büyük avantajı düşük yoğunlukta olmasıdır. Bu özelliği nedeniyle havacılık ve denizcilik endüstrisinde kullanımı yaygındır. Özellikle pilot kaskı imalinde ve hız teknesi inşasında bu özelliğinden faydalanılmaktadır. Çarpma mukavemetinin yüksek olması sebebiyle, son yıllarda balistik koruyucu yelek, kompozit miğfer gibi ürünlerde de kullanılmaktadır.

Karbon elyaf:

Karbon fiberler cam fiberlere göre çekme dayanımı, elastikiyet modülü, ısıl iletkenliği, boyut kararlılığı, aşınma direnci, sürünme ve yorulma dayanımı gibi birçok alanda üstünlük sağlar. Cam fiberlere nazaran üç kat daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olan karbon fiberler sertliğin önemli olduğu parçalarda tercih edilirler. Matris içerisine karbon fiberi eklenerek kompozit parçalar iletken haline getirilebilir.

Grafit elyaf:

Mükemmel işlenebilme yeteneği ve düşük ısıl genleşme katsayısı, grafitin üstün özelliklerindendir. Filamanların mükemmel şekillendirilebilme kabiliyetlerinden dolayı keskin şekilde köşeler yapılabilir. Yüksek ısıl iletkenliği sayesinde ısıl gerilmeler her bölgeye eşit şekilde dağılır. Dezavantajı ise düşük genleşme katsayısının sebep olduğu ısıl gerilmelerdir.

Boron:

Elastisite modülünün yüksek olması istenilen kompozitlerde kullanılır. Boron fiberleri normal olarak önceden reçine emdirilmiş bantlar halinde sağlanabilirler. Bu

reçinelerden teyp miktarı, hacimsel olarak %50 fiber içerecek şekilde ayarlanmaktadır. Ancak değişik uygulamalar için reçine / fiber oranı değiştirilebilir.

UHMWPE (Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen) elyaf:

1990 yılında seri üretimine geçilen UHMWPE fiberleri, çok yüksek çekme mukavemetine sahip olması (çelikten 10 kat daha sağlam) nedeniyle dünyada bilinen en sağlam fiberdir. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilen "tel sağma" işleminden geçirilerek elde edilir. Başlangıçta karmaşık bir yapıda olan polietilen, bu işlemden sonra bağ yapıları paralelleştirilerek % 85 gibi yüksek düzeyde kristal bir yapı oluşturularak çok üstün özelliklere sahip bir fiber elde edilir. Eşsiz özelliklerinden bazıları:

- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek elastisite modülü
- Sudan hafif olması (yoğunluğu: 0.97 gr/cm³)
- Çok yüksek enerji emebilme özelliği

Bu özellikleriyle UHMWPE fiberi, yapısal kompozit parçaların imalinde balistik korucu yelek ve diğer koruyucu elemanlarda, her tür koruyucu giysi, yüksek mukavemetli halat, paraşüt ipi, balık ağı yapımında ve hafifliği nedeniyle denizcilik gibi alanlarda kullanılabilecek cazip bir malzeme olmaktadır.

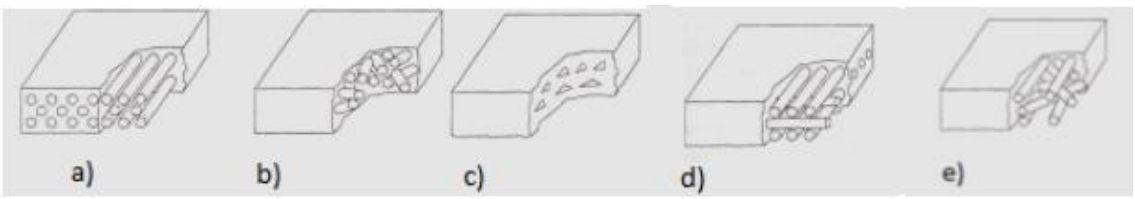
Metalik elyaflar:

Tel şeklindeki birçok metal yüksek mukavemet özellikleri göstermektedir. Berilyum, çelik ve tungsten teli en önemlilerindendir.

Seramik elyaflar:

Sürekli seramik fiberler, yüksek mukavemet, yüksek elastik modülü, yüksek ısıya dayanıklılığı ve çevresel faktörlerden az etkilenmesiyle bilinmektedir.

Elyaf takviyesindeki çeşitlilik Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler a) tek yönlü sürekli elyaflar, b) kesikli elyaflar, c) ortogonal elyaflar, e) iki yönde sürekli elyaflar d) rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar

4.4.2. Tabakalı kompozitler

En az iki değişik malzemenin, tabakalar halinde dizilerek oluşturulan kompozit malzemelere tabakalı kompozitler denir. Tabakalama işlemi, tabakaları meydana getiren malzemelerden daha iyi mekanik özelliklere sahip malzeme oluşturmak için yapılır. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemelerin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, termal yalıtımı iyileştirilir.

Bi Metaller:

Termal genleşme katsayısı oldukça farklı olan iki değişik metalin tabakalanmasından elde edilir. Sıcaklık değiştikçe belli bir ölçüde bir tarafa eğilir veya çarpılır. Bu tür metaller, sıcaklık ölçüm aleti yapımında kullanılır.

Kaplanmış Metaller:

Metallerde kaplama işlemi, birbiri üzerine kaplanan metallerin malzeme özelliklerinden daha iyi malzeme özellikleri elde etmek için yapılır. Mesela yüksek mukavemetli Al alaşımlarının korozyona direnci azdır. Saf alaşımlar ise korozyona daha fazla dirençlidirler. Yüksek mukavemetli Al alaşımı korozyona dayanıklı başka bir alaşımla kaplandığında meydana gelen kompozit malzeme, her iki malzemeden daha iyi malzeme özelliklerine sahip olur. Elde edilen kompozit malzeme hem korozyona dirençli hem de yüksek mukavemetlidir. Al telin %10 bakırla kaplanarak elde edilen kompozit malzemenin hafif ve ucuz olması buna bir örnektir.

Tabakalanmış Fiber Kompozitler:

Tabakalanmış elyaflı kompozitler, kompozitlerin merkezini oluştururlar. Çünkü bunlar elyaflı kompozitler ve tabakalanma tekniğini içinde bulundururlar. En yaygın ismi, tabakalanmış elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli malzemenin tabakaları, her biri değişik veya aynı yönlerde dizilmiş tabakacıkların birleştirilmesiyle meydana gelir. Tabakalı elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemeti ve rijitlikleri, üretilecek yapı elemanlarının ihtiyaçlarına göre belirlenir. Tabakalı elyaf takviyeli kompozitlere örnek olarak; roket kılıfları, fiberglas, kayık veya robot gövdeleri, hava aracı kanat panelleri ve gövde bölmeleri, tenis raketi, golf sopaları vs. verilebilir.

4.4.3. Tanecikli kompozitler

Tanecikli kompozitler bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesinden meydana gelir. Betonu, tanecikli kompozitlere örnek olarak verebiliriz. Beton kum ve çakıl parçacıklarının çimento ve su ile birleştirilmesi sonucu oluşur. Betonda ne parçacık malzemesi nede matris malzemesi metaliktir. Roket pervaneleri, metalik olmayan matris ile metalik parçacıkların birleşmesiyle oluşan kompozitlere örnek olarak verilebilir. Roket pervaneleri polietan ve polisülfat kauçuklar içerisine Al tozları ve perklorat oksitleyicilerin katılması ile elde edilir.

4.5. Kompozitlerde Matris Çeşitleri

Bir kompozit yapıda matrisin görevi, yapıştırıcı ve tutucu özelliği ile, fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere aktarmak ve kompozit yapıyı dış etkenlerden korumaktır. Matrisler plastik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılır.

- Plastik matrisli kompozitler: Matris olarak plastik esaslı malzemelerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Cam elyaflı plastikler örnek olarak verilebilir.
- Metal matrisli kompozitler: Matris olarak, Al, Mg, Cu, çelik ve benzeri metallerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir.

4.5.1. Plastik matrisli kompozitler

Plastik, moleküllerin belirli bir düzen içerisinde sıralanması ile oluşan organik kimyasal bir maddedir. Genel olarak plastik, dökülerek veya preslenerek şekil verilen ve metal olmayan malzeme türlerine verilen bir isimdir. Plastikler hafif ve kolay işlenebilmeleri nedeniyle çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Plastik isminin kullanılmasının nedeni, bu malzemelerin belirli şartlarda plastik bir kıvam göstermeleri ve bir kalıba basınçla enjekte edilerek kolayca şekil almalarıdır. Plastik malzemeler son 50 yıl içinde büyük gelişmeler göstererek metaller gibi yüksek oranda kullanılmaya başlanılmıştır.

4.5.1.1. Termoplastikler

Molekül yapısı olarak yan zincirler ve gruplar ihtiva ederler. Moleküller elastomerlerde ve termosetlerde olduğu gibi üç boyutlu bir yapı teşkil etmezler. Moleküller arasında zayıf Van der Waals bağları vardır. Bu nedenle rijit yapıya sahip değildirler. Isı altında yumuşarlar. Bu özellikleri sayesinde ısıtılarak şekillendirilirler.

Şekil değişikliği esnasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Tekrar tekrar ısıtılarak yeni şekiller alabilirler. Piyasada, toz ve granür halinde bulunurlar. Kompozit imalatında az da olsa kullanılırlar. Bilinen termoplastiklerden yaygın olan bazılarını şöyle verebiliriz:

PTFE (Politetrafloroetilen):

PTFE plastikleri opak, kristalin ve sünek bir fluoroplastik çeşididir. Önemli özellikleri; kimyasal bakımdan inert olmaları, yüksek ve düşük sıcaklıklarda kararlı yapıda olmaları ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları olarak söylenebilir. PTFE reçine oldukça yumuşak, sürtünme ve aşınma mukavemeti oldukça düşüktür. PTFE, inorganik elyaf, cam elyafı, karbon, bronz veya metalik oksitlerle kuvvetlendirildiği zaman aşınma özelliği çok ciddi bir şekilde gelişir. Bu sebeple plastikler arasında PTFE alaşımları, çok düşük sürtünme katsayısına sahip en iyi yatak malzemesidir. PTFE'nin sürtünme katsayısı yükün artmasıyla azalır.

Polikarbonat:

Amorf bir mühendislik termoplastiği olan polikarbonat, aleve dayanıklılık, besin maddeleri ve ilaçlarla temasına müsaade edilebilme, ultraviyole ışınlara mukavemetlilik gibi özelliklere sahiptir.

Poliamid (Naylon):

İlk mühendislik plastiği olan naylonun, pratikte naylon 6, naylon 6.6, naylon 6.10, naylon 6.12, naylon 11 ve döküm naylon gibi çeşitleri vardır. Tüm naylon çeşitleri elyaf ve takviye malzemeler ile kuvvetlendirilebilirler. İyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olan naylon, dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri ve kızak gibi elemanların yapımında kullanılır.

Polietilen:

En çok kullanılan termoplastik olan polietilenin çok değişik özellikleri vardır. Polietilen genellikle tok, kimyasal ve elektriksel özellikleri iyi, düşük sürtünme katsayısına sahip, sıfıra yakın nem emme özelliği olan ve kolay işlenebilen bir malzeme olarak bilinir.

Polivinil Klorür (PVC):

Vinil polimer ve kopolimerleri arasında en çok kullanılanı PVC'dir. PVC çeşitli yumuşatıcı, kuvvetlendirici, darbe değiştirici ve yağlayıcı maddelerle takviye edilerek değişik özelliklere sahip olabilir. Rijit PVC'ler cam çerçevesi olarak veya su şebekesinde boru olarak kullanılabilir (Akkurt, 1991).

4.5.1.2. Elastomerler

Üç boyutlu şebeke yapısı oluşturularak yüksek esneklik gösteren polimerlerden meydana gelmiştir.

4.5.1.3. Termosetler

Moleküller bir üç boyutlu şebeke yapısı teşkil edecek şekilde birbirine bağlı bir yapı ihtiva edeler. Bu bağlama esnasında meydana gelen bu olay tek yönlü kimyasal bir reaksiyondur. Plastik malzeme şekil aldıktan sonra sertleşir ve malzeme artık şekil değiştirmez.

Termoset plastikler, alkid, amino, epoksi, fenolik, poliester, poliüretan reçineler şeklinde gruplandırılabilir.

Termoset kompozitlerin imalatı:

- **Islak Kalıplama:**

Bu yöntem, tek yüzü düzgün küçük çapta üretim için kullanılır. Genellikle CTP (bilgisayardan kalıba) kalıp kullanılır. Kalıp yüzeyi ile temas eden CTP yüzeyi düzgün, diğer yüzeyi pürüzlü olur. Genellikle 2-10 mm kalınlıklar için bu yöntem kullanılır. Büyük boyutlu parçalara kalınlık daha fazla olabilir, ancak 2 mm'nin altında kalıplama tavsiye edilmez. Genellikle tekne, oto kaportası, cephe kaplama elemanları, depo ve tank gibi ürünlerin yapımında kullanılan bu kalıplama yöntemi iki teknikte yapılır;

- El yatırması
- Püskürtme

- **Köpük Rezervuar Kalıplama:**

Bu yöntem de, çift kalıpla her iki yüzeyi düzgün ürünlerin yapımında kullanılır. Yumuşak köpük bir malzemeye polyester emdirilir ve kuru cam elyafı yerleştirilmiş iki kalıp parçası arasında sıkıştırılır. Köpüğe emdirilmiş polyester, sıkışma nedeniyle cam elyafını da ıslatır ve sertleşmesi beklendikten sonra iki yüzü düzgün bir CTP ürün elde edilir. Kullanılan cam elyafı ve köpük kalınlığına bağlı olarak değişik mekanik özellik sağlanması mümkündür.
İkinci kademede tüm sistem, verilecek şekle göre hazırlanmış kalıplardan ısıtılmış bir bölge içerisinde geçer ve bu fırınlama sırasında reçinenin sertleşmesi sağlanır. Sertleşmiş levhanın kesimi ile üretim tamamlanır.

- **Profil Çekme (Pultrusion):**

İstenilen şekillerdeki profillerin üretimi için kullanılır. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlıdır ve ürünlerde boyuna mukavemet çok yüksektir. Çekme yönteminde genellikle iki yöntem söz konusudur. Birinci sistemde, çekilecek cam elyafı önce katalizlenmiş polyester banyosundan geçirilir ve sonra ısıtılmış kalıplardan polyester fazlası sıyrılarak çekilir. Kalıplar profilin şeklini belirler. İkinci yöntemde cam elyafı belli bir gerilim ile kuru olarak ısıtılmış kalıplardan geçirilir ve kalıp içerisinde reçine enjekte edilir.

Termoplastik kompozitlerin İmalatı:

Klasik termoplastik imalat yöntemleri ile termoplastik kompozitler üretilmekle beraber ticari düzeyde kullanılan en önemli metot enjeksiyon metodudur. Termoplastik kompozitlerin enjeksiyonunda bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Takviye malzemesi ilavesiyle basma viskozitesi artacağından, enjeksiyon basıncı saf termoplastiklere nazaran %80 kadar artabilir.

Kompozitlerde rijitlik, saf termoplastiklerden daha yüksek olduğundan kalıptan çıkarma sıcaklığı daha yüksek tutulur ve bu yüzden bu işlem süresi kısa olmalıdır. Rijitliğin yüksek olması kalıp konikliğinin artmasına ve enjektör sayısının da çoğalmasına yol açar. Ayrıca pistonlu enjeksiyon makinesi yerine karışmayı ve homojenleşmenin ölçülmesini ve sıcaklık kontrolünün daha iyi yapılmasını sağlamak için vidalı enjeksiyon makinesi tercih edilir. Makinenin vida hızı ve geri basıncı

elyafların hasar görmeyeceği şekilde seçilmelidir. Elyafların aşındırıcı özelliği hem tezgahta hem de kalıpta hızlı aşınmaya yol açabilir. Bu kusur, sertleştirilmiş kalıp çeliği kullanılması halinde ihmal edilebilecek düzeye indirilebilir.

4.5.2. Metal Kompozitler

Alüminyum, titanyum, nikel fiberleri ve erimez metal matrisleri bir araya getirilip yapıştırılarak metal matrisler elde edilir. Bunlardan bor / alüminyum olanlar difüzyon yolu ile bağlanmış tabakalar ve plazma püskürtülmüş şeritler şeklinde üretilmektedir. Yapıştırıldıktan sonra alüminyum 530º C' nin üzerindeki sıcaklıklarda işlenecek ise bor fiberlerinin tahrik olmaması ve özelliklerini kaybetmemesi için borik fiberleri kullanılması gerekir.

Metal matrisli alüminyum kompozitleri, sürekli veya aralıklı olarak üretilebilir. Düşük maliyetli parçalarda aralıklı olanlar, ağırlık kazancının istendiği yerlerde sürekli olanları tercih edilirler. Süreksiz fiberler, metal püskürtme veya toz metalürjisi ile birleştirilirler.

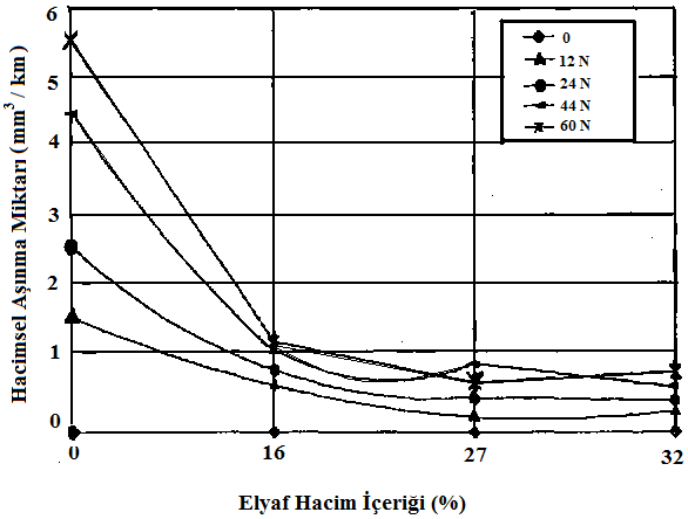
Metal matrisli kompozitlerin imalatı:

Metal matris kompozitlerde matris malzemesi olarak Al, Mg, Ti kullanılır. Takviye olarak seramikler; partikül, levhacık, visker ve elyaf şeklinde kullanılır. Matris malzemesi olarak Cu ve Al'da grafit elyaf olarak kullanılabilir. Metal matrisli kompozitler, sürekli takviyeli ve süreksiz takviyeli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılabilir. En kolay ve en ucuz takviye elyaf takviyesidir. Partikül ve levhacıklar ise viskerler ve fiberlere göre kolay üretilebilirler.

4.6. Kompozitlerin Aşınma Davranışları

Elyaf takviyeli metal ve plastik kompozitlerin yüksek özgül dayanımı, yüksek özgül modülleri ve yüksek sıcaklığa dayanım özellikleri sayesinde kullanım alanları artmıştır. Bunun yanında, özellikle otomotiv ve makine sanayinde sürtünme ve aşınmaya dirençli malzemelere olan talep, bu malzemelerin geliştirilmesinde bir diğer tahrik edici unsur olmuştur. Grafit, alumina, SiC, takviyeli metal ve epoksi kompozitler üzerine birçok çalışmalar yapılmış ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. Özellikle grafit

elyaflı kompozitlerin yağlayıcı özellikleri nedeni ile aşınma davranışlarında, matrise göre oldukça büyük gelişmeler elde edilmiştir.



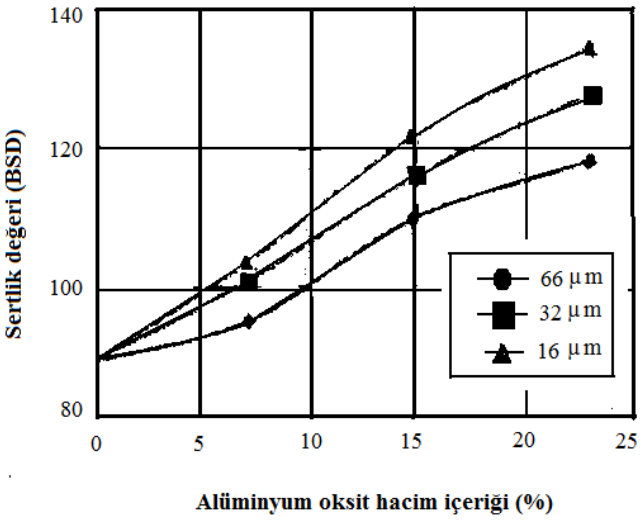
Şekil 4.2. Boron elyaf takviyeli alüminyum kompozitlerde hacimsel aşınma miktarı değişimi.

Değişik yükleme şartlarında yapılan deneylerde elyaf hacim içeriğinin, hacimsel aşınma miktarına etkisi ölçülmüş ve deney sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. Tüm hacim oranlarında sürekli elyafla takviyeli kompozitlerin hacimsel aşınma miktarının, takviyesiz matris malzemesine göre oldukça azaldığı gösterilmiştir. Örneğin, % 32 elyaflı kompozitte, matrise göre % 84'lük bir oranda azalma elde edilmiştir.

Yapılmış diğer bir çalışmada, vorteks metodu ile üretilen Al_2O_3 esaslı Al kompozitler değişik parçacık ve hacim içerikli olarak üretilmiştir. Bu kompozitlerin, parçacık hacim oranı ve parçacık boyutuna bağlı olarak, sertlik değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği gibi parçacık içeriğinin artması ile metal matrisli kompozitlerin sertliği önemli derecede artmaktadır. Bunun yanında partikül boyutunun azalmasıyla sertliğinin arttığı görülmektedir.

Benzer davranışlar bu kompozitlerin çekme dayanımı sonuçlarında da gözlenebilir. Yani, artan parçacık hacim içeriği ve azalan parçacık boyutu ile metal matrisli kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri de artmaktadır. Aynı şekilde, plastik matrisli kompozitler, boron elyaflar kullanılarak sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Benzer şartlarda deneyler yapılmış, matris malzemesine göre aşınma miktarında azalmalar gerçekleşmiştir. Sonuç olarak da plastik matrisli kompozitlerin aşınma direncinin, metal matrisli kompozitlerden daha iyi olduğu gösterilmiştir. Bunun

ise sertleştirilmiş çelik disk ile plastik matrisli kompozitler arasında oluşan tribo-film'den kaynaklandığı gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Al_2O_3 parçacık takviyeli Al esaslı kompozitlerin parçacık hacim içeriğine göre sertliklerinin değişimi

Rastgele yönlenmiş alümina parçacıkları ve çinko-alüminyum alaşımları takviye edilmiş metal matrisli kompozitin, aşınma ve sürtünme davranışlarının incelendiği farklı bir çalışma yapılmıştır. Alümina takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin ve matris malzemesinin, uygulanan yüke göre hacimsel aşınma miktarı değişimi incelenmiştir. Bu deneylerde aynı zamanda elyaf içeriğinin ve elyaf doğrultusunun etkisi araştırılmış, % 9 ve % 26 Al_2O_3 elyaf içerikli kompozitler farklı yükleme şartları altında aşındırılmıştır. Deneyler, hem normal elyaf doğrultusunda hem de rastgele düzlemsel doğrultuda yönlenmiş elyaf takviyeli kompozitlerde ve ana matris malzemesinde 1.6 m/s sabit hızda yapılmıştır. Metal matrisli kompozitin aşınma miktarının azaldığı görülmüştür. Elyaf içeriğinin artması ile aşınmanın azaldığı, ancak artan yükleme şartlarında aşınma miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Her iki malzeme türü için, uygulanan normal yükün artması ile aşınma miktarı da artmıştır. Matriste, yükün artışı ile aşınma miktarında hafif azalma eğilimi olmuştur. Normal doğrultuda yönlenmiş kompozitlerde aşınma oranının rastgele yönlenmiş kompozitlere göre daha az aşınma miktarı oluşturduğu gözlenmiştir. Örneğin, 32 N yükleme altında % 26 elyaf içerikli kompozit ile yapılan deneylerde rastgele yönlenmiş kompozit de oluşan aşınma miktarı 0.468 mm^3/km iken, aynı hacim içerikli ve yükleme şartları altında normal doğrultulu kompozit malzemelerde ise bu değer 0.185 mm^3/km

olmuştur. Bu şartlarda yapılan deneylerde rastgele yönlenmiş % 9 içerikli kompozitler de aşınmanın arttığı gözlenmiştir.

Diğer yükleme şartları da incelendiğinde, normal elyaf doğrultulu alümina takviyeli kompozitler, rastgele düzlemsel yönlenmiş kompozitlerden daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Bunun nedeni, kompozitlerin aşınma sonrası yüzeylerinin incelenmesi ile açıklanabilmektedir. Bu davranış farklılığın muhtemel sebebi de; rastgele yönlenen elyaflarda hem eğilme hem de burulma etkisi ile yaklaşık 500 μm uzunluğundaki elyafların yüzeye daha yakın konumda oldukları bunun sonucu olarak da daha çok çatlama ve kırılmalara yol açmalarıdır.

Normal konumda takviyelendirilmiş elyaflarda ise 3 μm çaplarıyla belli uzunlukta bağ oluşturdukları, sadece parçacıkların elyaf diplerinde ufak boyutta çatlamalar olduğu, bunun da sonraki çevrimlerde matris içerisine gömüldüğü yapılan mikroskopik çalışmalardan ortaya çıkmıştır (Şahin, 2000).

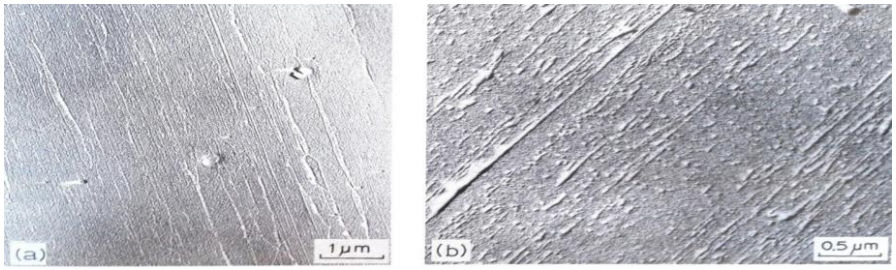
4.6.1. PTFE matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışı

PTFE, çok düşük sürtünme katsayısı sergileyen, – 260˚C ile + 260˚C arasında sürekli olarak çalışabilen bir termoplastik malzemedir. PTFE kimyasal olarak hemen hemen inert bir davranış sergiler. Eşsiz moleküler ve morfolojik yapısından kaynaklanan bu özellikleri PTFE ve PTFE matrisli kompozit malzemeleri, birbiri üzerinde kayma hareketi yapan makine elemanları için, polimer esaslı kompozitler içinde oldukça uygun bir seçenek haline getirir. Fakat oldukça yüksek aşınma sergilemesi PTFE'nin dezavantajı olarak söylenebilir. Bu dezavantajı, PTFE'ye takviye malzemeleri ilave edilerek ortadan kaldırılabilir.

Kayma uygulamalarında kullanılan birçok PTFE matrisli kompozit malzeme bulunmaktadır. PTFE matrise bir ya da birden çok takviye elemanı değişik oranlarda takviye edilerek, PTFE esaslı kompozitlerin özellikleri değiştirilebilir. PTFE'nin yüzey molekülleri oldukça pürüzsüz bir yapıdadır. Bu özelliği sürtünmeyi azaltır ve kayma işlemi esnasında karşı yüzeye transfer edilen ince film oluşumunu kolaylaştırır. PTFE tozları diğer polimer malzemeler için ya da metal matrisler için dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

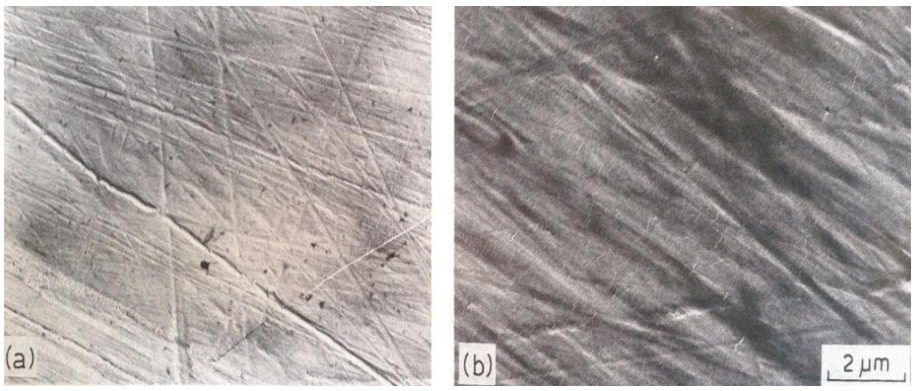
Polimerlerin kayma esnasında karşı yüzeye transfer olarak transfer filmi oluşturdukları, oluşan bu transfer filminin aşınma karakteristikleri üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinen bir durumdur. PTFE malzeme, pürüzsüz bir cam ya da çelik yüzey

üzerinde kayarsa oldukça ince bir transfer filmi oluşturur. PTFE'nin oluşturduğu transfer filminin, diğer polimerlerinkinden daha iyi ve sürekli olduğu Şekilde 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4. İlk çalışma esnasında transfer edilen filmin elektron mikroskop görüntüsü a) PTFE, b) Polipropilen

Kayma hızındaki artışın transfer edilen film yüzeyine etkisinin araştırıldığı bir araştırmada kayma hızının artmasının oluşturulan PTFE transfer film yüzeyini artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. 1000 devir sonunda transfer edilen PTFE transfer filminin elektron mikroskobu görüntüsü a) 0,1 m/s, b) 1 m/s

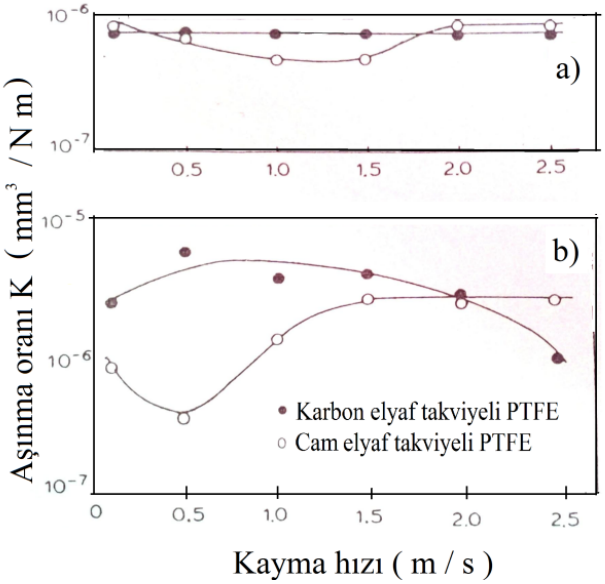
PTFE'nin sürtünme katsayısı, kayma süresinin artmasıyla önce azalır sonra dengeli bir hale ulaşır. Kayma hızının azalması ve ortam sıcaklığının artması, sürtünme katsayısını azaltan bir etki yapmaktadır. Kayma hızındaki artış ise sürtünme katsayısını artırır. Bu özellikleri PTFE polimer malzemeleri için önemli karakteristiklerdir.

4.6.2. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin aşınma ve sürtünmesi

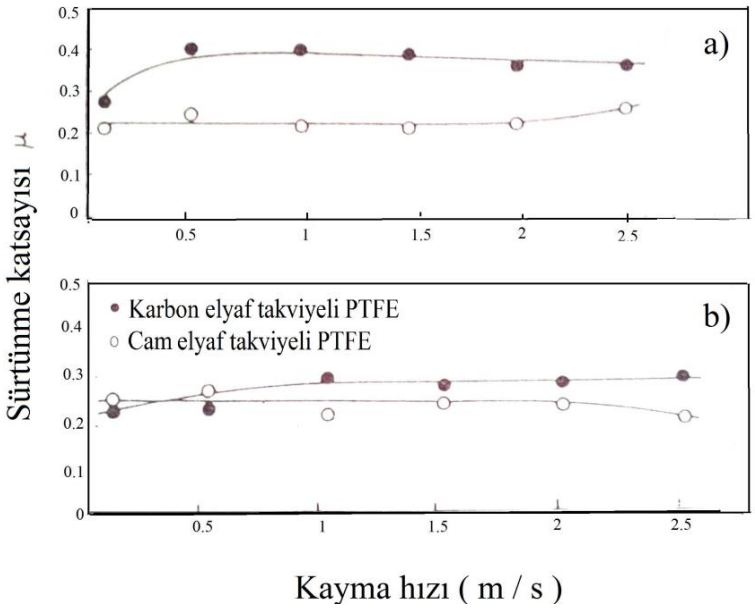
Literatürde yapılan çeşitli çalışmalar neticesinde cam ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemelerde aşınma özelliklerinin, takviye edilen malzeme özelliklerinden, sıcaklık, uygulanan yük, deneylerin yapıldığı kayma hızı gibi deney parametrelerinden etkilendiği ispatlanmıştır.

Aşınma ve sürtünmeye etki eden faktörler arasında, elyaf takviyeli PTFE'nin kayma hızından yük değişimine göre daha az etkilendiği çeşitli çalışmalarda ispatlanmıştır. Karbon elyaf takviyeli PTFE malzemelerinin aşınma değerlerinin, cam elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemelerinkinden daha yüksek olduğu, sürtünme katsayısı değerleri arasındaki farkın ise aşınma değerleri arasındaki farktan daha küçük olduğu ifade edilmelidir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

Cam diske karşı aşındırılmış malzemelerin çelik diske karşı aşındırılmış malzemelerden daha az aşınma göstereceği söylenebilir (Tanaka, 1986).

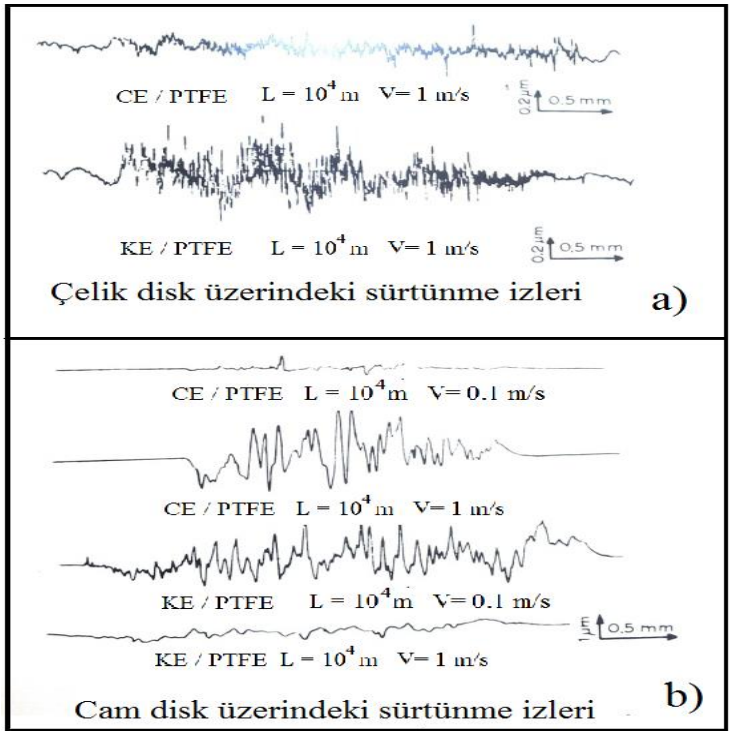


Şekil 4.6. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemeleri için kayma hızı – aşınma oranı değişimi a) çelik disk'e karşı, b) cam disk'e karşı



Şekil 4.7. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemeleri için kayma hızı – sürtünme katsayısı değişimi a) çelik disk'e karşı, b) cam disk'e karşı

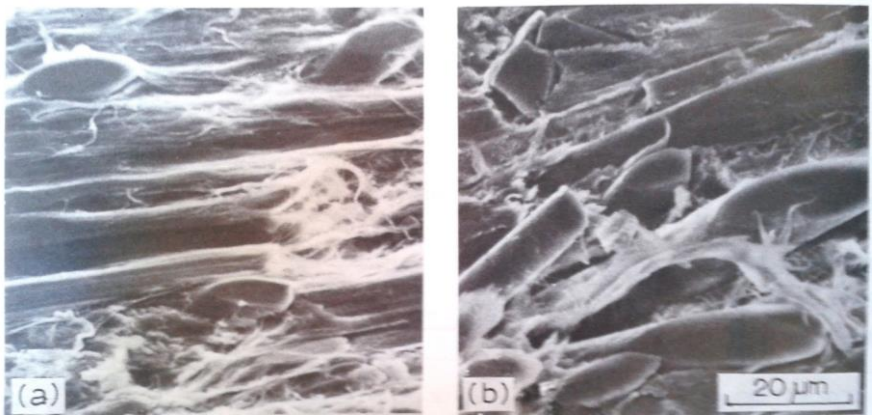
Karbon ve cam elyaf katkılı PTFE kompozitlerin abraziflik özelliğinin çok küçük olduğu Şekil 4.8'den görülmektedir. Yine aynı şekilden kayma hızının artmasının cam elyaf takviyeli PTFE kompozitin abrazifliğini artırdığını, karbon elyaf takviyeli kompozitin abrazifliğini ise azalttığını görürüz.



Şekil 4.8. Aşınma deneyi sonrası sürtünme izleri profili a) çelik disk, b) cam disk (CE /PTFE –Cam elyaf takviyeli PTFE, KE/PTFE – Karbon elyaf takviyeli PTFE)

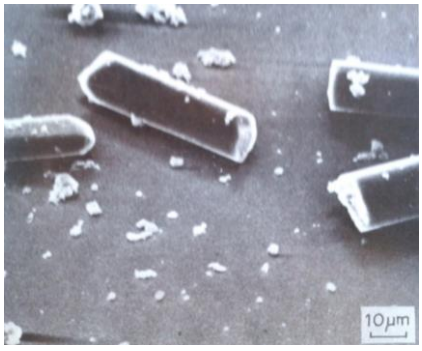
Cam disk üzerinde çelik diske göre daha az aşınma izleri oluşur. Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi disk yüzeylerinde önemli miktarda transfer edilen film tabakası oluşur.

Aşındırılmış elyaf takviyeli kompozitin yüzeyindeki aşınmış elyaf iplikleri, jiletle kesilmiş kompozit yüzeyinkinden daha fazla oluşur. Bu elyaf ipçikleri aşınma oranının yüksek olduğu ilk çalışma aşamasından, aşınma oranının azaldığı çalışma aşamasına kadar artar. PTFE matris içinde elyaf iplikçiklerinin hafifçe hareket edebiliyor olması, çalışma esnasında elyaf iplikçikleri yönünden zengin bir yüzey oluşmasına sebep olur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Aşındırılmış elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerinin SEM analizleri, a) cam elyaf takviyeli PTFE, b) karbon elyaf takviyeli PTFE

Matrise takviye edilen elyaflar, iki yüzey arasına uygulanan yükü destekler. Çalışma esnasında sürtünme sonucu kopup ortaya çıkan kısa elyaflar oluşur (Şekil 4.10). Bu kısa ve küçük elyaflar karşı yüzeyde sürtünme yönünde aşınma izleri oluşturur ve karşı yüzeyi aşındırarak sürtünme alanı dışına doğru taşınır.



Şekil 4.10. Cam elyaf takviyeli PTFE'ye karşı aşındırılmış cam disk üzerindeki sürtünme yönü doğrultusunda kompozit yapıdan kopmuş cam elyaf parçacıkları

Ayrıca kopan bu küçük elyaf parçaları yüzeyler arasında oluşan transfer film yüzeyini de etkiler. Aşındırıcı disk yüzeyinin mikroskobik incelemesi yapılırsa, yüzeyde aşınmış küçük parçacıklar bulunur (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Cam elyaf takviyeli PTFE'ye karşı aşındırılmış çelik disk yüzeyinin elektron mikroskop görüntüsü

5. KAYMALI YATAKLAR VE PERNOLAR

5.1. Kaymalı Yataklar

Yataklar, iki eleman arasındaki dönme şeklindeki izafi harekete müsaade eden, fakat kuvvet doğrultusundaki harekete engel olan elemanlardır. İzafi hareketin şekli doğrusal hareket ise kızak olarak adlandırılırlar.

Yatağın üzerine gelen kuvvetin doğrultusuna göre eksenel ve radyal yatak olarak ikiye ayrılırlar. Radyal yönde gelen yükü taşıyan yatağa radyal yatak, eksenel olarak gelen yükü taşıyan yatağa ise eksenel yatak denir. Her iki yönde de yük taşıyabilen yataklara radyal- eksenel kombine yatak denir (Şekil 5.1).

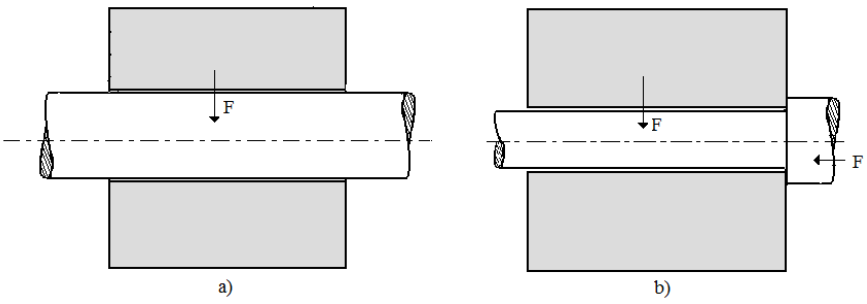
Kaymalı yataklarda yatakların malzemeleri, çalıştıkları elemanın malzemesinden daha yumuşak malzemelerden veya alaşımlardan seçilmelidir. Bu şekilde yataklık yaptıkları elemanların aşınması azaltılır.

Yatak malzemelerinden istenilen özellikler;

- İyi bir basma ve yorulma mukavemeti
- Aşınmaya ve korozyona dayanıklılık
- Düşük sürtünme katsayısı
- Düşük ısıl genleşme katsayısı

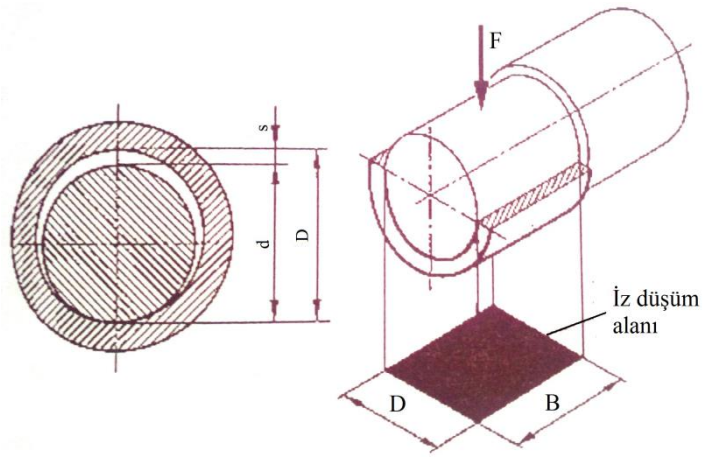
şeklinde sıralanabilir.

Kaymalı yataklar radyal, eksenel ve kombine yükleri taşıyabilecek konstrüksiyonda imal edilebilirler. Titreşimleri sönümlemeleri, az yer işgal etmeleri, parçalı olarak imal edilmeleri, çeşitli yağlama şekilleri ile çalışabilmeleri, rulmanlı yataklara göre daha sessiz çalışması kaymalı yatakların avantajları arasında sıralanabilir.



Şekil 5.1. a) Radyal kaymalı yatak, b) radyal – eksenel kaymalı yatak

Radyal yataklarda, yatak yüzeyinde oluşan basınç hesabı, uygulanan kuvvetin izdüşüm alanına (Şekil 5.2) oranı ile hesap edilir (Denklem 5.1).



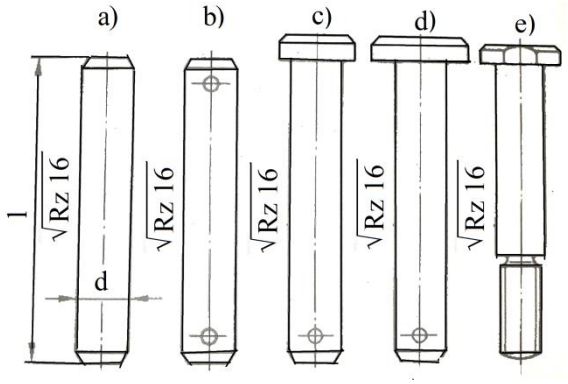
Şekil 5.2. Radyal kaymalı yatak

Burada B,yatak genişliği, D, yatak çapı, F, uygulanan kuvvet olarak verilir ve yatağın ortalama yüzey basıncı (P_y):

$$P_y = F / (B.D) \qquad (5.1)$$

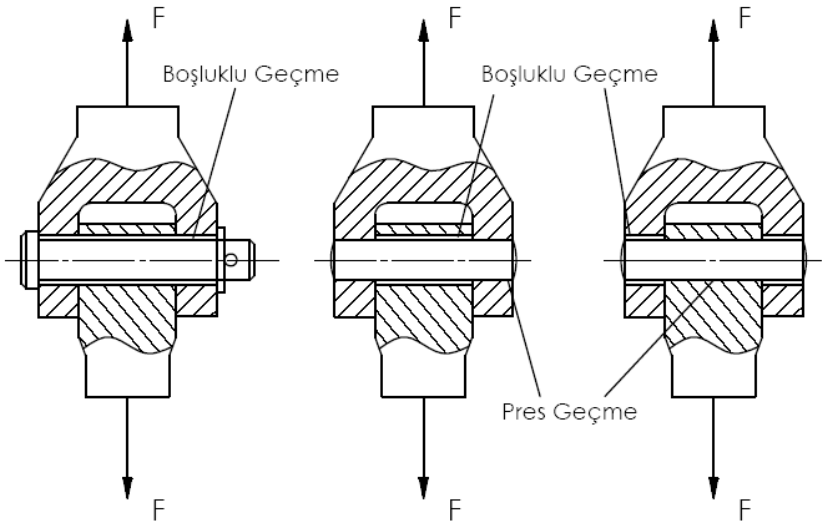
5.2. Pernolar

Pernolar, makine elemanlarını birbirine bağlayan bağlama elemanlarıdır. Pernoların bağladıkları elemanlar, birbirlerine göre dönme ve salınım hareketi yapabilirler. Bazı perno gösterimleri Şekil 5.3'de verilmiştir (Kurbanoğlu, 2006).



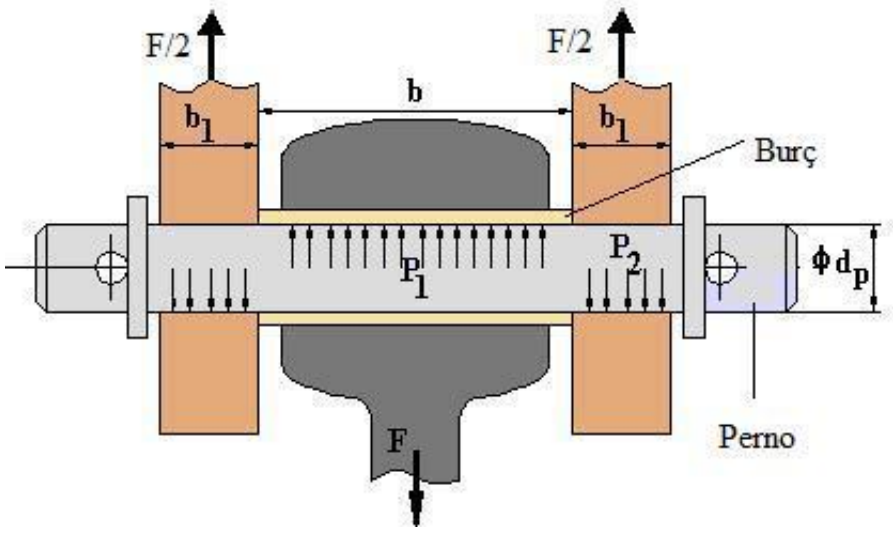
Şekil 5.3. Perno çeşitleri a) başsız perno (DIN 1433), b) gupilya delikli perno (DIN 1433), c) küçük başlı perno (DIN 1434, DIN 1435), d) büyük başlı perno (DIN 1436), e) Başlı ve vidalı perno (DIN 1445)

Pernolar birlikte çalışacağı elemana, boşluklu geçme ve sıkı geçme olarak montaj edilebilirler. Şekil 5.4'te pernonun değişik montaj şekilleri verilmiştir.



Şekil 5.4. Pernonun farklı montaj şekilleri

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi, perno ile diğer parçalar arasında yüzey basınçları meydana gelir. Perno, eğilmeye ve kesilmeye zorlanır. Bu zorlamalara ait emniyet hesaplamaları şu şekilde yapılır:



Şekil 5.5. Perno- mafsal bağlantısı

Burç ile perno arasındaki yüzey basıncı P_1;

$$P_1 = F / b \,.\, d_p \leq P_{em} \qquad (5.2)$$

Çatal ile perno arasındaki yüzey basıncı P_2;

$$P_2 = F / 2.\, b_1.\ d_p \leq P_{em} \qquad (5.3)$$

Pernoda meydana gelen eğilme gerilmesi σ_e;

$$\sigma_e = M_e / W_e = [\, F \,.\, (b+b_1) / 4] / [\, \pi \,.\, d_p^3 / 32] \leq \sigma_{em} \qquad (5.4)$$

ve oluşan kesme gerilmesi τ_{km};

$$\tau_{km} = 2.F / (\pi \,.\, d_p^2) \ \leq \tau_{em} \qquad (5.5)$$

olarak hesap edilir.
Bu ifadelerde; F, uygulanan yük (N), b, burç uzunluğu (mm), b_1, yatak uzunluğu (mm), d_p, pim çapıdır (mm). Pernoda meydana gelen kesme gerilmesi, diğer gerilmelere göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Perno ile yapılan bağlantıların boyutlandırılmasında;

$$b / d_p = 1.5 – 1.7 \qquad (5.6)$$

$$b_1 / b = 0.3 – 0.5 \qquad (5.7)$$

değerleri arasında alınması tavsiye edilir.

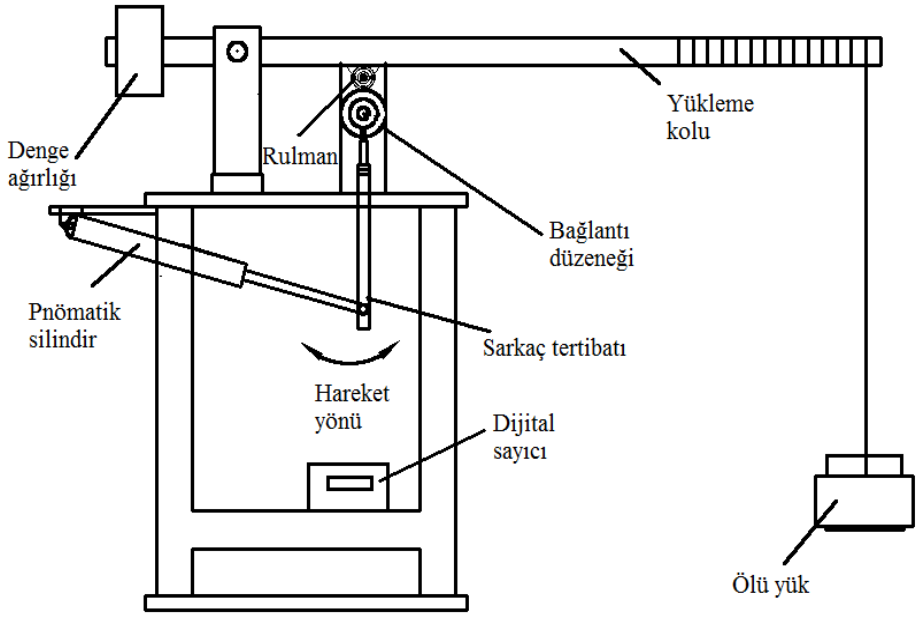
6. MATERYAL VE METOT

6.1. Deney Düzeneği

Çalışmada kullanılan deney seti ile yataklar ile pernoların kuru ve yağlı ortamdaki aşınma durumları incelenebilmektedir. Yaklaşık 35 mm çapa ve 200 mm uzunluğa kadar pernoların aşınma testleri bu deney seti ile yapılabilmektedir. Bu deney setinde yatakların ve pernoların bozulma ve aşınma sonuçlarının daha geniş aralıkta değerlendirilebilmesi için, etkili parametrelerin kontrol edilebilme imkanı önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilmiştir. Şekil 6.1'de fotoğraf görüntüsü, Şekil 6.2'de ise şematik görüntüsü verilen aşınma deney seti, özel olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir.

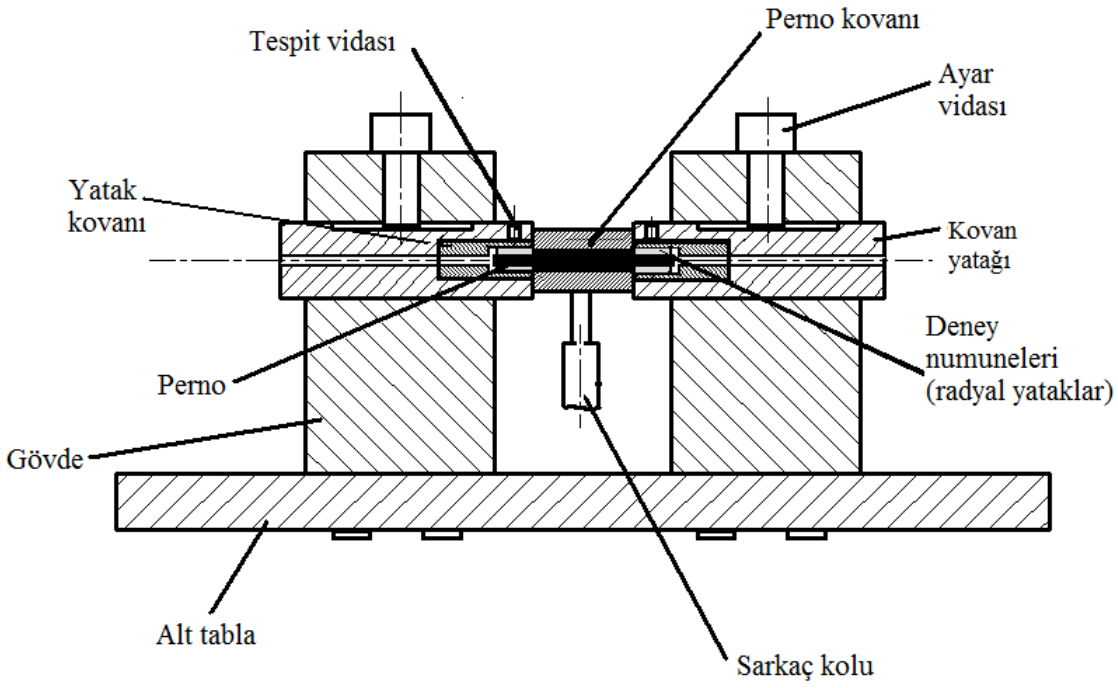


Şekil 6.1. Deney setinin fotoğraf görünüşü



Şekil 6.2. Deney setinin şematik görünüşü

Deney seti elemanları; denge ağırlığı, pnömatik silindir, dijital sayıcı, yükleme kolu, ölü yük, sarkaç tertibatı, bağlantı düzeneği gibi elemanlardan oluşmaktadır. Deney numunelerinin montajı ve bağlantı düzeneğinin detayları Şekil 6.3'deki şematik resimde verilmiştir.



Şekil 6.3. Bağlantı düzeneğinin şematik görünüşü

Deney seti, montaj ve demontajın kolaylıkla yapılabileceği şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu durum yerinde ve acil müdahale edebilme ve gerektiğinde bozulan, kırılan parçaların değişikliğini kolayca yapabilme imkânı sağlamaktadır. Deney setinde kompresörden sisteme gelen havanın basıncı, regülâtör aracılığıyla değiştirilebilmektedir. Deney setine yerleştirilen konum siviçleri yardımıyla sarkacın çalışma aralığı değiştirilebilmektedir.

Deney tertibatında, salınım sayısı ve salınım açısı kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, sarkaç mekanizması dakikada ortalama 65 salınım yapacak şekilde, salınım açısı da 60 ° derece olacak şekilde ayarlanmıştır. Bir turda 120 ° lik çember taranmaktadır. Pernoların çapına göre hesap edilen 120 ° lik çember yayı uzunluğu, bir turda katedilen kayma mesafesini vermektedir. 20, 60, 120, 180 ve 250 metre kayma mesafeleri, dijital sayıcıdan okunan tur sayısı ile hesap edilmiştir.

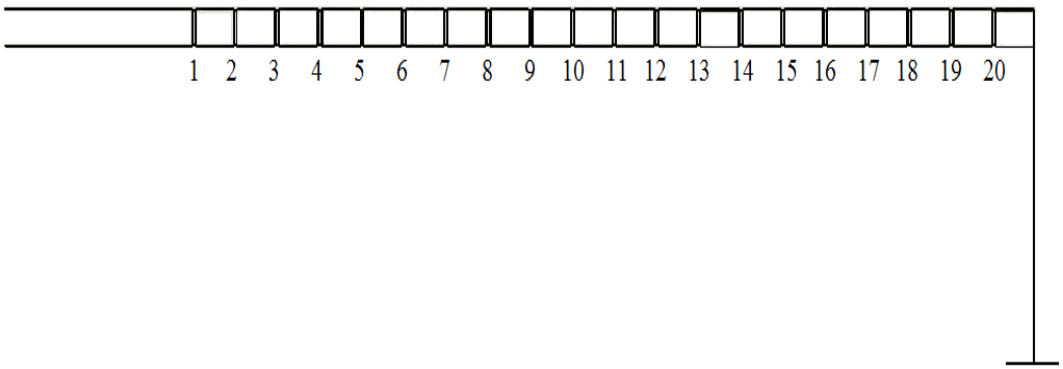
6.2. Test Metodu

Perno yatakları ve pernoların aşınma ve bozulma davranışlarını simüle eden deney düzeneği ile değişik malzemelerden yapılmış perno ve yatak numunelerinin farklı çalışma şartlarındaki aşınma davranışları araştırılabilir. Yapmış olduğumuz çalışmada perno yataklarının aşınma davranışları incelenmiştir. Bu çalışma için perno yataklarının aşınmasında etken olan yük ve kayma mesafesi gibi parametrelerin, yatakların aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 3 farklı kompozit malzemeden yapılmış perno yatağı üzerine farklı değerlerde yük uygulanarak, yük değişiminin kompozit yatakların aşınma karakteristiklerine nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Deneylerde, test numunesi olan kompozit yataklardan her deney parametresi için üçer çift yatak hazırlanmış ve deney işlemi üç defa tekrarlanarak deney sonuçları elde edilmiştir. Oluşturulan grafiklerde bu üç değerin ortalaması dikkate alınmıştır.

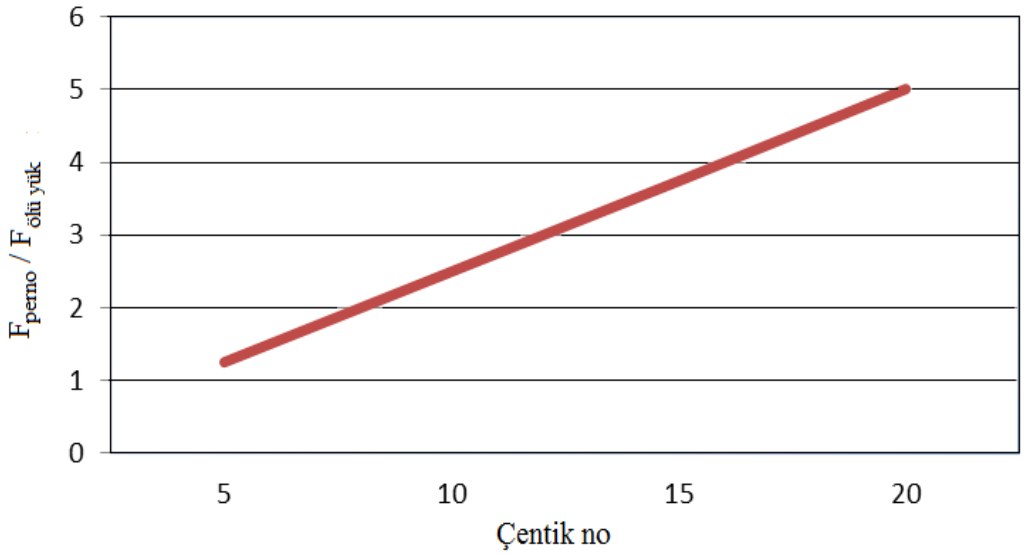
6.3. Yataklara Uygulanacak Yüklerin Tespiti

Deney seti, farklı çalışmalar için, değişik ağırlıklardaki ölü yüklerin, yük kolu üzerine asılabileceği şekilde tasarlanmıştır. Yükleme kolu uzunluğu 2080 mm'dir. Yatak numuneleri üzerine değişik kuvvetler oluşturabilmek amacıyla ölü yükün

asılacağı 20 adet çentik bulunmaktadır. Çentikler arası mesafe 50 mm'dir. Yükleme kolu Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Yükleme koluna ait çentik yük grafiği Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Yükleme Kolu



Şekil 6.5. Yük koluna asılan ağırlığın çentik numarasına göre ölü yük ile pernoya gelen yük arasındaki oran

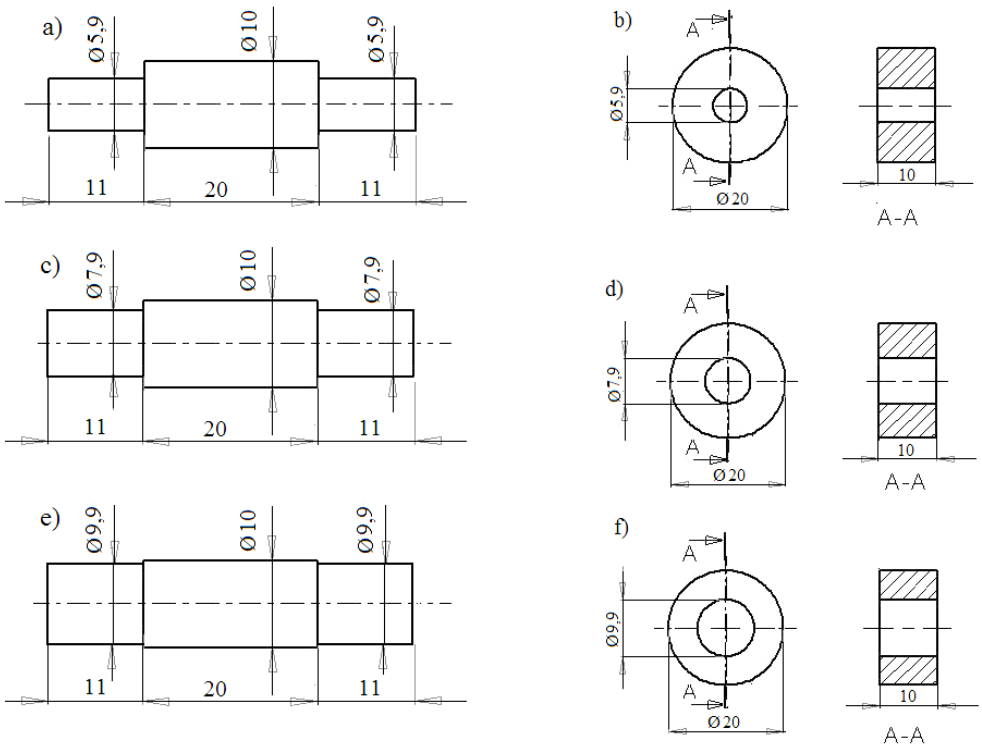
Şekil 6.5'deki grafiğin nasıl yorumlandığı şöyle izah edilebilir;

Yük kolunun üzerindeki 20 numaralı çentiğe yük asıldığında perno üzerine etki edecek kuvvet bu asılan yükün 5 katı olur. 20 numaralı çentiğe 20 kg yük asılırsa, perno üzerine 100 kg'lık bir yük etki eder. Yataklara gelen kuvvet ise, pernoya gelen yükün yarısı kadar olur. Bu kuvvet her iki yatağa eşit dağılan kuvvettir. Deney numunelerinde oluşan yüzey basınçları, (5.1) denklemin'de verilen bağıntı ile hesap edilir.

6.4. Deney Numuneleri

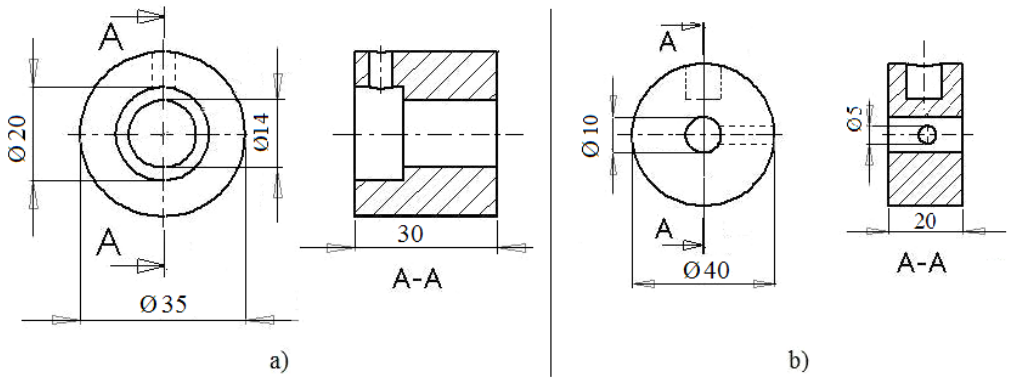
Kayma aşınması testi yapılacak kompozit yatak deney numuneleri üç farklı kompozit malzemeden ve üç farklı iç çapta hazırlanmıştır. Kullanılan kompozit malzemelerin malzeme ve boyutsal özellikleri şöyle açıklanabilir:

- % 40 bronz takviyeli PTFE (B40) polimer kompozitten elde edilen çubuk malzeme, 5.9, 7.9, 9.9 mm iç çapa ve 20 mm dış çapa sahip olacak şekilde işlendi ve deney numunesi deneye hazır hale getirildi.
- % 35 karbon takviyeli PTFE (K35) polimer kompozitten elde edilen çubuk malzeme, 5.9, 7.9, 9.9 mm iç çapa ve 20 mm dış çapa sahip olacak şekilde işlendi ve deney numunesi deneye hazır hale getirildi.
- % 15 cam elyaf takviyeli PTFE (C15) polimer kompozitten elde edilen çubuk malzeme, 5.9, 7.9, 9.9 mm iç çapa ve 20 mm dış çapa sahip olacak şekilde işlendi ve deney numunesi deneye hazır hale getirildi.
- AISI 1040 çeliğinden imal edilen pernolar, Şekil 6.6'da verilen ölçülerde işlendi ve deneyler için hazır hale getirildi.



Şekil 6.6. Değişik ölçülerde hazırlamış perno (a, c, e) ve yatak (b, d, f) deney numunelerinin ölçüleri (ölçü birimleri: mm)

Deney numunelerinin montajında pernolar, perno kovanına yerleştirilip tespit cıvatası ile iyice sabitlendi. Yatak numuneleri de yatak kovanına yerleştirilip tespit vidası ile sabitlendi. Perno kovanı sarkaç koluna bağlanarak deney ünitesi montaja hazır hale getirildi. Kompozit yatakların çelik pernoya karşı aşınma deneyleri yapıldı. Yatak kovanı ve perno kovanının teknik resimleri Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. a) Yatak kovanı, b) perno kovanı (ölçü birimleri: mm)

6.5. Deney Numunelerindeki Ağırlık Kaybının Tespit Edilmesi

Deney öncesinde ve deney sonrasında, numunelerin ilk ağırlıkları ve son ağırlıkları 10^{-4} gr hassasiyete sahip hassas terazi ile tartılmıştır. Yük ve kayma mesafesi değişiminin aşınma özelliklerine etkisi, meydana gelen aşınma kaybı ile incelenmiştir.

6.6. Deneyin Yapılışı

Deneyler aşağıda verilen sıraya uygun şekilde yapılmıştır:

1. Deney numuneleri Şekil 6.6'da verilen ölçülere göre CNC tezgahlarda işlendi. Yatak ve perno çaplarına göre üç ayrı gruba ayrıldı.
2. Deneyde kullanılacak her bir yatak çifti için ayrı pernolar hazırlandı.
3. Her gruptaki deney numuneleri kendi içinde numaralandırılarak ayrı ayrı muhafaza edildi.
4. Pernonun sağ tarafında ve sol tarafında çalışacak yatak numuneler önceden belirlendi ve montajı buna uygun şekilde yapıldı.
5. Deney numuneleri saf asetonla iyice temizlendi ve basınçlı hava tutularak kurutuldu. Yatak numunelerinin çalışmadan önceki ağırlığı 0,0001 gr

hassasiyetli terazi ile en az üç tartma işlemi sonucunda doğrulanarak kaydedildi. Bütün numuneler bu şekilde tartılıp ilk ağırlıkları kaydedildi.

6. Deney setinde yatakların monte edildiği yatak kovanı, her deney için temizlendi sonra yatakların montajı yapıldı.
7. Perno kovanına, daha önce numaralanmış ve montaj şekli belirlenmiş olan pernoların montajı yapıldı, tespit vidasıyla sabitlenerek deneye hazır hale getirildi.
8. Daha önceden belirlenmiş yükler yükleme koluna asılarak, perno yataklarında istenilen yüzey basıncı ayarlandı ve sonra deney başlatıldı.
9. Her bir deneyde belirlenen kayma mesafesi, dijital sayıcıdan tur sayısı okunarak hesap edildi.
10. Belirlenen kayma mesafesine ulaşıldığında deney durdurularak montajda yapılan işlemlerin tersi yapıldı. Yatak numuneleri kovanlarından çıkarılıp basınçlı hava ve kuru bezle temizlendi.
11. İyice temizlenen yatak numuneleri 10^{-4} gr hassasiyetli terazide tartılarak ağırlık kayıpları kaydedildi.
12. Kuru sürtünme ortamında yapılan deneylerde, bu işlemler sırasıyla bütün deney numuneleri için gerçekleştirildi.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1. Deneysel Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada değişik iç çaplarda bronz, karbon ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozit perno yatak deney numuneleri üzerinde, kayma mesafesi ve yatak yükünün aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

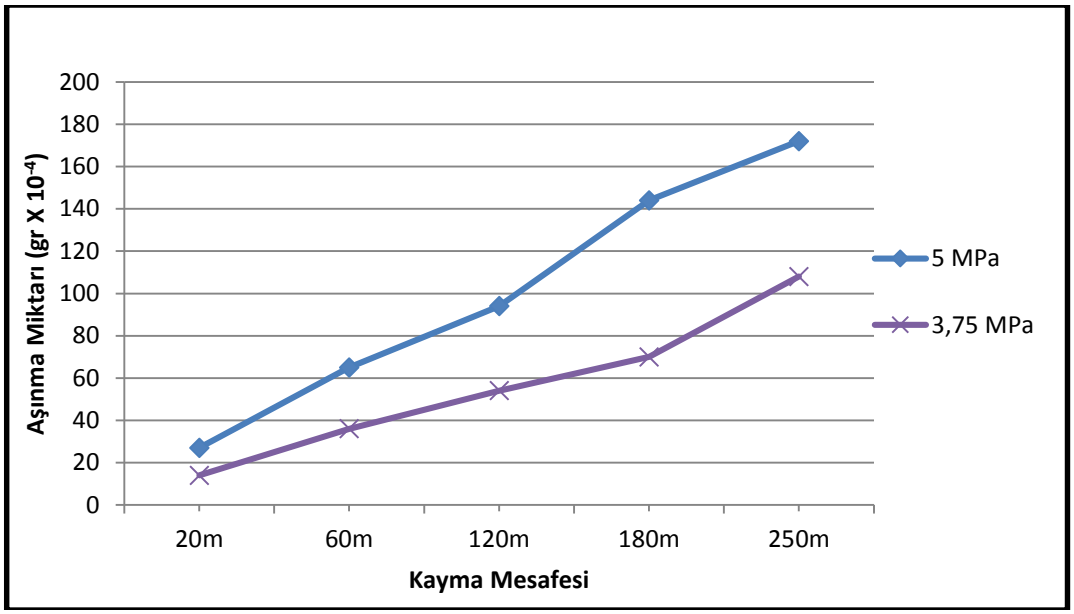
Kayma mesafesinin, yatakların aşınması üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, numuneler sırasıyla 20, 60, 120, 180, 250 metre kayma mesafelerinde çalıştırılmış ve sonrasında hassas terazide tartılarak, farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları hesaplanmıştır.

Yatağa uygulanan yüzey basınçları, (5.1) denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Hesap edilen yüzey basıncına uygun olarak ölü yükler uygulanmıştır.

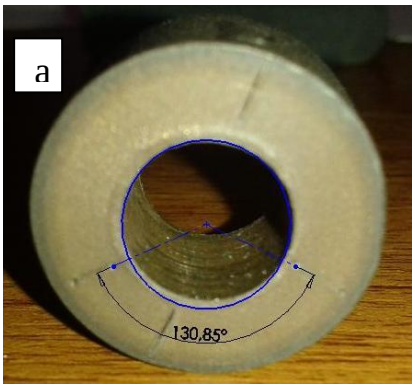
5,9 mm iç çaplı deney numuneleri sırasıyla 4,15 MPa ve 8,31 MPa yüzey basıncında, 7,9 mm iç çaplı deney numuneleri sırasıyla 3,14 MPa ve 6,28 MPa yüzey basında, 9,9 mm iç çapa sahip deney numuneleri ise sırasıyla 3,75 MPa ve 5 MPa yüzey basıncında test edilmiştir.

Üç farklı iç çap değişimi için, yüzey basıncı ve kayma mesafesi değişimlerinin kompozit perno yataklarının aşınma performansı üzerindeki etkisini açıklayan grafikler oluşturulmuştur.

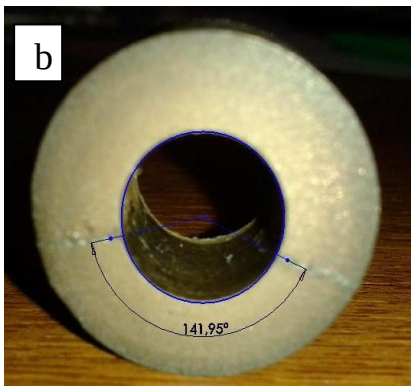
Şekil 7.1, Şekil 7.3 ve Şekil 7.5, 9,9 mm iç çaplı (sırasıyla bronz, karbon ve cam elyaf takviye edilmiş) yatak numunelerinin aşınma testi grafiklerini göstermektedir. Uygulanan yüzey basıncındaki artışın, yatak aşınma performansına etkisini açıklayan bu grafiklerden de görüleceği gibi, yatak deney numunelerine uygulanan yüzey basıncının artırılması, aşınma miktarının da artmasına sebep olmuştur. Farklı dolgu malzemelerinin, PTFE kompozit numunelerin aşınma direncine etkisini açıklayan Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'deki grafiklerde, değişen yüzey basınçlarında en fazla aşınma miktarı bronz takviyeli PTFE kompozit numunesinde görülmüştür. Bu durum bronzun PTFE matris ile zayıf bağ oluşturmasından ileri gelmektedir. Aşınma miktarı açısından bronzu sırasıyla, karbon takviyeli PTFE ve cam elyaf takviyeli PTFE deney numuneleri izlemektedir. Karbonun yağlayıcı özelliği, karbon katkılı PTFE kompozitin aşınma performansını iyileştirmiştir.



Şekil 7.1. 9,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

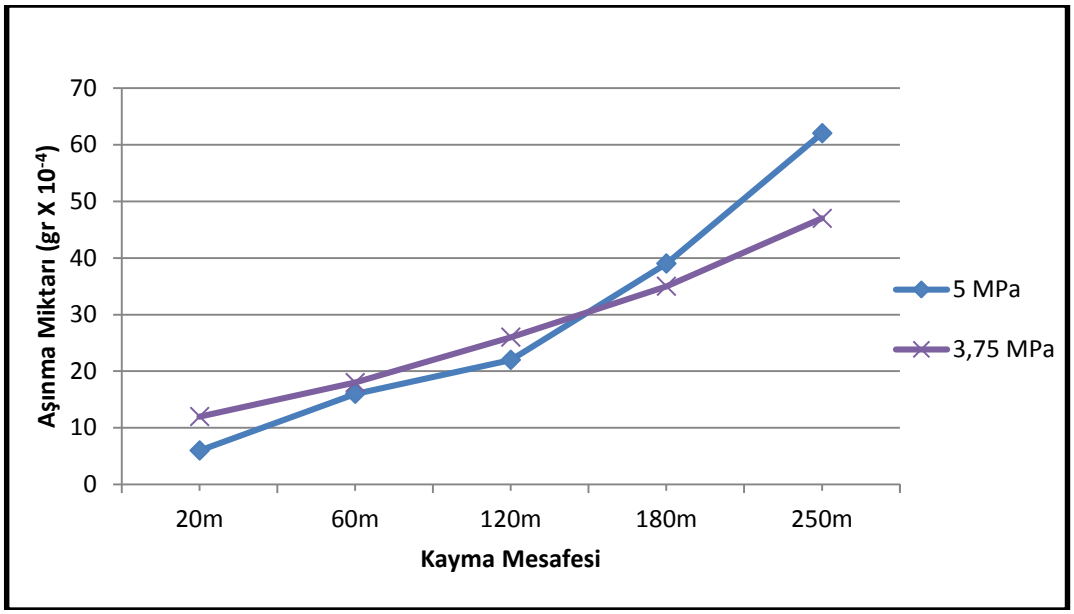


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**130,85**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,75**

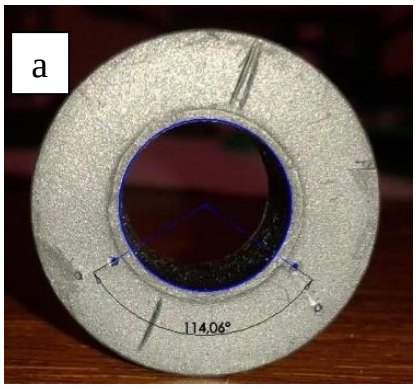


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**141,95**
Yüzey basıncı (MPa)	**5**

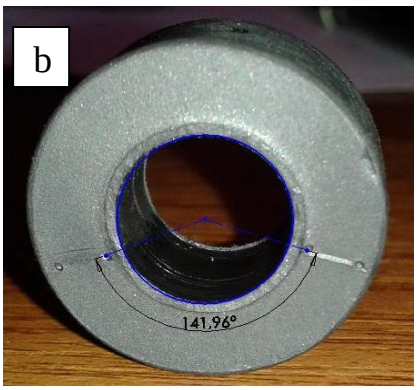
Şekil 7.2. 9,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,75 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 5 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune



Şekil 7.3. 9,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

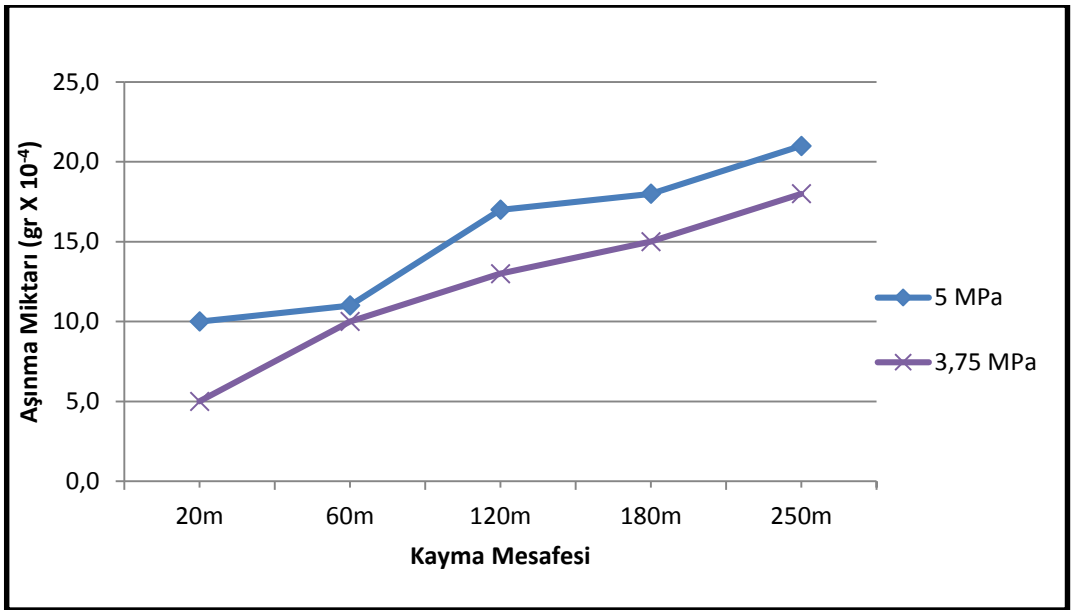


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**114,06**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,75**

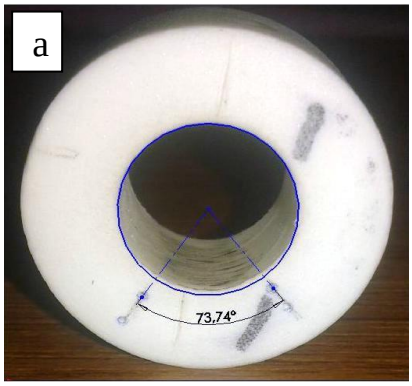


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**141,96**
Yüzey basıncı (MPa)	**5**

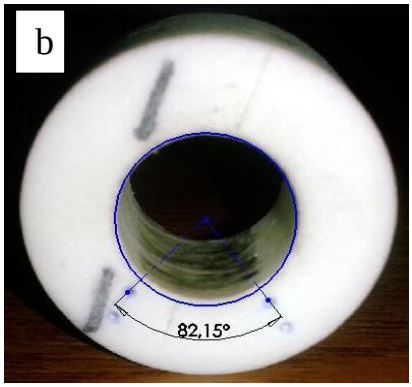
Şekil 7.4. 9,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,75 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 5 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune



Şekil 7.5. 9,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi



Malzeme	**Cam elyaf takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**73,74**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,75**



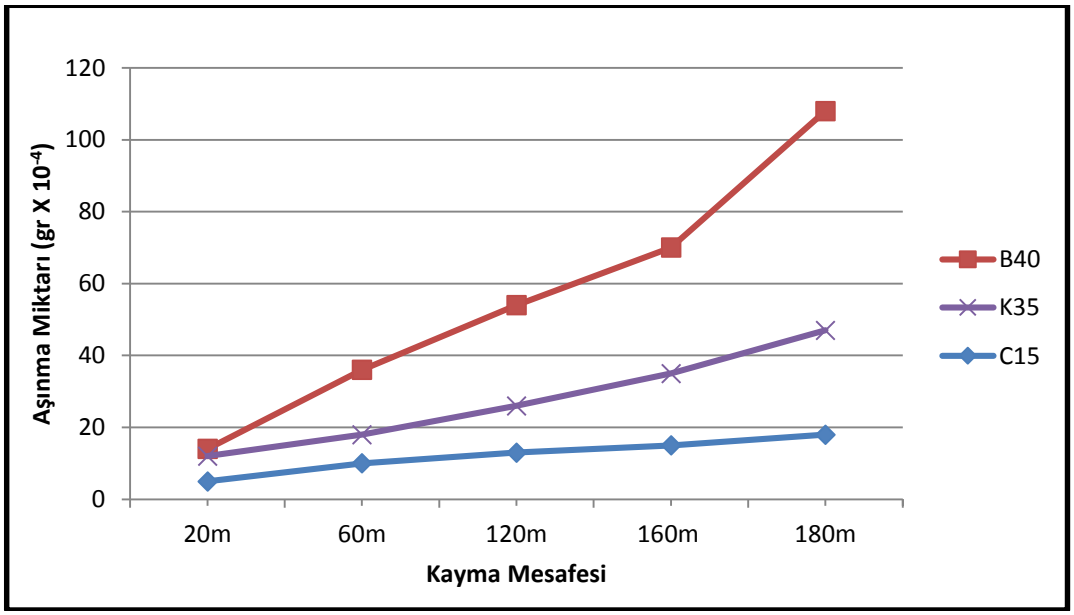
Malzeme	**Cam elyaf takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	9,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**82,15**
Yüzey basıncı (MPa)	**5**

Şekil 7.6. 9,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,75 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 5 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune

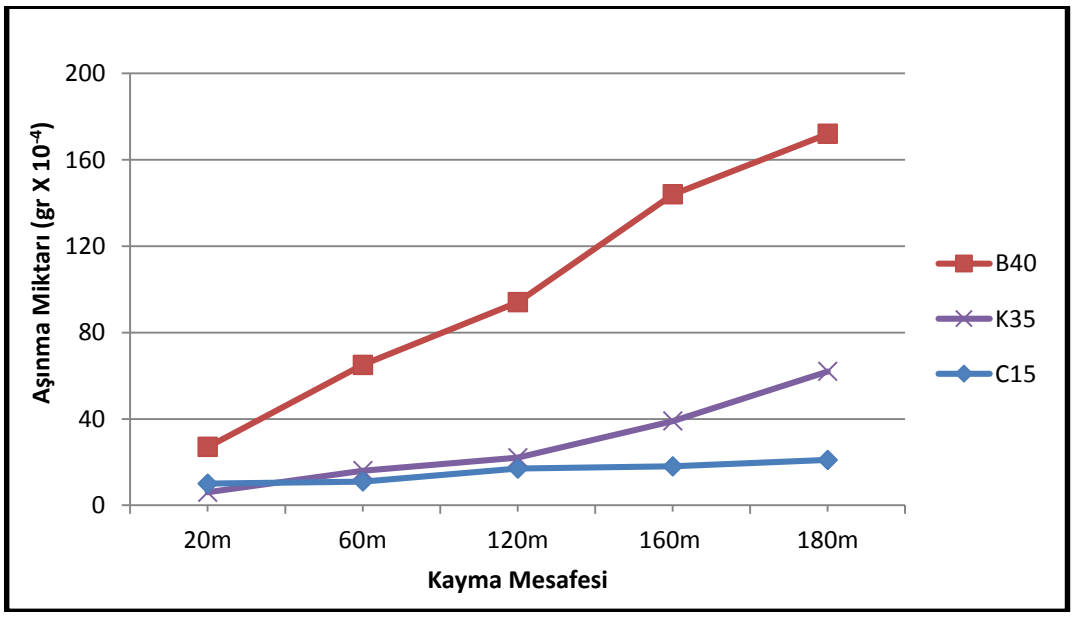
9,9 mm iç çaplı numunelerde artan yüzey basıncıyla, iç yüzey çalışma açılarında Tablo 7.1'de verilen oranlarda artış olmuştur (Şekil 7.2, Şekil 7.4 ve Şekil 7.6).

Tablo 7.1. 9,9 mm iç çaplı numunelerin iç yüzey çalışma açılarının, artan yüzey basıncı ile değişimi

Malzeme	Numunelerin iç yüzey çalışma açıları (˚)		Numunelerin iç yüzey çalışma açılarındaki artış
	3,75 MPa	5 MPa	
B40	130,85	141,95	% 8
K35	114,06	141,96	% 24
C15	73,74	82,15	% 11



Şekil 7.7. 9,9 mm iç çaplı numuneler için 3,75 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi



Şekil 7.8. 9,9 mm iç çaplı numuneler için 5 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi

7,9 mm iç çaplı kompozit yatak deney numunelerinin, yüzey basıncındaki değişimlerin aşınma performansına etkisini açıklayan Şekil 7.9, Şekil 7.11 ve Şekil 7.13'deki grafiklerde, yatak deney numuneleri üzerinde uygulanan yüzey basıncının artırılması, aşınma miktarlarını da artırmıştır. 9,9 mm iç çaplı numunelere benzer sonuçlar elde edilmiştir.

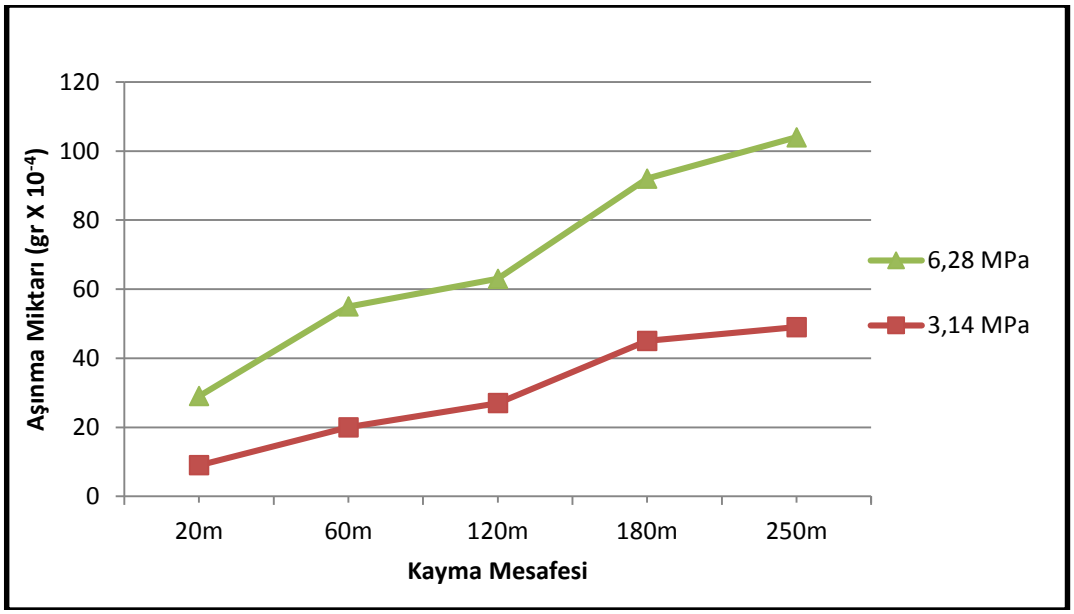
7,9 mm iç çaplı deney numuneleri için, değişen yüzey basınçlarında en fazla aşınma miktarı bronz takviyeli PTFE kompozit numunesinde oluşmuştur. Bronz takviyeli kompoziti sırasıyla, karbon takviyeli PTFE ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numuneleri izlemektedir (Şekil 7.15 ve Şekil 7.16).

7,9 mm iç çaplı yatak numunelerinde yüzey basıncındaki artış, numunelerin iç yüzeyindeki çalışma açılarını Tablo 7.2'de verilen oranlarda artırmıştır. Yüzey basıncının artmasıyla aşınmanın artması, iç yüzeylerdeki çalışma açılarının artmasının sonucudur (Şekil 7.10, Şekil 7.12 ve Şekil 7.14).

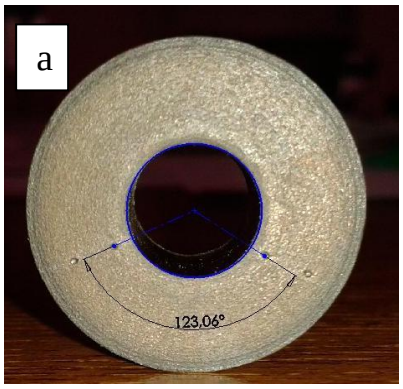
Bronzun karbon ve cam elyaf'dan daha sert bir malzeme olması, PTFE matris ile bronzun kuvvetli bağ oluşturamaması, bronz takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinde daha fazla aşınma meydana gelmesinin sebeplerindendir. Karbonun yağlayıcı özelliği sayesinde karbon katkılı PTFE kompozit numunelerinde, bronz katkılı kompozit numunelere göre daha düşük aşınma meydana geldiği gözlenmiştir.

Cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerinde minimum aşınma miktarları elde edilmiştir (Şekil 7.15 ve Şekil 7.16). Cam elyaf takviyeli PTFE kompozitte, cam elyafın PTFE'ye kazandırdığı iyi aşınma performansı sayesinde, cam elyaf takviyeli PTFE numuneler daha iyi bir aşınma performansı göstermiştir. Daha önce yapılan çalışmalardaki elde edilmiş sonuçlarda PTFE'ye cam elyaf takviyesinin bronz ve karbon takviyesine göre daha üstün aşınma dayanımı sağladığı görülmektedir (Tevruz, 1996; Ünal ve ark., 2007). Bu ise çalışmamızı desteklemektedir.

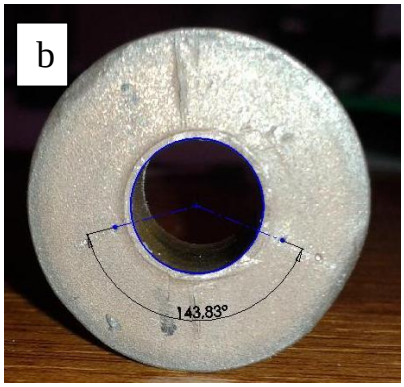
7,9 mm iç çaplı deney numulerinde, 9,9 mm iç çaplı numunelere nazaran daha az aşınma meydana gelmiştir. Bu durum, iç çapın ve dolayısıyla sürtünme alanının azalmasının bir sonucudur.



Şekil 7.9. 7,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

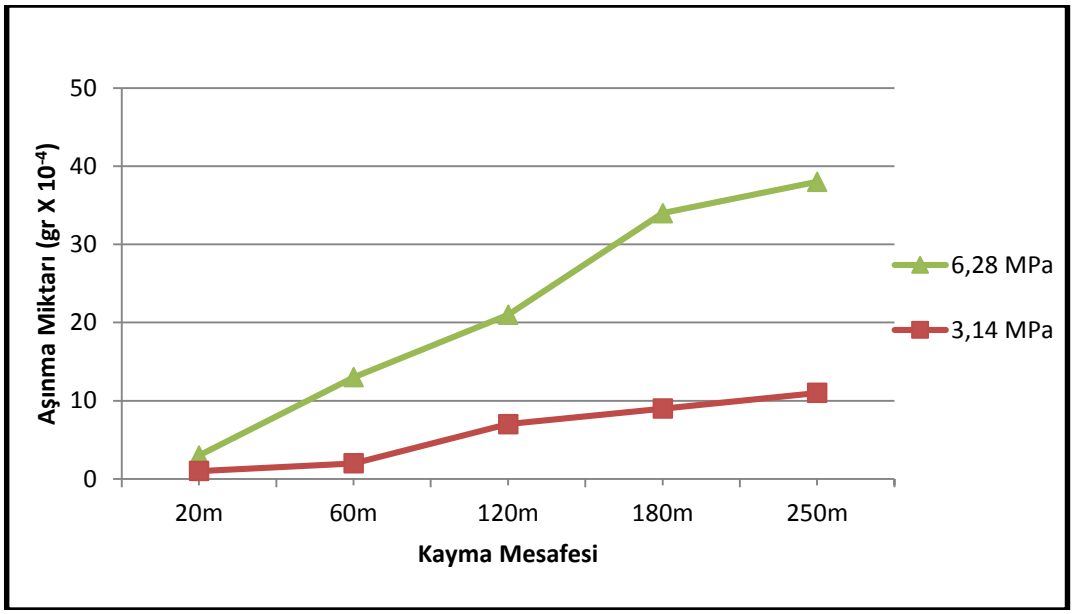


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**123,06**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,14**

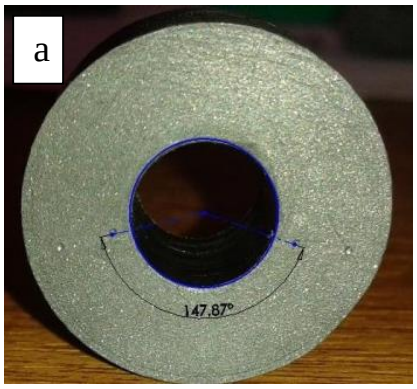


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**143,83**
Yüzey basıncı (MPa)	**6,28**

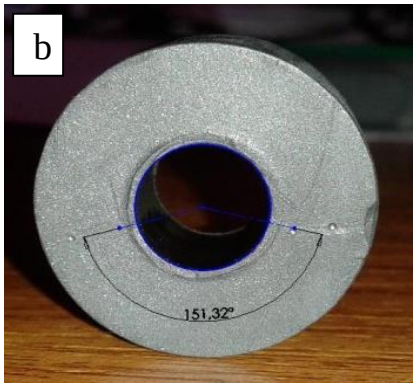
Şekil 7.10. 7,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,14 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 6,28 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune



Şekil 7.11. 7,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

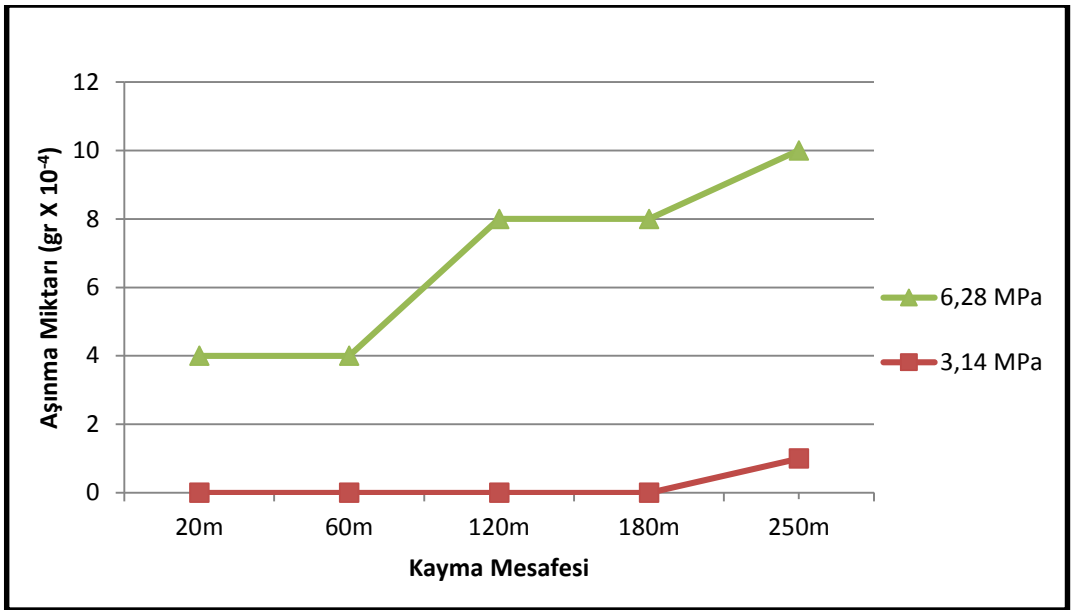


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**147,87**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,14**

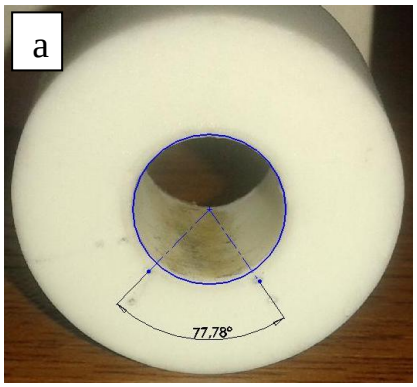


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**151,32**
Yüzey basıncı (MPa)	**6,28**

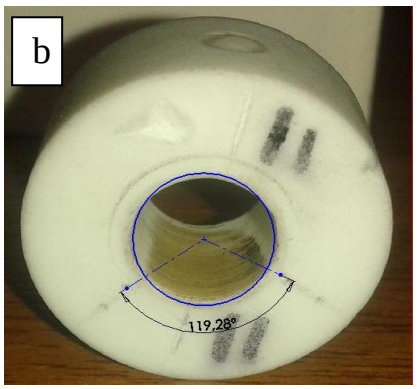
Şekil 7.12. 7,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,14 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 6,28 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune



Şekil 7.13. 7,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi



Malzeme	**Cam elyaf takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**77,78**
Yüzey basıncı (MPa)	**3,14**

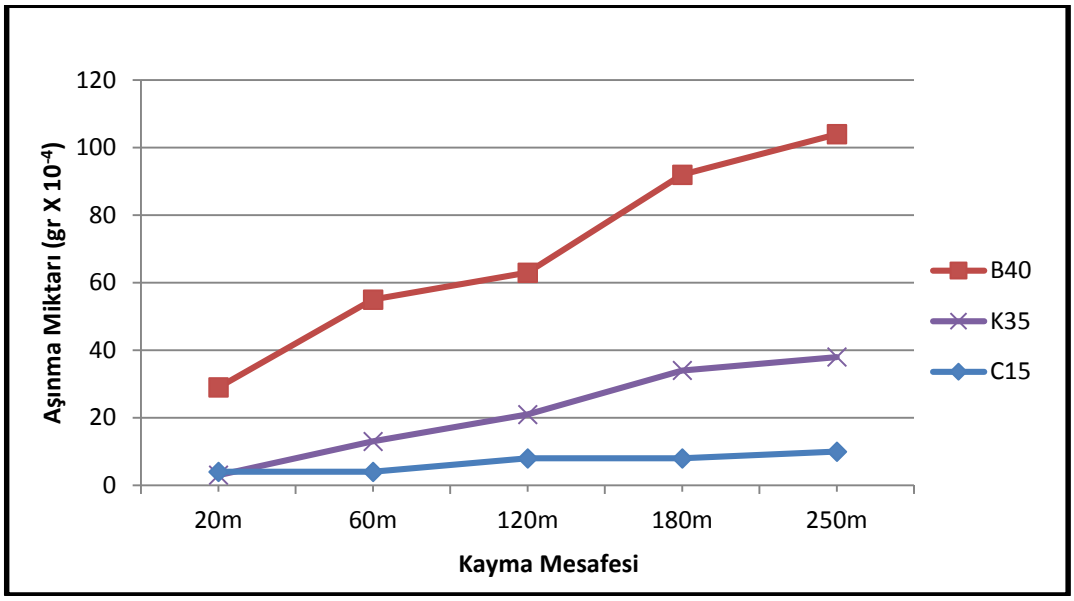


Malzeme	**Cam elyaf takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	7,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**119,28**
Yüzey basıncı (MPa)	**6,28**

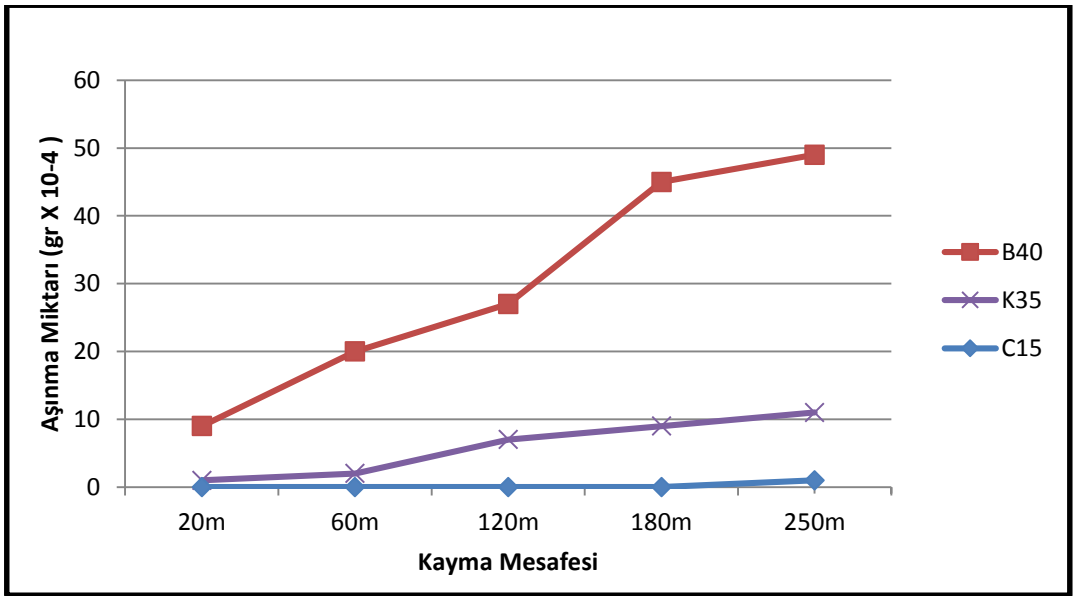
Şekil 7.14. 7,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 3,14 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 6,28 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune

Tablo 7.2. 7,9 mm iç çaplı numunelerin iç yüzey çalışma açılarının, artan yüzey basıncı ile değişimi

Malzeme	Numunelerin iç yüzey çalışma açıları (˚)		Numunelerin iç yüzey çalışma açılarındaki artış
	3,14 MPa	6,28 MPa	
B40	123,06	143,83	% 17
K35	147,87	151,32	% 2,5
C15	77,78	119,28	% 54



Şekil 7.15. 7,9 mm iç çaplı numuneler için 6,28 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi



Şekil 7.16. 7,9 mm iç çaplı numuneler için 3,14 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi

5,9 mm iç çaplı deney numuneleri için, yüzey basıncının artırılmasının yatak deney numunelerinin aşınma performansına etkisinin gösterildiği Şekil 7.17, Şekil 7.19, Şekil 7.22'deki grafiklerde de görüldüğü gibi, yatak deney numuneleri üzerinde uygulanan yüzey basıncının artırılması, aşınma miktarının da artmasına sebep olmuştur. Bu, 9,9 mm ve 7,9 mm iç çaplı numunelerde de elde edilene benzer bir sonuçtur. PTFE matrisine takviye edilen malzemenin, PTFE'nin aşınma performansına etkisinin gösterildiği Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'de görüldüğü gibi, 5,9 mm iç çaplı deney numuneleri için değişen yüzey basınçlarında maksimum aşınma miktarı;

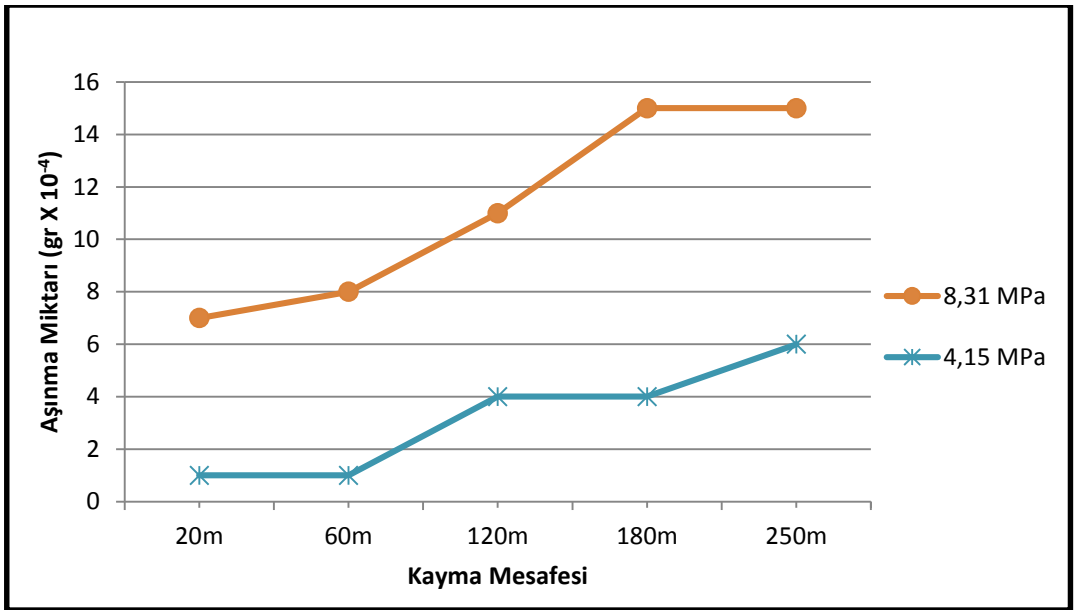
- 4,15 MPa yüzey basıncı değeri için bronz takviyeli PTFE kompozit numunesinde görülmüştür. Bronzu sırasıyla, karbon takviyeli PTFE ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numuneleri izlemektedir (Şekil 7.23).
- 8,31 MPa yüzey basıncı değeri için aşınma miktarı değerlerinde de en yüksek aşınma bronz takviyeli PTFE kompozit numunelerinde görülmüştür. Bronzu sırasıyla, karbon takviyeli PTFE ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numuneleri izlemektedir (Şekil 7.24).

Bronzun daha sert olan malzeme yapısı ve PTFE matrisle yaptığı bağın daha zayıf olması, bronz takviyeli PTFE numunelerde aşınmanın daha fazla görülmesine sebep olmuştur.

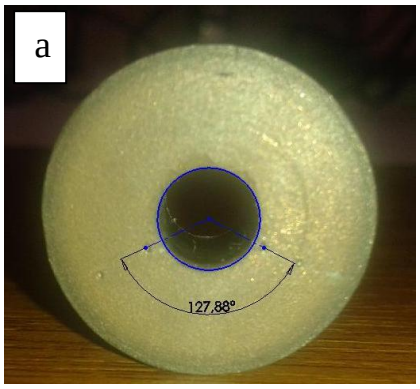
5,9 mm iç çaplı numunelerde uygulanan yüzey basıncı 4,15 MPa' dan 8,31 MPa' a artırıldığında, numunelerin çalışma açıları da artmıştır. Artan yüzey basıncıyla, numunelerin iç yüzey çalışma açılarında Tablo 7.3'te verilen oranlarda artış oluşmuştur (Şekil 7.18, Şekil 7.20 ve Şekil 7.21). Bunun sonucun da, yüksek basınçlarda daha fazla aşınma meydana gelmiştir.

Tablo 7.3. 5,9 mm iç çaplı numunelerin iç yüzey çalışma açılarının, artan yüzey basıncı ile değişimi

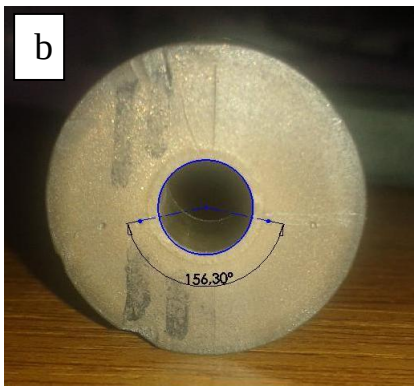
Malzeme	**Numunelerin iç yüzey çalışma açıları (˚)**		**Numunelerin iç yüzey çalışma açılarındaki artış**
	4,15 MPa	**8,31 MPa**	
B40	127,88	156,30	% 23
K35	118,08	140,39	% 19
C15	136,74	149,35	% 10



Şekil 7.17. 5,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

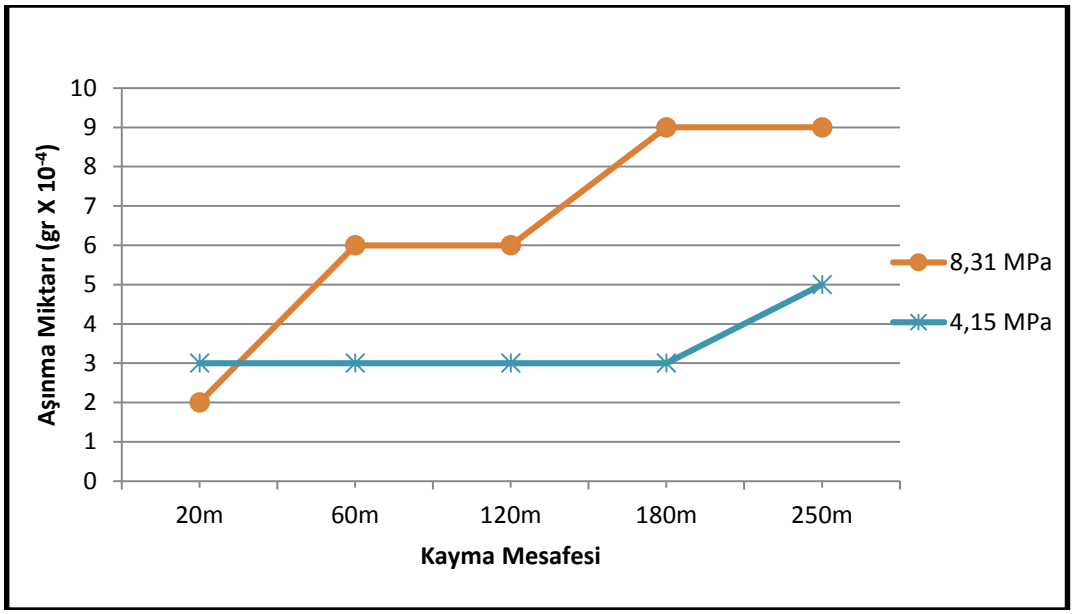


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**127,88**
Yüzey basıncı (MPa)	**4,15**

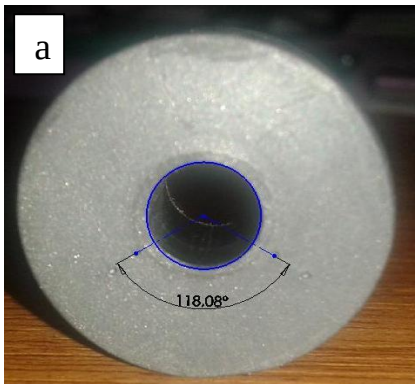


Malzeme	**Bronz takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**156,30**
Yüzey basıncı (MPa)	**8,31**

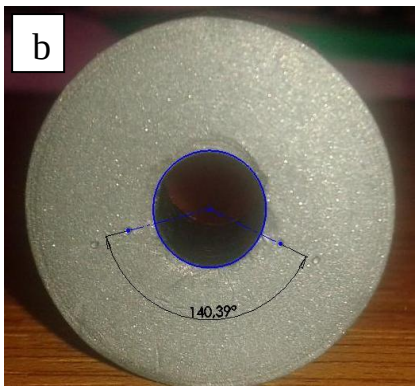
Şekil 7.18. 5,9 mm iç çaplı % 40 bronz katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 4,15 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 8,31 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune



Şekil 7.19. 5,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi

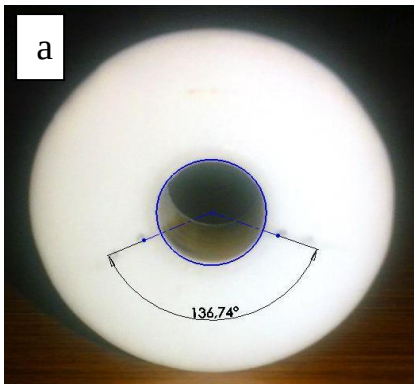


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**118,08**
Yüzey basıncı (MPa)	**4,15**

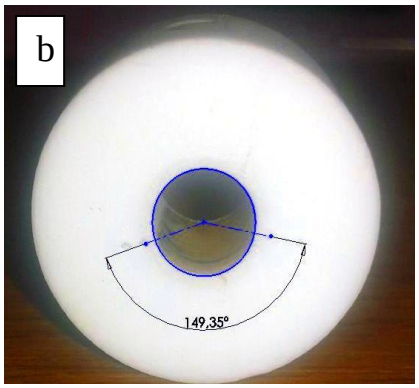


Malzeme	**Karbon takviyeli PTFE**
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**140,39**
Yüzey basıncı (MPa)	**8,31**

Şekil 7.20. 5,9 mm iç çaplı % 35 karbon katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 4,15 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 8,31 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune

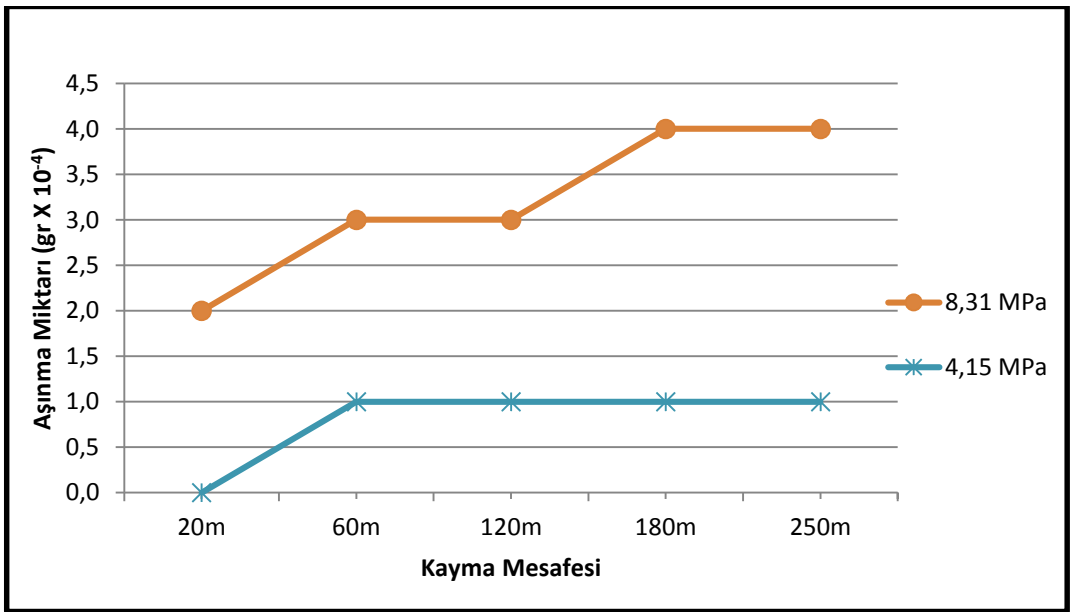


Malzeme	Cam elyaf takviyeli PTFE
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**136,74**
Yüzey basıncı (MPa)	**4,15**

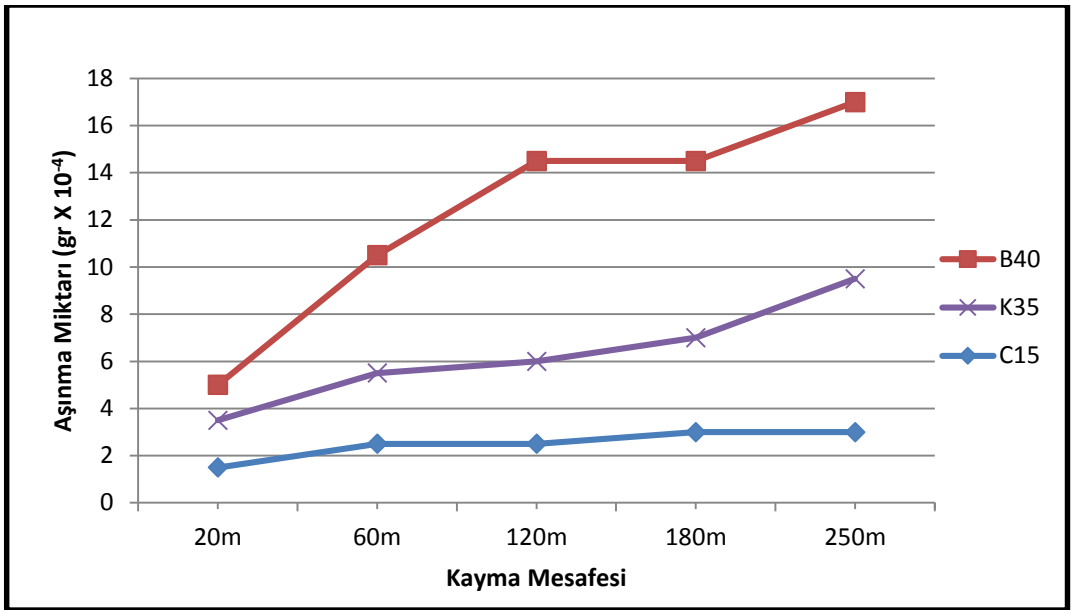


Malzeme	Cam elyaf takviyeli PTFE
İç çap (mm)	5,9
Dış çap (mm)	20
Yatak genişliği (mm)	10
Çalışma mesafesi (m)	250
Çalışma açısı (˚C)	**149,35**
Yüzey basıncı (MPa)	**8,31**

Şekil 7.21. 5,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numunelerinin çalışma açıları a) 4,15 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune, b) 8,31 MPa yüzey basıncında test edilmiş numune

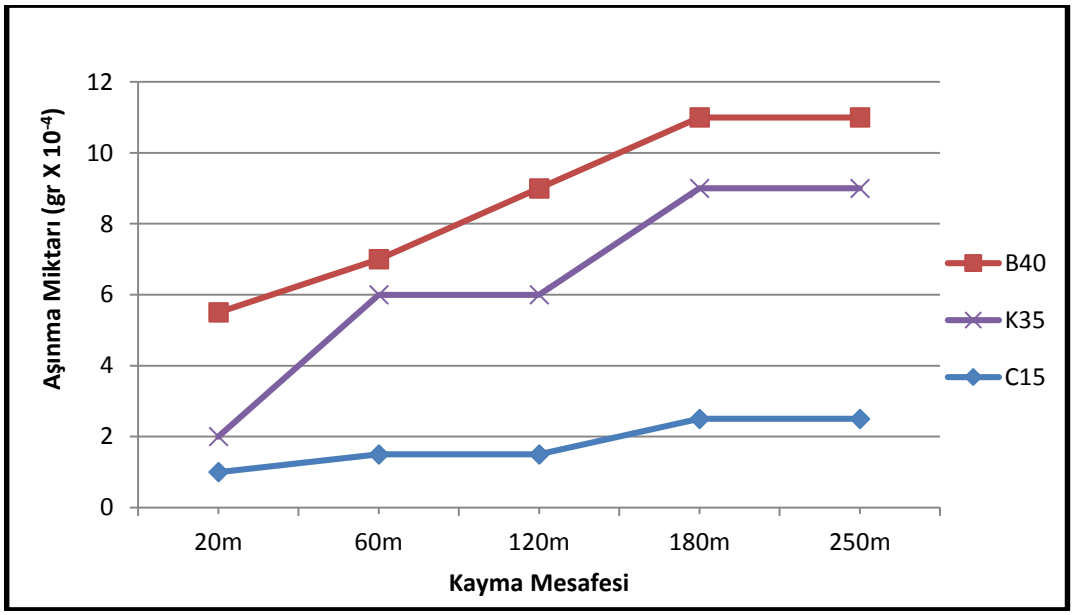


Şekil 7.22. 5,9 mm iç çaplı % 15 cam elyaf katkılı PTFE kompozit yatak deney numuneleri için, kayma mesafesi ve yüzey basıncı değişiminin aşınma miktarına etkisi



Şekil 7.23. 5,9 mm iç çaplı numuneler için 4,15 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi

7,9 mm iç çaplı deney numulerinde, 9,9 mm iç çaplı numunelere göre daha az aşınma miktarı meydana gelmiştir. 5,9 mm iç çaplı numunelerde ise aşınmalar 7,9 mm iç çaplı numunelere göre daha az olmuştur. Bu, yatakların iç çap değişiminin aşınma miktarı üzerine etkisini göstermektedir.



Şekil 7.24. 5,9 mm iç çaplı numuneler için 8,31 MPa yüzey basıncında, PTFE'ye bronz-karbon-cam elyaf takviyesinin aşınma miktarı üzerine etkisi

7.2. Kayma Mesafesi Değişiminin Aşınma Üzerine Etkisi

Kayma aşınması testi yapılmış kompozit perno yatağı deney numunelerinde, kayma mesafesindeki artma sonucunda aşınma kayıplarında da artışlar olmuştur. Numunelerin aşınma değerleri, hem takviye edilen malzeme çeşidinden hem de numunenin iç çap değişiminden etkilenmektedir.

Yapılan aşınma testleri sonucunda kayma mesafesindeki değişimden en az etkilenen ve aşınma direnci en yüksek olan kompozit malzemenin cam elyaf takviyeli PTFE olduğu tespit edilmiştir. PTFE matrise cam elyaf takviyesinin, aşınma dayanımını çok daha iyi geliştirmesi sonucunda, cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numuneleri daha iyi aşınma performansı sergilemiştir.

Karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinde ise, bronz takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinden daha az bir aşınma gözlenmiştir. Bunun sonucunda bronz takviyeli numunelere nazaran, karbon takviyeli numunelerin aşınma direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

İç çap değişiminin de etkili olduğu aşınma deneylerinde, iç çap değerleri en düşük olan numunelerin, en az aşınan numuneler olduğu sonucu elde edilmiştir.

7.3. Yüzey Basıncı Değişiminin Aşınma Üzerine Etkisi

Kayma aşınması testi yapılmış kompozit perno yataklarda yüzey basıncının artırılması, aşınma miktarını artırmıştır. Numunelerin iç çap değerlerindeki azalma ile, farklı oranlarda olmak kaydıyla üç çeşit takviye elemanlı kompozit deney numunelerinin her birinin aşınma miktarı da azalmıştır.

Kayma aşınması testleri sonucunda, temas yüzeyine uygulanan basınç değişiminden en az etkilenen ve aşınma direnci en yüksek olan numunelerin, cam elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numuneleri olduğu ispat edilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinin, bronz takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinden daha az aşınması, yüzey basıncı değişiminden daha az etkilendiğini göstermektedir. Bu durum aynı zamanda karbon takviyeli numunelerin, bronz takviyeli numunelere göre aşınma direncinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Kompozit perno yataklarının kuru sürtünme aşınmasında, yüzey basıncındaki artışla aşınma miktarlarında da artış olduğu, yüzey basıncı azaldıkça aşınma miktarının da azaldığı gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların, daha önce yapılmış benzer çalışmalarla uyumlu olduğu belirlenmiştir (Bagale ve ark., 2013).

7.4. Takviye Malzemesinin PTFE Kompozit Yatakların Aşınmasına Etkisi

% 40 bronz, % 35 karbon ve %15 cam elyaf takviye edilmiş kompozit perno yatağı deney numunelerinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda, her üç takviye malzemesinin, PTFE'nin aşınma karakteristiğini farklı şekilde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Takviyeli PTFE kompozit perno yataklarının kuru sürtünme aşınmasında, cam elyaf takviyeli kompozit yatakların en iyi aşınma direncine sahip olduğu ispat edilmiştir. Cam elyafın PTFE matrisle daha iyi bağ oluşturması sonucunda daha iyi aşınma performansı sergilemektedir.

Karbonun, PTFE matris içerisindeki iyi dağılımı, matrisle iyi bağ oluşturması sayesinde karbon takviyeli deney numuneleri bronz takviyeli deney numunelerinden daha az aşınmıştır.

Bronz takviyeli PTFE deney numunelerinin, bronzun PTFE matrisle zayıf bağ oluşturması sonucu en düşük aşınma dayanımına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

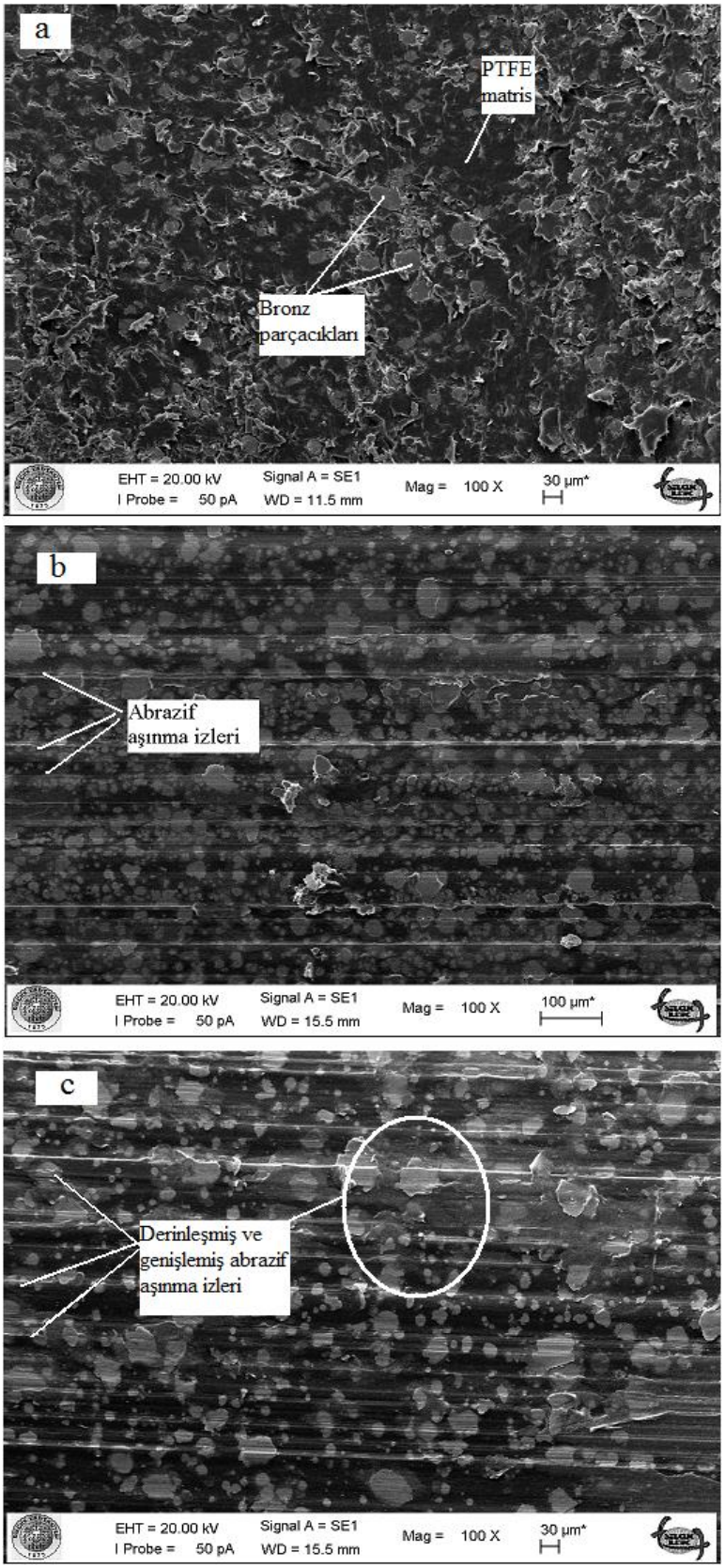
7.2. Aşınmış Yüzeylerin SEM Analizi

Deney numuneleri olarak kullanılan % 40 bronz takviyeli, % 35 karbon takviyeli ve % 15 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit yatakların çalışma öncesi ve sonrası SEM (taramalı elektron mikroskobu) fotoğrafları çekilmiştir. SEM fotoğrafları ile mikro yapı incelemeleri yapılarak, test edilmiş deney numunelerinde oluşmuş aşınma mekanizmaları araştırılmıştır. Üç farklı takviye elemanlı deney numunelerinin, artan yüzey basıncıyla aşınma yüzeylerindeki değişimler yorumlanmıştır.

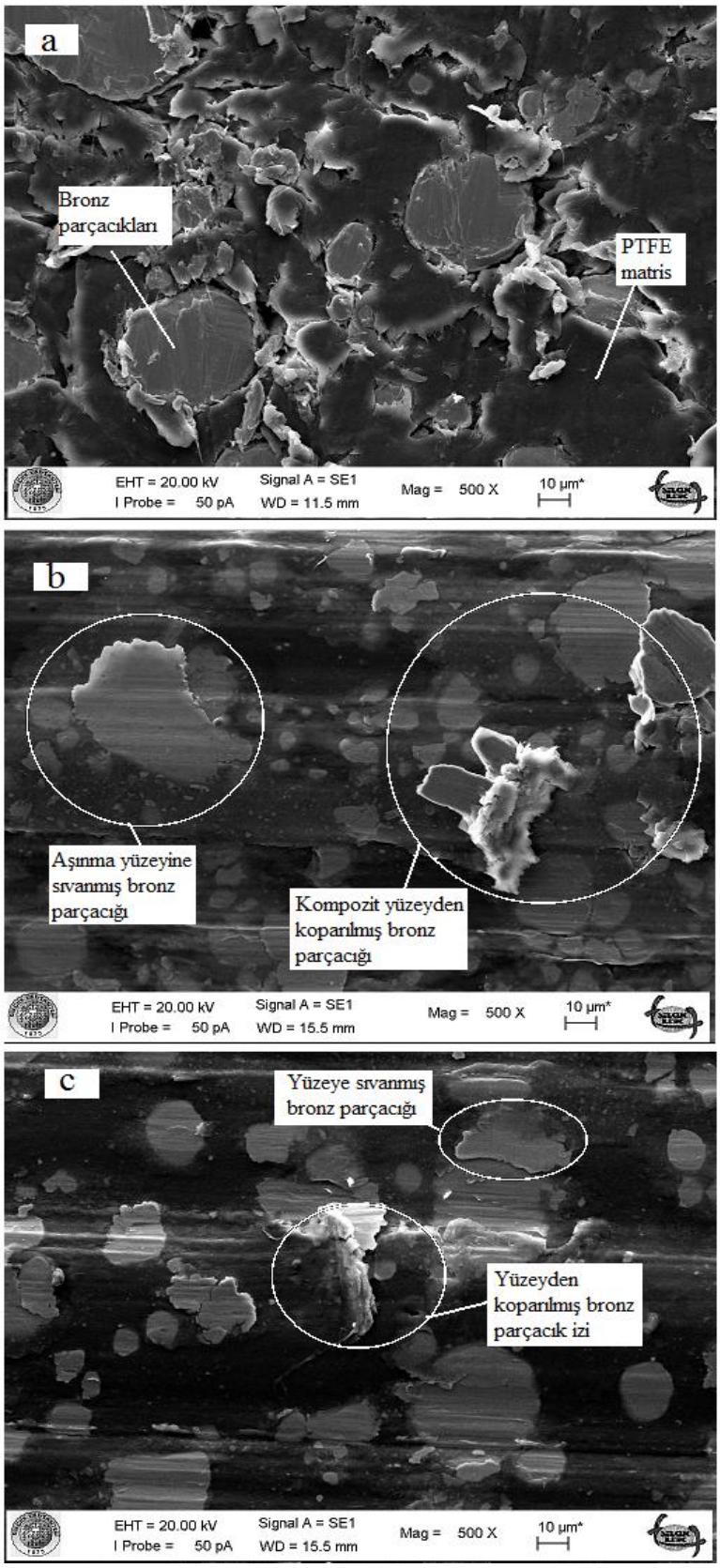
Deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası SEM görüntüsü 100X, 500X, 1000X ve 5000X büyütülmüş fotoğraflarda sırasıyla verilmiştir. Aşınma mekanizmaları SEM görüntüleri üzerinde gösterilerek açıklamalar yapılmıştır.

% 40 Bronz katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası 100X büyütmeli SEM fotoğraflarının gösterildiği Şekil 7.25a, Şekil 7.25b ve Şekil 7.25c'deki fotoğraflar karşılaştırıldığında, uygulanan yüzey basıncındaki artışın, aşınma sonucu yüzeyde oluşan abrazif aşınma izlerini derinleştirdiği görülmektedir. Uygulanan yüzey basıncı değeri 3,75 MPa'dan 5 MPa'a çıkarıldığında, yüzeydeki abrazif aşınma izleri daha belirgin çizgiler halini almış ve yapıdaki bronz parçacıkları yüzey üzerinde daha çok toplanmıştır. Bronzun aşınma direncinin PTFE'den yüksek olması sebebiyle PTFE'nin sürtünme alanından dışarı doğru yönlendirilmesi sonucunda yüzeyde bronz parçacıklarının biriktiği görülmektedir.

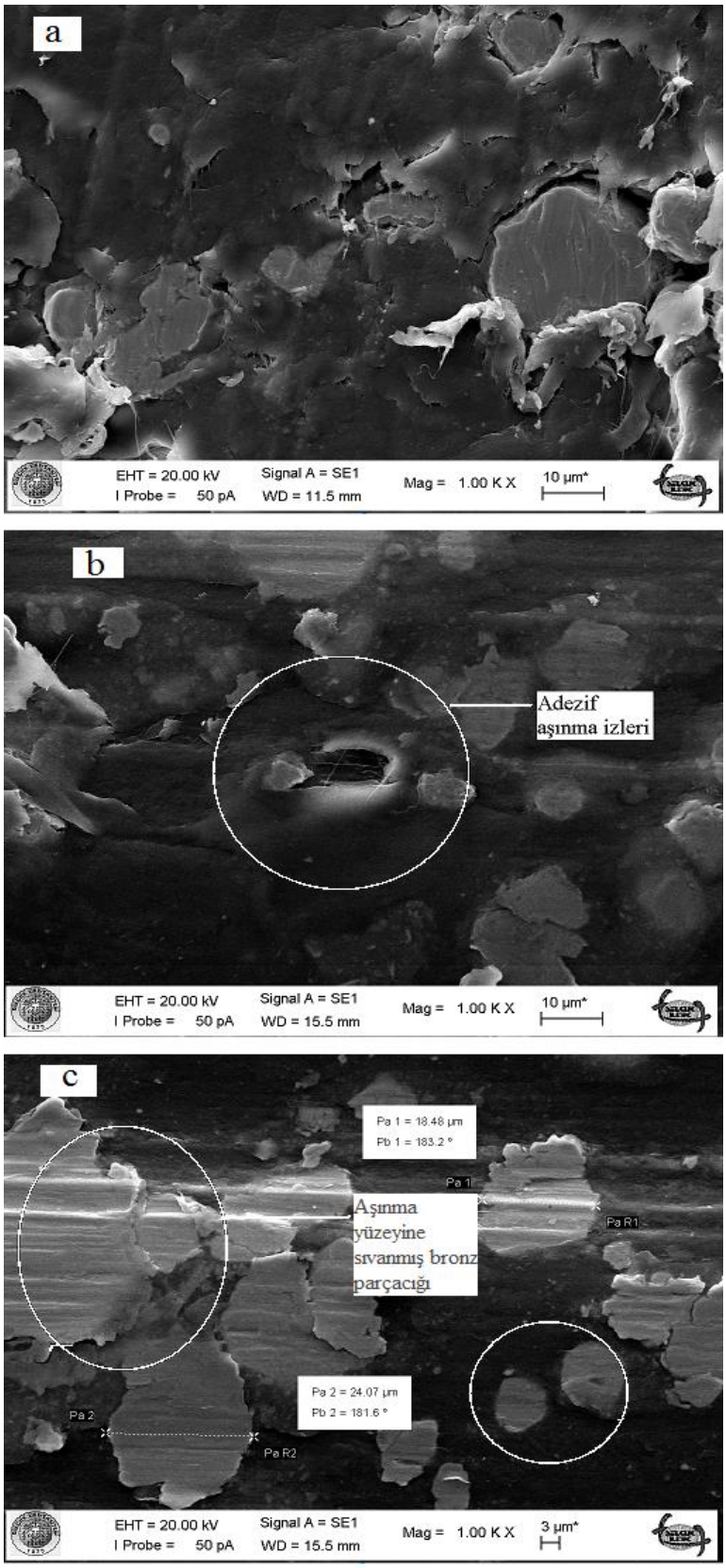
Bronz katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası 500X büyütmeli SEM fotoğraflarının gösterildiği Şekil 7.26a, Şekil 7.26b ve Şekil 7.26c'deki mikro yapı fotoğrafları karılaştırıldığında, aşınma sonucunda malzemenin mikro yapısında kopmalar olduğu görülmektedir. Yüzey basıncı değerindeki artış ise yüzeyler arasında oluşan adezyonu artırmıştır. Artan yüzey basıncı, kopan parçacıkların daha yumuşak matris malzemesi olan PTFE içerisine gömülmesini ve sürtünme yüzeyine sıvanmasını artırmıştır.



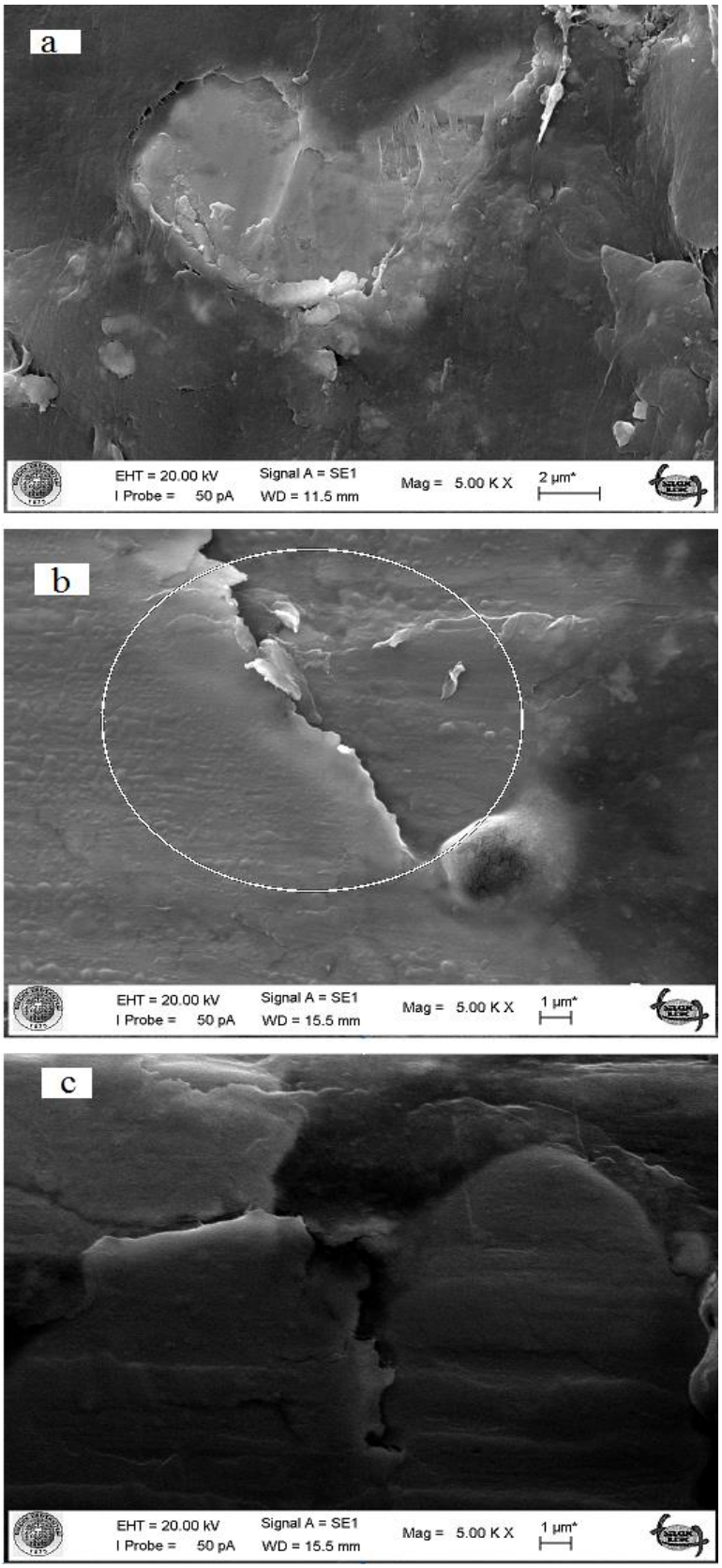
Şekil 7.25. % 40 bronz takviyeli PTFE kompozit numunelerin 100X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.26. % 40 bronz takviyeli PTFE kompozit numunelerin 500X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.27. % 40 bronz takviyeli PTFE kompozit numunelerin 1000X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



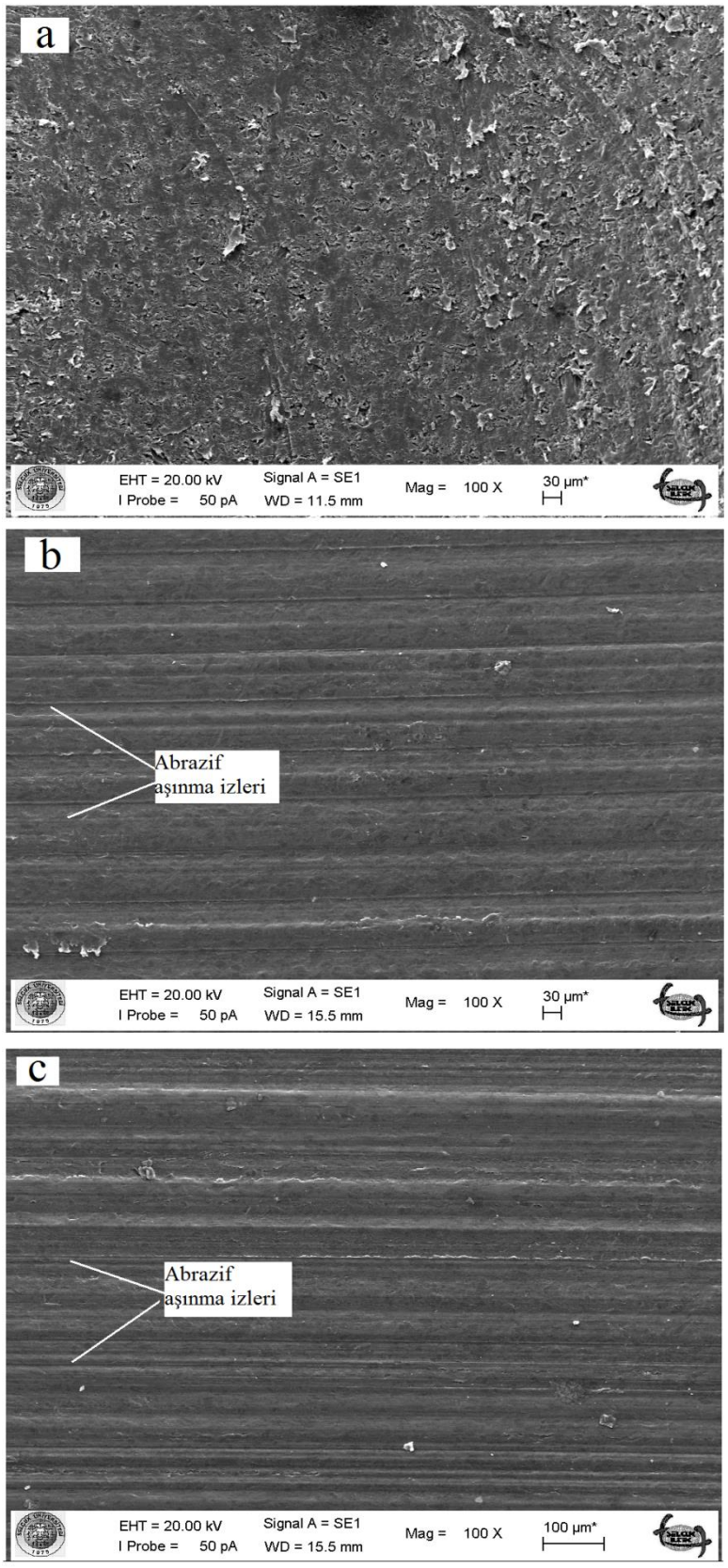
Şekil 7.28. % 40 bronz takviyeli PTFE kompozit numunelerin 5000X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda

Bronz katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası yüzeylerinin SEM resimleri 1000X büyütme ile çekilmiştir. 1000X büyütmeli SEM fotoğraflarının bulunduğu Şekil 7.27 incelendiğinde, Şekil 7.27b'de yuvarlak içine alınmış bölgede, adezif aşınma sonucu kompozit malzeme yüzeyinden kaldırılmış parçacığın izi görülmektedir. Şekil 7.27c, Şekil 7.27b ile kıyaslandığı zaman yük artışının, kompozit yapı içerisindeki bronz parçacıklarının matris yüzeyi üzerinde sıvanmasında artışa sebep olduğu görülmektedir. Aşınmış yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında, aşınmanın malzemenin yüzey yapısını değiştirdiği ve yük değişiminin aşınma yüzeyine etki ettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

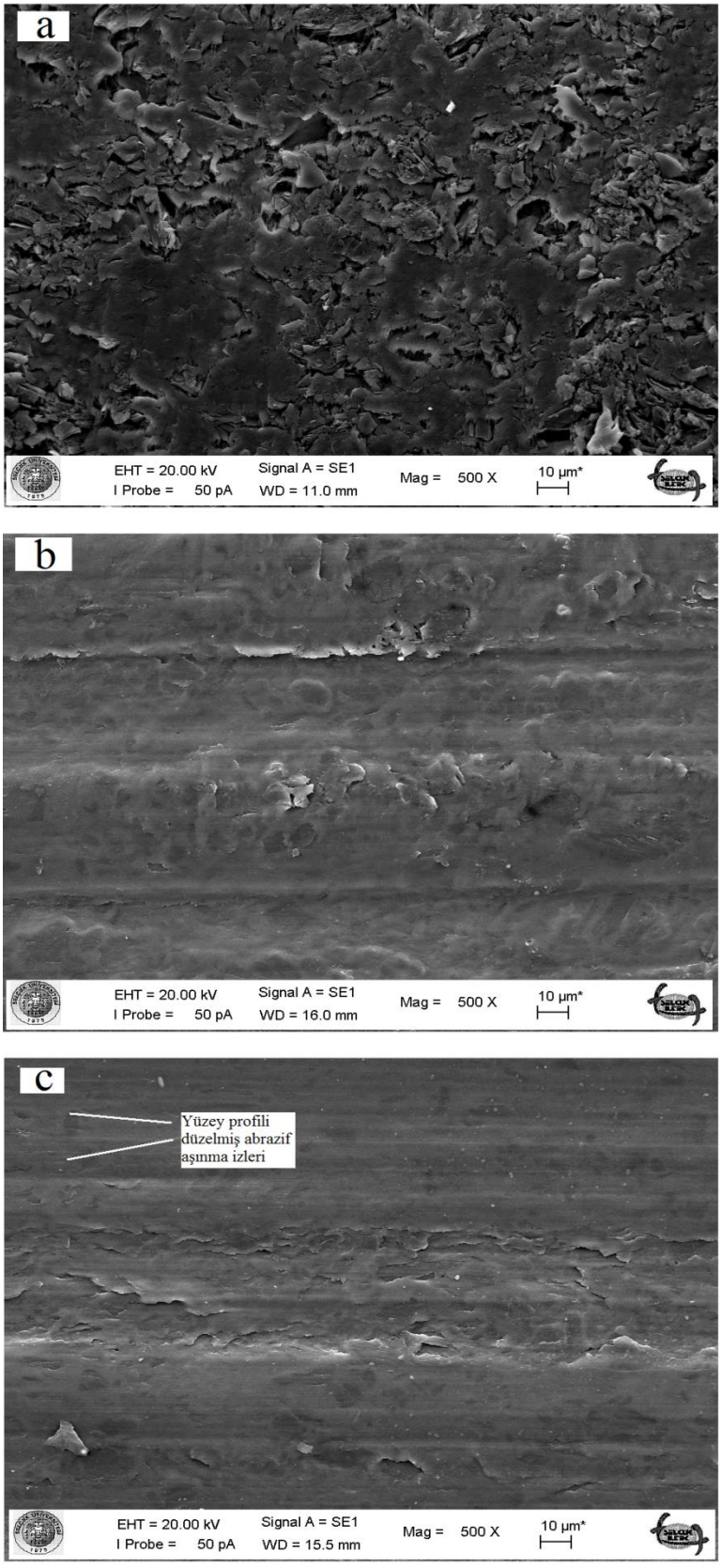
Bronz katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası yüzeylerinin Şekil 7.28'deki 5000X büyütme ile çekilmiş SEM fotoğrafları incelendiğinde, Şekil 7.28b'de bronz partiküllerinin yüzeyinden kaldırılmış parçacıkların izleri görülmektedir. Şekil 7.28c, Şekil 7.28b ile karşılaştırıldığında, bronz parçacıklarının yüzeyinden koparılan parçacık izlerinin azaldığı sonucuna ulaşılır. Yüzey yapısında görülen bu değişimin sebebi, aşınma yüzeyine uygulanan basıncın artırılmasıdır. Yüzey basıncındaki artış kopan parçacıkların aşınma yüzeyine sıvanmasını ve gömülmesini artırmaktadır.

% 35 Karbon katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası yüzeylerindeki mikro yapı değişiklikleri Şekil 7.29a, Şekil 7.29b ve Şekil 7.29c'deki 100X büyütmeli SEM fotoğraflarıyla incelenmiştir. Şekil 7.29b'de görülen abrazif aşınma izlerinin uygulanan yüzey basıncı değeri 3,75 MPa'dan 5 MPa'a artırıldığında, abrazif aşınma çizgilerinin derinliğinin azaldığı görülmektedir. Yükün artırılması sonucu sürtünme alanında artan yüzey basıncı, aşınmış yüzeydeki abrazif aşınma çizgilerinin derinliğini azaltmaktadır. Literatürlerde karbon takviyeli PTFE ile yapılmış benzer çalışmalarda yüzeye uygulanan yükün artırılmasının aşınmış yüzeydeki pürüzlülüğü azalttığı sonucu elde edilmiştir (Golchin ve ark., 2012). Bu ise çalışmamızı desteklemektedir.

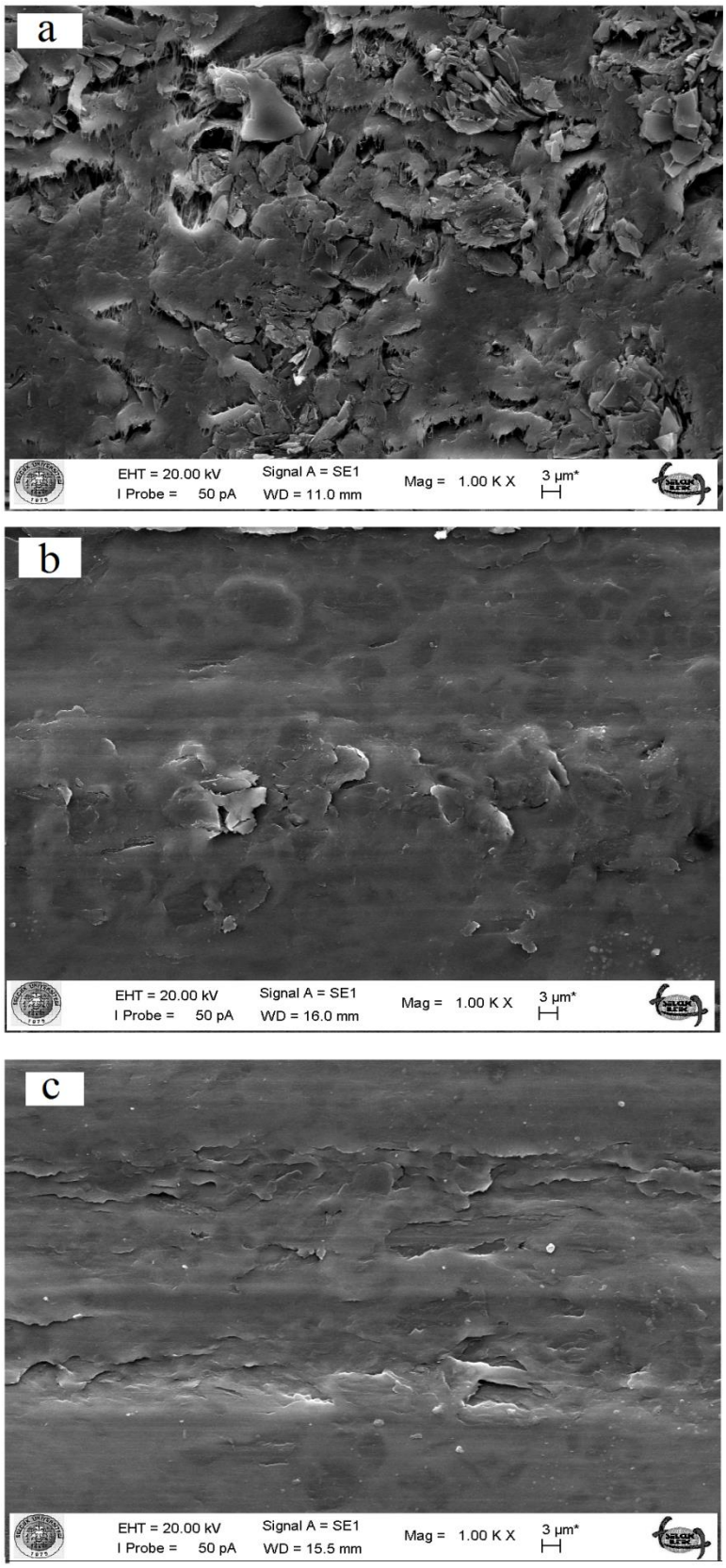
Karbon katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrasında yüzeylerinin mikro yapıları Şekil 7.30'daki 500X büyütmeli SEM fotoğrafları ile analiz edilmiştir. Şekil 7.30b ve Şekil 7.30c'deki SEM fotoğraflarında, adezif aşınma ve abrazif aşınmanın birlikte oluşturduğu aşınma izleri görülmektedir. Yüzey basıncı değerinin 3,75 MPa'dan 5 MPa'a artırılması ile aşınma izlerindeki derinlikler azalmıştır.



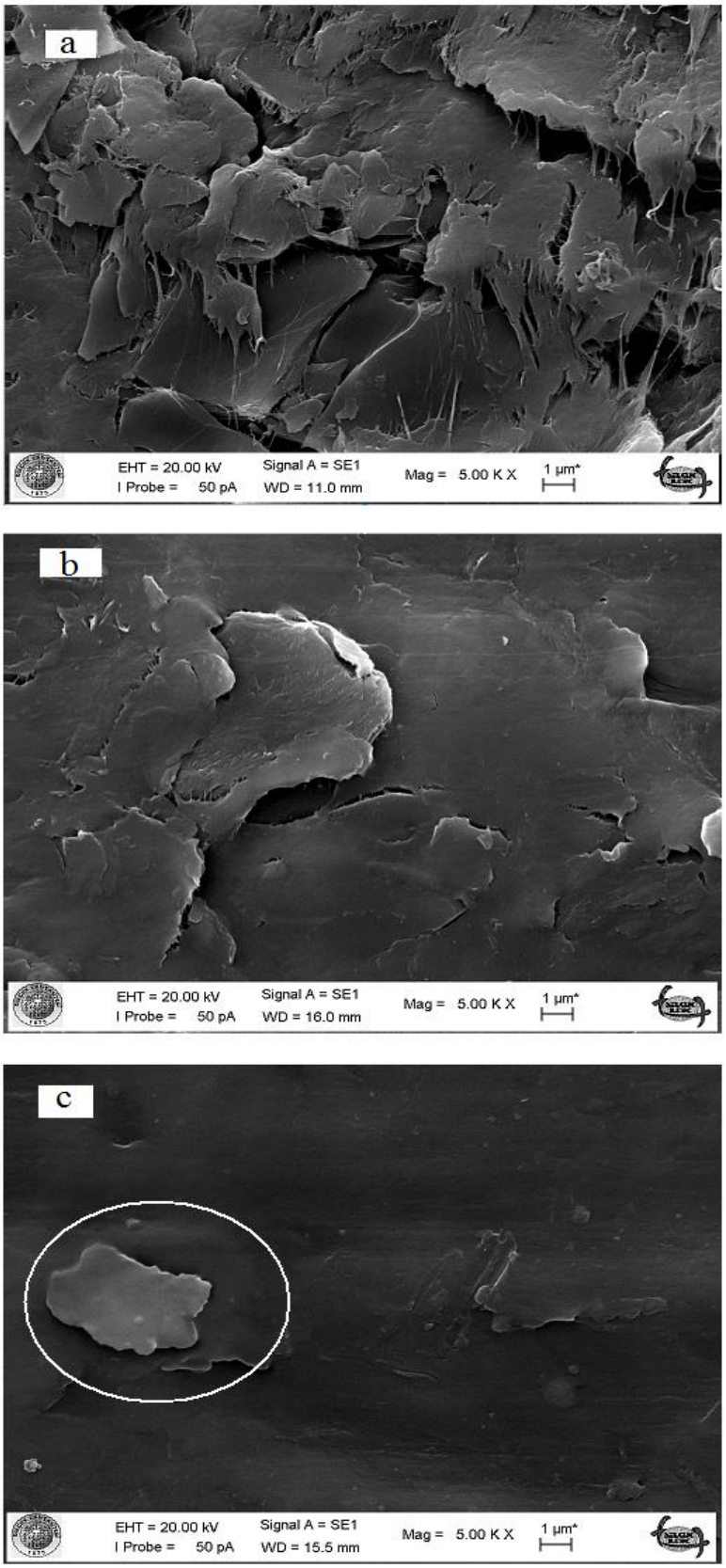
Şekil 7.29. % 35 karbon takviyeli PTFE kompozit numunelerin 100X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.30. % 35 karbon takviyeli PTFE kompozit numunelerin 500X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.31. % 35 karbon takviyeli PTFE kompozit numunelerin 1000X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



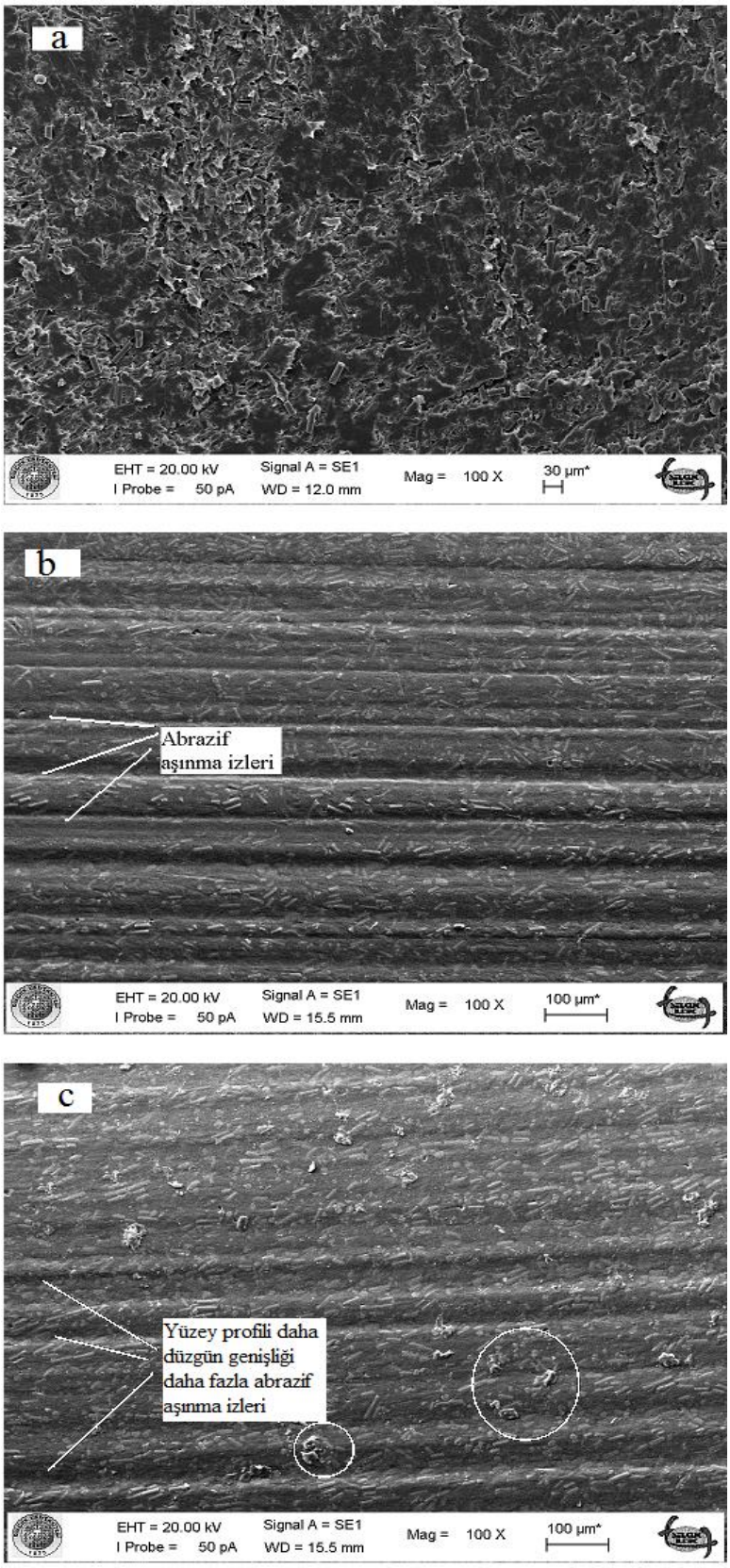
Şekil 7.32. % 35 karbon takviyeli PTFE kompozit numunelerin 5000X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda

Karbon katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesinde ve çalışma sonrasında yüzey mikro yapıları Şekil 7.31'deki 1000X büyütmeli SEM fotoğrafları ile incelenmiştir. Şekil 7.31b'de adezif aşınma sonucu kompozit malzeme yüzeyinden koparılmış parçacıkların izleri görülmektedir. Şekil 7.31c'de yüzey basıncının 3,75 MPa'dan 5 MPa'a artırılması sonucu adezif aşınmanın arttığı, karbon takviyeli PTFE kompozit yüzeyden daha fazla parçacık koptuğu görülmektedir. Bunun da, aşınma miktarındaki artışın sebebi olduğu belirlenmiştir.

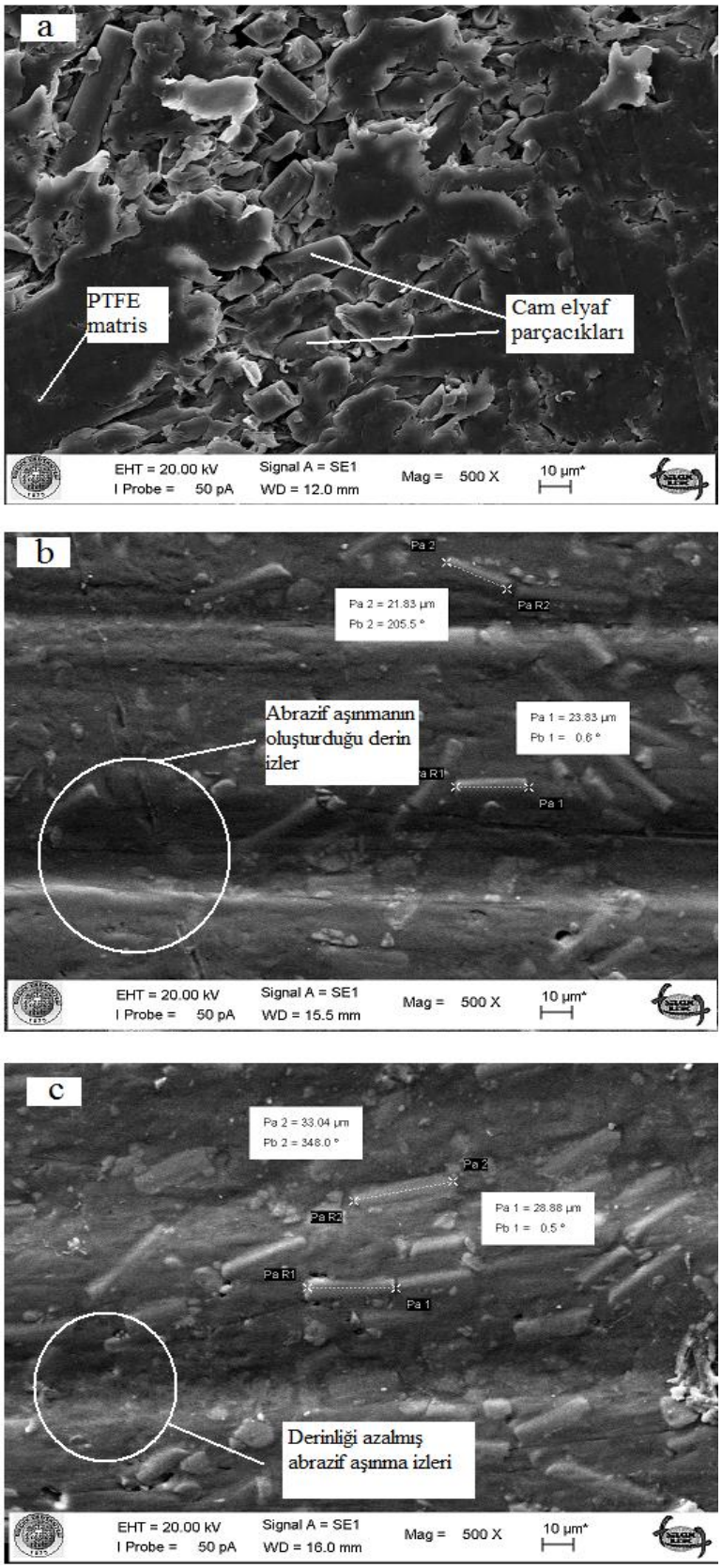
Karbon katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesindeki ve çalışma sonrasındaki yüzey mikro yapıları Şekil 7.32'de 5000X büyütmeli SEM fotoğrafları ile incelenmiştir. Karbon katkılı PTFE deney numunesinin 3,75 MPa yüzey basıncında aşınmış SEM fotoğrafı (Şekil 7.32b) incelendiğinde, aşınma öncesindeki tabakalı yapının uygulanan yüzey basıncı ile azaldığı görülmektedir. 5 MPa yüzey basıncında çalışan numunelerin SEM fotoğrafında (Şekil 7.32c) ise kompozit yüzeyden kopan parçacıkların matrise gömüldüğü görülmektedir. Karbonun küçük boyutlarda olması, matris içerisine iyi dağılımı ve yağlayıcı özelliği sayesinde, karbon takviyeli PTFE kompozit deney numunelerinde aşınma deformasyonu daha az gerçekleşmiştir. Karbon takviyeli numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM mikro yapı incelemelerinde, bronz takviyeli numunelere göre daha az aşınma deformasyonu oluştuğu tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Conte ve ark., 2012).

Şekil 7.33'de % 15 cam elyaf katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası mikro yapı analizleri, 100X büyütmeli SEM fotoğraflarıyla yapılmıştır. Şekil 7.33a'da çalışma öncesi SEM fotoğrafı, Şekil 7.33b ve Şekil 7.33c'de ise sırasıyla 3,75 MPa ve 5 MPa yüzey basıncında test edilmiş numunelerin SEM fotoğrafı görülmektedir. Şekil 7.33b'de görülen abrazif aşınma izlerinde, uygulanan yüzey basıncı değeri 3,75 MPa'dan 5 MPa'a artırıldığında belirgin bir azalış görülür. Artan yüzey basıncı, abrazif aşınmanın oluşturduğu aşınma izlerindeki derinliği azaltmış, aşınma izlerindeki genişliği ise artırmıştır.

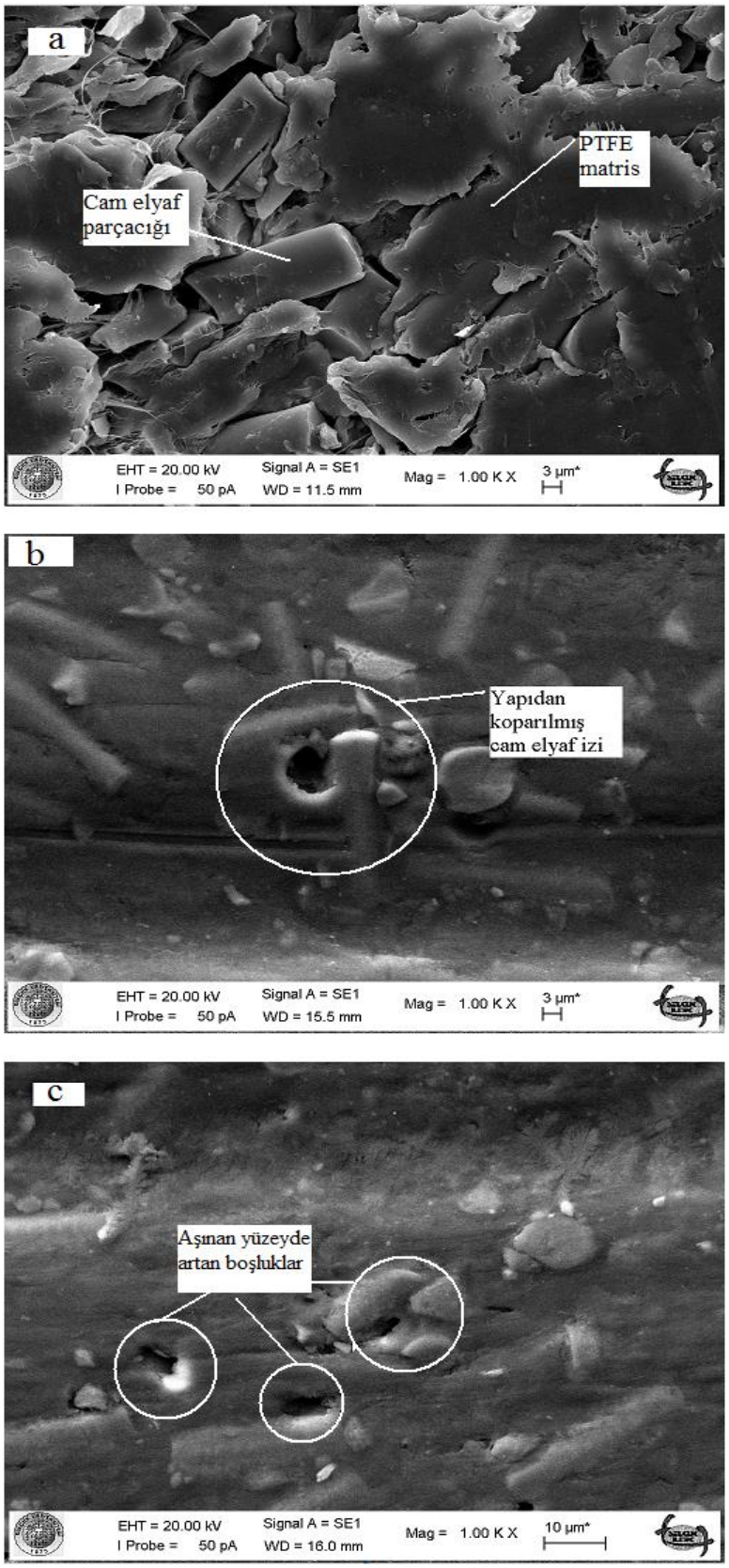
Cam elyaf katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi (Şekil 7.34a) ve çalışma sonrası (Şekil 7.34b ve Şekil 7.34c) mikro yapı incelemelerinin yapıldığı Şekil 7.34'de, çalışma sonrası yüzey mikro yapısında adezif aşınma ve abrazif aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Yüzey basıncı değerinin 3,75 MPa'dan 5 MPa'a çıkarıldığı durumda, adezif aşınma izlerinin genişliğinin arttığı, derinliğinin ise azaldığı görülmektedir.



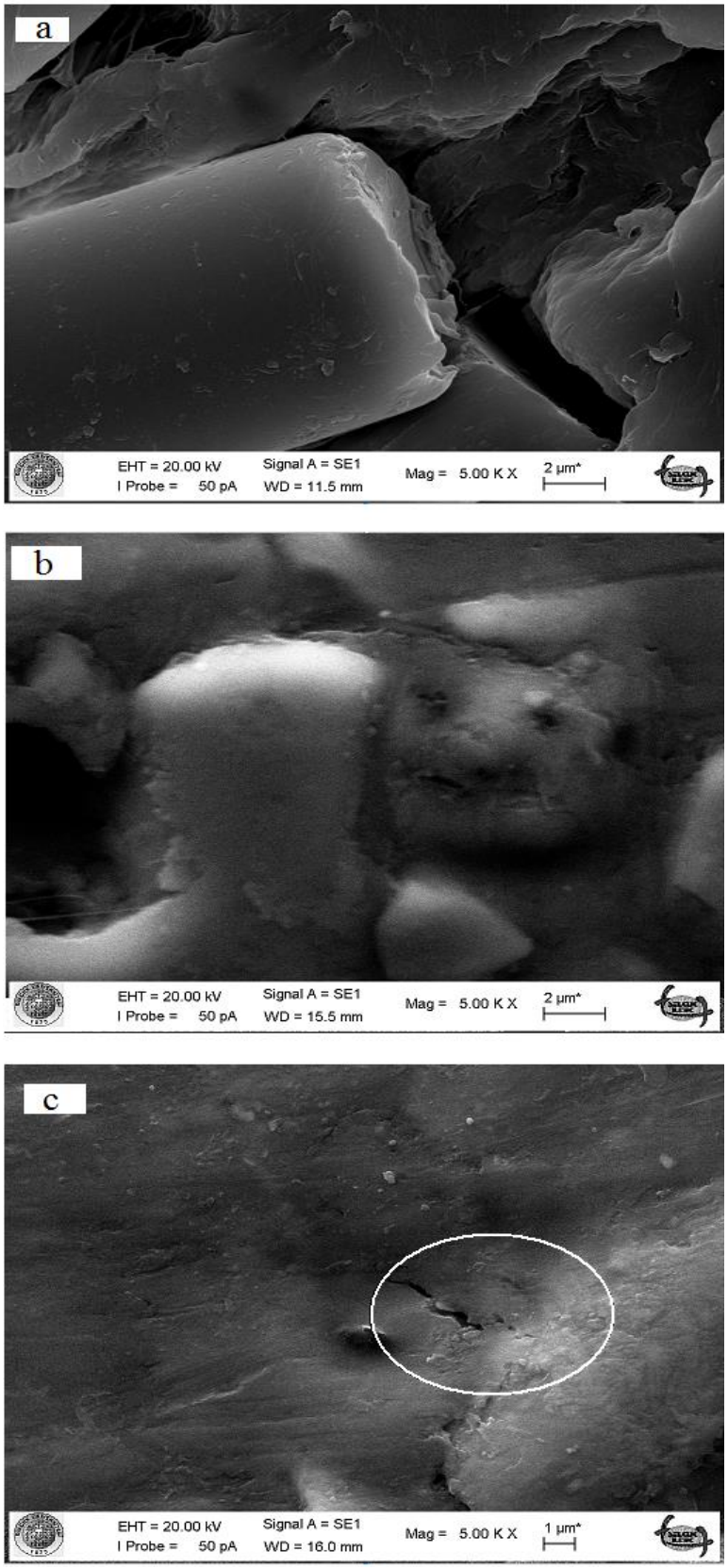
Şekil 7.33. % 15 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerin 100 X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.34. % 15 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerin 500 X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.35. % 15 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerin 1000 X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda



Şekil 7.36. % 15 cam elyaf takviyeli PTFE kompozit numunelerin 5000 X büyütmeli SEM görüntüleri a) çalışma öncesi, b) 3.75 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda, c) 5 MPa yüzey basıncında çalışma sonucunda

% 15 cam elyaf katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası mikro yapı analizleri 1000X büyütmeli SEM fotoğrafları ile Şekil 7.35'de gösterilmiştir. Çalışma sonrası SEM fotoğrafları verilen numunelerde (Şekil 7.35b ve Şekil 7.35c) adezif ve abrazif aşınma sonucunda kompozit malzeme yüzeyinden kaldırılmış parçacıkların izi görülmektedir. 3,75 MPa yüzey basıncında çalışmış numunelere göre (Şekil 7.35b), 5 MPa yüzey basıncında çalışmış numunelerin yüzeyinde adezif aşınmanın arttığı görülmektedir (Şekil 7.35c). Cam elyaf katkılı PTFE kompozit numunelerin yüzeyinde görüldüğü gibi, kopan parçacık izlerinin etrafında diğer kompozit deney numunelerine göre daha üniform bir mikro yapı oluşması, sürtünme esnasında daha düzgün bir transfer film yüzeyi oluşmasını sağlamış ve neticede aşınma direnci artmıştır.

Cam elyaf katkılı PTFE'den hazırlanmış deney numunelerinin çalışma öncesi ve çalışma sonrası mikro yapısı 5000X büyütmeli SEM fotoğrafları ile Şekil 7.36'de gösterilmektedir. Şekil 7.36'deki SEM fotoğraflarında, kopmuş ve yüzeye gömülmüş cam elyaf parçacıkları görülmektedir. 3,75 MPa yüzey basıncında test edilmiş numunenin SEM fotoğrafında (Şekil 7.36b) yüzeyden elyaf parçacığının koparıldığı ve elyaf kopan bölgenin etrafının matris içinde bulunan diğer elyaflarla çevrili olduğu görülmektedir. Şekil 7.36c'de ise yüzey basıncının 5 MPa'a artırılmasının, elyafı matrisi içine doğru hareket ettirdiğini ve yüzeyde birikinti şeklinde elyaf görünümünün azaldığı görülmektedir.

Çalıştığımız üç çeşit kompozit malzemelerle ilgili, yapmış olduğumuz aşınma ve SEM analizleri sonucunda, literatürdeki çalışmalara paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Literatürlerdeki bronz, karbon ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozit malzemeleriyle yapılmış çalışmalar incelendiğinde, parametre ve deney seti farklılıkları sebebiyle aynı aşınma değerleri elde edilememiş, fakat benzer sonuçlar elde edilmiştir.

SEM görüntülerinde bronzun ve cam elyafın PTFE matrisi içindeki dağılımları görülebilirken, karbon PTFE matrisi içerisinde seçilememektedir. Bu durum, kompozit malzeme üretilirken matris malzemesi olan PTFE'nin karbonun etrafını sarıp örtmesi ve iyi bir bağ oluşturması sonucu karbonun matrise gömülmesi ile açıklanabilir.

Daha önce yapılmış benzer çalışmalar incelendiğinde karbon takviyeli PTFE'nin aşınma direncinin, cam elyaf takviyeli PTFE'den daha az olduğu, cam elyafın ise aşınmaya karşı daha dirençli bir yapıda olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapmış olduğumuz deneysel çalışmalardan şu sonuçlara ulaşıldı:

- Matris içerisindeki takviye edilmiş malzeme çeşitlerinin, kompozit malzemenin aşınma karakteristiği üzerinde etkili olmuştur.
- Perno yataklarında, yatak üzerine gelen yükün değişmesinin, yatağın aşınması üzerinde etkili olduğu ve yükün artması sonucu aşınmanın arttığı, yatağın aşınma ömrünün ise azaldığı deneysel verilerle tespit edilmiştir.
- Yükteki artışın her üç kompozit yatak numunelerine de farklı oranlarda etki ettiği gösterilmiştir.
- Deneysel çalışmasını gerçekleştirmiş olduğumuz bu üç çeşit kompozit malzemeler içinde, cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin aşınma direnci en yüksek kompozit malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

8.2. Öneriler

- PTFE malzemesinin kullanıldığı kaymalı yatak uygulamalarında, takviye edilen dolgu malzemeleri tribolojik özellikleri geliştirdiği için, molibden disülfür, titanyum oksit gibi dolgu malzemelerinin de PTFE matris içerisine takviye edilerek çalışmalar yapılması, tribolojik özelliklerin araştırılması açısından faydalı olabilir.
- Numunelerin iç çap değişiminin aşınma üzerinde etkisi olduğu için, değişik iç çaplardaki perno yataklarıyla daha detaylı bir deneysel çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

Akkurt, M., 1990, Makine Elemanları, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Akkurt, S., 1991, Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayın Evi, İstanbul.

Bagale, D., Shekhawat, S. and Chaudhari, J., 2013, Wear analysis of polytetrafluoroethylen and it's composites under dry conditions using design-expert, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(1), 1-5

Bijwe, J., Neje, S., Indumathi, J. and Fahim, M., 2002, Friction and wear performance evaluation of carbon fibre reinforced PTFE composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21, 1221-1240

Bijwe, J., Sen, S. and Ghosh, A., 2005, Influence of PTFE content in PEEK–PTFE blends on mechanical properties and tribo-performance in various wear modes, *Wear*, 258, 1536-1542

Burris, D., L., Sawyer, W., G., 2006, A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite, *Wear*, 261, 410–418

Chenga, X., Xuea, Y. and Xieb, C., 2003, Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earths-modified glass fiber, *Materials Letters*, 57, 2553–2557

Conte, M., Igartua, A., 2012, Study of PTFE composites tribological behavior, *Wear*, 296, 568-574

Erten, A., 2011, Kompozit pernoların bozulma davranışlarının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Franke, R., Lehmann, D., and Kunze, K., 2007, Tribological behaviour of new chemically bonded PTFE polyamide compounds, *Wear*, 262, 242-252

Friedrich, K., Zhang, Z. and Schlarb, A.,K., 2005, Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology*, 65, 2329-2343

Golchin, A., 2010, Tribological performance of PTFE composites at breakway in sliding lubricated contacts, Master Thesis, *Lulea University of Technology*, İsveç.

Golchin, A., Simmons, G., F. and Glavatskih, S., B., 2012, Break-away friction of PTFE materials in lubricated conditions, *Tribology International*, 48, 54-62

Grün, F., Godor, I., Sailer, W. and Ganser, H., P., 2012, Simulation of tribological functionality of heterogeneous tribomaterials, *Tribology International*, 46, 119–127

Gu, D., Yang, Y., Qi, X., Deng, W. and Shi, L., 2012, Influence of Weave Structures on the Tribological Properties of Hybrid Kevlar/PTFE Fabric Composites, *Chinese Journal Of Mechaiıcal Engineering*, 1-8

Jia, B.,B., Li, T.,S., Liu, X., J. and Cong, P., H., 2007, Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, *Wear*, 262, 1353-1359

Kaleli, H., 2011, Tribololi Prensipleri ve Uygulama Örnekleri [online], Yıldız Teknik Üniversitesi,http://www.yildiz.edu.tr/~kaleli/TribolojiPrensipleriveUygulamalar.pdf [Ziyaret Tarihi: 27 Haziran 2013].

Khoddamzadeh, A., Liu, R., Wu, X., 2009, Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed Tribaloy alloy additive for sliding bearings, *Wear*, 266, 646-657.

Klass, N., V., and Marcus, K. and Kellock, C., 2005, The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene, *Tribology International*, 38, 824–833

Koike, H., Mizobe, K., Oyama, S., Kashima, Y., Kanemasu, K. and Kida, K., 2013, Observation of wear on PEEK-PTFE hybrid radial bearings, *Advanced Materials Research*, 683, 385-390

Kulkarni, P., V., Chapkhhane N. K., 2012, Development and testing of PTFE based Composite Bearing Material for Turbine Pump, 1 (6), 15-20

Kurbanoğlu, C., 2006, Makine Elemanları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Martini, C., Ceshcini, L., Tarterini, F., Paillard, J.,M. and Curran, J.,A., 2010, PEO layers obtained from mixed aluminate–phosphate baths on ti–6al–4v: dry sliding behaviour and influence of a PTFE topcoat, *Wear*, 269, 747–756

Özsaraç, U., 1999, Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

Rezaei A., Ost, W., Paepegem, W., V., Baets, P. and D., Degrieck, J., 2011, Experimental study and numerical simulation of the large-scale testing of polymeric composite journal bearings: three-dimensional and dynamic modeling, *Wear*, 270, 431-438

Sharma, M., Bijwe, J., 2010, Surface tailoring of carbon fabric reinforced PES composites with PTFE filler in micro and nano sizes, *NSTI- Nanotech*, 1, 713-716

Shi, M., Miyazawa F., Tobe, S. and Stolarski, T. A. , 2005, The Friction and Wear Properties of PTFE Composite-Thermal Spray Metallic Binary Coatings, *Materials Transactions*, 46 (1), 84-87

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.

Tanaka, K., 1986, Friction and wear of polymer composites, Volume 1, Chapter 5, Ed: Friedrich, K., Elsevier Book Series, 137-174.

Tekin, K., S., Akkök, M., 2011, Sınır yağlama koşullarında çalışan yataklar için aşınma test düzeneği tasarımı, yapımı ve iş makineleri yataklarında aşınma analizi, Mühendis ve Makine, 616, 70-79

Tevruz, T., 1996, Saf ve cam elyafı dolgulu politetrafloroetilen (ptfe) radyal yatakların tribolojik davranışları, *9. Müh. Sempozyumu Bildirileri Kitabı*, Isparta, 1-6.

Tevruz, T., 1998, Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings, *Wear*, 230, 61-69

Tevruz, T., 1998, Tribological behaviours of carbon-filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings, *Wear*, 221, 61-68

Theiler, G., Hübner, W., Gradt, T., Klein, P. and Friedrich, K., 2002, Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures, *Tribology International*, 35, 449-458

Unal, H., Kurtulus, E., Mimaroglu, A. and Aydin, M., 2010, Tribological performance of ptfe bronze filled composites under wide range of application conditions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 2184-2191

Unal, H., Mimaroglu, A., Kadıoglu, U. and Ekiz, H., 2004, Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions, *Materials and Design*, 25, 239–245

Unal, H., Sen, U. and Mimaroglu, A., 2006, An approach to friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composite, *Materials and Design*, 27, 694-699

Unal, H., Sen, U. and Mimaroglu, A., 2007, Study of Abrasive Wear Volume Map for PTFE and PTFE Composites, *Appl. Compos. Mater.*, 14, 287–306

Ünlü, B., S., Atik, E. and Köksal, S., 2009, Tribological properties of polymer-based journal bearings, *Wear*, 30, 2618-2622

Wang, Y. and Yan, F., 2007, A study on tribological behaviour of transfer films of PTFE/bronze composites, *Wear, 262*, 876–882

Wang, Y. and Yan, F., 2007, Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites, *Wear, 261*, 1359-1366

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Seyit Mehmet DEMET
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	KONYA / 12.07.1988
Telefon	**:**	
Faks	**:**	
e-mail	**:**	smdemet@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Konya Lisesi, Meram, KONYA	2005
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2010
Yüksek Lisans	:		
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2010 -2010	HİDROKON A.Ş.	Makine Mühendisi
2011 - 2012	Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2012 - …	Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Triboloji, makine elemanları.

YABANCI DİLLER

İngilizce