



**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT PERNOLARIN BOZULMA  
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Abdullah ERTEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos–2011**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah ERTEN tarafından hazırlanan “KOMPOZİT PERNOLARIN BOZULMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 09/08/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Mesut UYANER

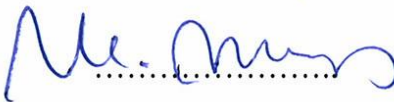
#### Danışman


Doç. Dr. Hüseyin İMREK

#### Üye

Yrd. Doç Dr. A. Serhat ERSOYOĞLU

### İmza

  
.....

  
.....

  
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Bayram SADE  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 10201076 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdullah ERTEN  
09.08.2011

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## KOMPOZİT PERNOLARIN BOZULMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

**Abdullah ERTEN**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Hüseyin İMREK**

**2011, 97 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Mesut UYANER**

**Doç. Dr. Hüseyin İMREK**

**Yrd. Doç. Dr. A. Serhat ERSOYOĞLU**

Bu çalışmada karbon elyaf kaplı çelikten imal edilmiş pernolar ile çelik pernoların çelik yatak içerisinde değişik yükleme şartları altında bozulma durumları incelenmiş ve birbiriyle mukayese edilmiştir. Çelik perno malzemesi olarak C45 yatak malzemesi olarak ise 42CrMo4 kullanılmıştır. Bu çalışma için perno testlerinin yapılacağı özel bir deney seti tasarlanıp imal edilmiş ve sonrasında bu deney seti üzerinde planlanan çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyler perno üzerine uygulanan yükler ve aşınma mesafeleri değiştirilerek yapılmıştır. Kullanılan farklı iki tip perno numunesinin yük ve aşınma mesafeleri karşısında ki aşınma ve bozulma durumları incelenmiştir. Deneylerde kullanılan değişik yükleme durumları için pernolar üzerinde oluşan gerilme durumları KISS Soft paket programı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Karbon Elyaf Takviyeli kompozit, Kompozitlerde Aşınma, Pernolar, Yataklar,

## **ABSTRACT**

**Ms. THESIS**

### **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FAILURE BEHAVIOR OF COMPOSITE PIVOT PIN JOINTS**

**Abdullah ERTEN**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Selcuk University  
Mechanical Engineering Department**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK**

**2011, 97 Pages**

#### **Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER  
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK  
Asst. Prof. Dr. A. Serhat ERSOYOĞLU**

In this study, carbon-fiber-coated steel pivot pin with steel pivot pin, in the steel bearing under various loading conditions investigated corrosion cases and has been compared with each other. C45 is used as steel pivot pin material and 42CrMo4 is used as bearing material. This study tests will be made for the pivot pin after a test kit designed and manufactured, and this set of experiments carried out on the planned work. The experiments were made by changing the pivot pin on the applied loads and wear distances. Two different types of load and wear pivot pin samples used in the face of the distances that the wear and deterioration are examined. Used in the experiments of different loading conditions, stress conditions on the pivot pin with the help of calculations made and the values were compared by using KISS Soft package program.

**Keywords:** Bearing , Carbon fiber reinforced composite, Pivot pin, Wear of composites,

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, tezin her aşamasında bana yardımcı olan ve destek veren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin İMREK'e, teşekkürü bir borç bilirim.

Tez aşamasında yardımlarını aldığım Dr. Mak. Mühendisi Mehmet BAĞCI ve Öğr. Göv. Veysel FIRAT ayrıca teşekkür ederim.

Tez süresinde Konyada bana her türlü desteği sağlayan Selver Aykut ATEŞ çiftine, ayrıca tez çalışmam süresince bana destek olan eşim Hilal ERTEN' ne ve bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Abdullah ERTEN  
KONYA-2011

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>2</b>
<b>3. TEORİK ESASLAR</b> .....	<b>4</b>
3.1. Sürtünme.....	4
3.1.1 Kuru Sürtünme.....	8
3.1.2. Sınır Sürtünme .....	12
3.1.3. Sıvı Sürtünme .....	14
3.2. Aşınma .....	15
3.2.1. Kayma Aşınması.....	15
3.2.2. Kayma Aşınması Teorisi .....	17
3.2.3. Metallerin Yağsız Durumdaki Aşınması .....	22
3.2.4. Aşınmanın Genel Sınıflandırılması .....	23
3.2.4.1. Adezyon aşınması.....	23
3.2.4.2. Abrazyon aşınması .....	24
3.2.4.3. Mekanik korozyon aşınması.....	25
3.2.4.4. Yorulma aşınması (Pitting).....	25
3.3. Kompozit malzemeler.....	26
3.3.1. Kompozit malzemelerin tanımı .....	26
3.3.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları .....	29
3.3.3. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları .....	27
3.3.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....	28
3.3.5. Kompozitlerde matris çeşitleri .....	33
3.3.6. Kompozit malzeme imalinde kullanılan matris malzemeler .....	37
3.3.7. Plastiklere katkı malzemelerinin katılması .....	34
3.3.8. Plastiklerin genel özellikleri .....	35
3.3.9. Plastik matris kompozit imalatı.....	36
3.3.10. Termoplastik kompozitlerin üretimi.....	37
3.3.11. Metal kompozitler .....	37
3.3.12. Metal matris kompozitlerin imalatı .....	38
3.3.13. Kompozit malzemelerin dayan ve özellikleri .....	38
3.3.14. Malzeme özellikleri .....	38
3.3.15. Tasarım faktörleri .....	39
3.3.16. Metal kompozitler .....	40
3.3.17. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler .....	40

3.4. Kompozitlerin aşınma davranışı .....	42
3.4.1. Kompozitlerin aşınması .....	42
3.4.2. Kompozitlerin aşınma yüzeyleri .....	46
3.4.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin yorulma davranışları .....	57
3.5. Pernolar .....	57
3.5.1. Pernoların tanımı .....	57
3.5.2. Pernoların hesabı .....	58
3.5.3. Pernoların üretim biçimi .....	60
3.5.4. Pernoların standart gösterimi .....	60
3.5.5. Pernolardaki toleranslar .....	62
<b>4. METERYAL VE METOT .....</b>	<b>63</b>
4.1. Test metodu .....	63
4.2. Deney tesisatı .....	63
4.3. Salınım sayısı ve salınım acısı .....	66
4.4. Yükleme koluna uygulanacak yüklerin tespiti .....	66
4.5. Deneye tabi tutulan numune ve yataklar .....	67
4.6. Deney numunelerinin mekanik özellikleri .....	69
4.7. Deney numunelerindeki hacimsel kaybın tespit edilmesi .....	70
4.8. Deneyin yapılışı .....	70
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>71</b>
5.1. Yapılan deneylerin grafiksel incelenmesi .....	72
5.1.1. Kayma mesafesi ile aşınma ilişkisinin incelenmesi .....	72
5.1.2. Yük ile aşınma kaybı değişiminin incelenmesi .....	75
5.2. Aşınma yüzeylerin analizi .....	77
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>82</b>
6.1. Sonuç .....	82
6.2. Öneriler .....	82
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>97</b>

## SİMGELER

$F_{adh}$	Adhezyon kuvveti (N)
$\mu_{adh}$	Adhezyon sürtünme katsayısı
K	Aşınma katsayısı
k	Boyutlu aşınma katsayısı
$F_{def}$	Deformasyon kuvveti (N)
$\mu_{def}$	Deformasyon sürtünme katsayısı
E	Elastisite modülü (N/mm <sup>2</sup> )
$A_g$	Gerçek temas alanı (mm <sup>2</sup> )
G	Kayma modülü (N/mm <sup>2</sup> )
$\Gamma$	Kayma şekil değiştirmesi
$\tau_{km}$	Kesme mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{ko}$	Kopma mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
$F_N$	Normal kuvvet (N)
W	Normal yük (N)
$\delta W$	Normal yük (N)
P	Plastik deformasyondaki pürüzün akma basıncı (N/mm <sup>2</sup> )
$\nu$	Poisson oranı
$\mu_s$	Statik sürtünme katsayısı
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$F_S$	Sürtünme kuvveti (N)
A	Temas yüzey alanı (mm)
F	Temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (N)
$R_{t1}$ ve $R_{t2}$	Yüzeylerin maksimum yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )
P	Yoğunluk (kg / dm <sup>3</sup> )
V	Hacim (mm <sup>3</sup> )
M	Aşınma miktarı (gr)
F	Yük (N)
L	Kayma mesafesi (m)

## 1. GİRİŞ

Temasta olan ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki eleman arasında sürtünme ve bunun sonucu olarak aşınma, sıcaklık yükselişi ve enerji kaybı meydana gelmektedir. Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, tek bir aşınma hali değil, birden çok aşınma hali vardır. Bu aşınma halleri adezyon, abrazyon, yorulma aşınması (pitting) ve mekanik korozyon olmak üzere dört ana grupta toplanabilir.

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanlarının yaklaşık olarak %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Ayrıca sürtünme sonucunda meydana gelen enerji kayıpları oldukça yüksek seviyelerdedir. Bu nedenle uygun bir yağlama ile sistemin verimi önemsiz bir oranda arttırılsa bile, tasarruf edilen maddi kazanç tutarı çok büyük değerlere varmaktadır. Bunların yanısıra, aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kayıpları ve makinelerin onarımı için harcanan zaman göz önüne alınırsa, aşınmanın makine konstrüksiyonundaki önemi daha iyi anlaşılır. Bu sebeple aşınmayı azaltma yönünde birçok çalışmalar yapılmış ve halende bu yöndeki çalışmalar devam etmektedir.

Sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek için sürtünen yüzeyler arasında yağlayıcı maddeler konulmaktadır. Sürtünme bakımından, çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı maddenin fonksiyonu farklıdır. Aşınma üzerinde yapılan çalışmalarda aşınma üzerinde etkili olan birçok faktör incelenmiş ve etkileri üzerinde tartışmalar yapılmış ve bazı aşınma türleri için bu etkenlerde dikkate alınarak bağıntılar çıkarılmıştır.

Aşınmaya etki eden faktörlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir:Yük, Hız, Sıcaklık, Malzeme çifti, Sertlik, Yüzey pürüzlülüğü

Yapılan bu deneysel çalışmada karbon elyaf sarılmış çelik pernoların ve çelik pernoların, farklı yük ve çalışma mesafelerindeki aşınma davranışları incelenmiş ve birbiriyle mukayese edilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Alaattin Aktas ve Ramazan Karakuzu (1999), yaptıkları çalışmada karbon-epoksi kompozit levhalara perçinlerin keyfi olarak yerleştirilmesi durumunda bozulma mukavemetini ve bozulma modunu incelemişlerdir. Bozulma yükü ve bozulma modu sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Sayısal metot iki adımdan oluşmaktadır. İlkinde sonlu elemanlar metodu kullanılarak plakadaki gerilme dağılımı hesaplanmış, ikincisinde ise bozulma yükü ve bozulma modu Tsai-Hill ve fiber basma-çekme hassar kriteri ile tahmin edilmiştir. Pim çapı ile eksenler arası uzaklıklar ve plaka kalınlığı arasında bağıntılar kurulmuştur.

Alaattin Aktaş, Hüseyin İmrek ve Yusuf Cünedioğlu (2009), bu makalede, tek ve çift paralel bağlantılı cam-epoksi kompozit plakaların bozulma yükü ve bozulma modu deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Analizde iki değişken incelenmiştir. Plakanın serbest kenarından olan mesafe E ile deliğin çapı D arasındaki oran (E/D) ve numune genişliğinin W delik çapına (W/D) oranı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Deneyler ASTM D953-D standardına göre yürütülmüştür. Sayısal çalışma ANSYS'in sonlu elemanlar analiz programında gerçekleştirilmiştir. Bozulma analizlerinde Yamada-Sun hata kriteri kullanılmıştır. Serbest kenardan en uzaktaki pim deliğinde en çok gerilme olduğu gözlenmiş olup sayısal tahminlerle deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

Hong-Sheng Wang, Chang-Li Hung ve Fu-Kuo Chang (1996), yazarlar fiber takviyeli katmanlı kompozitlerin mekanik bağlantılarının yataklama hasarları incelenmiştir. Çalışmada çift katman metal / kompozit / metal ile cıvata bağlantıları araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların odak noktası, yatak hata mekanizmaları ve cıvata bağlantılarının sıkma basıncı ile oluşan yatak tepkisi ve yataklama dayanımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek olmuştur. Yataklama hasarları, yan destekler olmadan veya sıkma basıncının çeşitli açılarla yan destekler kullanılarak uygulandığı cıvatalı yataklarla karakterize edilmiştir. Deneyler sonucunda cıvatalı kompozit bağlantılarda yanal uygulamaların önemli olduğu sonucuna varılmış olup eğer yanal destek yoksa yataklama hasarının daha fazla olduğu ispatlanmıştır. Yataklama hasarlarında oluşacak birincil hasar modunun birikmiş sıkışma hasarıyla ortaya çıkan makaslama çatlaklarından dolayı ortaya çıktığı ispatlanmıştır. Yanal uygulamaların makaslama çatlaklarını bastırabilecek ve bozulma modunu daha ileri seviyeye taşıyabilecek konumda olduğu gösterilmiştir.

Chang-Li Hung ve Fu-Kuo Chang (1996), çalışmalarında, tabakalı kompozitlerin mekanik bağlantıların tepkisi ve yataklama kusurları ile ilgilenmişlerdir. Deneyle sonucunda birikmiş hasar modeli üzerinde hasar mekanizmaları gözlemlenerek tabakalı kompozit bağlantıların yataklama hasarlarının simülasyonu geliştirilmiştir.

Yi Xiao, ve Takashi Ishikawa (2005), bu çalışmada civatalı kompozit bağlantıların karakteristik tepkisi ve yataklama hasarlarının simülasyonu için bir analitik model geliştirilmiştir. Analitik model içerisinde pim/delik sınırında temas şartlarının hesabı, kademeli hasar, sonlu deformasyon ve lineer olmayan malzeme davranışı yer almaktadır. Yükleme sırasında doğrusal olmayan malzeme davranışını temsil etmek için kompleks yaklaşıma dayanılarak mekanik hasar ile doğrusal olmayan makaslama esneklik teorisi birleştirilmiştir. Bağlantının ilerleyen hasarı için sayısal simülasyon sonuçları ve dayanım tepkisi deneysel verilerle son derece uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Shim. Y, Oda. K, Tedori (2006), bu çalışmada elektrik direnç değişim metodu kullanılarak civatalı kompozit bağlantıların yataklama hasarlarının bulunması amaçlanmıştır. Bir karbon fiber takviyeli kompozitte elektrodlar deliğin uzağında olduğunda elektrik direnci güçlü anizotropiye sahip olmasından hareketle delikte yatak hasarı olduğunda elektrik direnci değişerek alarm oluşturacağı çekme testi boyunca deneysel ölçümler elektrik direnciyle değişeceği düşünülmüştür. Hasar yayılımı mikroskop ve C-scan denetimiyle gözlemlenmiş ve sonuç olarak önerilen metot ile civatalı kompozit bağlantıların yataklama hasarlarının denetlenebileceği ispatlanmıştır.

### 3. TEORİK ESASLAR

#### 3.1. Sürtünme

Temasta olan ve birbirine göre izafi hareket yapan iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirence “sürtünme” denir. Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma–yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma ve kayma–yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur. Kayma sürtünmesi için Bowden ve Tabor modeli en basit haliyle, iki yüzeyde sürtünme kuvveti oluştuğunu farz eder. Yüzeyler arasında gerçek temas alanında gelişen bir adhezyon kuvveti ve bir deformasyon kuvveti oluştuğu farz edilir. Bunları beraber olarak düşünmek daha aydınlatıcı ve uygun olur. Nihai sürtünme kuvveti  $F_s$ , bu iki terimin yani adhezyon kuvveti  $F_{adh}$  ve deformasyon kuvveti  $F_{def}$  ' in bir özeti olarak alınmıştır.

Adhezyon terimi pürüzlülük temasındaki çekim kuvvetini anlatır. İlk bakışta bu kabul imkânsız gibi görünür. Bu konudaki ortak görüş, iki metal yüzeyden biri diğerine bastırıldığı zaman genellikle yapışmadığıdır. Bununla birlikte yüzeyler temizse yüzey film tabakaları, oksit ve gazlardan arındırılmışsa metaller arasında önemli bir adhezyon gözlenir. Benzer şartlar yüksek vakum altında gerçekleştirilebilir. Kuvvetli yapışma bakır ve altın gibi metallerde yüksek basınç altında görülür.

Adhezif kuvvetlerin olması nedeni ile Bowden ve Tabor modelinin kabulü uygulanabilir. İki metal yüzey, normal şartlar altında birbirlerine temaslarında neden önemli bir adhezyonun gözlenmediğinin iki sebebi vardır. İlk olarak oksitle kaplanacak olan yüzeyler ve ikinci olarak yüksüz durumda pürüzlülük birleşimini bozmak için yeterli gerilmeyi oluşturan yükün, pürüzlülüklerin etrafında elastik gerilmeler oluşturmasıdır.

Adhezyon deneyleri ve teorik modellemeler, farklı iki metalin birbiri üzerinde kaydığı zaman pürüzlülük birleşimlerinin farklı olduğunu göstermektedir. Temas alanında pürüzlülük temaslarının kesit alanını ( $A$ ) ile ve bütün bileşenlerinde aynı kesme gerilmesine ( $s$ ) sahip olduğu kabul edilirse, adhezyon nedeniyle oluşan sürtünme kuvveti aşağıdaki gibi verilir.

$$F_{adh} = A \times s \quad (3.1)$$

İlk yaklaşım, yüzeyler arasındaki temasın elastik mi yoksa plastik mi olduğu ve gerçek temas alanının uygulanan yük ile orantılı olduğudur. Konvansiyonel mühendislik işlemleriyle imal edilen metal yüzeyler arasındaki temas için ilk pürüzlülük etkili olarak plastik olacaktır. Yüzeğe gelen normal yük ( W )

$$W \approx A \times H \quad (3.2)$$

şekilde ifade edilebilir. Buradaki H sertliktir.

Adhezif ve normal kuvvetlerden sürtünme kuvvetine geçiş yapılırsa;

$$\mu_{adh} = F_{adh} / W \approx s / H \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir.

Metaller için sertlik akma gerilmesinin yaklaşık üç katıdır. Bu durumda

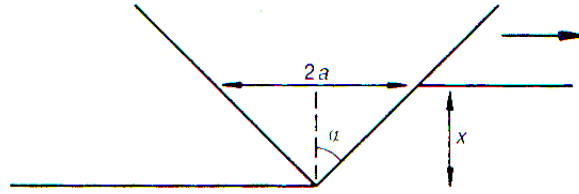
$$H \approx 3 \times Y \text{ olur.} \quad (3.4)$$

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

$$H \approx 5 \times s \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. Buradan sürtünme katsayısı ise

$$\mu_{adh} \approx s / H \approx 0.2' \text{ dir.} \quad (3.6)$$



Şekil 3.1 Sürtünen parçanın deformasyonu için model

Rijit bir konik bir yüzey, düzlem bir yüzey üzerinde kayarsa, yer değiştirme için gerekli teğetsel kuvvetin değeri düşük olacaktır (Şekil 3.1).

$H'$  yi yüzey malzemesinin çentik sertliği alıp yivin kesit alanı ile çarparsak, □

$$F_{\text{def}} = H \times a \times x = H \times x^2 \times \tan \alpha \quad (3.7)$$

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

$$W = (H \times \pi \times a^2) / 2 = (H \times \pi \times x^2 \times \tan^2 \alpha) / 2 \quad (3.8)$$

buradan sürtünme katsayısı,

$$\mu_{\text{def}} = F_{\text{def}} / W = (2 / \pi) \times \cot \alpha \quad (3.9)$$

olur.

Bir düzlem modelde pürüzlülük bir yarı açılı takoz olarak alındığında,

$$\mu_{\text{def}} = \cot \alpha \quad (3.10)$$

olur.

Gerçek yüzeylerin eğimleri daima  $10^0$  dereceden daha azdır ve (3.9.) ve (3.10.) denklemlerinden dolayı,  $\mu_{\text{def}}$ ' in 0.1' den daha küçük olması beklenir. Bu basit modelden hareketle sert bir metal daha yumuşak bir metal üzerinde kayarsa, toplam sürtünme katsayısınının 0.3' ü aşmayacağı sonucu çıkarılabilir.

Metallerin yağsız kaymasında  $\mu_s$  için ölçülen değerler de çizelge 3.1' de verilmiştir. Gerçekte bu tahminler birkaç kat farklılık göstermektedir. Çalışma sertleşmesi ve bu değerlerin gerçekte olan farklılığının ortaya çıkmasında önemli rol oynamaktadır.

**Çizelge 3.1** Havada ve yağlamasız durumda çeşitli metaller için statik sürtünme katsayısının ( $\mu_s$ ) tipik değerleri

<i>(a) Havada Kendi İle Eş Çalışan Metaller</i>	$\mu_s$
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
<i>(b) Havada (0.13% C) Çelik Üzerinde Saf Metallerin ve Alaşımların Kayması</i>	$\mu_s$
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
$\alpha$ – Pirinç (Cu – 30% Zn)	0.5
Kurşun Kaplı $\alpha/\beta$ Pirinci (Cu – 40% Zn)	0.2
Gri Dökme Demir	0.4
Yumuşak Çelik (0.13% C)	0.8

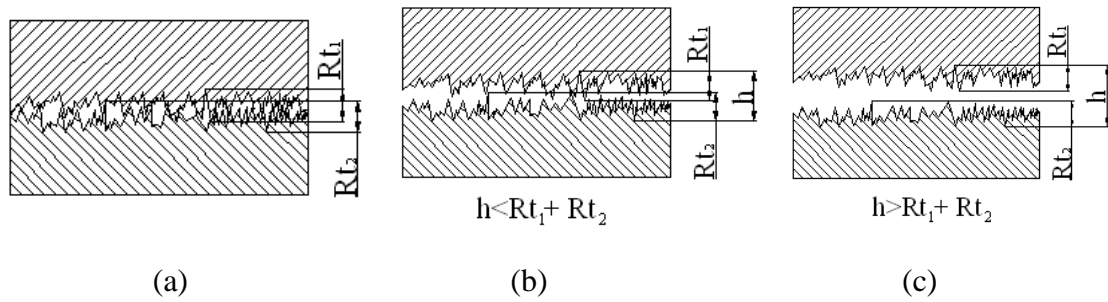
İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde bulunup ve bulunmaması bakımından kayma sürtünmesi kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir.

Kuru sürtünme birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 3.2.a).

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde ise iki durum ortaya çıkabilir.

Yüzeylerin birbirinden tamamen ayrılmadığı durumdaki sürtünmeye sınır sürtünmesi adı verilir (Şekil 3.2.b).

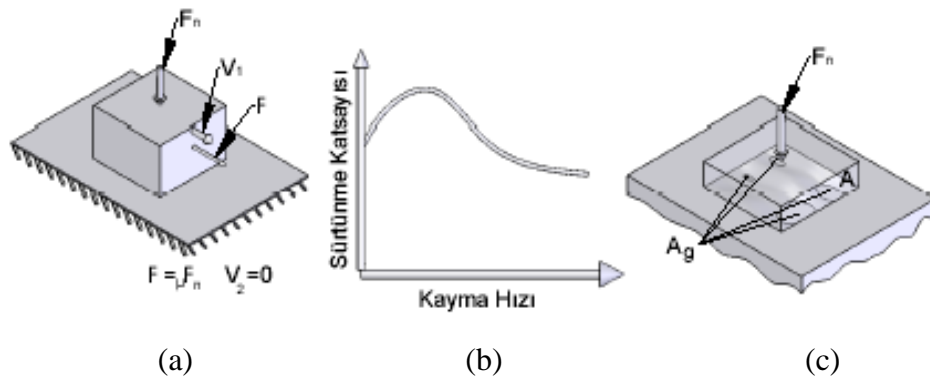
Ancak iki yüzey, yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılırsa, esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşacağından bu sürtünmeye de sıvı sürtünmesi denir (Şekil 3.2.c) (Hutchings 1996, Ludeme 1996).



Şekil 3.2 Sürtünme çeşitleri (a) Kuru sürtünme, (b) Sınır sürtünme, (c) Sıvı sürtünme

### 3.1.1 Kuru Sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 3.3.a' da gösterilen model kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 Kuru sürtünme modeli

Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_N$ ) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı;

$$F_S = \mu \times F_N \quad (3.11)$$

değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada  $\mu$  sürtünme katsayısıdır.

Genel ifadeye göre sürtünme, izafi hareket yapan veya hareket yapabilme imkanına sahip olan yüzeylerde oluşur. Şekil 3.3.a' da cisimlerin herhangi birine teğetsel bir  $F$  kuvveti uygulanırsa, iki durum ortaya çıkabilir.

Birinci durumda  $F_S > F$  yani sürtünme kuvveti  $F$  kuvvetinden daha büyük olabilir. Bu halde  $F$  kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar. Ancak hareket olanağı olduğundan, yüzeyler arası statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir.

İkinci durumda  $F_S \leq F$  yani sürtünme kuvveti  $F$  kuvvetinden daha küçük olabilir. Kinematik sürtünme denilen bu halde,  $F$  kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Genellikle statik sürtünme katsayısı  $\mu_s$ , kinematik sürtünme katsayısı  $\mu'$  den daha büyüktür. Kayma hızının artmasına bağlı olarak kinematik sürtünme katsayısında azda olsa azalma görülür (Şekil 3.3.b).

Coulomb–Amontons kanunu olarak tanınan (3.11) bağıntısına göre;

- ✓ Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır,
- ✓ Sürtünme kuvveti nominal temas alanına bağlı değildir,
- ✓ Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekil 3.2.a' da görüldüğü gibi yüzeyler birbiri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler. Böylece temas alanı esasen çok küçük temas alanlarından meydana gelmektedir (Şekil 3.3.c). Bu küçük temas alanlarının toplamı sonucunda gerçek temas alanı ( $A_g$ ) meydana gelmektedir.

Bu alan temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden ( $A$ ) geometrik alanından çok daha küçüktür. Deneyler gerçek temas alanının  $A_g = (1/500 \dots 1/1000) * A$  arasında olduğunu

göstermektedir. Bunun yanı sıra  $F_n$  yükleme kuvvetinin uygulaması ile pürüzler şekil değiştirirler ve bunun sonucu olarak temas yüzey alanı artar.

Yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında atmosferi teşkil eden elemanların etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır.

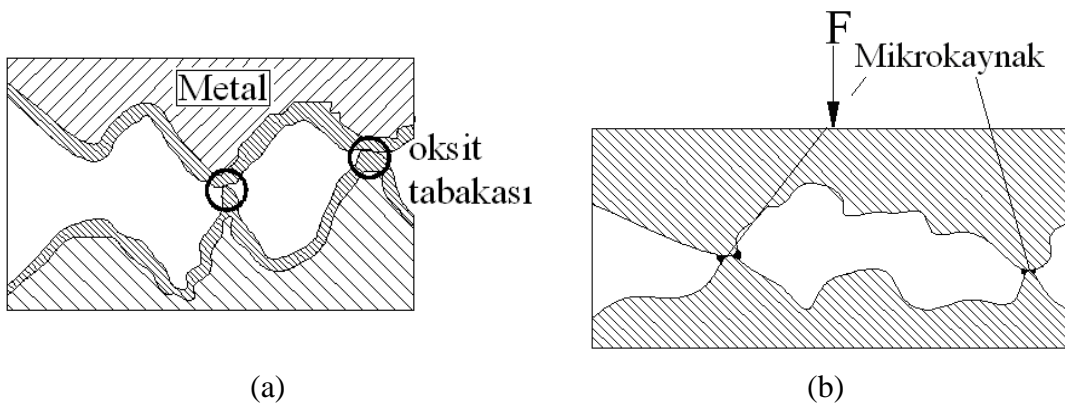
Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve sadece çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan ve gerçeğe en yakın olan teori Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisidir. Bu teori şu şekilde açıklanabilir;

Yüksüz durumda yüzeyler belirli pürüzlülük noktalarında temasta bulunmaktadır (Şekil 3.4.a). Bu noktalarda tabii tabakalar arasında bağlar oluşur. Yük tatbik edildikten sonra, çok küçük olan temas yüzeyleri arasında çok büyük basınçlar meydana gelir.

Bu basınçların etkisi altında bazı temas noktalarındaki tabii tabaka kopar, metalik temas meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur (Şekil 3.4.b). Bu bağlar tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir.

Temasta bulunan elemanların izafi hareketi ancak bu bağların kopması ile mümkündür.



Şekil 3.4 Mikro kaynakların oluşması

Bu durumda sürtünme gerek metalik, gerekse tabii tabaka bağlarının oluşturduğu dirençtir; sürtünme kuvveti ise bu bağların kopması için gereken kuvvettir.

Yukarıdaki teoriye göre sürtünme katsayısını analitik olarak ifade etmek mümkündür. Buna göre yükü taşıyan  $A_g$  temas alanında oluşan metalik bağların yüzdesi  $\alpha$ , bunların kesme mukavemeti  $\tau_{km}$ , tabii tabakalar arasındaki bağların kayma mukavemeti  $\tau_{ko}$  ve tabakanın kopma mukavemeti  $\sigma_{ko}$  ile ifade edilirse, sürtünme katsayısı Bowden ve Tabor' a göre;

$$\mu = F_S / F_N = [ \alpha \times ( \tau_{km} / \sigma_{ko} ) ] + [ ( 1 - \alpha ) \times ( \tau_{ko} / \sigma_{ko} ) ] \quad (3.12)$$

olarak bulunur.

Gerçek temas alanı tamamen metalik temas noktalarından meydana geldiği durumda  $\alpha = 1$  olur ve böylece,

$$\mu = \tau_{km} / \sigma_{ko} \quad (3.13)$$

yazılır. Diğer taraftan sadece tabii tabaka bağları olduğu halde  $\alpha = 0$  olur ve sürtünme katsayısı için,

$$\mu = \tau_{ko} / \sigma_{ko} \quad (3.14)$$

olarak elde edilir.

$\alpha$ ,  $\tau_{km}$  ve  $\tau_{ko}$  değerlerinin tayini çok güç olduğundan pratikte yukarıdaki bağıntıların kullanılması olanaksız gibi görünmektedir. Buna rağmen bu bağıntılardan aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür.

Bu teoriye göre şu sonuçlar çıkarılabilir:

Sürtünme katsayısı, metal kaynak bağ teşkil etmiş olan temas noktalarının kesme mukavemetine ( $\tau_{km}$ ), tabakanın kopma mukavemetine ( $\sigma_{ko}$ ), ve tabii tabaka bağlarının kayma mukavemetine ( $\tau_{ko}$ ) bağlıdır.  $\tau_{km}$  ve  $\tau_{ko}$ ' nun küçük,  $\sigma_{ko}$ ' nun ise büyük olması halinde, sürtünme katsayısı da küçük olur.

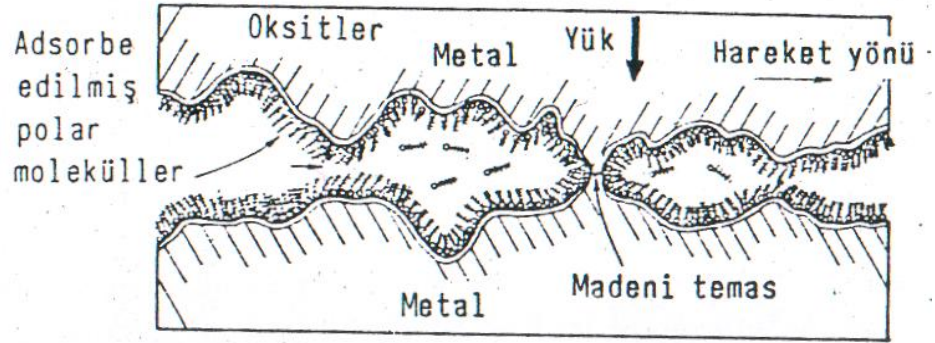
Metal kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kesme mukavemeti, temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır. Bu bakımdan;

- ✓ Birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen demir, krom ve nikel gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları oluşmaktadır. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişmekte, yüzeyler üzerinde izler ve bir yüzeyden diğerine malzeme transferi olmaktadır. Bazı hallerde kaynama noktaları o kadar şiddetli olur ki yüzeyler birbirine kilitlenir, hareket sağlanması durumunda ise yüzeyler tamamen bozular. Bu duruma yenme denir. Bu olay demir, krom ve nikel gibi sert malzemelerin alaşımları için de geçerlidir.
- ✓ Birbirine benzemeyen ve birbiriyle ilgili olmayan malzemeler arasında daha hafif ve düzenli bir sürtünme oluşmakta ve yüzeyler üzerinde çok ince izler görülmektedir.
- ✓ Birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert, diğeri yumuşak (örneğin kalay, kurşun, indiyum ve bunların alaşımları) olması durumunda, yumuşak malzeme diğer malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile kaplar ve sanki iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kayarmış gibi olur. Burada yumuşak malzeme bir yağlayıcı madde gibi rol oynar. Böylelikle sürtünme katsayısı azalır ve bu yüzeylerde yenme olayı meydana gelmez. Kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemesi olmasının nedeni buna bağlıdır.

Bu durumda küçük bir sürtünme katsayısı elde etmek ve aşırı aşınmayı önlemek için malzemeler aynı veya birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen cinsten olmamalıdır. Ayrıca malzemelerden birinin yumuşak diğerinin sert olması da gerekmektedir (Akkurt 1990)

### **3.1.2 Sınır Sürtünme**

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0.02 ile 0.1 arasında değişir. Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün bir şekilde yapışırlar (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Sınır sürtünmesi

Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakası oluşmaktadır. Yağın bu özelliğine yapışma kabiliyeti denir. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Oluşan bu tabaka, tabii tabakada olduğu gibi metalik yüzeylerin doğrudan temasa geçmesini engeller. Ancak yağ tabakası ile tabii tabaka arasında önemli bir fark vardır. Havanın etkisi ile oluşan tabii tabakanın esası oksit tabakası olup burada tesadüfen bulunan yağ molekülleri çok azdır. Yağ tabakası ise tamamen yağ moleküllerinden oluşur ve özelliğini burayı yağlamak amacıyla konulan yağ maddesinden alır. Yağ tabakasının tabii tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta bulunan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti  $\sigma_{kf}$  ve kayma mukavemeti  $\tau_{kf}$  ile ifade edilirse, (3.13.) denkleminin burada da geçerlidir. İyi bir yağlama sisteminde  $\alpha$  çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı;

$$\mu \approx \tau_{kf} / \sigma_{kf} \quad (3.15)$$

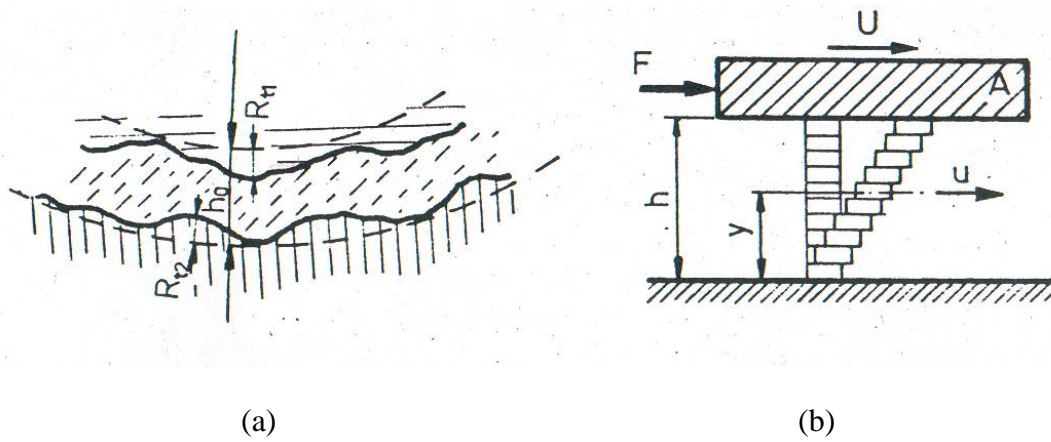
olarak bulunur.

Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adı yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetini büyütmek veya kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katık denilen bir takım ek maddeler konulur. Genellikle organik yağlardan oluşan katkı maddeleri yağ içerisine çok az miktarda konulur. Bu maddeler metalik yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerler ve yüzeyler

arasında, kopma mukavemeti yüksek olan yarı sıvı halde madeni sabunları oluştururlar. Böylece sınır sürtünme; sırf adsorpsiyon tabakalarından oluşan fiziksel veya kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen tabakaların oluşturduğu kimyasal esasa dayanabilir (Akkurt 1990).

### 3.1.3. Sıvı Sürtünme

Sıvı sürtünmesi, madeni yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Sıvı sürtünme

Yüzeylerin pürüzlülüğü göz önüne alınır, analitik bakımdan sıvı sürtünmesi;

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2} \quad (3.16)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada  $R_{t1}$  ve  $R_{t2}$  her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür.

Sıvı sürtünmesinde rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki basınç oluşumu vardır (Akkurt 1990).

### 3.2. Aşınma

Aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya ince parçaların ayrılması ile bir malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla ilgilidir. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle aşınma olduğu gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir.

Aşınma birçok mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen çoğu zaman tasarımda ihmal edilen bir faktördür. Çoğu zaman önemli tamirler veya yenileme masrafları gerektirir ve kullanılabilirlik oranını düşürür. Sonuçta aşınan parçaların tamir edilmediği ve yenilenmediği durumlarda makinenin randıman düşer. Bu sebeplerden dolayı aşınma, tasarım sürecinde ele alınmalı ve kullanım sırasında bir problem olarak karşımıza çıkması önlenmelidir.

Birbirleri üzerinde kayan katı yüzeylerde meydana gelen aşınma, yağlamanın durumuna, kayan yüzeylerin yapısına, kimyasal ortama, normal yük ve kayma hızı gibi işletme koşullarından etkilenebilir.

Dönen elemanlarda meydana gelen temas, kaymadan ziyade dönme hareketini kapsadığı için aşınma yorulma ile olur. Eğer sert parçacıklar yüzeye çarpıyorlarsa aşınma erozyonla oluşur.

Yukarıda anlatılanlara bağlı olarak aşınmanın oluşmasının genel sebepleri; aşırı yük ve hız, uygun olmayan yağlama sonucunda metal-metal temasının olması, yağ içerisindeki aşındırıcı tanecikler ve toz parçalarının bulunması, temas alanında yağ filminin yırtılması ile yağ ve içerisindeki kimyasal katkıların oluşturacağı kimyasal aşınmalardan kaynaklanabilir.

#### 3.2.1. Kayma aşınması

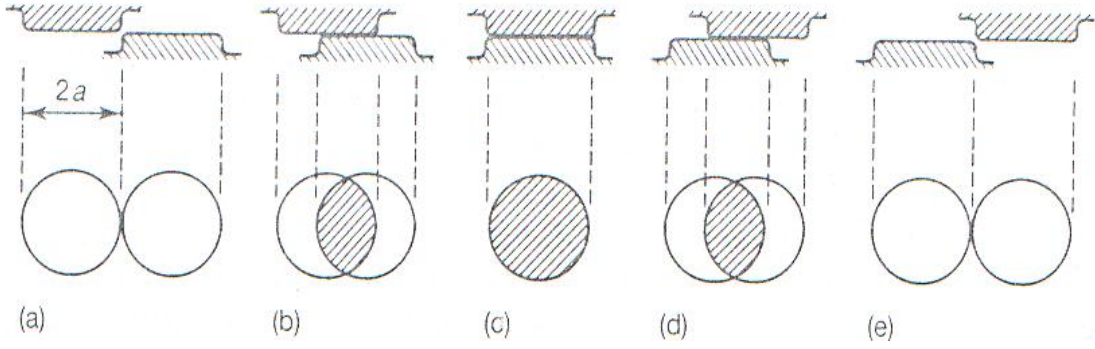
Birçok pratik uygulamada kayma yüzeyi bir şekilde yağlanır. Bazı mühendislik uygulamalarında ve birçok laboratuvar araştırmalarında ise yüzeyler normal hava şartlarında aralarında herhangi bir yağlayıcı madde olmaksızın birbiri üzerinde kayarlar bu şekilde meydana gelen aşınmalara kayma aşınması denir. Hissedilir derecede nemli hava ortamında gerçekleşse bile aralarında herhangi bir yağlayıcı madde bulunmayan aşınmalara kuru kayma aşınması denir. Dışarıdan ortama giren veya malzeme üzerinden kopan ve yüzeylerin arasına giren sert partiküllerin iştirak ettiği aşınmaya abrazif aşınma denir.

Adhesif aşınma terimi bazen kayma aşınmasını tanımlamak için kullanılır fakat bu kullanım aldatıcı olabilir. Adhezyon, kayma aşınmasında önemli bir rol oynasa da bu rol kayma aşınmasında gerçekleşen birçok fiziksel ve kimyasal süreçten yalnızca birisidir. Bu nedenle kayma aşınması tercihen genel bir terim olarak kullanılır. Scuffing, scoring, galling terimleri şiddetli kayma aşınmalarıdır. Fakat bunlar tam olarak tanımlanamazlar ve bu terimler kullanım bakımından farklılık gösterirler.

Scuffing, İngiltere' deki kullanımında kayma yüzeyleri arasındaki bölgesel katı hal kaynağı ile meydana gelen bölgesel yüzey aşınması anlamında kullanılır. Bu terim sık olarak, genellikle yüksek hızlı kaymalardaki yağlamanın bozulmasını tanımlamak için kullanılır. Amerika' da scoring bazen az scuffing ile aynı anlamda kullanılır ve bu iki terim abrazif parçacıkların sebep olduğu aşınmayı da içerir. Galling, bölgesel kaynağın sebep olduğu scuffing' in daha şiddetli bir şeklidir ve geniş ölçüdeki yüzey aşınmaları için kullanılır. Bu kelime düşük hızlardaki yetersiz yağlamalı kaymanın sonucu oluşan aşınma anlamına gelir. Malzemedeki büyük parçaların transferi veya yer değiştirmesi ve pürüzlü yüzeyler ile karakterize edilir. Galling süresiz yağlamalı sistemlerde oluşur. İlk olarak yağ filmi bozulur ardından yüzeyler birbirine yapışır ve kayma sisteminde büyük bir hasar oluşur.

### **3.2.2. Kayma Aşınması teorisi**

Temas halindeki iki yüzey birbiri üzerinde kayarsa yüzeylerden biri veya ikisi de aşınmaya maruz kalır. Burada Holm ve Archard' a göre bu tip aşınmanın teorik analizi verilecektir. Bu analiz basitliğinden dolayı, 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 orijinal olarak metaller için geliştirilse de diğer malzemelerin aşınmalarının anlaşılabilmesi için de bazı kolaylıklar sağlar. İki yüzey arasındaki temas, pürüzlülüklerin birbirine dokunduğu yerlerde olur ve böylece gerçek temas alanı pürüzlülüklerin temas alanlarının toplamına eşittir. Bu alan normal yükü doğru orantılıdır. Birçok durumda en azından metaller için pürüzlülükler, bölgesel plastik deformasyona uğrarlar.



**Şekil 3.7** Birbiri üzerinde hareket eden iki pürüzlülüğün basit bir temasının değişimini gösteren şematik diyagram

Şekil 3.7 dairesel ve yarıçapı “a” olarak kabul ettiğimiz basit bir pürüzlülük temasını kaymanın değişik aşamalarında göstermektedir. Bu temas Şekil 3.7 c’ de maksimuma ulaşıyor ve buradan normal yük ( $\delta W$ );

$$\delta W = P \times \pi \times a^2 \text{ olur.} \quad (3.17)$$

Burada P, plastik deformasyona uğrayan pürüzün akma basıncıdır. Kayma devam ederken yüzeyler Şekil 3.7. d ve Şekil 3.7 e’ deki gibi yer değiştirirler. Sürekli kayma, pürüzlülük temasında sürekli oluşum ve tahribe sebep olur. Aşınma, pürüzlülüklerden malzeme parçacıklarının ayrılmasıyla gerçekleşir. Aşınma ile taşınan malzeme hacmi  $\delta V$ , temas boyu a’ nın küpü ile orantılıdır.

$$\delta V = (2 \times \pi \times a^3) / 3 \quad (3.18)$$

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

$$\delta Q = (\kappa \times \delta V) / (2 \times a) = (\kappa \times \pi \times a^2) / 3 \quad (3.19)$$

ve toplam aşınma oranı;

$$Q = \Sigma \delta Q = ( \kappa / 3 ) x ( \Sigma \pi x a^2 ) \quad (3.20)$$

toplam normal yük ise;

$$\delta W = P x ( \Sigma \pi x a^2 ) \quad (3.21)$$

bulunur. Buradan;

$$Q = ( \kappa x W ) / ( 3 x P ) \quad (3.22)$$

1/3 faktörünü orantı sabiti içine alarak ( $\kappa / 3 = K$ ) şeklinde kullanabiliriz ve iz bırakma sertliği H içinde ( $P = H$ ) diyebiliriz. Bu değişikliklerden sonra denklem yeniden yazılırsa;

$$Q = ( K x W ) / H \quad (3.23)$$

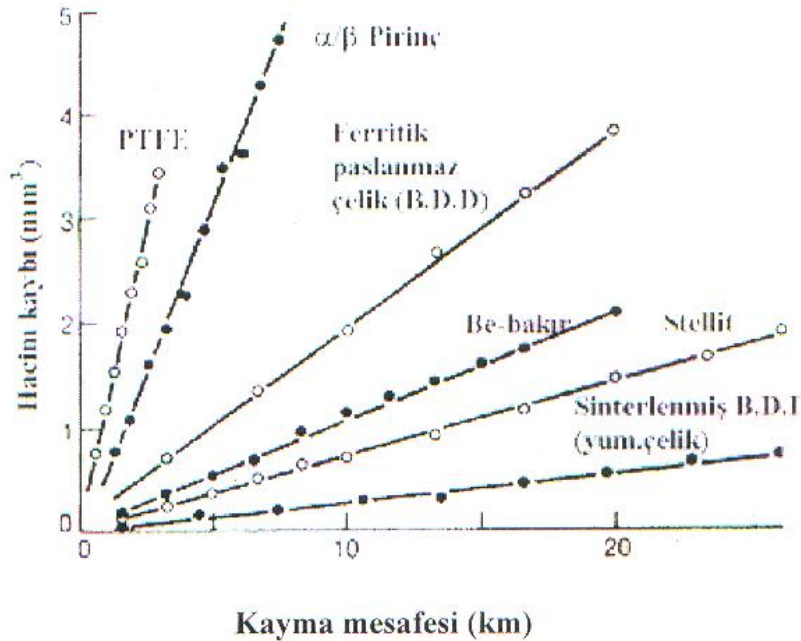
elde edilir.

Archard aşınma denklemi olarak adlandırılan bu denklem birim kayma mesafesindeki aşınma hacmi Q, makroskopik özellikler olan 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 adını alan k' nın birimi  $mm^3/N.m$ ' dir ve temastaki birim yük (N) ve birim kayma mesafesi için aşınmadan dolayı taşınan malzeme miktarını ( $mm^3$ ) temsil eder. 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. (3.23) eşitliğine göre eğer K değeri verilen bir kayma sistemi için bir sabitse aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kaybı ile kayma

mesafesi orantılı olacaktır ve normal yük değiştirilirse bununla orantılı olarak aşınma oranı da değişecektir.

Birçok sistem için yapılan deneylerde sabit kayma hızında, aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kaybıyla, kayma mesafesinin orantılı olduğu bulunmuştur. Bazen kaymanın başlangıcında yüzeyler arasında dengeli hal kuruluncaya kadar geçici bir durum gözlenir. Bu kısa dönem sırasındaki aşınma oranı anlık bir durum olduğu için normal aşınma oranından daha küçük veya daha büyük olabilir.

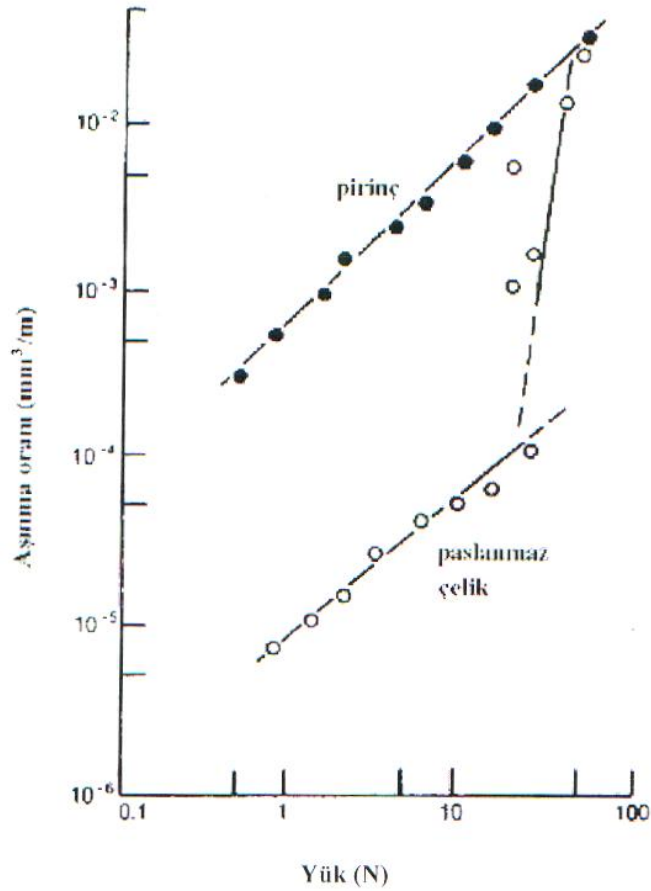
Şekil 3.8’ de hava ortamında yağlamasız durumlarda birçok malzeme için yapılmış olan pim–halka deneylerinin sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara bakılarak test süresi boyunca bütün malzemeler için normal aşınma oranının sabit olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.8 Yağlamasız pim–halka testi sonuçlarından elde edilmiş kayma mesafesine göre aşınmanın değişimi grafiği

Aşınma oranı ve normal yük arasında tam bir orantıya çok az rastlanır. Birçok sistemde aşınma oranı yükün belirli bir sınırına kadar yükü hemen hemen aynı oranda değişmesine rağmen yük bu sınırın üzerine çıktığında düşük aşınma oranından yüksek aşınma oranına ani geçişler olur.

Şekil 3.9’ de bu davranış görülmektedir. Takım çeliğinden yapılmış bir halkaya uygulanan pirinç bir pimin aşınma oranının lineer olarak arttığı ve (3.23) denkleminde uydugu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu yük bölgesi boyunca hiçbir ani geçiş bulunmamaktadır. Ferritik paslanmaz çelik pim için aşınma oranı kritik bir yükün üstünde hızlı bir yükselme göstermektedir. Bu yükün altında ise davranışı Archard denkleminde uyum sağlamaktadır.



Şekil 3.9 Yağlamasız pim-halka testinde takım çeliğinden yapılmış halka ve pirinç pimin yüke göre aşınma oranı grafiği

Görünen temas alanı veya kayma hızının aşınma oranı üzerindeki etkisi çoğu zaman tartışma konusu olmuştur. (3.23) denkleminde de aşınma oranı  $Q'$  nun hangi faktörlere doğrudan bağlı olduğu görülmektedir.

Ancak çoğu sistemde artan kayma hızı aşınma oranında belirgin durum değişiklikleri meydana getirmektedir.

Pim-halka testinde kuru kayma aşınmaları için ölçülen tipik  $K$  değerleri birçok malzeme için Çizelge 3.2’ de listelenmiştir. Çizelge 3.1’ deki bazı malzemeler için

listelenmiş sürtünme katsayılarıyla Çizelge 3.2'deki değerlerin karşılaştırılması yararlı olabilir.

Aşınma katsayısı değerleri  $10^{-2}$  ile  $10^{-7}$  mertebeleri arasında değişiklik gösterirken sürtünme katsayısındaki sapmalar buna göre daha düşüktür ve bu iki veri grubu arasında görünür 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)	$7 \times 10^{-3}$
$\alpha / \beta$ Pirinç	$6 \times 10^{-4}$
PTFE	$2.5 \times 10^{-5}$
$\alpha$ Pirinç	$1.7 \times 10^{-4}$
PMMA	$7 \times 10^{-6}$
Bakır – Berilyum	$3.7 \times 10^{-5}$
Sert Takım Çeliği	$1.3 \times 10^{-4}$
Stellit	$5.5 \times 10^{-5}$
Paslanmaz Çelik (Ferritik)	$1.7 \times 10^{-5}$
Polietilen	$1.3 \times 10^{-7}$

Archard aşınma eşitliği aşınma katsayısı K yardımıyla aşınma şiddetinin tanımlanmasını sağlar. Fakat şunu da hatırlamak gerekir ki parçacıkların malzemeden ayrılma mekanizmasını tanımlamak için geçerli değildir.

Görüldüğü üzere aşınma katsayısı çeşitli yorumlara açıktır ve abrazif aşınma ile oluşan malzeme kaybı için birbirinden farklı başlangıç kabulleri ile benzer bir eşitlik türetilir (Juvinall ve ark. 1983).

### 3.2.3. Metallerin yağsız durumdaki aşınması

Metallerin yağlamasız aşınmasında kayma koşullarına göre değişiklik gösteren birçok mekanizma vardır. Mekanizmalar arasında geçiş genelde normal yük ve kayma

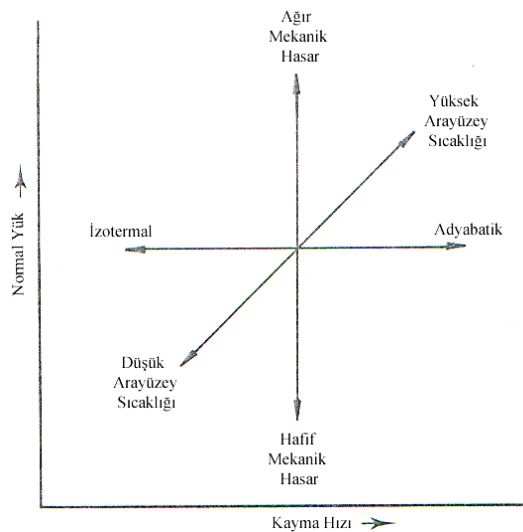
hızındaki değişimle bazı durumlarda da kayma süresi veya mesafesinin değişimiyle görülür.

Mekanizmalardaki önemli kontrol faktörleri mekanik gerilmeler, sıcaklık ve oksidasyon durumudur. Metallerin kayma aşınmasının anlaşılmasında bu üç faktörün göz önüne alınması önemlidir. Aynı zamanda ara yüzeydeki koşulların çok değişik olabileceği, özellikle sıcaklığın çevreninkinden farklı olması durumu göz önüne alınmalıdır.

Kayma aşınmasının karmaşıklığı bu birbiriyle alakalı üç faktörün etkisinden kaynaklanır ve hem yüklemeye ve hem de kayma hızından etkilenebilir. Şekil 3.10' da mekanik hasar miktarı ve ara yüzey sıcaklığının yüke ve kayma hızına bağlı olarak değişimi şematik olarak gösterilmiştir.

Yükteki yükselme daha büyük gerilmelere sebep olur ve bu da daha çok mekanik hasarı doğurur. Hem yük hem de kayma hızı ara yüzey sıcaklığına etki eder. İkisi birlikte ara yüzeydeki güç dağılımını kontrol ederler. Bunlara ek olarak kayma hızı ara yüzeyden uzaklaşan ısı iletimini belirler. Düşük kayma hızında üretilen ısı oldukça hızlı iletildiğinden ara yüzey sıcaklığı düşecektir. Sınırdaki kayma prosesi izotermal olacaktır. Yüksek hızlarda sınırlı bir ısı iletimi olacağından dolayı ara yüzey sıcaklığı yüksek olacak ve sınır şartları da adyabatik olacaktır. Yüksek ara yüzey sıcaklığı yüzeylerde meydana gelecek olan kimyasal reaksiyonu artırır.

Örneğin havayla temas eden yüzeyde hızlı bir şekilde oksit tabakası oluşur. Böylece pürüzlülüğün mekanik direnci azalır.



**Şekil 3.10** Normal yük ve kayma hızının metallerdeki kayma aşınması prosesine etkileri

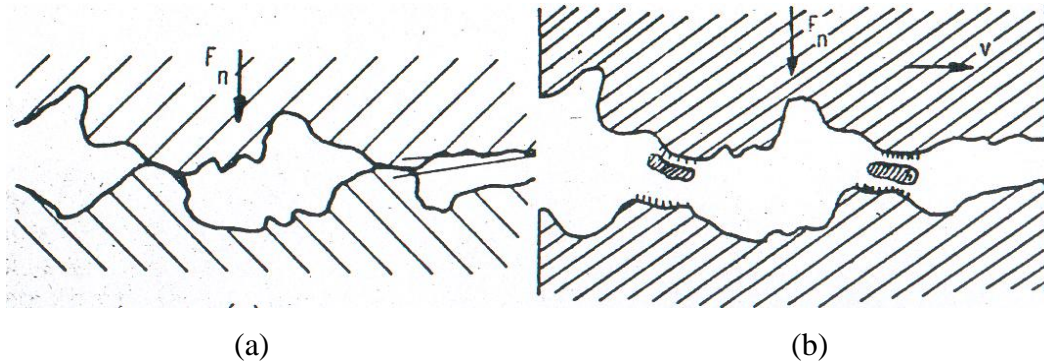
### 3.2.4. Aşınmanın Genel Sınıflandırılması

Temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, birçok aşınma hali vardır. Bunlar; adezyon aşınması, abrazyon aşınması, mekanik korozyon aşınması, yorulma aşınması (pitting), olmak üzere dört ana grupta incelenebilir (Peterson 1980).

#### 3.2.4.1. Adezyon aşınması

Adezyon aşınması en yaygın aşınma türüdür ve genel anlamda aşınma kavramı bu aşınma için kullanılmaktadır.

Özellikle kayma sürtünmesi yapan ve metalografik yapıları birbirine benzeyen metallerin kaynaklaşmasıdır. Çok iyi parlatılmış yüzeylerin bile çok küçükte olsa bazı bölgeleri birbirine temas eder. Çok küçük yüklemeler altında bile bu noktalardaki gerilmeler malzemenin akma sınırını geçebilir. Yüzeyde bulunan bu oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktalar kesilerek yenme ve aşınma olayı ortaya çıkar. Bu olay şekil 3.11’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Adezyon aşınmasının oluşması

Adezyon aşınmasının önlenmesi için alınması gereken önlemleri şu şekilde sıralayabiliriz.

- ✓ Adezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana geldiğinden malzeme çiftinin biri sert diğeri yumuşak olarak 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 katı bir yağ konulursa aşınma ve bilhassa yenme önenebilir. Bu nedenle adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır (Akkurt 1990, Rabinowicz 1964).

#### **3.2.4.2. Abrazyon aşınması**

Abrazyon aşınmasında yüzeylerin bozulması dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir.

Bu sert parçacıklar bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğilemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine neden olurlar. Abrazyon aşınmasında önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Yüzeylerin sertliği ısıtılma işlemi veya yüzeylere sert malzeme kaplama ile elde edilebilir.

Abrazyon aşınmasını önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir;

- ✓ Yüzeyler sertleştirilmelidir.
- ✓ Dışarıdan sert malzemelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır.
- ✓ Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir. Ancak bu oldukça zor bir iştir. Bazen aşındırıcı parçacıklar yumuşak metal içerisine gömülebilir. Bu durumda aşınma kaçınılmaz olmaktadır.

#### **3.2.4.3. Mekanik korozyon aşınması**

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, 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 gerçekleşir. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılır ve kırılan parçacıklar yerinden ayrılarak aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında

tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Henüz kesin olarak bilinmemekle beraber, hava rutubetinin de bu olay üzerinde etkisi büyüktür. Oksidasyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat veya sülfid ile işlem görür veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler kullanılır (Onaran 1993, Rabinowicz 1964).

#### **3.2.4.4. Yorulma aşınması (Pitting)**

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları 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 basınçları meydana gelir. Bu çeşit basıncın 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. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi bunların büyümesinde önemli rol oynayabilir. Pitting aşınmasının diğer bir açıklama tarzında ise çukurcukların plastik deformasyon nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir.

İki tip pitting vardır. Birinci tipi olan ilkel pitting de çukurcuklar çok küçük olup büyümeyiz ve yüzeye yayılmazlar. İkinci tipi olan tahripkar pitting de ise çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar. Birinci tipte parçanın normal çalışması genellikle etkilenmezken diğerinde parça işe yaramaz hale gelir.

Pitting oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynar. Doğal sertlikteki malzemelerde örneğin çeliklerde pitting meydana gelir ancak çeliğin yüzeyi sertleştirilirse pitting oluşumu geciktirilebilir. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Yorulma aşınmasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir (Akkurt 1990, Rabinowicz 1964).

### 3.3 Kompozit Malzemeler

#### 3.3.1 Kompozit malzemelerin tanımı

Teknolojik gelişmelerin temelinde malzeme alanındaki ilerlemeler ve yeni buluşlar yatmaktadır. Günümüzde malzeme bilimi tek bir mühendislik dalı olmaktan çıkmış, alt branşları olan metallere, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler, polimerler vb. gibi kollarına ayrılmıştır. Kompozit malzemeler ise bu gruplar içerisinde en önemlilerinden biri olarak çok geniş bir uygulama sahası bulmuştur. Havacılık, otomotiv, tekstil gibi önemli endüstri kolları kompozit malzemelerin önemini benimsemiş ve sürekli 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. Kompozit yapılar çatı ve matris diyebileceğimiz iki farklı oluşumun uygun usullerle bir araya getirilmesiyle teşkil edilirler. Adından da çağrıştırdığı gibi çatı kompozit yapının mekanik mukavemetini sağlamakla yükümlüdür. Kompozitler de çatıyı teşkil eden uygun malzemelerin iplikçik halindeki formlarıdır.

Matris ise fiberleri bir arada tutan ve fiberler arasında gerilim aktarımını sağlayarak kompozit yapının mekanik özelliklerinin oluşumunu dolaylı olarak etkileyen ve fiberleri fiziksel ve kimyasal dış etkenlerden koruyarak kompozit yapının bir sistem olarak ortaya çıkmasını sağlayan kısımdır. Matris malzemesi olarak uygun metal alaşımları kullanılabilir 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.

İyi bir görünüm vermeleri

Diğer malzemelere uyumluluğu

Kolay imal edilebilirlik ve yüksek üretim miktarlarına sahip olması

Düşük maliyet

Kalite

Uzun kullanım süresi ve iyi performans

Ham malzeme temin kolaylığı

Çok iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

### 3.3.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları

Cam elyafli 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 kompozitler uçak parçaları çok cazip hale gelmiştir. Bu alanda en çok kullanılan elyaf, karbon, aramid ve camdır. Matris malzemesi olarak 120-170°C 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 kompozitlerin bol miktarda kullanıldığı ilk uygulamalardan birisidir. Uzay mekaniğinin ana çatısı, 242 tek yönlü borun elyafı alüminyum ana yapılu tüplerden oluşmuştur. Bu tüpler alüminyum tiplere göre % 44 ağırlık tasarrufu sağlamıştır.

**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 imali ekonomik olarak mümkündür. Diğer taraftan lüks yatlar ve sürat motorları kompozitlerden imal edilirler.

### 3.3.3. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

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

#### **Avantajları:**

Çatlak ilerlemesi olayı minimize edilmiştir.

Titreşimleri absorbe edilme özelliği sağlanmıştır.

Kompozitlerden bazıları çok yüksek akma sınırı değerlerine sahiptir.

Korozyon problemi yoktur. Bunda matris ve malzemenin uygun seçilmesinin önemi büyüktür. Aksi takdirde birbirleri ile temasta bulunan malzemeler pil oluşturacak ve galvanik korozyona neden olacaktır.

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 mukavemet 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.
- ✓ Delik delme ve kesme türü işlemler liflerde açılmaya yol açmaktadır (Ancak 3 boyutlu dokumada bu olay söz konusu değildir. Zira 3 boyutlu yapının kesilmesiyle elde edilen ve 2.5 boyutlu yapı adı verilen malzeme türü iyi özellikler vermektedir.)

#### **3.3.4. 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 oluşurlar. Kompozitleri başlıca üç ana grupta inceleyebiliriz.

1-Fiber takviyeli kompozitler

2-Tabakalı kompozitler

3-Tanecikli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler

#### **Fiberglas**

Uçaklarda, panellerde kullanıldığı gibi, roket motorlarda da kullanılmaktadır. Avantajları; fiyatının göreceli olarak ucuz olması, kolay temin edilmesi, işleme

kolaylığı, yüksek mukavemeti, esnek olması ve düşük kalıp maliyetidir. Dezavantajı ise; neme karşı çok duyarlı olmasıdır. Havacılık ihtiyaçlarını karşılamak üzere temel olarak iki tip fiberglas bulunmaktadır. Bunlar “E-Camı” ve “S-Camı”dır.

### **E-Camı**

Moleküler yapısı “Kalsiyum Oksit / Alümina-Borasilikat” esaslıdır. Genel amaçlıdır. Mukavemet ve yüksek elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu alanlarda kullanılır. Diğer fiberlere nazaran daha ucuzdur.

### **S-Camı**

Bir “Siliko-Alümino-Magnesia” kompozisyonudur. Alümina içeriği E cam’ına göre daha fazladır ve mukavemeti E-camı’na göre %40 daha büyüktür. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini daha iyi koruyabilmektedir. Çok yüksek dayanım gereken yerlerde kullanılır. Fiberglasın bu tipi dokuma halinden ziyade iplikcik halinde bulundurulur ve kompozit teşkili sırasında istenilen formda dizilirler. Fiberglas demetleri genellikle reçine esaslı bir madde ile kaplanır ve sargı makineleri yardımıyla uygulama yapılır.

### **C-Camı**

“Soda-kireç-borasilikat” içerir. Kimyasal stabilitenin en önemli faktör olduğu alanlarda kullanılır. Asitlerle teması olan yerlerde kullanılabilirler.

### **Kuartz**

Düşük dielektrik özellikleri istenen anten, radar ve bunun gibi parçalarda kullanılır.

### **Boron**

Elastisite modülü yüksek kompozit teşkili için 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.

### **Karbon Fiberler**

Karbon fiberler cam fiberlere göre çekme dayanımı, elastikiyet modülü, ısı iletkenlik, 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 eklenmesi ile kompozit parçalar iletken haline getirilebilir. Bu özelliklerinden dolayı makaralı yataklarda, plastik elektrotlarda, motor farlarında kullanılır.

### **Grafit Fiberler**

Mükemmel işlenebilme yeteneği ve düşük ısıl genleşme katsayısı, grafitin diğer üstünlükleridir. Filamanların mükemmel şekillendirilebilme kabiliyetlerinden dolayı keskin şekilde köşeler yapılabilir. Isıl iletkenliğin yüksek oluşu, ısıl gerilmelerin radyasyon ve konveksiyon yolu ile üniform olarak dağılması sağlanır. Dezavantajı ise düşük genleşme katsayısının sebep olduğu ısıl gerilmelerdir.

### **Organik Fiber**

Diğer fiber türlerinden farklı olarak para-aramid fiberi aromatik polyamid yapıda bir organik polimerdir. Para-aramid mevcut organik ve inorganik fiberlerden en yüksek çekme mukavemetine sahip fiberlerden birisidir. 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.

### **UHMWPE (Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen) Fiber**

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 geçirilmesiyle elde edilir. Başlangıçta karmaşık bir yapı ihtiva eden polietilen, bu işlemde sonra bağ yapıları paralelleştirilerek ve yüksek düzeyde kristal bir yapı (%85) oluşturularak çok üstün özelliklere sahip bir fiber elde edilir. Eşi bulunmayan özelliklerinden bazıları:

- Yüksek çekme mukavemeti
- Çok yüksek elastisite modülü
- Sudan hafif olması (0.97 gr/cm<sup>3</sup>)
- Çok yüksek enerji emebilme özelliği
- Tekrar kullanılabilmesi

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, hafifliği nedeniyle denizcilik gibi alanlarda kullanılabilecek cazip bir malzeme olmaktadır.

### **Seramik Fiberler**

Sürekli seramik fiberler yüksek mukavemet ve elastik modül özelliklerini yüksek ısıya dayanıklılık ve çevresel şartlardan fazla etkilenmeme özellikleri ile birleştirilmektedir. Bazı karakteristikler, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme arasında bir konum kazandırmaktadır. Örnek olarak silikon carbide (SiC), fiberler ve alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) fiberler verilebilir.

### **Metalik Fiberler**

Tel şeklindeki birçok metal yüksek mukavemet özellikleri göstermektedir. Berilyum teli çelik ve tungsten en önemlileridir. Özellikle berilyum yüksek modül ve oldukça düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı yüksek fiyatına rağmen iyi bir fiberdir. Mukavemeti diğerine düşüktür.

### **Tabakalı Kompozitler**

En az iki değişik malzemenin tabakalar halinde dizilerek, teşkil etmiş olduğu kompozit malzemelere tabakalı kompozitler denir.

Tabakalama, tabakaları meydana getiren malzemelerin daha faydalı bir malzeme oluşturması için teşkil edilir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemelerin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, termal izolasyonu iyileştirilir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bir metalden haddelenmiş metallere, tabakalanmış camlardan, plastik tabakalı laminantlarda çok güzel şekilde görülebilir.

### **Bi Metaller:**

Termal genişleme katsayısı oldukça farklı, iki değişik metalin tabakalanmasından elde edilir. Sıcaklık değiştikçe belli bir ölçüde bir tarafa ve diğer tarafa eğilir veya çarpılır. Bu tür metaller sıcaklık ölçüm aleti olarak veya termostat olarak kullanılır.

### **Kaplanmış Metaller:**

Bir metal başka bir metalin üzerinde her iki malzeme özelliğinden daha iyi sır özellik elde etmek için yapılır. Mesela yüksek mukavemetli Al alaşımlar korozyona daha az dirençlidirler. Buna rağmen, saf alaşımlar korozyona daha dirençlidirler. Yüksek mukavemetli Al alaşımı korozyona dayanıklı başka bir alaşımla kaplandığı zaman meydana gelen kompozit malzeme her iki malzemedenden daha çekici avantajlara sahiptir. Elde edilen kompozit malzeme hem korozyona dirençli hemde yüksek mukavemetlidir. Son zamanlarda Al tel %10 bakırla kaplanarak elde edilen kompozit malzemenin, yani kompozitlerin bakır teller yerine kullanıldığı görülmektedir. Al tel hafif ve ucuzdur. Buna karşılık başka malzemeyle kaynak edilmesi ve yüksek

sıcaklıklara dayanması zordur. Diğer taraftan bakır tel pahalı ve oldukça ağır, kaynak ve diğer bağlantıların yapılması kolaydır.

Bakır kaplanmış Al tel ise hafiftir. Kolayca kaynak bağlantısı yapılabilir. Bakır kaplı Al tel 3/16" lik çaplı tel haline gelebilir. İçine 0.015" lik çapa kadar bakırın korozyonundan etkilenme olmadan çekilebilir.

Dezavantajı çekme sırasında tabakalar arasında ayrılma oluşmasıdır. Bu yüzden dikkatli kontrol gereklidir.

#### **Tabakalanmış Fiber Kompozitler:**

Tabakalanmış elyafli kompozitler, kompozitlerin merkez sınıfını oluştururlar. Çünkü bunlar elyafli kompozitler ve tabakalanma tekniğini aynı anda ihtiva ederler. En yaygın bir isim tabakalanmış elyaf takviyeli kompozitlerdir. Buradan tabakalar veya elyaf takviyeli malzemenin tabakaları, her biri değişik yönlerde dizilmiş tabakacıkların birleştirilmesiyle meydana gelmiştir. Meydana gelen kompozit malzemenin mukavemeti ve rijitliği değişik yönlerde takviyelendirilmiştir.

Tabakalı elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemeti ve rijitlikleri inşa edilecek yapı elemanlarının dizayn ihtiyaçlarına göre belirlenir. Tabakalı elyaf takviyeli kompozitlere, roket lançerleri (kılıflar), fiberglas, kayak veya robot gövdeleri, hava aracı kanat panelleri ve gövde bölmeleri, tenis raketi, golf sopaları vs. verilebilir.

#### **Tanecikli Kompozitler:**

Tanecikli kompozitler bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesinden meydana gelir. Parçacıklar ve matrisler metalik veya metalik olmayan matrisle birleşmesiyle meydana gelen kompozitler veya bunların tersi olan kompozitlerdir. Parçacıklı kompozitlere örnek olarak betonu verebiliriz. Beton kum ve çakıl parçacıklarının çimento ve su ile birleştirilmesi sonucu olur. Betonda ne parçacık nede matris malzeme metaliktir. Metalik olmayan matris metalik parçacık birleşimi kompozitlere örnek, roket pervaneleridir. Roket pervaneleri polietan ve polisülfat kauçuklar içerisine Al tozları ve perklorat oksitleyicilerin katılması ile elde edilir.

#### **3.3.5. Kompozitlerde matris çeşitleri**

Bir kompozit yapıda matrisin görevi, yapıştırıcı ve tutucu özelliği ile, fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere aktarmak, dağıtmak ve kompozit yapıyı dış etkenlerden korumaktır.

1. Plastik matrisli kompozitler: Matris olarak plastik esaslı malzemelerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Örnek olarak cam elyafı plastikler verilebilir.

2. Metal matrisli kompozitler: Matris olarak, Al, Mg ,Cu ve çelik ile benzeri metallerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir.

### **3.3.6. Kompozit malzemelerin imalinde kullanılan matris malzemeler**

#### **Plastikler**

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 40-50 yıl içinde büyük gelişmeler göstererek metallerle aynı oranda kullanılmaya başlanılmıştır.

#### **Elastomerler**

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

#### **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 Vander Wals bağı vardır. Bu nedenle rijit yapıya sahip değildirler. Isı altında yumuşarlar ve bu özelliklerinden faydalanarak ısıtılmak suretiyle şekillendirilirler. Bu şekil değişikliği esnasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Tekrar tekrar ısıtılarak yeni şekiller alabilirler. Piyasada ise toz ve granül halde bulunurlar. Kompozit imalatında az da olsa kullanılırlar.

#### **Termosetler**

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

### **Cam takviyeli plastik tipi**

Plastik malzemeler en çok reçine diye adlandırılırlar. Kompozit malzemelerin imalatında en çok kullanılan termosetlerdir. Ekonomik, verimli ve gelişmiş mekanik özellikleri olan parçalar, termosetlerden kolaylıkla yapılırlar. Günümüzde deniz araçları yapımında, otomotiv sanayinde, inşaat sektöründe, depo, tank boru yapımında bilhassa ekonomik olması sebebiyle yaygın olarak kullanılırlar.

Termoset plastikler içinde en yaygın kullanılanı poliesterler, fenolik reçineler, ekopsi reçineler ve silikonlardır. Poliester ise bunların içerisinde en yaygın kullanılanıdır. Özellikleri imalat kolaylığı ve yatırımın düşük olması poliesterlerin tercih edilme nedenidir. Fenolik reçineler ise yüksek mukavemetin yanı sıra, büyük ısı direnci istenen yerlerde kullanılırlar.

### **3.3.7. Plastiklere katkı maddesinin katılması**

Pratikte plastik malzeme özelliklerini iyileştirmek gayesiyle ilave katkı maddeler katılarak kullanılır. Bu katkı maddeleri ise şunlardır:

- Polimer reçineler
- Cam ve karbon elyaflar
- Dolgu malzemeleri
- Yumuşatıcılar
- Stabilizatörler
- Yağlayıcı
- Renk verici
- Aleve karşı koruyucu

Bu gibi katkı maddeleri ise çeşitli yöntemlerle plastik içerisine katılırlar.

### **3.3.8. Plastiklerin genel özellikleri**

Plastik malzemelerin genel özellikleri:

1-Plastiklerin dış görünüşleri: Plastikler genel olarak renksiz, şeffaftır ve istenilen renge boyanabilirler.

2-Yüzey sertliği: Plastikler yumuşak olduklarından aşınma dirençleri zayıftır, bazı boyayıcı maddelerle karıştırıldığında yüzey sertlikleri artırılabilirler.

3-Yoğunluğu: Plastiklerin yoğunluğu oldukça düşüktür. (0.9-2.5 gr/cm<sup>3</sup>)

4-Isıl özellikler: Genel olarak plastiklerin 100-180 °C arasında olur. Çünkü yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Isı iletim katsayıları çok düşüktür. Bu nedenle

malzeme içinde biriken ısı, ısıyı yorulmaya yol açar. Plastiklerin ısı iletim katsayılarını artırmak için Al, Cu, C cam elyafı katılır. Ayrıca plastiklerin ısı iletim katsayıları metallerinkinden çok yüksektir.

5- Kimyasal özellikler: Genel olarak termoplastikler asit, bazlı ve tuzlu çözeltilere dayanıklıdır. Fakat termosetler kimyasal etkilere dayanıksızdır.

6- Yanma özellikleri: Termoplastikler, alev veya aşırı ısı karşısında yanarak özelliklerini kaybederler. Alevden uzaklaştırıldıklarında yanma durur.

7- Havadan etkilenme: Plastikler havadan etkilenecek bozulurlar. Radyasyon, yağmur veya dolu erzyonu, rüzgar, hava kirliliği gibi etkilere bozulurlar. Ultraviyole ışınlar renklerini alır.

8- Elektriksel özellikler: Plastiklerin elektrik özellikleri oldukça zayıftır. Çok iyi yalıtkanlık gösterirler.

### 3.3.9. Plastik matris kompozit imalatı

Termoset Kompozitlerin İmalatı

#### Islak Kalıplama

Bu yöntem, tek yüzü düzgün küçük çapta üretim için kullanılır. Genellikle CTP 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;

- a) El yatırması
- b) 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 şekilde 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 aynı profilin şeklini belirler.

İkinci yöntemde cam elyafı belli bir gerilim ile kuru olarak ısıtılmış kalıplardan geçirilir ve kalıp içerisinde reçine enjekte edilir.

#### **3.3.10. Termoplastik kompozitlerin üretimi**

Klasik termoplastik imalat yöntemleri ile termoplastik kompozitler üretilmekle beraber ticari düzeyde kullanılan en önemli metod enjeksiyondur. Termoplastik kompozitlerin enjeksiyonunda bazı ilave zorluklarda ortaya çıkmaktadır.

Takviye malzemesi basma viskozitesi artacağından enjeksiyon basıncı termoplastiklere nazaran %80 kadar daha fazla büyüyebilir.

Kompozitlerde rijitlik, 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 makinası yerine karışmayı ve homojenleşmeyi ölçmeyi ve sıcaklık kontrolünü daha iyi sağlamak için vidalı enjeksiyon makinası tercih edilir. Makinanın vida hızı ve geri basıncı elyafların hasar görmeyeceği şekilde seçilmesi gereklidir. Elyafın aşındırıcı özelliği hem tezgahta hem de kalıpta hızlı aşınmaya yol açabilir. Bu mahsur sertleştirilmiş kalıp çeliği kullanılması halinde ihmal edilebilecek düzeye inebilir.

#### **3.3.11. Metal kompozitler**

Metal Matriksler:

Alüminyum, titanyum, nikel fiberleri ve erimez metal matriksleri bir araya getirilip yapıştırılarak metal matriksler elde edilir. Bunlardan bor / alüminyum olanlar difüzyon yolu ile bağlanmış tabakalar ve plazma püskürtülmüş şeritler şeklinde üretilmektedir. Yapıştırıldıktan sonra alüminyum 530°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda

işlenecek ise bor fiberlerinin tahrik olmaması ve özelliklerini kaybetmemesi için boric fiberleri kullanılması gerekir.

Metal matriksli alüminyum kompozitleri sürekli veya aralıklı olarak üretilebilir. Düşük maliyetli parçalarda aralıklı olanlar, ağırlık kazancının istendiği yerlerde sürekli olanları tercih edilirler. Silikon korpit ve  $Al_2O_3$  fiberlerinin hem sürekli hem de aralıklı olanları mevcuttur. Süreksiz fiberler, metal püskürtme veya toz metalürjisi ile birleştirilirler.

Çizelgede bor / alüminyum kompozitinin plazma, difüzyon ve ötektik bağlama işlemlerine göre mekanik özellikleri gösterilmiştir. Kaynak konvansiyonel tekniklerinden birisidir. Difüzyon ile bağlama işleminde ise birleştirilecek yüzeyler, boşaltılmış retort içinde  $490^{\circ}C$ 'de ve 69 MPa basınçta veya  $530^{\circ}C$  ve 2070 Pa basınçta 30-90 dakika ısıtılmak sureti ile iki katı yüzey arasında difüzyon sağlanarak parça birleştirilir.

Ötektik bağlama işleminde birleştirilecek parçalar, gümüş veya bakır ile kaplanır.

#### Bor-Alüminyum Kompozitinin Mekanik Özellikleri

Metal matrikslere uygulanan bu işlemler diğer reçinelerle karşılaştırıldığında çok masraflı olduğu görülür. Ayrıca, elde edilen matriksin boyutu ve şekli de sınırlıdır.

### 3.3.12. Metal matriks kompozitlerin imalatı

Metal matriks kompozitlerde matriks malzemesi olarak Al, Mg, Ti kullanılır. Takviye olarak seramikler, partikül, levhacık, visker, elyaf şeklinde kullanılır. Matriks malzemesi olarak Cu ve Al'da grafit elyaf olarak kullanılır.

Metal matriks kompozitler sürekli takviyeli ve süreksiz takviyeli kompozitler olmak üzere ikiye ayrılabilir. En kolay ve en ucuz takviye fiberdir. Partikül ve levhacıklar ise viskerler ve fiberlere göre kolay üretilebilirler.

### 3.3.13. Malzeme özellikleri

Sertlik:

Yapısal parçaların dizaynında, fiberle güçlendirilmiş yapılar önem arz eder. Bu kompozit sistemler uygun nedenlerle birleştirilirler. Örneğin, fiberin bölgesel kompozisyonu kabul edilerek, boyutlar ile fiber yapısının şekli ve tipi değiştirilerek, bir kompozit parçanın farklı alanlardaki sertlik değerleri önemli oranda değiştirilir.

Süneklik:

Çok rijit metallerdeki gibi, karbonla güçlendirilmiş plastiklerde gevreklerdir. Çünkü karbon lifleri kırılmandır. Karbon lifli kompozitler bir davranış göstermezler ve darbe dirençleri oldukça düşüktür.

İletkenlik (Geçirgenlik):

Plastik reçineler içerisine katılan karbon fiberleri, elektrik ve ısı iletkenliğini sağlayan tertiplere neden olurlar. Elektrik iletkenliği doğru akım için faydalar sağlar. Bu özellik elektrostatik uygulamalar için bir avantajdır.

Isıl Genleşme:

Bir kompozitin ısı genleşme katsayısı sadece fiberlerin boyutlarına bağlı değildir. Fakat matriks metalin ısı davranışları da önemlidir. Dolayısıyla kompozit malzemelerdeki ısı genleşmeleri önlemek için dikkat edilmelidir ve yönler ile boyutlar ilgili tolerans limitlerini aşmamalıdır. Eğer ki ısı genleşmeler zarar verici seviyede ise kesintili fiberlerdeki rasgele yönlendirilmiş yapı uygun bir çözüm olabilir. Matriks materyaldeki genleşme fiberlerden daha büyüktür. Isıl genleşmeler bir kompozit malzemede kolayca oluşabilir. Çünkü matriks reçinedeki elastik genleşmeler, karbon liflerinden daha geniş ve sünektir. Ayrıca indüklenmiş ısı gerilmeleri absorbe eder. Ara yüzey bağ kuvveti fiber-matriks boyunca değişmez ve kompozit malzemenin özelliklerini etkilemez. Bir kompozit malzemenin çalışma sıcaklığının limitleri, matriks yapısına bağlıdır. Yüksek sıcaklık epoksileri için sıcaklık dağılım birkaç yüz derece olabilir. Maksimum olarak 350°F (177°C)dir.

Eğer gerilmelerin seviyesi 30 kips / in<sup>2</sup> (207 Mpa) ve elastisite modülü 5-30\*10000000 lb. / in<sup>2</sup> (34,5-2076 pa) olacağı bekleniyorsa, kuvvetlendirilmiş fiberlerin bazıları belirli şekillerde olmalıdır.

Şekiller ( Morfolojiler ):

Bir parçanın istenilen dizaynında ilk olarak, uygun metaller şekilleri ( formları ) ve üretim metodlarının anlaşılması gerekir. Kompozit yapılar çok çeşitli şekiller sahip olmalarına rağmen hepsi, polister, tipik epoksilen, reçine matrisindeki uzun fiberlerle meydana gelir. Kısa ve rasgele dağılmış fiberlerde, uzun fiberlerle birlikte bir darbe emici gibi kullanılırlar. Materyal şekillere belirli fabrikasyon ( üretim) işlemleri ile temin edilir. Şekiller ve işlemler, karıştırılan kuru fiberler ve reçinelere göre gruplandırılabilirler.

### 3.3.14. Tasarımların faktörleri

Geçmişte tasarım mühendislerinin yaklaşımı, kompozitlerin yerine geçen yeni parçaların tasarım idi. Örneğin, kompozit malzemelerden türbin motorları dizaynında, mevcut bileşenleri ağırlık ve maliyetin azaltılması gibi bir yol izlenmiştir. Kompozit parça tasarımı, bu nedenle kompozitler genelde önemli olmayan komşu tesisatlarla uygunluğa zorlanmıştır. Sonuç olarak, kompozit bileşenler, orijinal motor dizaynında istenmeyen ekstra özellikleri ve fazlalıkları ihtiva ederler. Dahası, kompozit yapılarının belirli mukavemet özellikleri ve daha yüksek belirli sertlik gibi tüm avantajların tamamı avantaj olarak alınmaz. Değişen isteklerden dolayı ortaya çıkan maliyet ve ağırlık, motor dizaynına kompozit malzemeleri daha az çekici hale getirir.

Kompozitlerin birleştirilmesi ile oluşan yeni motor dizaynında düşük ağırlık ve düşük maliyet planlanmıştır. Kompozit malzemeler, gaz-türbin motorlarında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çünkü motor sistemlerinin doğal yapısı, malzeme yapısındaki değişimlere karşı aşırı derecede koruyucu tarzda yapılmamıştır. Yani ilerlemiş süpersonik motorlar, en düşük ağırlıkta, maksimum performansı verecek şekilde dizayn edilmiştir.

Ticari amaçlı jet türbin motorlarında kritik kompozit bileşenler, türbin motor sistemleri ve askeri alanda kompozitlerin başarılı bir şekilde kullanılmasına dayandırılır. Bir işletimsel jet motorundaki malzemelerin toplam sıcaklık oranı -65'den yaklaşık olarak 2200°F (-54' den 1220°C)'ye ulaşabilir. Bunlar genellikle uçak motorlarında, fanlarda, bazı durumlarda düşük basınçta kompresörlerde ve sıhhi tesisatlarda kullanılırlar. Bu kompozit malzeme 600°F (316°C) 'yi geçebilecek giriş sıcaklıklarında motorlarda daha ileri seviyede kullanılabilir.

Yapısal kompozitler, normal biçimde sertleştirilen fan pervanelerinde çekicidir. Bu durumda yüksek sertlik, kompozitlerin düşük yoğunluğu, fan veya kompresör veriminin artması, maliyet ve ağırlığın azalması gibi avantajları kompozitler içerir. Daha da önemlisi, metal parçalarla mümkün olandan %50 daha yüksek dönme hızı sağlayan kompozit fanlar yapılabilir.

Motorlardaki yüksek sıcaklıklar genellikle, polimid reçine veya metal (Al ve Ti) gibi kompozit matrislerin tipini sınırlar. Güçlendirilmiş, süper alaşımlı fiber yapılardaki gibi yeni kompozit sistemler, kompresör ve türbinlerde ilave uygulama alanları bulmuştur.

### 3.3.16. Kompozit malzemelerin mekanik davranışları

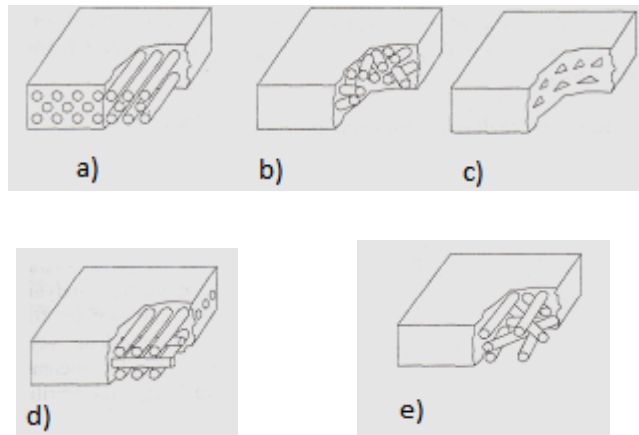
Kompozit malzemeler onları daha klasik mühendislik malzemelerinden farklı kılabacak birçok karakteristiklere sahiptir. Çoğu yaygın mühendislik malzemeleri homojen ve izotropdur. Yapılar ile sıcaklık bağımlı izotropik malzeme özellikleri, bir sıcaklık değişimine (gradyanına) maruz bırakıldığında homojen değildir. Fakat hala izotropiktir. Kompozit malzemeler genellikle hem heterojendir ve hem de anizotropiktir. Bazı kompozit malzemeler çok basit örneğin, yaprak şekilli cam fiberli yapı, üç tabakaya sahiptir ve bunların her biri homojen ve izotropiktir.

### 3.3.17. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler yumuşak ve sünek matriks içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Matriks malzemesi yükü elyaflara transfer ederek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken, elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Çökeltmeyle sertliği artırılmış kompozitlerin aksine kompozitin dayanımı hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda artırılır. Bu takviyeli kompozitlerde oldukça değişik takviye elemanları kullanılmaktadır. Elyaf, örme, veya şerit fitil şeklinde olabilmekle beraber tabakalar halinde yönlü elyaflar da kullanılır. Sürekli elyafları çok yönlü takviyelendirebilmek için çoklu filamentler halinde veya dokunmuş örgü halinde kalıp içerisine yerleştirilir. Ön ısıtmadan sonra metal veya alaşımı sıvı metal emdirme veya infiltrasyon metodu ile emdirilerek üretilmekte olup genellikle de metal matriksli kompozitlere uygulanmaktadır. Beton yapılarda çelik tel çubuğun girmesi, polimer matriks içine katılan cam elyafla kompozitler ulaşım ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Boron ve grafit elyaflarda polimerlere göre üstün özellikler sağlarlar. Keza takviye elemanları değişik yönlerde Şekil 3.12 de görüldüğü gibi düzenlenebilmektedir. Anizotropik özellikler elde etmek amacıyla sürekli tek yönlü elyaflarla takviyelendirme yapılmaktadır.

Bu tip kompozitlerde takviye fazı %80 hacim oranına kadar sürekli elyafların en küçük çapları 10-20 nm iken en büyük çapları ise 100-200  $\mu$ m çaplarında üretilir ancak kullanıldığı yere göre tek filamentler halinde kullanılırlar. Filamentler kimyasal buharlaştırma ve fiziksel buharlaştırma metodu ile kaplama yapılarak üretilir. İlk üretilen sürekli elyaflar boron ve SiC olmasına rağmen daha sonra karbon, alumina

esaslı elyaflar da uzun olarak üretilmektedir. Elyaf takviyeli kompozitin mikro-yapısal özelliği, elyafların uzun ve tek boyutlu olmasıdır. Bunlarda elyaf kuvvetleri taşırken matriksde kuvvetleri elyafa iletir. Genelde elyaf yönlendirildiği için mekanik özellikleri anistropiktir. Sürekli elyaflar yönlendirilme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen yüklemeye çekme, basma ve eğilme gerilmeleri için istenilen dayanıma ulaşılabilir. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun elyaflar nedeniyle elyaf doğrultusunda maksimum performans gösterirler. Ancak elyaf eksenine dik doğrultuda düşük özellikler elde edilir çünkü matriks dayanımı esas olmaktadır. Bu mahsuru gidermek için hem elyaf eksenine dik hem de elyaf eksenine paralel kuvvet uygulandığında mekanik özellikleri iyileştirmek için ise değişik açılarda takviyelendirme yapılmak suretiyle bu doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

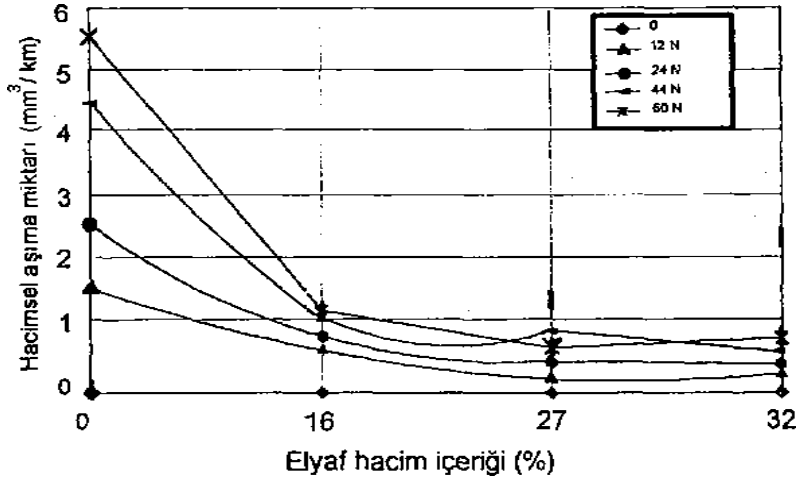


**Şekil 3.12** Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler. a) Tek yönlü sürekli elyaflar, b) Kesikli elyaflar, c) Ortogonal elyaflar, d) Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar.

### 3.4. KOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞI

#### 3.4.1 Kompozitlerin aşınması

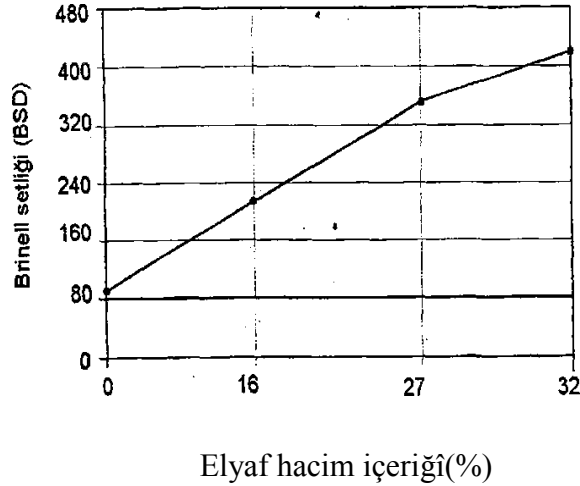
Elyaf takviyeli metal ve plastik kompozitlerin yüksek özgül dayanımı, modülleri ve yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle son yıllarda kullanım alanları artmaktadır. Bunun yanında, yüksek performans gerektiren sürtünme ve aşınmaya dirençli malzemelere olan ilgi ve istek de özellikle otomatik sanayinde bu malzemelerin geliştirilmesinde bir diğer tahrik edici unsur olmuştur. Grafit, alumina, SiC ile takviyeli metal ve epoksi kompozitler üzerine bir çok çalışmalar yapılmış ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. Bu malzemelerin aşınma davranışlarında ana matrikse göre oldukça büyük ilerlemeler, özellikle, grafit elyaflı kompozitlerin yağlayıcı özellikleri nedeni ile elde edilmiştir. Burada sürekli boron elyaf takviyeli alüminyum matriksli kompozitler sıvı metal emdirilmesi metodu ile maksimum % 32'e kadar elyaf içerikli olarak üretilmiştir. Aşınma davranışları Pin-on-disk türü standart bir deney aparatında değişik şartlar gerçekleştirilmiş ve ana malzeme ile karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 3.13. Boron elyaf takviyeli alüminyum kompozitlerde hacimsel aşınma miktarı değişimi.

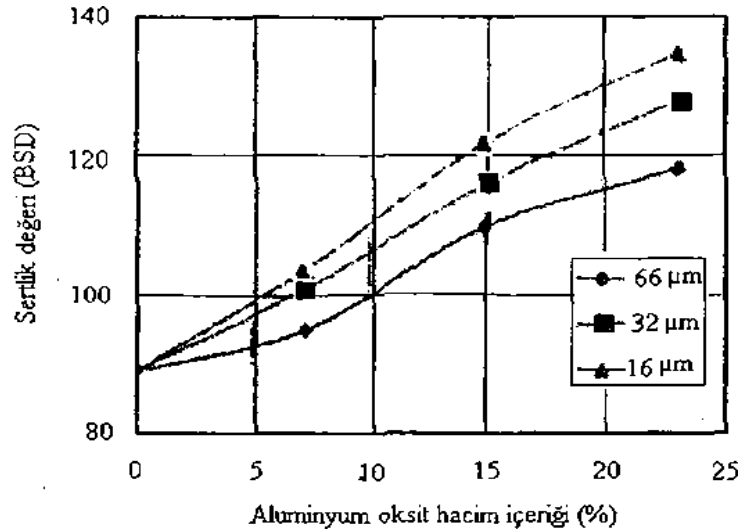
Değişik yükleme şartlarında yapılan bu deneylerde hacimsel aşınma miktarı ölçülmüş olup deney sonuçları Şekil 3.13 de gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, sürekli elyafla takviyeli bütün kompozitlerde hacimsel aşınma miktarının takviyesiz matriks malzemesinden oldukça büyük oranda azalmaların olduğunu göstermiştir. Örneğin, % 32 elyaflı kompozit için matrikse göre % 84'lük bir azalma elde edilmiştir. Ancak % 16 elyaf içerikli kompozitlerde diğerlerine göre daha

fazla aşınma miktarı olduğu gözlenmiştir. Bunun da üretim esnasında mikro yapıdan da gözlenebileceği gibi elyafların uniform dağıtamadığından ileri gelmektedir. Benzer düşüşler diğer takviyeli kompozitlerde de görülmektedir. Bunun esas kaynağı ise Şekil 3.14 de gösterildiği gibi, elyaf içeriğine bağlı olarak kompozitin sertliğinde sürekli doğrusal bir artış meydana gelmesinden ileri gelmektedir. ( Y. Şahin Kompozit malzemelere girişi, Gazi Kitabevi, 2000)



Şekil 3.14. Elyaf içeriğine bağlı olarak Brinell sertliğinin değişimi

Yukarıda açıklandığı gibi son zamanlarda yapılan bir çalışmada da, 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 3.15 de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği gibi parçacık içeriğinin artması ile MMK'lerin sertliği önemli derecede artmaktadır. Bunun yanında partikül boyutunun azaldığı zaman ise sertliğinin arttığı görülmektedir. Benzer davranışlar bu kompozitlerin çekme dayanımı sonuçlarında da gözlenebilir. Yani, artan parçacık hacim içeriği ile azalan parçacık boyutu ile MMK malzemelerin çekme mukavemetleri de artmaktadır.

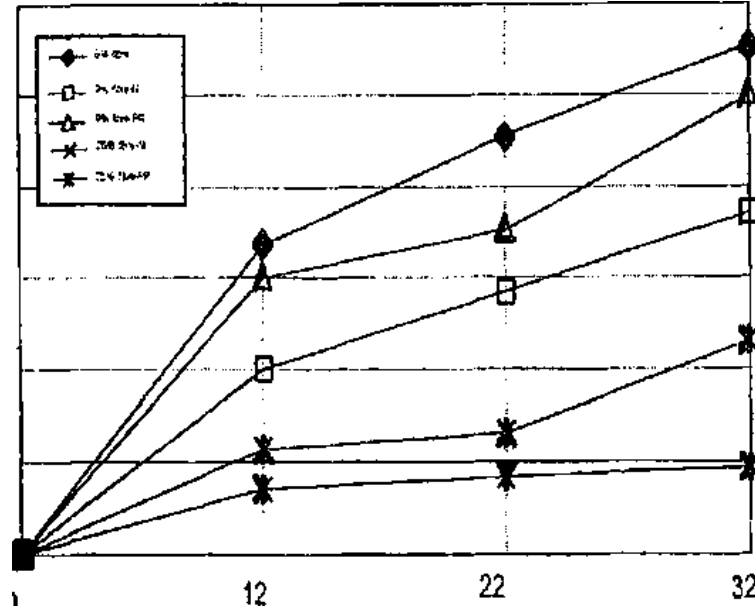


Şekil 3.15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık takviyeli Al esaslı kompozitlerin parçacık hacim içeriğine göre sertliklerinin değişimi

Aynı şekilde, plastik matriksli kompozitler yine boron elyaflar kullanılarak sıcak presleme tekniği yardımı ile üretilmiştir. Benzer şartlarda deneyler yapılmış yine ana malzemeye göre aşınma miktarında oldukça fazla oranda azalmalar ortaya çıkmıştır. Sürpriz olarak da plastik matriksli kompozitlerin aşınma direncinin metal matriksli kompozitlerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Bunun ise sertleştirilmiş çelik disk ile plastik matriksli kompozitler arasında oluşan tribo-filmden kaynaklandığı gözlenmiştir.

Diğer bir metal matriksli kompozitin aşınma ve sürtünme davranışları benzer çalışma şartlarında incelenmiştir. Ancak bu çalışmada ise rastgele doğrultuda yönlendirilmiş "Saffil" alumina parçacıkları ile çinko- alüminyum alaşımları takviyelendirilmiştir. Alumina takviyeli Al-Zn esaslı kompozitlerin ve matriks malzemesinin uygulanan yüke göre hacimsel aşınma miktarının değişimini gösteren aşınma sonuçları Şekil 3.16 da gösterilmiştir. Bu deneylerde aynı zamanda elyaf içeriğinin ve elyaf doğrultusunun etkisi araştırılmıştır. Bu deneylerde % 9 ve % 26 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elyaf içerikli kompozitler farklı yükleme şartları altında incelenmiştir. Deneyler, hem normal elyaf doğrultusunda hem de rastgele düzlemsel doğrultuda yönlendirilmiş elyaf takviyeli kompozitlerde ve ana matriks malzemesinde 1.6 m.s<sup>-1</sup> sabit hızda yapılmıştır. Bu şekilden görüldüğü gibi metal matriksli kompozitin aşınma miktarının matriksten daha düşük olduğunu göstermiştir. Aynı şekilden yine, elyaf içeriğinin artması ile aşınmanın azaldığı ancak artan yükleme şartlarında aşınma miktarının yine arttığı görülmektedir. Her iki malzeme türü içinde normal uygulanan yükün artması ile aşınma miktarı da artmıştır. Ancak matrikste yük artışı ile aşınma miktarında hafif azalma eğilimi vardır.

Elyaf doğrultusuna gelince, 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 kompozitte oluşan aşınma miktarı  $0.468 \text{ mm}^3/\text{km}$  iken aynı hacim içerikli ve yükleme şartları altında normal doğrultulu kompozit malzemelerde ise bu değer  $0.185 \text{ mm}^3/\text{km}$  olmuştur. Bu şartlarda yapılan deneylerde rastgele yönlenmiş % 9 içerikli kompozitler de hayli artış olduğu gözlenmektedir. Diğer yükleme şartları da incelendiğinde alumina takviyeli bu kompozitlerde normal elyaf doğrultulu kompozitlerin rastgele düzlemsel yönlenmiş kompozitlerden daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Bunun nedeni açıklayabilmek için bu kompozitlerin aşınma sonrası yüzey topograflarının incelenmesi ile aydınlığa kavuşabilmektedir. Bu nedenle tarama elektron mikroskobu incelemesi yapılmalıdır.



Şekil 3.16 Alumina/Al-Zn alaşımlı kompozitin hacimsel aşınma miktarının uygulanan yükle değişimi.

Bu davranışın farklılığın muhtemel sebebi de; rastgele yönlendirilen elyaflarda hem eğilme hem de burulma etkisi ile yaklaşık  $500 \mu\text{m}$  uzunluğundaki elyafların yüzeye daha yakın konumda oldukları bunun sonucu olarak da daha çok çatlama ve kırılmalara yol açtığı fakat normal konumda takviyelendirilen elyaflarda ise  $3 \mu\text{m}$  çap, belli uzunlukta bağ oluşturdukları, ve sadece parçacık elyaf diplerinden ufak boyutta çatlamalara sebep olduğu bunun da sonraki çevrimlerde matris içerisine gömüldüğü yapılan tarama elektron mikroskopik çalışmadan ortaya çıkmıştır. Daha detaylı olarak

ortaya çıkarılmasında ileri malzeme metalografik ölçüm tekniklerinin kullanılması uygun olacaktır.

### 3.4.2. Kompozitlerin aşınma yüzeyleri

Yukarıda belirtildiği gibi ana matriks malzemesi ile kompozitlerin aşınma miktarlarının farklı olduğu değişik kompozit malzemeler ile yapılan deney sonuçlarından görülmüştür. Bu olayın daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacı ile burada bazı aşınmış kompozit ve matriks ana malzeme yüzeylerinin incelemesi yapılmıştır. Benzer şartlar altında kompozitler üzerinde deneyler yapılmış olmasına rağmen oldukça farklı aşınma yüzeyleri gözlenmiştir. Şekil 3.17 de tarama elektron mikroskobu ile düşük görüntü de tipik bir matriksin aşınma yüzeyi gösterilmiştir. Burada deney  $1 \text{ m.s}^{-1}$  hızı ve 24 N yük altında yapılmıştır. Bu mikro fotoğraf kayma doğrultusuna paralel yüzey üzerinde aşırı uzun sürekli oluklar gözlenmektedir. Şekil 3.17b de ise yine aynı Al matriks alaşımının aşınmış yüzeyi gösterilmektedir. Burada keza deney aynı hız fakat 60 N yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Bu daha büyük yüklemde oluklar yine var fakat düzleşme olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında lokal katman ayrılması (delaminasyon) ve hasarlı bölge oluştuğu görülmektedir.



a)



b)

**Şekil 3.17** Al-2014 alaşımının aşınmış yüzeyinin mikro fotoğrafı. Düşük yük ve düşük büyütmede (a), Al-2014 alaşımının aşınmış yüzeyinin mikro fotoğrafı, Yüksek yük ve yüksek büyütmede (b)



a)



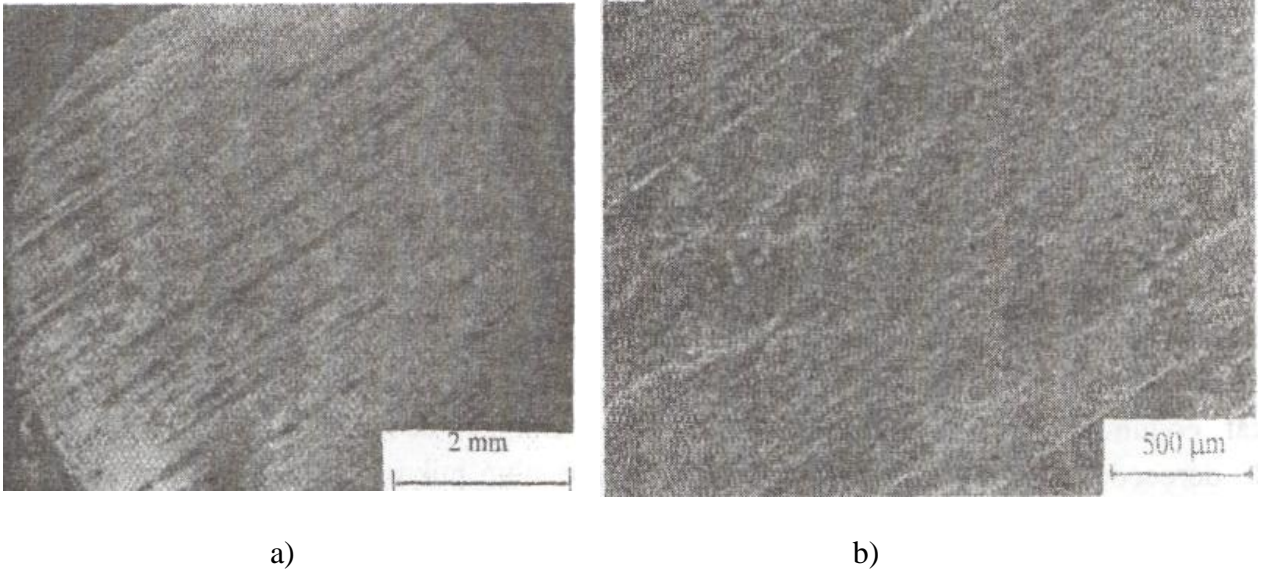
b)

**Şekil 3.18** % 32 boron elyaf içerikli Al kompozitin aşınma yüzeyi, a) Düşük büyütmede oldukça düzgün yüzeyin gösterilmesi, b) Yüksek büyütmede ise elyaf uçlarında çatlamlar ve matriksin kırılan yere sıvanması

Aynı şartlar altında deney yapılan kompozitlerde ise oldukça farklı şekilde aşınma yüzeyi gözlenmiştir. % 32 boron elyaf içerikli Al kompozit 44 N yük altında deneye tabi tutulmuş ve aşınma yüzeyi Şekil 3.18a da gösterilmiştir. Bir önceki matriks alaşımına göre bu düşük ölçekli mikro fotoğraf yüksek yük altında deney yapılmasına rağmen derin oluklama ve çukurlar gözlenmemiş ve oldukça düzgün bir yüzey görüntüsü mevcut olduğu görülmektedir. Plastik deformasyon ile ilgili çok az delil görülmekte, bunun da elyaf uçlarında ufak ölçekli kırılmalardan kaynaklandığı bu kırılan yerlere de matriksin sıvandığı gözlenmiştir. Şekil 3.18 b de aynı numune fakat

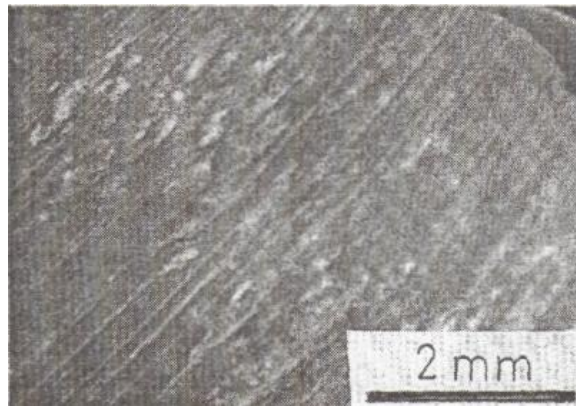
daha yüksek büyütmede gösterilmiştir. Bu mikro fotoğraf elyaf diplerinden yaklaşık 25µm'e kadar çatlamlar olduğunu göstermektedir. Daha sonraki kayma ve sürtünme işlemi ile buranın matriks alaşımı tarafından doldurulduğunu göstermektedir.

Burada da elyaf doğrultusunun aşınma miktarı üzerine etkisi incelenmiştir. Metal matriksli kompozit malzemeler hem elyaf eksenine dik doğrultuda hem de elyaf eksenine paralel doğrultuda kesilerek hazırlanmış ve farklı şartlarda aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Bundan sonraki açıklamalarda normal doğrultuda teste edilen kompozitler “N” ve elyaf eksenine paralel doğrultuda test edilen kompozit malzemeler de “P” şeklinde anılacaktır. Bu kompozit malzemelerin değişik şartlar altında incelenmesi ile “N” doğrultulu kompozitlerin aşınma direncinin “P” doğrultulu kompozitler'den daha iyi olduğunu göstermiştir . Örnek vermek gerekirse; Şekil 3.18 a da % 27 sürekli boron elyaf içerikli P doğrultulu kompozitin aşınma yüzeyi gösterilmiştir. Burada deney 0.6 m.s<sup>-1</sup> hız ve 22 N yük altında gerçekleştirilmiş olup mikro fotoğraf ikinci elektron (sekondary elektron) demetinden alınmıştır. Bu düşük ölçekteki görünüm mikro fotoğrafı aksenal yönde oluşan sürtünme kuvveti nedeni ile elyaf, boydan boya çekilmeğe zorlandığı ve bunun sonucu olarak da esas pim çapı olan 6.4 mm' nin dışına çıktığı ve daha sonraki sürtünme hareketleri dolayısı ile de kırıldığı veya yerini boşalttığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da matriks esaslı bölge daha çok disk ile temas halinde olduğu yani matriks aşınması daha yoğun olduğundan dolayı da N doğrultulu kompozite göre daha fazla aşınma miktarı meydana gelmektedir. Bu mikro fotoğraf gevrek olan elyafların bu yük altında küçük parçalar halinde kırıldığını ve bazı elyafların kayma doğrultusuna göre çekildiğini fakat çoğunun yerinde kaldığını göstermiştir. Fakat kırılan parçaların belli derecede eğildiği de gösterilmiştir. Yukarıda açıklanan çalışmalardan elyaf doğrultusunun kompozitin aşınma davranışı üzerine etkili olduğu anlaşılmaktadır. Diğer metal matriks esaslı kompozitlerin davranışlarının incelenmesi sonucunda aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

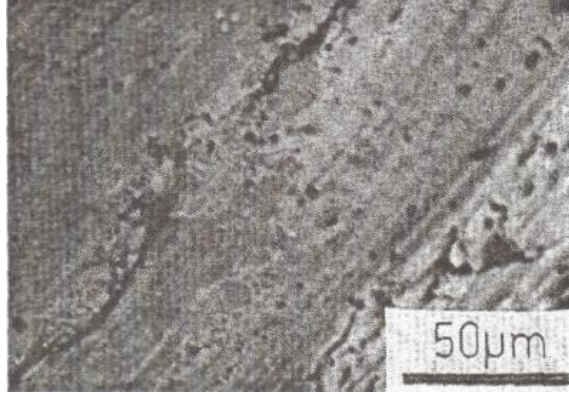


**Şekil 3.19** % 27 elyaf içerikli P doğrultuda deney yapılan metal matrisli kompozitin tarama elektron mikroskopunda alınmış aşınma yüzeyi, a) Düşük ölçekte alınmış TEM görünümü, b) Yüksek büyütmede alınmış TEM görünümü

Şekil 3.19a da % 9  $Al_2O_3$  elyaf takviyeli Al-Zn kompozit 22 N yük altında normal doğrultuda yönlenmiş olan kompozitin ikincil elektrondan alınan aşınma yüzeyini göstermektedir. Düşük görünümdeki bu mikro- fotoğraf dar olukları göstermekte ve yüzey üzerinde oluşan az sayıdaki karıncalamaları da göstermektedir. Şekil 3.19b de geri-saçmalı elektron demetinde alınmış daha yüksek büyütmede alınmış fotoğrafı olup atomik sayısı farklı dikkate alan görünümüdür. Dolayısı ile bu mikro fotoğraf kayma yüzeyi boyunca dağılmış bulunan alumina elyafları (siyah olanlar) ve bazı elyaflarında pim yüzeyine gömüldüğü ve yapıştığını ortaya çıkarmıştır.



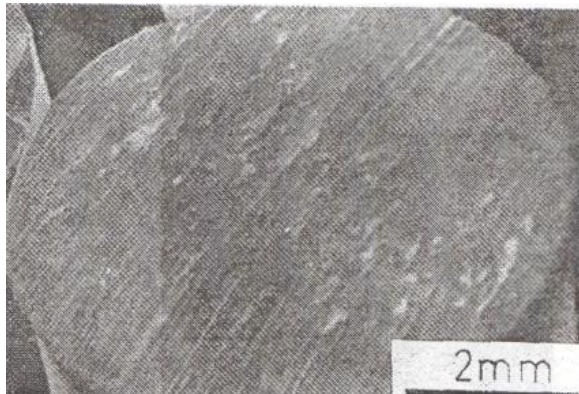
a)



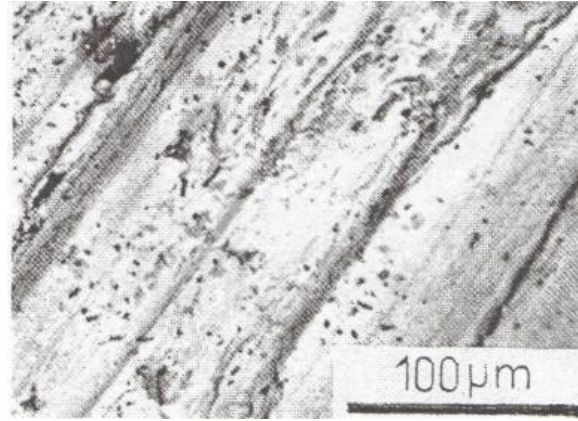
b)

**Şekil 3.20** % 9 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elyaf içerikli kompozitin aşınma yüzeyi, a) Düşük büyütmede ikinci elektron demeti ile elde edilmiş görünümü, b) Geri- saçmalı elektron demeti ile elde edilen görünümü,

Diğer bir % 9 alumina elyaf içerikli kompozitin düşük büyütmede aşınmış yüzeyin ikinci elektron ile alınmış fotoğrafı Şekil 3.20a da gösterilmiştir. Bu numune ise 32 N yükleme altında test edilmiştir. Fakat buradaki teste elyaflar normal doğrultuda yönelmiş olan kompozit numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda ince yivler ve kanallar pim yüzeyi üzerinde az sayıda küçük aşınma kraterleri ve bu aşınma kraterleri de, genellikle, elyafların yığıldığı bölgelerde oluştuğu gözlenmiştir. Ancak aynı yüzey alanı geri-saçmalı elektron demeti ile çekilen fotoğrafı Şekil 3.20b de gösterilmiştir. Bu mikro-fotoğraf atom sayısı farkı nedeniyle aşınmış pim yüzeyi üzerinde deformasyona uğramış bir film katmanının oluşumun göstermiştir.



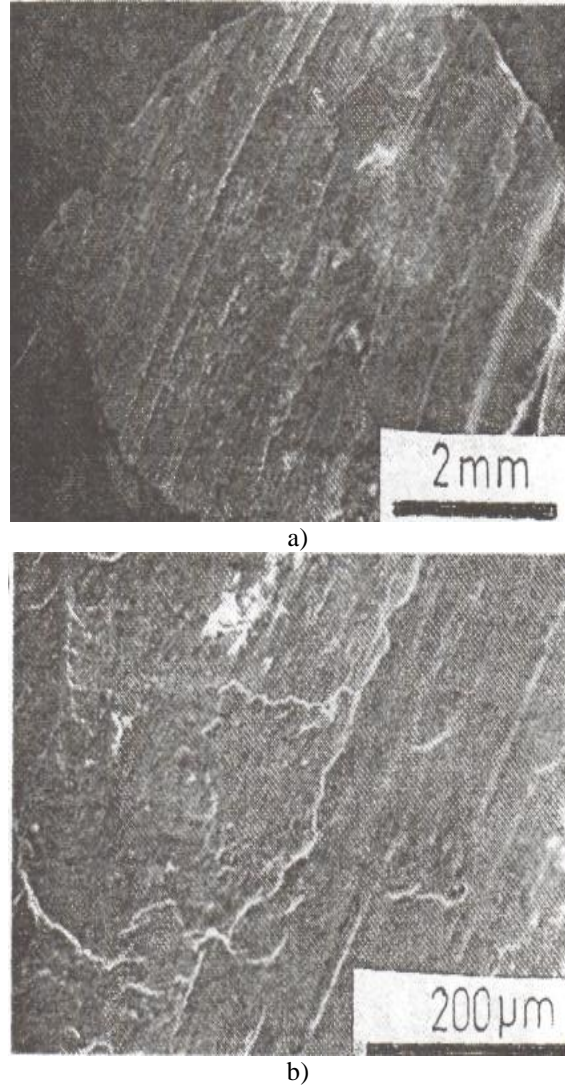
a)



b)

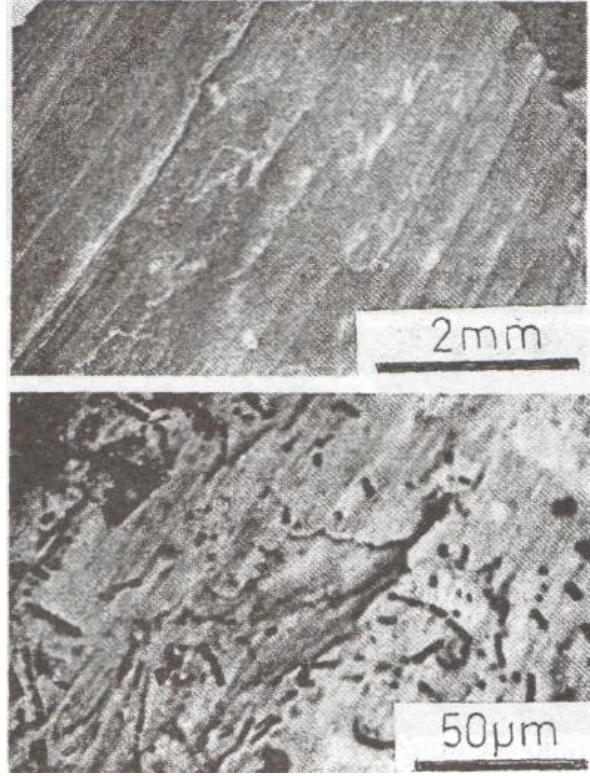
**Şekil 3.21** % 9 A1203 elyaf içerikli normal doğrultulu kompozitin aşınma yüzeyi, a) Düşük büyütmede ikincil elektron demeti ile elde edilmiş görünümü, b) Geri-saçımlı elektron demeti ile elde edilen görünümü

Şimdi ise rastgele doğrultuda yönlendirilmiş kompozitlerin aşınma yüzeylerini dikkate alalım. Şekil 3.22a da % 9 elyaf içerikli kompozitin aşınma yüzeyi ikincil elektron demeti ile alınmış olarak gösterilmiştir. Deneysel 22 N yük altında ve 1.6 m.s-1 hız ile rastgele yönlendirilmiş kompozitler üzerinde yapılmıştır. Bu düşük büyütmede alınan mikro fotoğraf normal doğrultuda test edilen numune yüzeylerine benzer fakat bazı farklılıklar da mevcuttur. Yüzeyinin kayma yüzeyi üzerinde daha geniş oluklar ile biraz daha kaba görünüm göstermektedir. Bu da elyafların aşınma yüzeyine paralel ve rastgele doğrultuda yönlendirildiğinden dolayıdır. Bu durum daha açık ve net olarak Şekil 3.22b de daha büyük büyütmede alınmış olan fotoğrafta gözlemlenmektedir. Keza bu fotoğrafta bazı elyafların büyük parçacıklar halinde yerinden koptuğu ve sonraki kayma işlemi ile kolayca yeniden kaybolduğu görülmektedir. Buna ilaveten bazı oluklama ve elyaf uçlarından kırılmaların yanı sıra matriks olarak da; belli bir kalınlıktaki matriks tabakasının tamamen ayrıldığı görülmektedir. Bu da delaminasyonun etkili olduğunu teyit etmektedir. Fakat elyaf uçlarında yeteri kadar kırılmalar oluştuğundan sonra bu durumun gerçekleştiği sanılmaktadır.



**Şekil 3.22** Rastgele doğrultuda yönlendirilmiş % 9 elyaf takviyeli kompozitin aşınma yüzeyi, a) İkincil elektron mikroskobu görüntüsü, b) Geri-saçmalı elektron demetinden alınan TEM görüntüsü,

Bu deneyde; 22 N'luk normal yük uygulanmış ve yine rastgele yönlendirilmiş kompozit deneye tabi tutulmuştur. Bu fotoğrafta bir önceki aşınmış yüzeye benzer bir görüntü ortaya çıkarmış fakat oluklar daha net ve derin şekilde gözlenmekte ve pim üzerinde de plastik olarak deforme olan bir katmanın oluştuğu görülmektedir. Şekil 3.22 b de ise aynı aşınma yüzeyi alanı fakat geri-saçmalı elektron demeti ile daha yüksek büyütmede çekilmiş fotoğraftır. Çok sayıda küçük elyaf parçacıkları siyah olarak görünmekte ve elyafların uzunluğu da koyu olup yaklaşık 30 μm'dir. Yüksek atom numarasına sahip çok ufak parçacıklar ile ana matriks içinde çinkoca zengin intermetalik oluşturabilmektedir. Kırılan ve gömülen elyafların ölçüsünün farklı olduğu bu fotoğrafta da görülebilir. Bu da, Şekil 3.22a da gösterildiği gibi, farklı boydaki elyafların değişik oluklara sebep olduğunu gösterir.

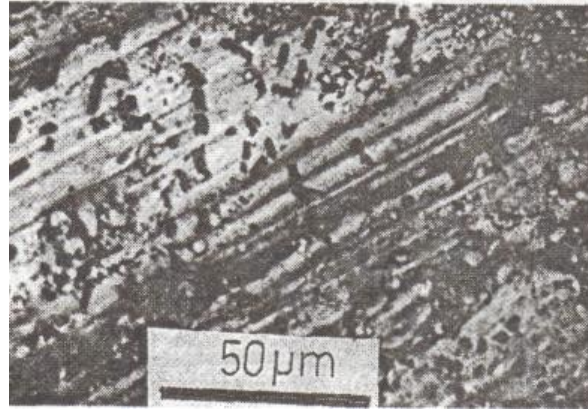


**Şekil 3.23** % 26 elyaf takviyeli kompozitin aşınma yüzeyleri, a) Düşük büyütmede ikincil elektron demeti, b) Yüksek büyütmede geri-saçmalı elektron demeti

Bu mikro fotoğraftan sağ kısmında oluklama genişliği yaklaşık 150-200  $\mu\text{m}$  iken sol tarafta bu mesafe yaklaşık 300-400  $\mu\text{m}$ 'dir. Aynı zamanda kayma yüzeyi üzerindeki kırılmış elyaflar kayma doğrultusuna göre belli açıda eğildiği gözlenmektedir. Yine rastgele düzlemsel olarak yönlenmiş Saffil takviyeli kompozitin aşınmış yüzeyi daha büyük büyütmede tarama elektron mikroskobu altındaki resmi Şekil 3.23 de gösterilmiştir. Burada da yine rastgele doğrultuda yönlenmiş bulunan elyafların kırıldığı daha net olarak gözlenmektedir. Bu kırılma ölçüleri ise değişmekle beraber ortalama 10-20  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir.



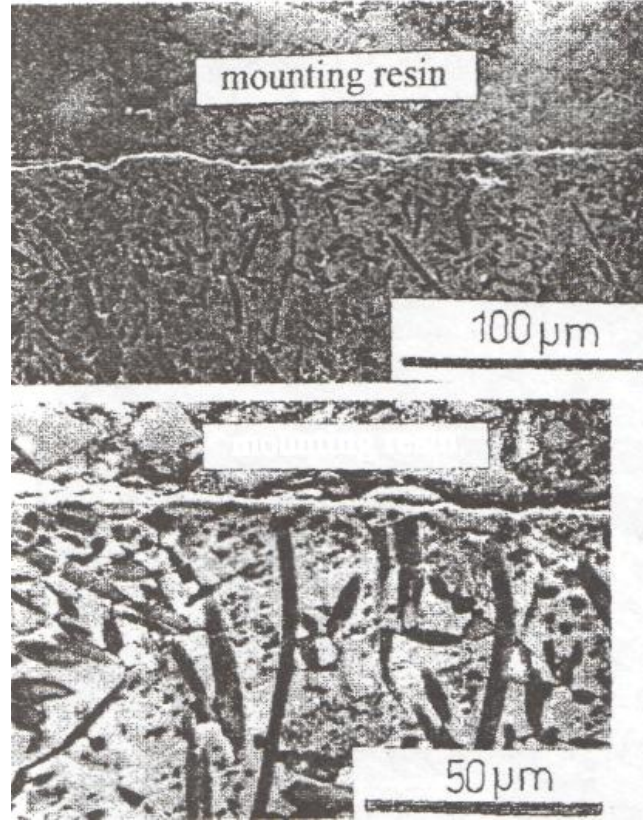
a)



b)

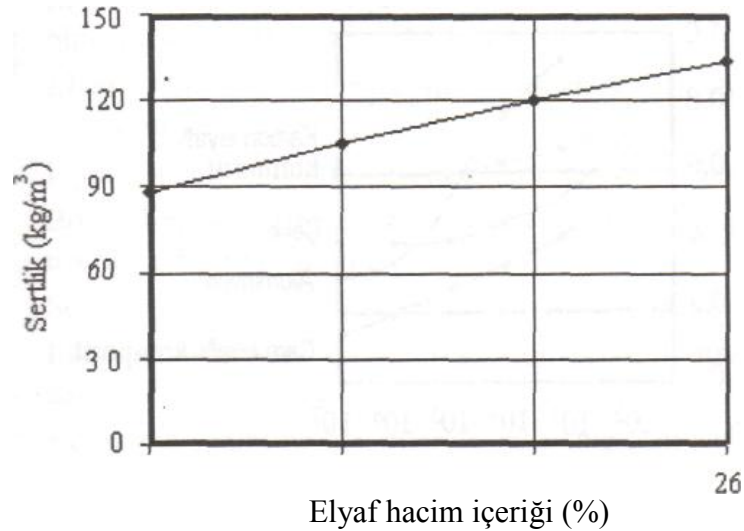
**Şekil 3.24** Saffil takviyeli % 26 elyaf içerikli bir kompozitin aşınma yüzeyleri, a) Düşük büyütmede gösterilen plastik deformasyon ve oksit parçacıkları, b) Yüksek büyütmede geri-saçmalı elektron demeti ile gösterilen kırılan elyaflar ve pim üzerine yapışan elyaf parçacıkları

Yine Saffil takviyeli % 26 elyaf içerikli diğer bir kompozitin aşınma yüzeyi yüksek büyütmede Şekil 3.24.a da gösterilmiştir. Deney aynı hızda ve 32 N yük altında yapılmıştır. Bu ikinci elektron demeti mikro fotoğrafı, plastik deformasyon ve kaba yüzey görünümü göstermektedir. Bunun dışında pim yüzeyine yapışmış, bağlanmış oksidize olmuş aşınma artıkları (debris parçacıkları) gözlenmiştir. Şekil 3.24.b de ise geri-saçmalı elektron demeti ile alınmış aynı örnek numunenin aşınma yüzeyine paralel uzanmış elyafların farklı ölçülerde kırıldığını ve bu ufacık parçaların pim yüzeyi üzerinden koptuğunu göstermiştir.



**Şekil 3.25** % 26 elyaf takviyeli kompozitin enine kesitteki aşınma yüzeyleri, a) Düşük büyütmede ikincil elektron demeti., b) Yüksek büyütmede geri- saçmalı elektron demeti

Yukarıdaki deneyler ve veriler dışında yapılan bu çalışmada da yine mevcut üretilen kompozitin elyaf içeriğine bağlı olarak Brinell sertlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları Şekil 3.26 de gösterilmiştir. Her bir deneyde elyaf içeriğine göre sertlik değerlerinin arttığı, genelde bu artışın doğrusal bir eğilimi olduğu görülmüştür. Bütün yükleme şartlarında % 9 Saffil içerikli kompozitte dahi matrikse göre daha az aşınma olduğu gözlenmiştir. Bunun matriks içerisine gömülen yaklaşık 2700 Hv sertliğindeki alumina elyaf parçacıklarından kaynaklandığı ve elyaf ile matriks arasındaki arayüzey bağının da kafi olduğundan ileri geldiği sanılmaktadır. Dolayısı ile daha çok elyaf içermesi kompozitin daha sert olduğu ve bunun sonucu olarak da aşınmaya karşı daha iyi direnç göstermektedir. Benzer özellikler diğer türdeki takviyeli kompozit malzemeler için de görülebilir.



Şekil 3.26 Kompozitte elyaf içeriğine göre Brinell sertliğin değişimi

### 3.4.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin yorulma davranışları

Metallerde ve diğer kompozitlerle karşılaştırıldığında karbon elyaf takviyeli plastik kompozitler (KETP) süper yorulma performansı göstermektedir. Karbon takviyeli kompozit çok yüksek gerilme seviyelerinde bile elyaf doğrultusunda yüklendiği zaman çekme yorulmasına karşı çok hassas değildir. KETP kompozitin mükemmel performansı tek yönlü takviyeli kompozitin elyaf doğrultusunda yük uygulandığında gerçekleşmektedir. Ancak bütün şekillerde böyle oluşmaz. Matriksin performansının daha önemli olduğu durumlarda, örneğin, 45° düzenlenirse veya elyaf doğrultusuna dik yönde çekme basma kuvveti uygulanırsa yorulma ömrü hayli azalır. Ancak, yarı izotropik KETP tabakalı kompozitlerde bile yorulma direnci çelik ve alüminyuma göre 2-4 kat daha fazladır. 107 çekme çevrimi sonrası KETP/epoksi kompozit için çekme dayanımının kısa süreli maksimum çekme dayanım oranı % 53-58 arasındadır. Bu tek yönlü takviyeli kompozitlere 0°, 45°, yarı-izotropik ve iki yönlü 90° düzenleme uygulanırsa 2024 Al-T3 ve Ç4130 çeliğinde sırası ile % 28 ve % 44 oranı ile karşılaştırılabilir.

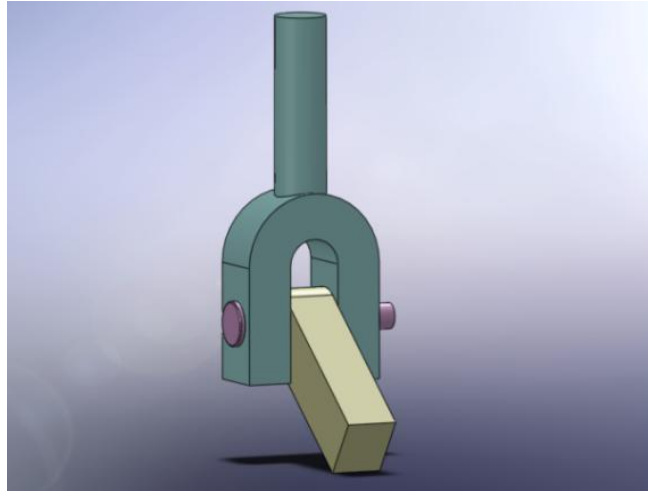
Kompozitlerin sürünme davranışının da özellikle, karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin elyaf doğrultusunda sürünme davranışının oldukça iyidir. Bunlar çeliklerden daha iyi performans göstermektedir. Karbon takviyeli kompozitler çekme yüküne maruz kaldığında uzun süreli sürünme direncine karşı önemli avantaja sahip olduğu bilinmektedir. Burada elyafların toplam elastik davranışları kompozitin davranışını belirler. Ancak, basma yükü altında veya açılı düzenlemelerde deney

yapıldığında matriks özellikleri daha önemli olmaktadır. Polimerler, vizko elastik malzemeler olup bunlar yük altında zamanla sürekli sapma gösterirler. Bu şartlar altında kompozit malzemenin sürünme davranışı nitelik gerektirir. ( Şahin 2000)

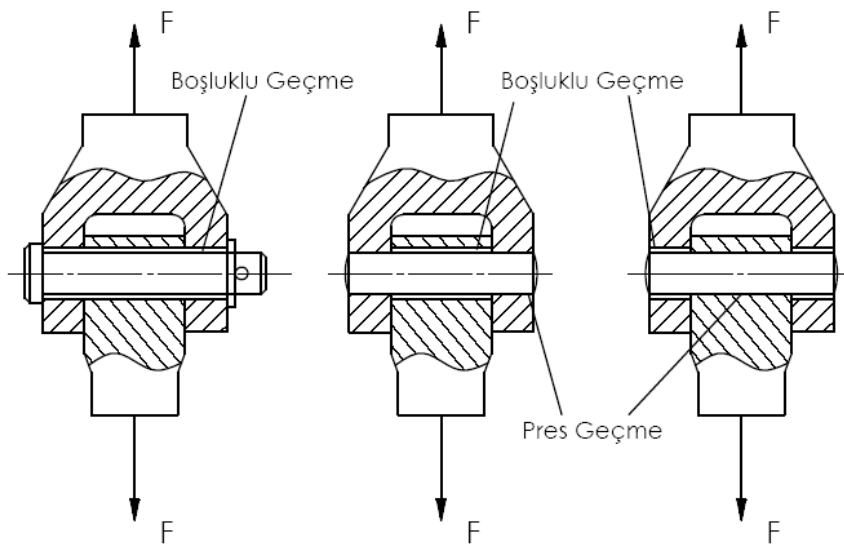
### 3.5. PERNOLAR

#### 3.5.1 Pernoların tanımı

Makina parçalarını birbirine hareket serbestliği olacak şekilde bağlayan, silindirik makina elemanlarıdır. Birleştirecekleri parçaya değişik şekillerde boşluklu geçmeyle takılıp, bir mafsal oluştururlar. Pernolar, genel makine imalatında, madencilikte, motorlu taşıt, lokomotif ve vagon yapımı gibi birçok alanda kullanılır. Şekil 3.27’de bir biyelin çatal mafsalında kullanılan perno görülmektedir. Şekil 3.28’de ise bu elemanların değişik şekillerdeki montaj resimleri yer almaktadır.



Şekil 3.27 Biyel Çatal Mafsalı Mafsalında Pernonun Kullanımı



Şekil 3.28 Pernonun Üç Farklı Montaj Görünümü

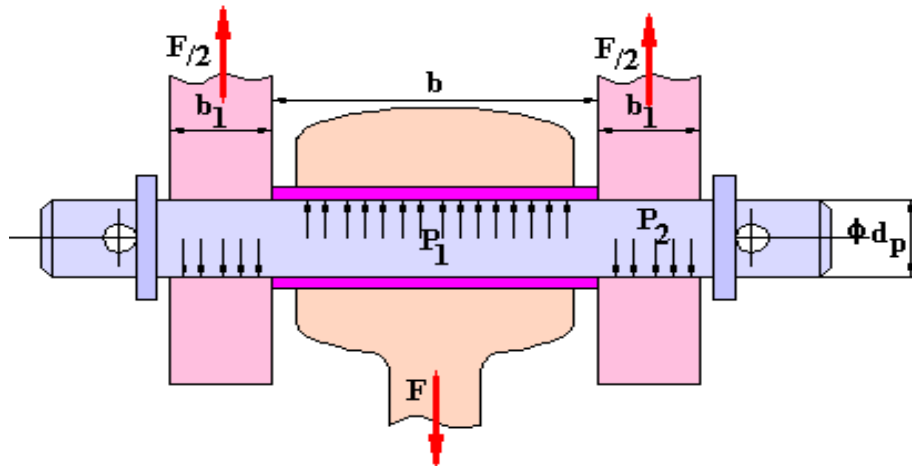
Pernoların başlı, başsız, vidalı, gupilya delikli standart tipleri mevcuttur. Geçme sistemi boşluklu olduğu için aksel yönde hareketi hatta tamamen çıkmayı önlemek için segman, gupilya gibi çeşitli emniyet elemanları kullanılır. Bu hallerde pernodaki gerekli yuvalar açılmalıdır.

Pernolar standartlaştırılmış olup ilgili standartlara TSE'den ulaşılabilir.

Pernolar genellikle sade karbonlu çelikten ve sementasyon çeliğinden yapılırlar. İstendiğinde yüzeyleri bakır ve kromla kaplanabilir, fosfatlama yapılabilir. Genel olarak pernodaki toleranslarda işlenir. Çalışma şartlarına göre bu tolerans değişebilmektedir. Sementasyonla 55-60 HRC'ye sertleştirilebilir.

### 3.5.2. Pernoların hesabı

Şekil-3.29 da perno ile yapılan bir mafsallık bağlantısı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi perno ile diğer parçalar arasında yüzey basınçları meydana gelir. Perno ayrıca eğilmeye ve kesilmeye zorlanır. Bu zorlamalara ait ifadeler şu şekilde çıkarılabilir.



Şekil-3.29. Perno ile yapılmış mafsallık bağlantısı

Burç ile perno arasındaki yüzey basıncı  $P_1$  ;

$$P_1 = \frac{F}{b \cdot d_p} \leq P_{em} \quad (3.24)$$

Çatal ile perno arasındaki yüzey basıncı  $P_2$  ;

$$P_2 = \frac{F}{2 \cdot b_1 \cdot d_p} \leq P_{em} \quad (3.25)$$

Pernoda meydana gelen eğilme gerilmesi  $\sigma_e$ ;

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W_e} = \frac{F \cdot \frac{b+b_1}{4}}{\frac{\pi \cdot d_p^3}{32}} \leq \sigma_{em} \quad (3.26)$$

Pernoda meydana gelen kesme gerilmesi  $\tau$ ;

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}} \leq \tau_{em} \quad (3.27)$$

olarak verilir.

Bu ifadelerde;

F: Uygulanan yük ( N)

b: Burç uzunluğu ( mm)

$b_1$ : Yatak uzunluğu (mm)

$d_p$ : Pim (mm) çapıdır.

Pernoda meydana gelen kesme gerilmesi, diğer gerilmelere göre yapılan boyutlandırmalarda çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.

Perno ile yapılan bağlantıların boyutlandırılmasında;

$$\frac{b}{d_p} = 1.5 \dots 1.7 \quad (3.28)$$

$$\frac{b_1}{b} = 0.3 \dots 0.5 \quad (3.29)$$

değerlerinin alınması tavsiye edilir.

Çalışma içerisinde yukardaki hesap metodu mantığında hesaplama yapan KISSsoft paket programı ile pernolar için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar ile ilgili doküman ekler kısmında verilmiştir.

KISSsoft, temel makine elemanlarının boyutlandırma hesaplamalarını yapan bir paket programıdır. KISSsoft paket programı ile dişlilerin, şaftların, rulmanların, bağlama elemanlarının, hatta kayış/kasnak mekanizmalarının boyutlandırma ve hesaplamalar yapabilir. Bu yazılımın amacı, hesaplamaların hızlı yapılması ve bunları dökümantasyonu ile zamanın kısaltılmasıdır. KISSsoft, farklı, zor sistemler arasında dönüştürme ve tolerans hesaplamaları gibi ek modülleri ile de değişik çözümler sunmaktadır. Program ayrıca bütün popüler CAD programlarıyla da ilişkilendirilebilmektedir.

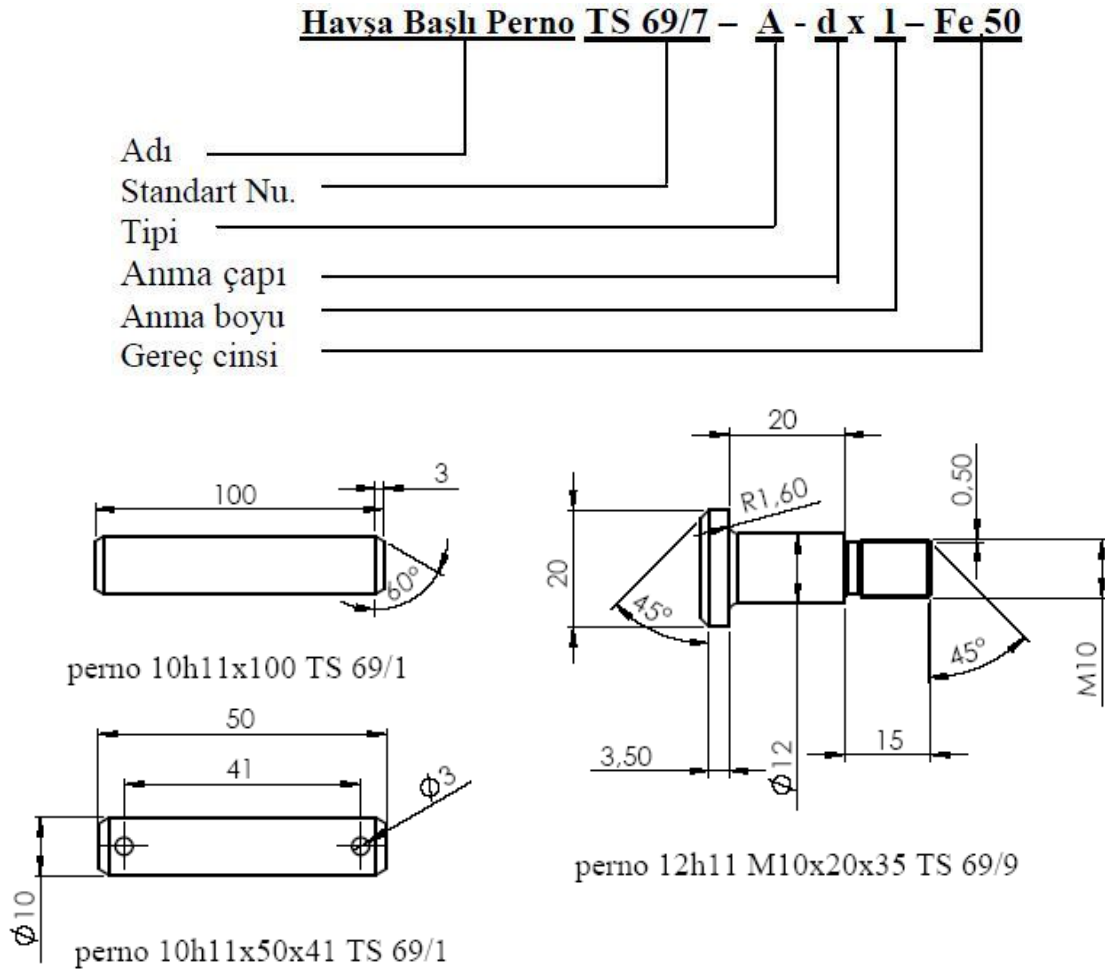
### 3.5.3. Pernoların üretim biçimi

Pernolar, otomat tezgâhları ve CNC torna gibi tezgahlarda yapılır. Pernoların baş kısımları, fatura ve pah kısımları, preslerde kalıplar aracılığıyla preslenerek de yapılabilir. Pernoların yüzeyleri temiz ve pürüzsüz olmalıdır. Üzerlerinde çapak, tufal, karıncalanma, çizik, çentik pas vb. kusurlar bulunmamalıdır.

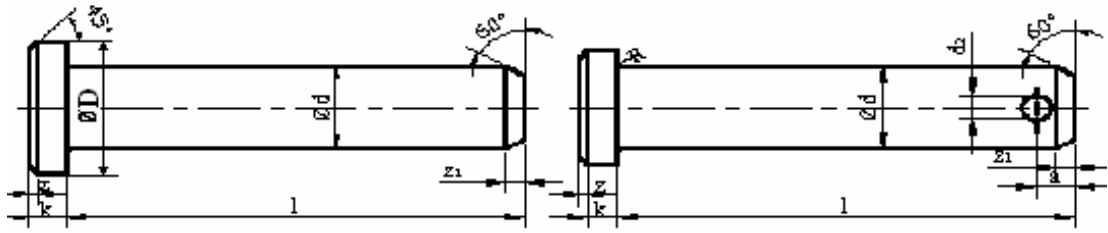
### 3.5.4. Pernoların standart gösterimi

Pernolar, TS 8201 standardı esas olmak üzere ilgili standartlarında aşağıdaki gibi gösterilir.

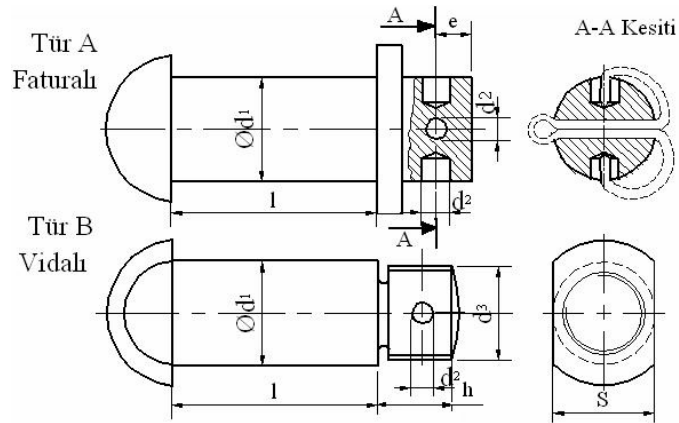
Yaygın olarak kullanılan bazı perno tiplerinin ölçülendirilmelerinin standart gösterimleri Şekil 3.30 de ve bazı perno tiplerinin teknik resimleri Şekil 3.31 de verilmiştir.



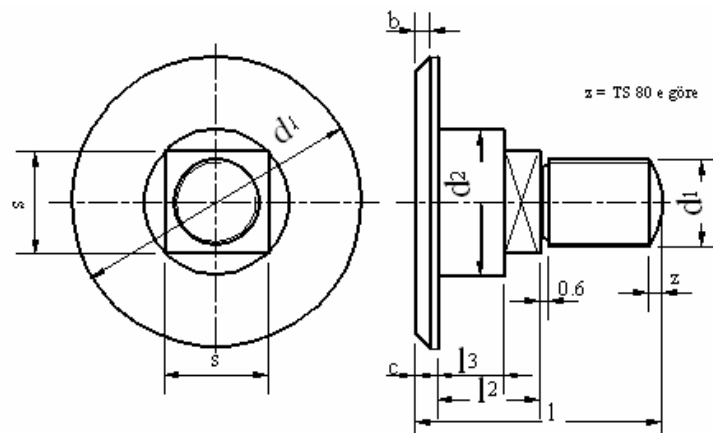
Şekil 3.30 Bazı pernoların ölçülendirme ve standart gösterimleri



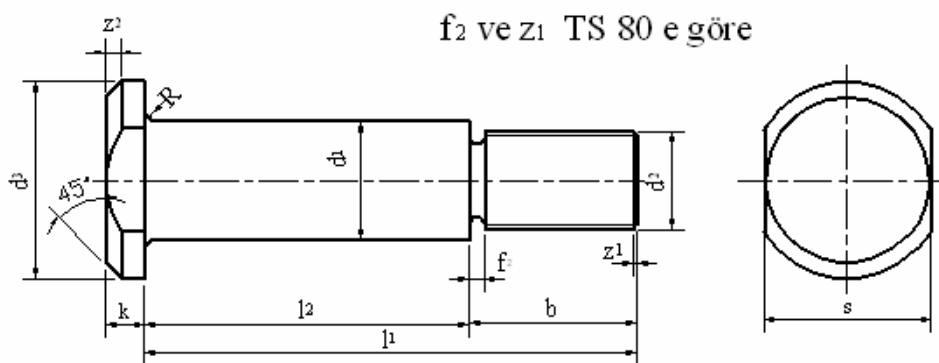
a)



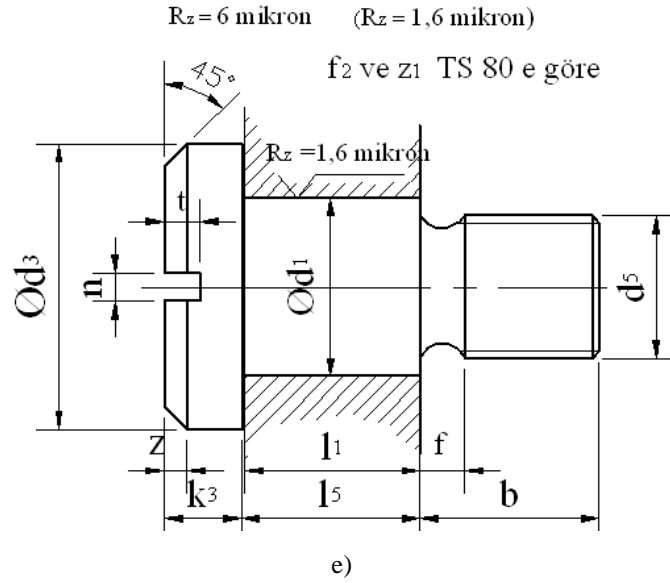
b)



c)



d)



**Şekil 3.31** Sık kullanılan perno tipleri a) Orta başlı perno, b) Bombe başlı perno, c) Yassı başlı perno, d) Kesik başlı vidalı perno e) Pah başlı perno

### 3.5.5. Pernolardaki toleranslar

Pernolar toleranslı olarak birleştirilirler, pernolar için tavsiye edilen tolerans değeri h11, delikler için ise A11, B12, C11, D9 veya D11 olarak verilmektedir. Deneyde kullanılan perno ve delikler, Çizelge 3.3' de pernolarda kullanılan bazı ISO kaliteleri için temel toleranslar verilmiştir.

**Çizelge 3.3** ISO kaliteleri için temel toleranslar

ISO Kaliteleri	IT9	IT11	IT12
Nominal boyut bölgesi $6 < d \leq 10$ (mm)	36µm	90 µm	150 µm

Yataklara ait alt sınır değerleri Çizelge 3.4 de verilmiştir.

**Çizelge 3.4** Yataklar için verilen bazı uzaklıkların karşılığı olan ait alt sınır tolerans değerleri.

Uzaklık	A	B	C	D
Nominal çap(mm) $6 < d \leq 10$	+280 µm	+150 µm	+95 µm	+50 µm

Pernoların temel toleransları ve tavsiye edilen toleransların alt ve üst değerleri Çizelge 3.5 de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Pernolarda tavsiye edilen alıştırmalar.

Nominal ap( mm)	Alıştırmalar	En buyk boşluk ( $\mu\text{m}$ )	En küçük boşluk ( $\mu\text{m}$ )
10	A11h11	460	280
10	B12h11	340	150
10	C11h11	275	95
10	D11h11	230	50
10	D9h11	176	50

## 4. MATERYAL VE METOT

### 4.1. Test metodu

Aşınma ve bozulma testleri için pernoların çalışmalarını simüle eden özel bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu deney düzeneği ile değişik malzemelerden yapılmış numunelerin farklı çalışma şartlarındaki bozulmalarını gözlemlemek mümkündür. Hazırlanan deney düzeneğinde bu çalışma için pernoların aşınmasında etken olan yk ve kayma mesafesi gibi etken parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan bu deneysel çalışmada farklı malzemelerden yapılmış pernelara farklı yüklemeler yapılarak bu yükler karşısında ki bozulma davranışları incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu düzenek perno üzerindeki aşınmanın yanısıra perno yatağının aşınmasını da inceleyebilecek şekilde tasarlanmıştır.

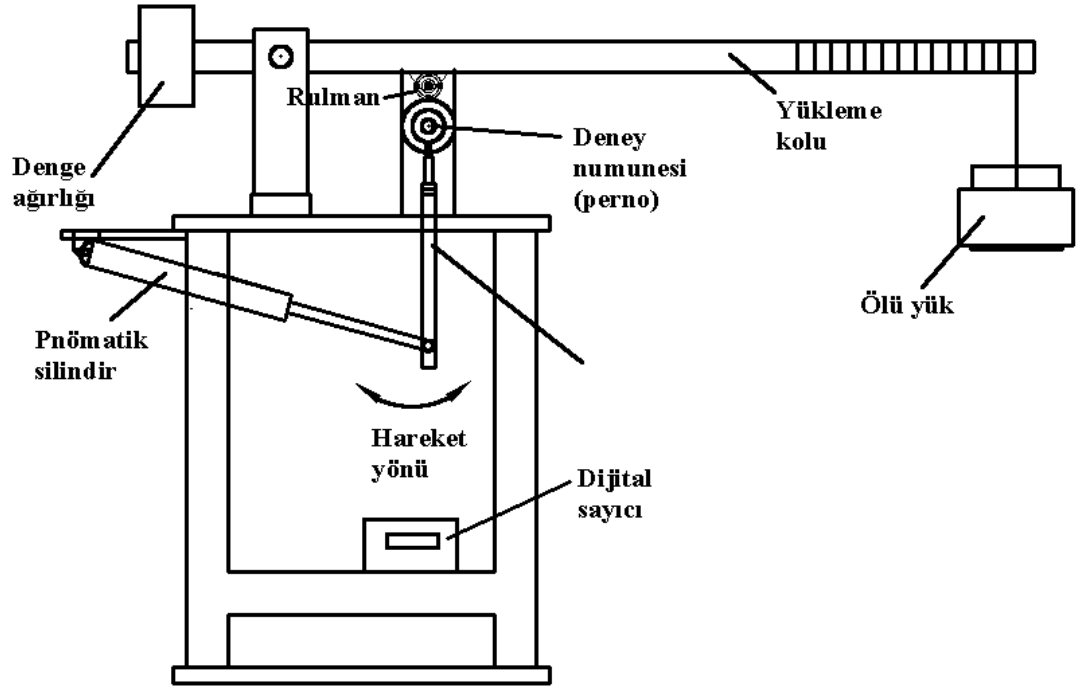
Deneyde, test numunesi olan pernelardan her deney için üçer adet hazırlanmış ve her bir deney için farklı deney numunesi ile işlem üç defa tekrarlanarak deney sonuçları elde edilmiştir. Deney sonuçlarından hazırlanan grafiklerde bu üç değerin ortalaması dikkate alınmıştır.

#### 4.2. Deney tesisatı

Deney tesisatının tasarımında öncelikli olarak değerlendirilen kriter, pernoların bozulma davranışlarının incelenmesidir. Bu set ile kompozit, çelik ve sert kaplamalara sahip pernoların kuru ve yağlı ortamdaki aşınma olayları incelenebilecektir. Yine 35 mm çapa ve 200 mm uzunluğa kadar olan pernoların testleri yapılabilecektir.

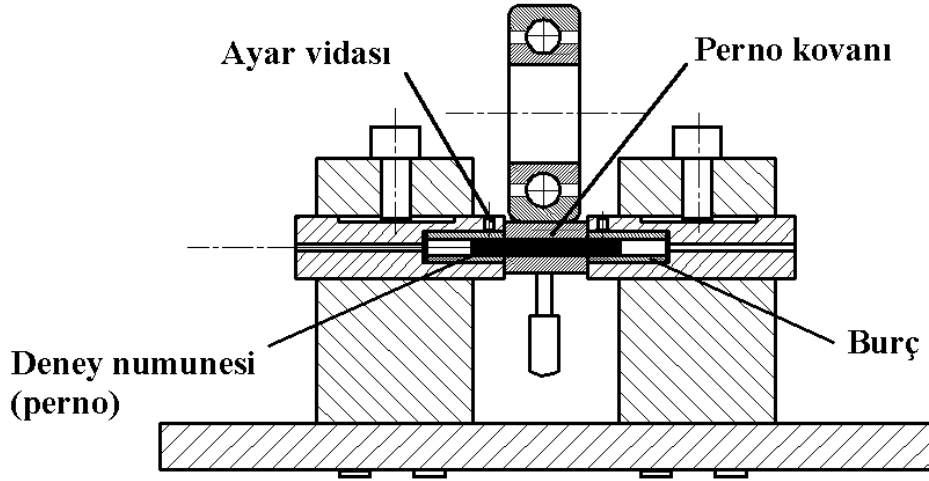
Pernoların bozulma ve aşınma sonuçlarının daha geniş bir aralıkta değerlendirilebilmesi için etkili bütün parametrelerin kontrol edilebilme imkânı da önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilmiştir.

Öncelikli olarak bu özellikleri karşılamak amacıyla Şekil 4.1.'deki şematik ve Şekil 4.3 de fotoğraf görüntüsü verilen perno aşınması deney tesisatı özel olarak tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Deney seti şematik resmi

Deney teçhizatı başlıca; denge ağırlığı, pnömomatik silindir, dijital sayıcı, yüklemeye kolu, ölçü yük, sarkaç tertibatı, perno bağlama yatağı gibi kısımlardan oluşmaktadır. Deney numunesinin yataklanması ve bağlama düzeneğinin detayları Şekil 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.2. Perno bağlama düzeneği şematik resmi



Şekil 4.3 Denei seti fotoğraf görüntüsü

Deney tesisatı kolaylıkla montaj ve demontaj yapılabilecek şekilde imal edilmiştir. Bu durum, kurulum ve kontrol aşamalarında çıkan problemlerin sebeplerini araştırmaya imkan vererek, yerinde müdahale edebilme ve gerektiğinde ekipman değişikliğine gidebilme fırsatı vermektedir.

Kurulan deney tesisatında sisteme gelen hava basıncı ayarlanabilecek şekilde tasarlanmış olup ve bu amaçla tesisata yerleştirilen konum siviçleri yardımıyla çalışma aralığıda değiştirilebilmektedir. Basınç değiştirilerek hız değeri ayarlanabilmektedir.

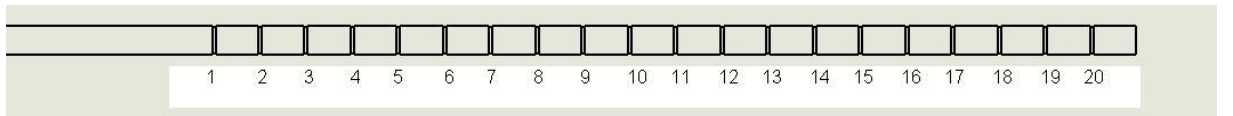
#### 4.3. Salınım sayısı ve salınım açısı

Deney tertibatında, salınım sayısı ve salınım açısı kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada sarkaç mekanizması dakikada 120 salınım yapacak şekilde salınım açısı da 60 derece olarak ayarlanmıştır. Tüm deneyler bu değerlere göre yapılmıştır.

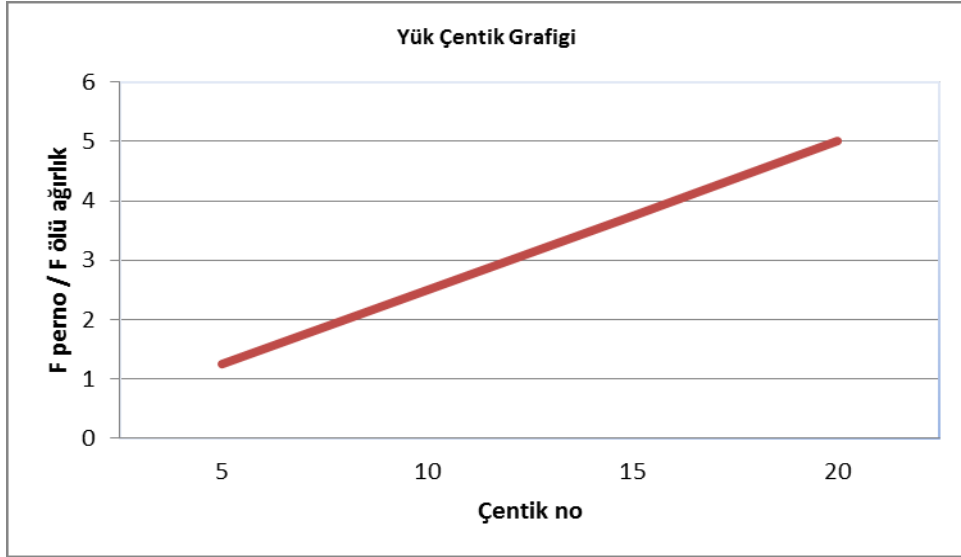
#### 4.4. Yükleme koluna uygulanacak yüklerin tespiti

Deney tesisatı, farklı çalışmalar için, değişik ölü ağırlıkların tatbik edileceği şekilde tasarlanmıştır.

Yükleme kolu uzunluğu 2080 mm dir. Numune üzerinde değişik momentler oluşturabilmek amacıyla ölü yükün sabitleneceği 20 adet çentik bulunmaktadır. Bu çentiklerin birbirine olan uzaklığı 50 mm dir. Bu kol Şekil 4.4. de gösterilmiştir. Ayrıca bu kola ait yük çentik grafiğide Şekil 4.5 de verilmiştir.



Şekil 4.4 Yükleme kolundaki çentikler ve numaralar



Şekil 4.5 Ölü ağırlık-Çentik grafiği

Örneğin numune üzerine 1000 N'luk kuvvet uygulanmak istenirse bu durumda; Bir nolu çentiğe uygulanması gereken kuvvet:

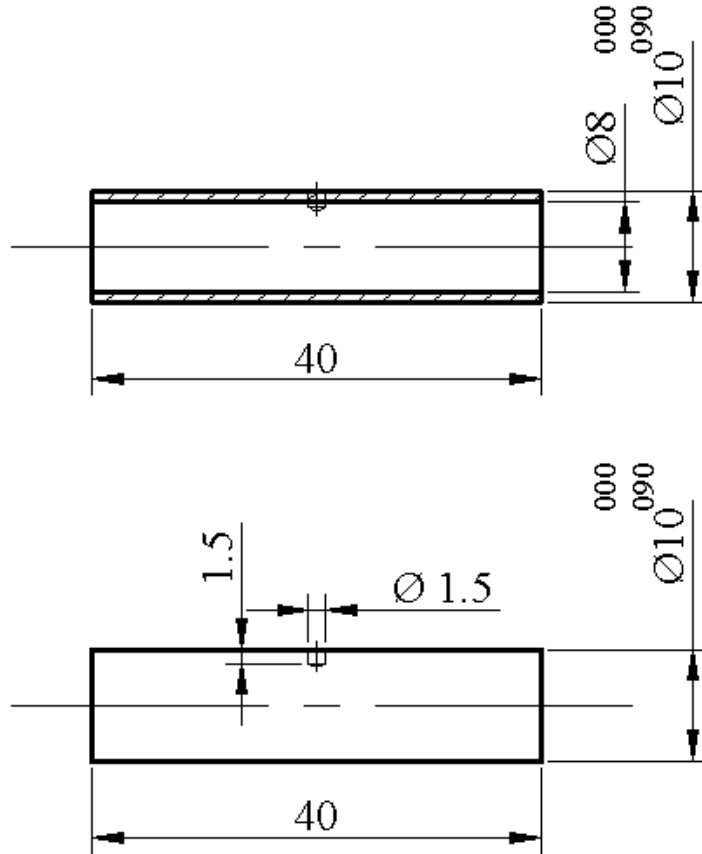
$$\frac{F_{perno}}{F_{yük}} = 5 \quad \frac{100}{F_{yük}} = 5 \quad F_{yük} = 200 \text{ N olarak bulunur.}$$

Öyle ise 1 nolu çentiğe asılması gereken yük  $m = 200/9,81 = 20,03 \text{ kg}$  olarak belirlenir.

#### 4.5. Deneye tabi tutulan numune ve yataklar:

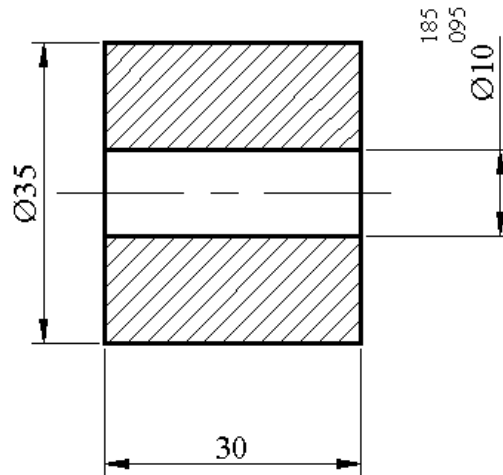
Deneyisel çalışmada kullanılan pernolar iki farklı malzemeden seçilmiş olup bunlardan birincisi karbon fiber kaplı çelikten yapılmış pernolar, diğeri ise çelik pernolardır. Karbon fiber kaplı perno 8 mm çapındaki çelik çubuk üzerine pernonun üzerine 1mm et kalınlığında karbon fiber sarılarak elde edilmiştir.

Deneyde kullanılan perno boyutları sabit tutulmuştur. Pernoların dış çapları 10 mm uzunlukları ise 40 mm olarak alınmıştır.



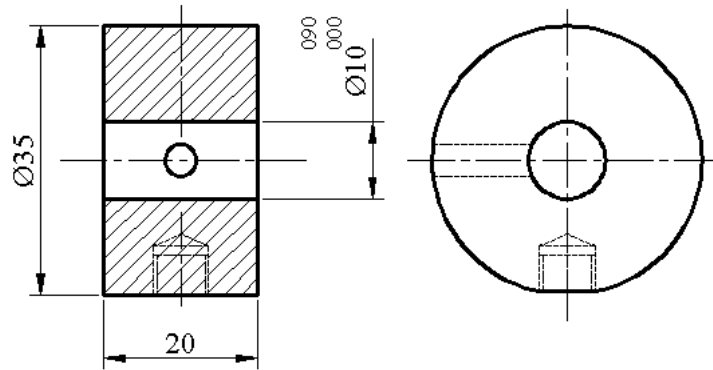
Şekil 4.6 Pernoların ölçü ve toleransları ile genel görünüm

Deneysel çalışmalarda, kullanılan numunelerin ölçüleri Şekil 4.6 da verilmiştir. Yataklama için kullanılan burçların şematik resmi ise Şekil 4.7 de verilmiştir. Burçlar aksenal hareketli ana yatak içerisindeki yuvasına takıldıktan sonra ekseni etrafında ve aksenal yönde hareket etmemesi için ana yatak üzerindeki ayar vidaları yardımı ile sabitlenirler.



Şekil 4.7. Perno burçlarının şematik resmi

Perno kovanının boyutları ve teknik çizimi ise Şekil 4.8 de verilmiştir. Numune kovana yerleştirildikten sonra perno kovana yerleştirildikten sonra numune kovan üzerindeki ayar vidası sabitlenir. Perno üzerinde sabitleme için açılmış küçük bir yuva mevcuttur. Son olarak perno uçları perno burçlarına yerleştirilerek merkezleme ayarları yapılır veyük tatbik edilir. Bu işlem tamamlandıktan sonra kovan, sarkaç mili üzerinde üzerine açılmış vidaya bağlanır.



Şekil 4.8. Perno kovanının şematik resmi

#### 4.6. Deney numunelerinin mekanik özellikleri

Deney numunelerinin çekme mukavemeti, basma mukavemeti ve sertlik değerleri gibi bazı mekanik özellikleri Çizelge 4.1. de verilmiştir. Karbon elyaf malzemenin mekanik özellikleri elyaf yönünde ki değerlerdir.

Çizelge 4.1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Kopma mukavemeti: $\sigma_k$ (N/mm <sup>2</sup> )	Akma mukavemeti $\sigma_{ak}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson oranı $\nu$	Sertlik HRC	Elastisite modülü E (N/mm <sup>2</sup> )
Çelik perno C45 (Ç1040)	600-700	370	0,3	30±2	210000
Karbon elyaf	2800	2800	0,1		87500
Burç 42CrMo4 (AISI 4140)	1000-1200	800	0,3	50±2	210000

#### 4.7. Deney numunelerindeki ağırlık kaybının tespit edilmesi

Yapılan deneylerde, deney numunelerindeki aşınma kayıpları  $10^{-4}$  gr hassasiyete sahip hassas terazi ile ölçülmüştür. Aşınan pernoların çaplarındaki ölçü düşüşleri dijital kumpasla ölçülmüş ancak deneylerde hassasiyet açısından ağırlık kaybı ölçüsü esas alınmıştır.

#### 4.8. Deneyin yapılışı

Deney numunelerinin hazırlanışı ve deneylerin yapılışı aşağıda verilen prosedüre göre gerçekleştirilmiştir.

1. Çelik ve dış yüzeyi karbon elyaf ile kaplanmış çelik numuneler 40 mm boyunda ve 10 mm çapında CNC tornada işlenmiştir. Çelik numuneler sertleştirilerek fosfatlanmıştır. Pernoların orta kısımlarına ayar vidasının oturacağı yuva açılmıştır.

2. Tüm deney numuneleri basınçlı hava ile temizlenerek yüzeylerindeki toz vb. maddelerden arındırılmıştır.

3. Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra deney numunesinin ilk ağırlığının tespit edilmesi için deney numuneleri  $10^{-4}$  gr hassasiyete sahip hassas terazide tartılmış ve ilk ağırlıkları kaydedilmiştir.

4. Her bir deney numunesi, perno kovanına yerleştirilmiş ve yerinde dönmemesi için ayar vidası ile sabitlenmiştir.

5. Perno kovani sarkaç miline bağlandıktan sonra perno muyluları ana yatak içerisinde bulunan burçlara yerleştirilmiştir.

6. Numune burçların içerisine yerleştirildikten sonra baskı rulmanı perno kovasını ortalayacak şekilde ayarlanmış ve ana yatak sabitleme civataları ile sabitlenmiştir.

7. Dijital sayıcı sıfırlanmış ve çalıştırılmıştır.

8. Yükleme koluna çalışılacak kademedeki ölü ağırlık asılmıştır.

9. Pnömatik sisteme basınçlı hava verilerek sarkaç harekete geçirilmiştir.

10. İstenen salınım adedi tamamlandığında sistem durdurulmuş ve deney numunesi, bağlama işleminin tersi bir işlem yapılarak burçlar ve kovandan çıkarılarak tekrar basınçlı hava ile temizlenmiştir.

**11.** Deney numunesinin son ağırlığının tespit edilmesi için deney numunesi basınçlı hava ile temizlenmiş ve tekrar hassas terazide tartılarak son ağırlığı kaydedilmiştir.

**12.** Bir deneyin bitirilip diğer deneyin başlatılmasından önce sistemde kullanılan elemanlarda oluşabilecek kirliliği önlemek amacıyla her bir deneyden sonra deneyin yapıldığı bölge ve elemanlar basınçlı hava ile temizlenerek deney tesisatında, oluşabilecek istenmeyen etkiler minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Böylece deneylerin tümünde standart yapı korunmuştur.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

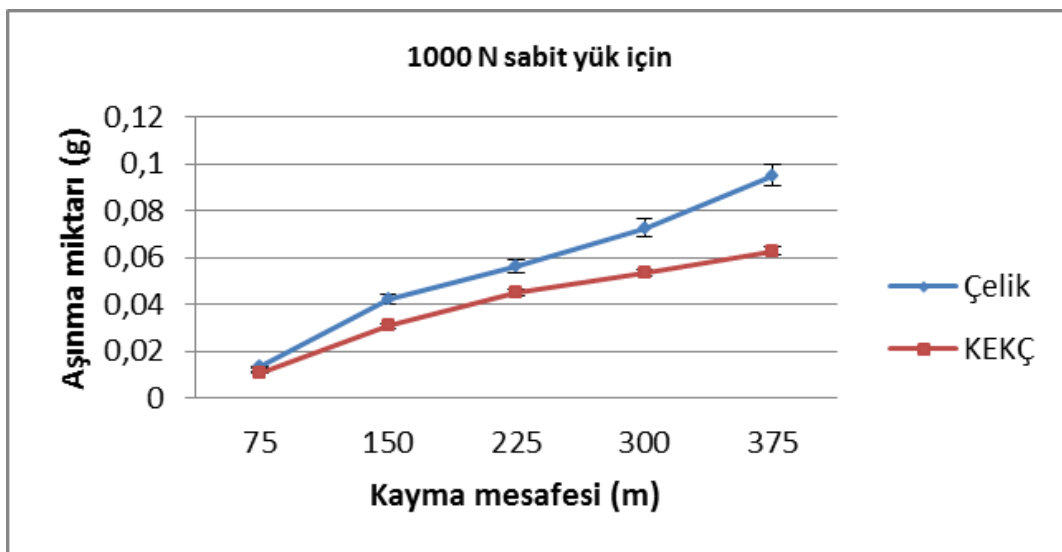
Çelik perno numuneler ile çelik üzerine ve üzerine 1 mm kalınlığında karbon fiber kaplanmış perno numuneler farklı yüklemelere ( 1000 N, 1500 N, 2000 N, 2500 N, 3000 N ) maruz bırakılarak aşınma ve bozulma davranışları incelenmiştir. Ayrıca belirlenen kayma mesafelerindeki aşınma değerleride tespit edilmiştir.

### 5.1. Yapılan deneylerin grafiksel incelemesi

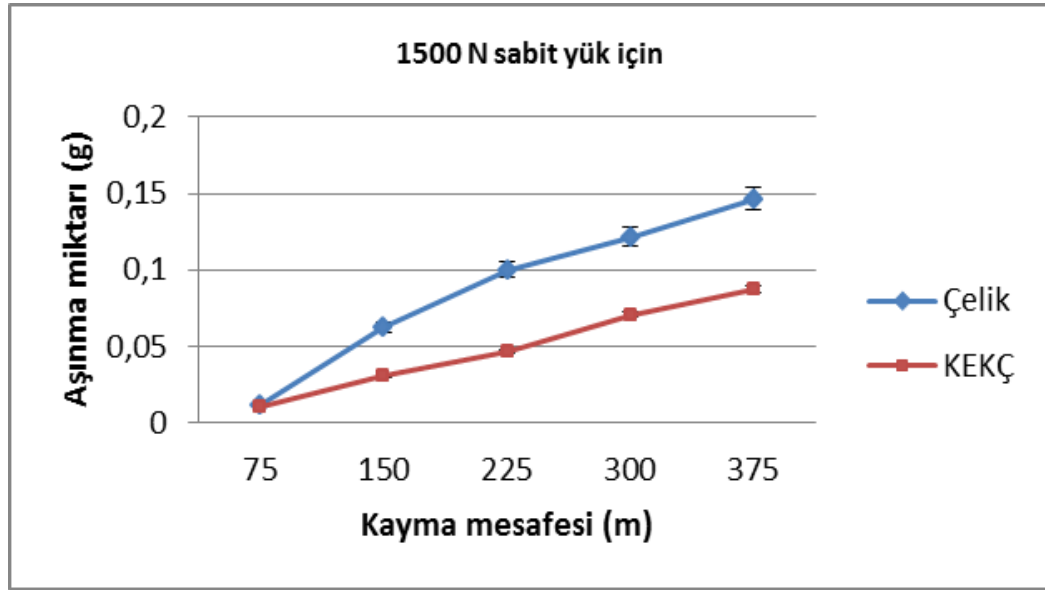
Yapılan deneyler sonunda her bir deney numunesi için aşınma kaybı değerleri hesaplanarak yük-aşınma kaybı ve kayma mesafesi-aşınma kaybı grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklerdeki her bir noktanın belirlenebilmesi için o duruma ait üç deney yapılmış ve bu üç tekrarlı deneyin ortalaması alınarak grafikler çizilmiştir.

#### 5.1.1. Kayma mesafesi ile aşınma ilişkisinin incelenmesi

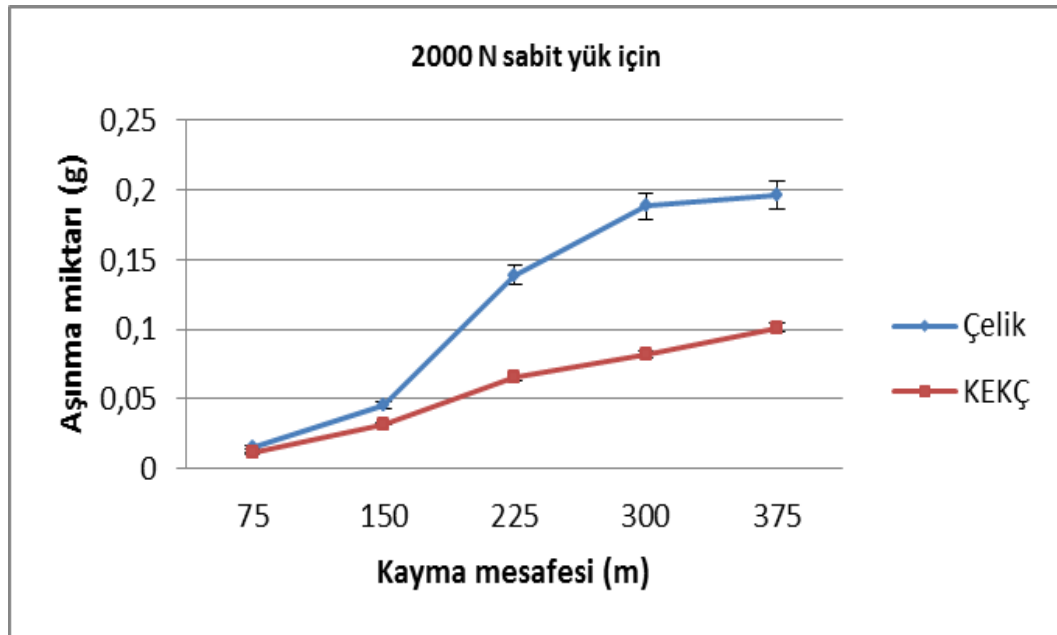
Deneyel verilerle elde edilen kayma mesafesi-aşınma ilişkisini gösteren grafikler Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'de verilmiştir. Şekillerdeki grafikler her biri sabit yük için hazırlanmıştır. Bu yükler şekil sırasına göre 1000N, 1500N, 2000N, 2500N, 3000N olarak alınmıştır. Grafiklerin hazırlanmasında kullanılan kayma mesafesi ise 125, 250, ve 375 m dir. Grafiklerde " KEKÇ" ile ifade edilen kısaltma karbon elyaf kaplanmış çelik pernoyu ifade etmektedir.



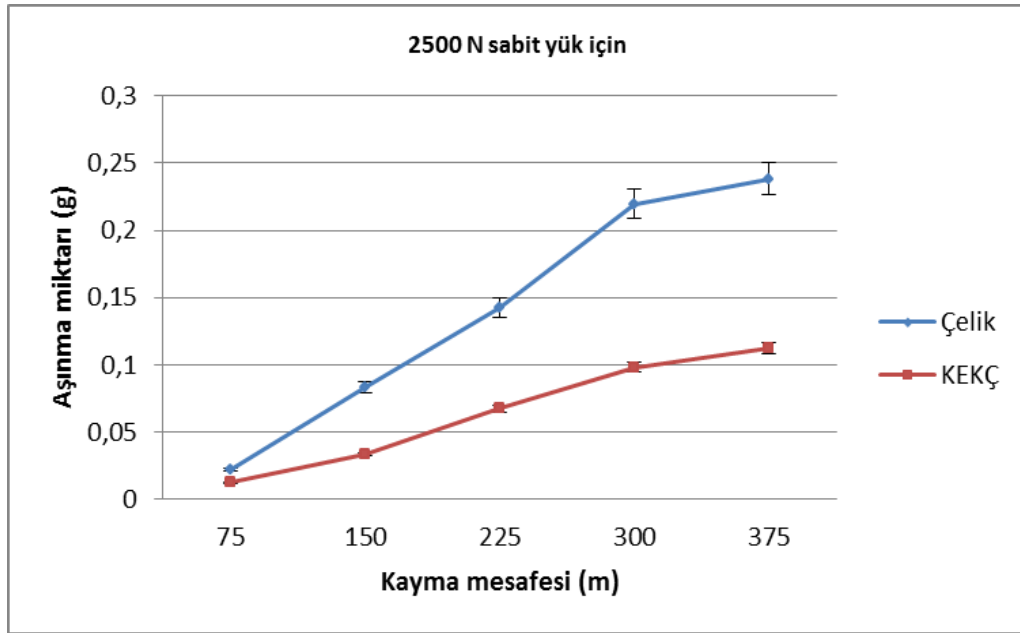
Şekil 5.1. 1000 N sabit yükteki kayma mesafesi-aşınma kaybı ilişkisi



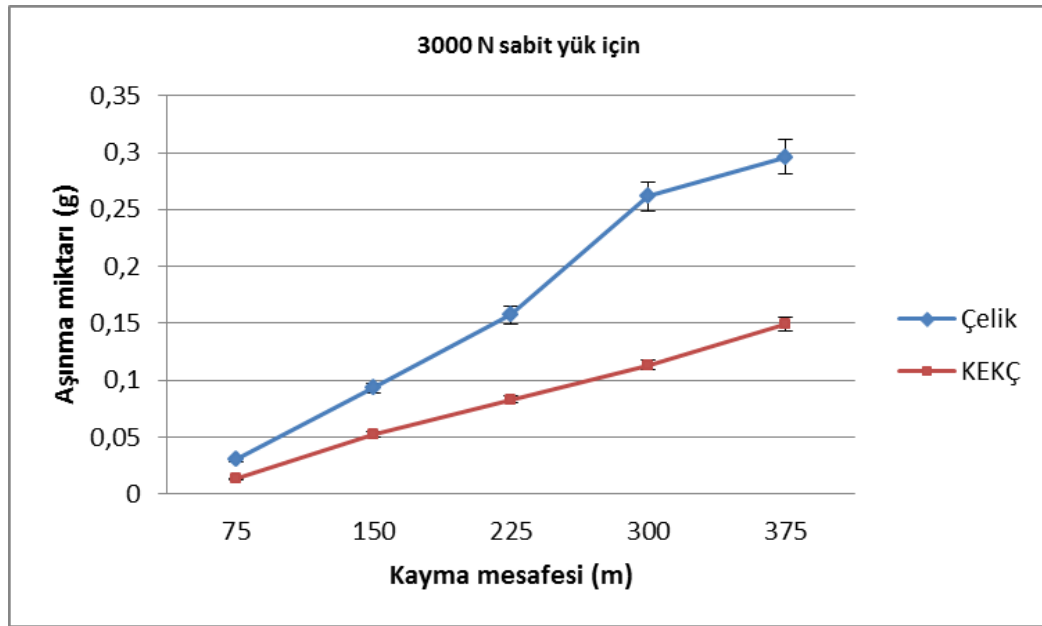
Şekil 5.2. 1500 N sabit yükteki kayma mesafesi-aşınma kaybı ilişkisi



Şekil 5.3. 2000 N sabit yükteki kayma mesafesi-aşınma kaybı ilişkisi



Şekil 5.4. 2500 N sabit yükteki kayma mesafesi-aşınma kaybı ilişkisi



Şekil 5.5. 3000 N sabit yükteki kayma mesafesi-aşınma kaybı ilişkisi

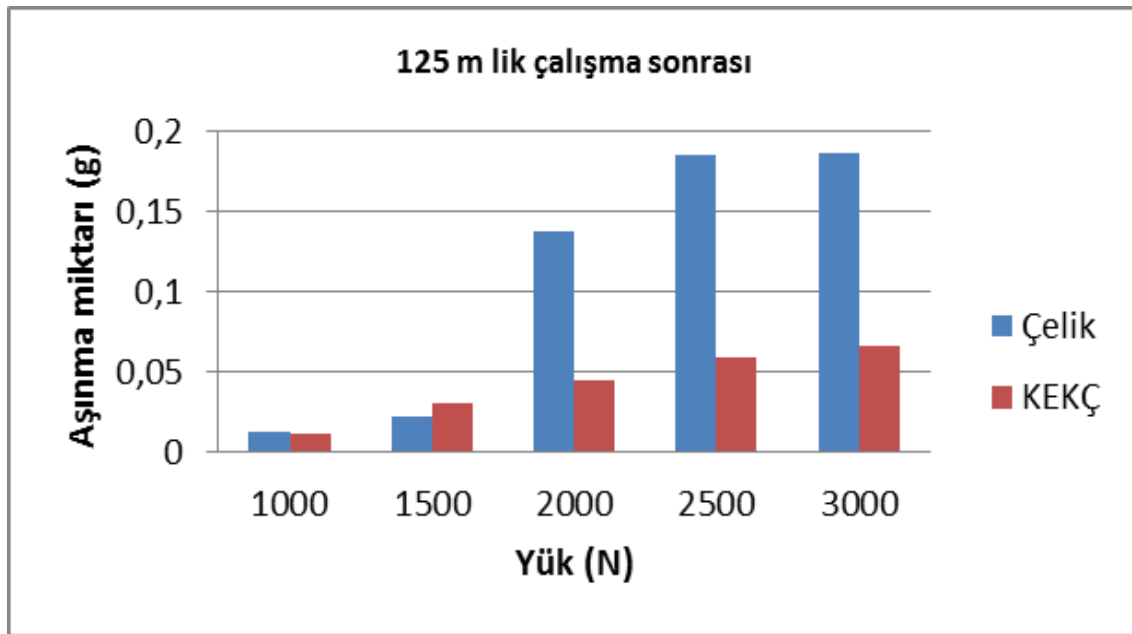
Grafikler incelendiğinde gerek çelik perno numunesi gerekse karbon elyaf kaplanmış çelik perno numunesinin 375m lik çalışma sonundaki aşınma değeri 1000 ve 1500 N'luk yüklemeler için hemen hemen birbirine yakın değerlerdir. Ancak yükün artmasıyla çok küçükte olsa bir ayrılma gözlenmiştir. Yükün 2000, 2500 ve 3000 N olduğu durumlarda ise aşınma miktarları arasındaki fark oldukça büyüktür. Grafiklerin

tamamında kayma mesafesinin artmasıyla aşınma miktarının arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte karbon elyaf kaplı çelikteki artış lineer bir seyir izlemektedir. Yine çelik perno numunesinin aşınma değerleri bütün yüklemeler için karbon elyaf kaplı perno numunesinden daha yüksektir.

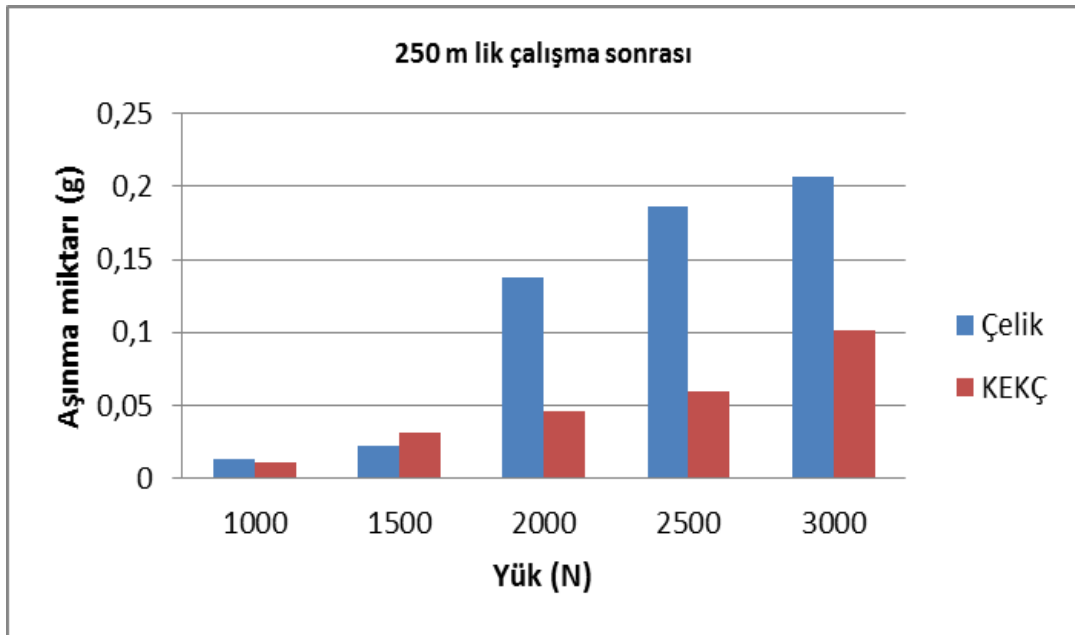
375m lik kayma mesafesine gelindiğinde ise çelik numunenin aşınma miktarındaki artış karbon elyaf kaplanmış çelik numuneye göre iki buçuk kat olarak sergilenmiştir.

### 5.1.2. Yük ile aşınma kaybı değişiminin incelenmesi

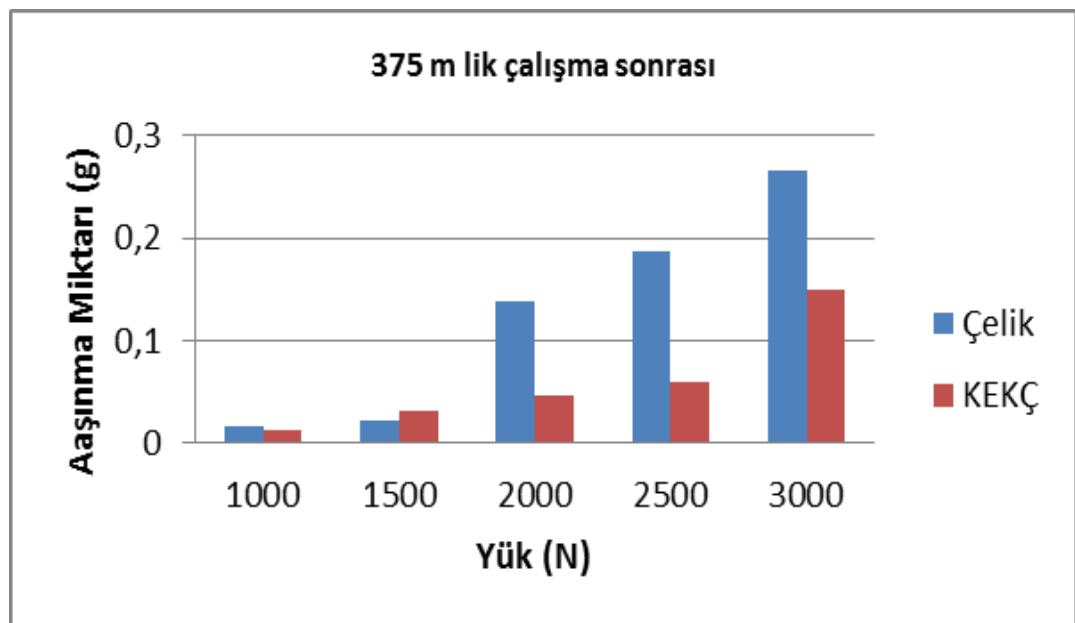
Şekil 5.6. Şekil 5.7. ve Şekil 5.8,'deki grafiklerde sabit kayma mesafeleri için farklı yüklerdeki aşınma davranışları incelenmiş olup sırasıyla 125m, 250m, 375m lik kayma mesafelerinde 1000N, 1500N, 2000N, 2500N, 3000N luk yükler için aşınma-yük değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.6. 125 m lik çalışma sonrası yük ile aşınma miktarı arasındaki ilişki



Şekil 5.7. 300 m lik çalışma sonrası yük ile aşınma miktarı arasındaki ilişki.



Şekil 5.8. 375 m lik çalışma sonrası yük ile aşınma miktarı arasındaki ilişki.

Her üç grafik ayrı ayrı incelendiğinde yük karşısındaki aşınma miktarlarının, uygulanan yüklerin artması ile arttığı görülmektedir. Çelik perno numunelerindeki aşınma miktarı karbon kaplı çelik perno numunelerdekine göre oldukça yüksek değerlerde seyretmektedir.

Her üç grafikte de her iki numune için özellikle 1000 ve 1500N'luk yükler karşısında aşınma çok düşük seviyede kalmıştır. Yükleme değerleri arttıkça aşınma değerleride artış göstermiştir.

## 5.2. Aşınmış yüzeylerin analizi

Çelik ve karbon elyaf kaplanmış çelik pernoların çeşitli yükler için 375 m lik aşınma sonundaki fotoğrafları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 da verilmiştir. Şekil 5.9 çelik pernoların 1000, 2000 ve 3000 N luk yükler ve 375 m lik aşınma sonundaki fotoğraflarını, şekil 5.10 ise karbon elyaf kaplanmış çelik pernoların 1000, 2000 ve 3000 N luk yükler ve 375 m lik aşınma sonundaki fotoğraflarını göstermektedir.



a) 1000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma



b) 2000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

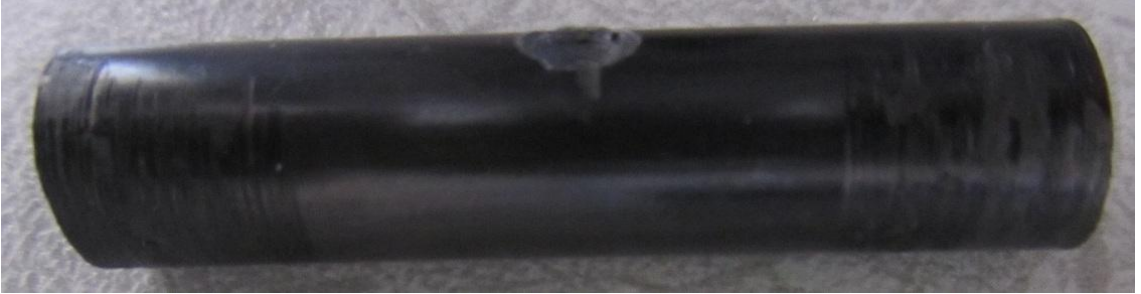


c) 3000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

**Şekil 5.9.** Çelik pernolardaki yüzey aşınmaları



a) 1000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma



b) 2000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma



c) 3000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

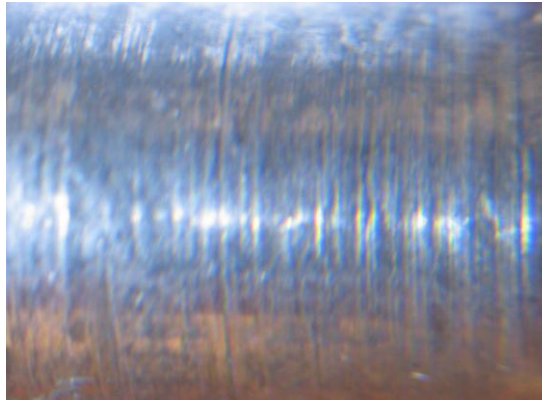
**Şekil 5.10.** Karbon elyaf kaplanmış çelik pernolardaki yüzey aşınmaları

Ayrıca aşınan yüzeyler 30x büyütme mikroskofta incelenmiş ve bunlarla ilgili görüntüler Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 verilmiştir. Şekil 5.11 çelik numunelerin 1000, 2000 ve 3000 N luk yükler ve 375 m lik çalışma sonundaki aşınmış yüzeylerinin mikroskop görüntülerini, Şekil 5.12 ise 1000, 2000 ve 3000 N luk yükler ve 375 m lik çalışma sonundaki aşınmış yüzeylerin mikroskop görüntülerini vermektedir.

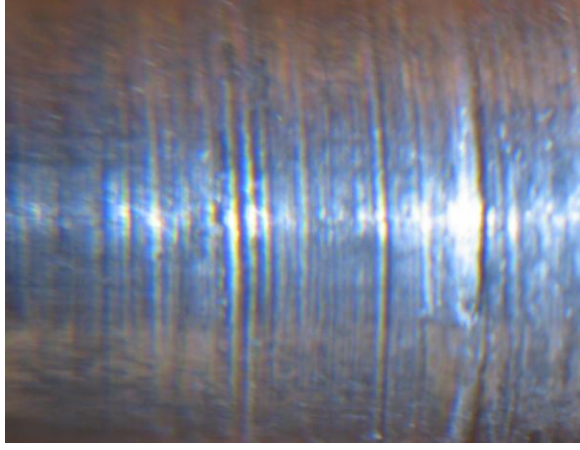
Aşınma izleri her iki numunede de kanallar şeklindedir. Temas yüzeyleri arasına giren aşınma partikülleri iki yüzey arasında temas yüzeyine gömülerek kazıma yapmış ve derin kanalların oluşmasına neden olmuştur.

Gerek çelik pernonun gerekse karbon elyaf kaplı çelik perno numunelerin aşınmış yüzeylerinin görüntüleri incelendiğinde yükün artması ile aşınma kanallarının arttığı, kanalların daha derin ve geniş bir hale geldiği görülmektedir.

En ince ve küçük aşınma kanallarının, karbon elyaf kaplı çelik perno numunelerinde olduğu görülmüştür. Çelik perno numune yüzeylerindeki kanalların ise daha derin ve geniş olduğu tespit edilmiştir.



a) 1000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

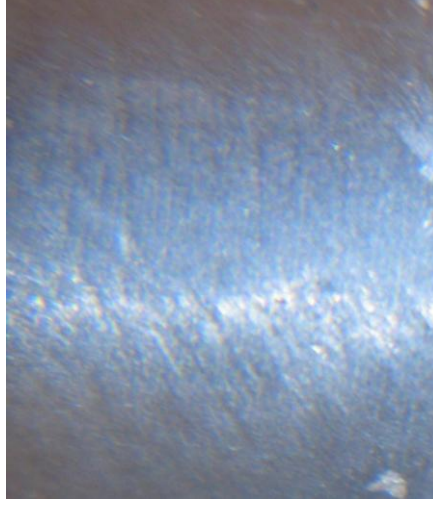


b) 2000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

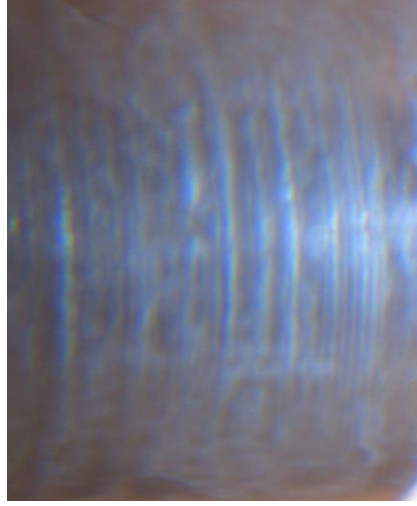


c) 3000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

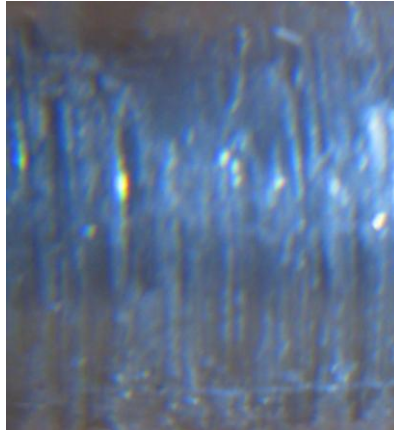
**Şekil 5.11.** Çelik pernoların aşınma sonrası mikroskop görüntüleri



a) 1000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma



b) 2000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma



c) 3000 N luk yük ve 375 m lik kayma mesafesi sonrası oluşan aşınma

**Şekil 5.12.** Karbon elyaf kaplanmış çelik pernelerin aşınma sonrası mikroskop görüntüleri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuç

Pernolardaki aşınma, perno malzeme özelliklerine, uygulanan yüke, kayma mesafesine ve çalışma koşullarına bağlı çok karmaşık bir olaydır.

Bu karmaşık olayın incelenmesinde bu çalışmada aşınma üzerine etki eden birçok parametre sabit tutulmuştur. Deneysel hız değiştirilmeden sadece farklı yapıya sahip pernoların değişken yük ve değişken kayma mesafelerindeki davranışları incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ✓ Karbon elyaf kaplı çelik pernoların çelik pernelara alternatif olabilecekleri tesbit edilmiştir.
- ✓ Aşırı yüklerdeki çalışmalarda kompozit pernoların yüzey dayanımlarının daha iyi olduğu gerilme dağılımının daha homojen olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Kompozit pernoların çalışma ortamlarının çelik pernelara nazaran daha hassas olduğu ve yataklarda oluşan hasarlardan çok çabuk etkilendiği bu tür durumlarda yapının liflenmeye başladığı gözlemlenmiştir.

### 6.2. Öneriler

- ✓ Tamamı karbon elyaf olan pernoların aşınmaları incelenebilir.
- ✓ Pernoların yağlı çalışma ortamlarındaki aşınmalar incelenebilir.
- ✓ Perno çapları ve yataklama numuneleri değiştirilerek çalışmalar yapılabilir.
- ✓ Çelik üzerindeki elyaf et kalınlıkları değiştirilebilir.

**KAYNAKLAR**

1. Akkurt, Mustafa, 1990 “Makine Elemanları Cilt 1”, Birsen Yayınevi, İstanbul,
2. Aktaş A, Karakuzu R, 1999 Failure analysis of two-dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint, Mechanics of composite materials and structures Volume: 6 Issue: 4 Pages: 347-361
3. Aktaş A, İmrek H, Cünedioğlu Y, 2009 Experimental and numerical failure analysis of pinned-joints in composite materials, composite structure volume:89 issue:3 Pages: 459-466
4. Hutchings, I.M.,1996 “Tribology”, Friction and Wear of Engineering Materials, St Edmundsbury Press, London,
5. Hung CL, Chang FK, 1996, Bearing failure of bolted composite joints .2. Model and verification, Journal of composite materials volume: 30 Issue: 12 Pages: 1359-1400
6. Juvinall, Robert C., Marshek, Kurt M.,1983 “Fundamentals of Machine Component Design”, Second Edition, U.S.A.,
7. Jack A. Collins, Henry R. Busby, George H. 2009 Staab Mechanical Design of Machine Elements and Machines, John Wiley and Sons,
8. Ludema, Kenneth C.,1996 “Friction, Wear, Lubrication”, A Textbook in Tribology, CRC Press, U.S.A.,
9. Onaran, Kaşif, 1993 “Malzeme Bilimi”, Bilim ve Teknik Yayınevi, İstanbul,
10. Peterson, M.B., 1980 “Classification of wear processes”, in Wear Control Handbook, ASME, pp. 9-16,
11. Rabinowicz, E.,1964 “Friction and Wear of Materials”, John Wiley, New York,.
12. Shimamura Y, Oda K, Todoroki A, et al.,2006 Detectability of bearing failure of composite bolted joints by electric resistance change method
13. Şahin Y, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, 2000, Ankara

14. Xiao Y, Ishikawa T, 2005, Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation) Composites science and technology Volume: 65 Issue: 7-8 Pages: 1022-1031
15. Wang HS, Hung CL, Chang FK, 1996, Bearing failure of bolted composite joints .1. Experimental characterizati Journal of Composite Materials August 1996 vol. 30 no. 12 1359-1400

## EKLER

### EK 1

#### KISS soft analiz sonuçları

KISSsoft - Test version - Pins [M03a] - Untitled

File Project View Calculation Report Graphics Extras Help

KISSSOFT  
Release 04-2010B

Operating data

Configuration: Bolt under shearing action (in double shear)

Rod force:  $F_n$  1000.0000 N

Application factor:  $K_A$  1.1000

Type of load: alternating

Installation case: Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Geometry

Type of pin: Full pin / Bolt

Pin diameter:  $d$  10.0000 mm

Rod thickness:  $t_s$  20.0000 mm

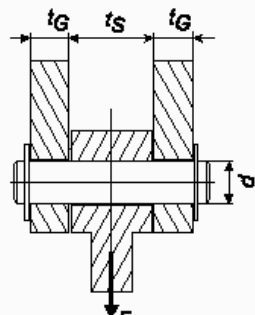
Fork thickness:  $t_G$  10.0000 mm

Materials

Pin/ Bolt: C45 (1), Through hardened steel, unalloyed, through hardened

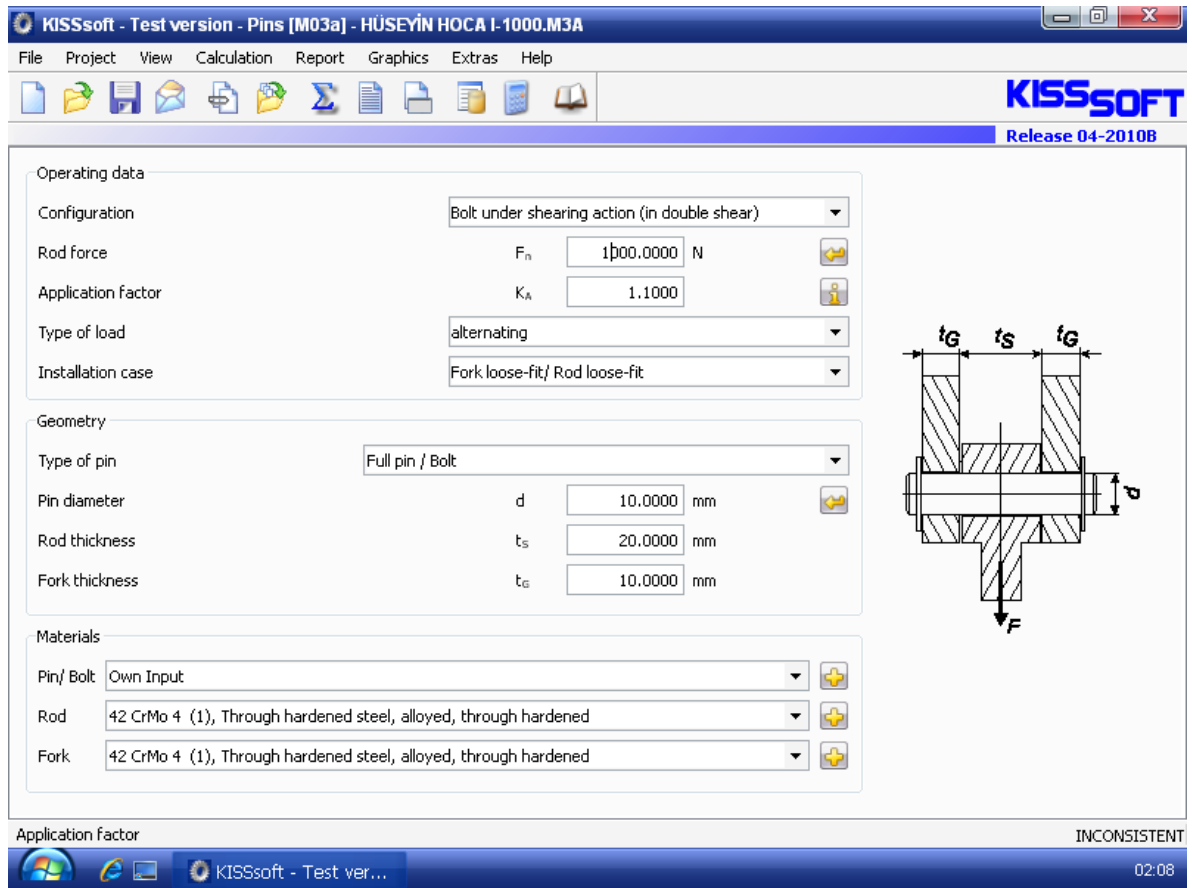
Rod: 42 CrMo 4 (1), Through hardened steel, alloyed, through hardened

Fork: 42 CrMo 4 (1), Through hardened steel, alloyed, through hardened



INCONSISTENT

Şekil 1. Çelik perno numunenin modellemesi



Şekil 2. Karbon elyaf kaplı çelik perno numunenin modellemesi

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 01:55:06

---

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	1000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material	C45 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	700.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	70.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	105.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	7.500
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	7.003
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	84.034
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	5.500
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	5.500

Safeties:

1/2

Şekil 3. 1000 N yük altındaki çelik pernoların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 01:57:49

---

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**  
 l-> The required nominal safety for this application case is not reached!

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	1500.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material	C45 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	700.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	70.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[signazul]	105.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	11.250
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	10.504

1/2

Şekil 4. 1500 N yük altındaki çelik perneların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 01:58:42

---

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**  
 l-> The required nominal safety for this application case is not reached!

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	2000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material	C45 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	700.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	70.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[signazul]	105.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	15.000
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	14.006

1/2

Şekil 5. 2000 N yük altındaki çelik perneların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 01:59:54

---

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**  
 l-> The required nominal safety for this application case is not reached!

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	2500.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material	C45 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	700.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	70.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[signazul]	105.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	18.750
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	17.507

1/2

Şekil 6. 2500 N yük altındaki çelik perneların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:00:33

---

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**  
 l-> The required nominal safety for this application case is not reached!

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	3000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material	C45 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	700.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	70.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[signazul]	105.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	22.500
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	21.008

1/2

Şekil 7. 3000 N yük altındaki çelik perneların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:09:12

---

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	1000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material (Own input)	KARBON ELYAF	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	2800.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	280.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	420.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	7.500
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	7.003
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	84.034
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	5.500
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	5.500

Safeties:

1/2

Şekil 8. 1000 N yük altındaki karbon elyaf kaplı çelik pernelerin sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:11:19

---

**Pins [M03a]**

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

**Bolt under shearing action (in double shear)**

**Inputs:**

Rod force (N)	[Fn]	1500.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

**Material data:**

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

**Pin/ Bolt**

Material (Own input)	KARBON ELYAF	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	2800.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	280.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	420.000

**Rod**

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

**Fork**

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

**Results:**

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	11.250
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	10.504
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	126.051
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	8.250
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	8.250

Safeties:

1/2

Şekil 9. 1500 N yük altındaki karbon elyaf kaplı çelik pernelerin sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:11:58

---

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	2000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material (Own input)	KARBON ELYAF	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	2800.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	280.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	420.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	15.000
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	14.006
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	168.068
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	11.000
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	11.000

Safeties:

1/2

Şekil 10. 2000 N yük altındaki karbon elyaf kaplı çelik pernoların sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:12:40

---

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	2500.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material (Own input)	KARBON ELYAF	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	2800.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	280.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	420.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	18.750
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	17.507
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	210.085
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	13.750
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	13.750

Safeties:

1/2

Şekil 11. 2500 N yük altındaki karbon elyaf kaplı çelik pernelerin sonuçları

KISSsoft - Release 04-2010B

---

KISSsoft evaluation

---

Name : HÜSEYİN HOCA I-1000 File  
 Changed by : Administrator on: 22.01.2003 at: 02:13:18

---

### Pins [M03a]

Calculation method: G. Niemann, volume 1, 4th edition

### **Bolt under shearing action (in double shear)**

#### Inputs:

Rod force (N)	[Fn]	3000.000
Bolt diameter (mm)	[d]	10.000
Cross section area (mm <sup>2</sup> )	[A]	78.540
Rod thickness (mm)	[tS]	20.000
Thickness of fork (mm)	[tG]	10.000
Application factor	[KA]	1.100

Installation case:  
 Fork loose-fit/ Rod loose-fit

Type of load:  
 alternating

Type of pin: Full pin / Bolt

#### Material data:

Dynamic factor	[cd]	0.500
Reduction factor bending/shearing notched pin	[ck]	1.000
Reduction factor pressure notched pin	[ckp]	1.000
Coefficient surface pressure	[faktp]	0.350
Coefficient shearing stress	[fakttau]	0.200
Coefficient bending Stress	[faktsigma]	0.300

#### Pin/ Bolt

Material (Own input)	KARBON ELYAF	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	2800.000
Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tauzul]	280.000
Admissible bending stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigmazul]	420.000

#### Rod

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible surface pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Fork

Material	42 CrMo 4 (1)	
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	[Rm]	1100.000
Permissible pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pzul]	192.500

#### Results:

Pin:		
Moment of resistance (mm <sup>3</sup> )	[W]	98.175
Bending moment (Nm)	[Mb]	22.500
Shearing stress (N/mm <sup>2</sup> )	[tau]	21.008
Bending Stress (N/mm <sup>2</sup> )	[sigma]	252.101
Rod:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pw]	16.500
Fork:		
Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	[pn]	16.500

Safeties:

1/2

Şekil 12. 3000 N yük altındaki karbon elyaf kaplı çelik pernelerin sonuçları

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Abdullah ERTEN  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : ÜSKÜDAR / 12.11.1977  
**Telefon** : / 0.505 260 26 09  
**Faks** :  
**e-mail** : aerten@thy.com / abduallahrtn@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Merkez İHL Süper Lisesi,Beşevle, ANAKARA	1998
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi,Makine Müh.Selçuklu, KONYA	2002
Yüksek Lisans	: -	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2002 – 2003	ANADOLU Danışmanlık	Makine Mühendisi
2003 – ...	THY Teknik Uçak Bakım	Yapısal Atl. Müh.

**UZMANLIK ALANI:** Makine Elemanları, Makine tasarımı, Uçak yapıları ve kompozit yapılar.

**YABANCI DİLLER:** İngilizce