

**YAŞLANDIRILMIŞ Cu-Be ALAŞIMLARININ  
ELEKTRİK AKIMI ALTINDA AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2010  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**Musa ÖNAL**

**YAŞLANDIRILMIŞ Cu-Be ALAŞIMLARININ ELEKTRİK AKIMI  
ALTINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Musa ÖNAL**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2010**

Musa ÖNAL tarafından hazırlanan “YAŞLANDIRILMIŞ Cu-Be ALAŞIMLARININ ELEKTRİK AKIMI ALTINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa YAŞAR

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK

Tez Danışmanı, Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oybirliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/ 05/ 2010

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Doç. Dr. Mustafa ACARER (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK (AİBÜ)

...../...../2010

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

İmzası

Musa ÖNAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **YAŞLANDIRILMIŞ Cu-Be ALAŞIMLARININ ELEKTRİK AKIMI ALTINDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Musa ÖNAL**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Doç. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Yrd. Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK**

**Haziran 2010, 52 sayfa**

Bu çalışmada, C17200 ve C17500 standartlarında temin edilen iki farklı Cu-Be döküm alaşımı numunelerine öncelikle farklı sıcaklıklarda yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak, maksimum sertlik değerlerini veren ısıl işlem şartları ve aşınma özellikleri incelenmiştir.

Yaşlandırma işlemlerinde, C17200 800 °C'de 2 saat çözeltiye alınmış 300 – 315 – 330 – 345 – 360 °C'de 3 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işlemlerinde, C17500 alaşımı ise 900 °C'de 2 saat çözeltiye alınmıştır ve 410 – 440 – 470 – 500 – 530 °C'de 3 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminden sonra aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri, 0,98 m/s kayma hızında, 2000 m yol ve 20 N yük altında, 0A, 10A, 20A ve 30A elektrik akımları altında çalışan bir pin on disk aşınma cihazında atmosferik ortamda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sürtünme kuvveti verileri değerlendirilerek sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Maksimum

aşınma meydana gelen malzemelerin aşınma yüzeyleri SEM ile aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla incelenmiştir.

Maksimum sertlik C17200 Cu-Be alaşımı için 800 °C 2 saat çözeltiye alınmış ve 330°C de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış alaşımda elde edilmiştir. C17500 Cu-Be alaşımı ise 900 °C 2 saat çözeltiye alma ve 500 °C de 3 saat işlemi uygulandıktan sonra bulunmuştur. Daha yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında aşırı yaşlanma meydana gelmiş ve sertlik değerleri düşmüştür. Ayrıca yaşlandırılmış C17200 Cu-Be alaşımının sertliği C17500 alaşımına göre oldukça yüksek bulunmuştur. Elektriksel aşınma deneylerinde, hem aşınma kaybı hem de sürtünme katsayısı değerleri elektrik akımı arttıkça ilk olarak yükselme göstermiş ancak daha sonra düşmüştür.

**Anahtar Sözcükler** : Cu-Be aşınma, ısıl işlem, yaşlanma

**Bilim Kodu** : 710.3.022

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF AGED Cu-Be ALLOYS UNDER ELECTRICAL WEAR CURRENT**

**Musa ÖNAL**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Science  
Department of Metal Education**

**Thesis Advisors :**

**Assoc. Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Assist. Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK**

**June 2010, 52 pages**

This study is aimed at determining the heat treatment conditions and wear attrition characteristics which give the maximum hardness toughness values by placing two different Cu-Be casted alloy samples, obtained in C17200 and C17500 standards, in a aging in different temperatures.

C17200 is solution heat treated turned into solution at 800C for two hours. After that, it is aged for three hours at 300 – 315 – 330 – 345 – 360 °C. C17500 is turned into solution at 900 °C and then aged for three hours at 410 – 440 – 70 – 500 – 530 °C respectively. After the aging heat treatment, wear tests were conducted. The wear tests were conducted in an atmospheric environment on a pin on disk wear test apparatus operating at a sliding rate of 0,98 m/s, under 20N weight and 0A, 10A, 20A, 30A electric currents in a 2000 m sliding distance. The resulting data of friction

force is evaluated to calculate friction coefficient values. Worn surfaces which have the maximum wear rate are analyzed with SEM in order to determine wear mechanisms.

The maximum hardness was obtained in C17200 Cu-Be alloy is solution heat treated for two hours at 800 °C and aged for three hours under 330 °C temperature. However, the maximum hardness was obtained C17500. Cu-Be alloy is solution heat treated for two hours under 900 °C and then aged for three hours at 500 °C temperature. Under higher aging temperatures, over-aging occurred and toughness values are decreased. Also, the hardness of aged C17200 alloy is found to be considerably high compared to the C17500 alloy. In electrical wear test experiments, with increasing electrical currents, both wear loss and friction coefficient values are found to increase at first, but later, these values decreased.

**Key Words** : Copper-Berilium, heat, treatment, ageing

**Science Code** : 710.3.022



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımnda bana destek veren danıőmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa YAŞAR'a, ikinci danıőmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK'a çeşitli vesilelerle katkıda bulunan hocalarım Sayın Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK, Doç. Dr. Mustafa ACARER, Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ ve Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	4
2.1. SÜRTÜNME.....	5
2.1.1. Kuru Sürtünme.....	6
2.1.2. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi .....	9
2.2. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI.....	10
2.2.1. Adhesiv Aşınma.....	10
2.2.2. Abrasiv Aşınma.....	11
2.2.3. Yorulma Aşınması .....	11
2.2.4. Korozyon Aşınma.....	13
2.3. YAŞLANMA .....	14
2.3.1. Yaşlanmanın Tanımı .....	14
2.3.2. Yapay Yaşlandırma.....	15
2.3.3. Doğal Yaşlandırma.....	15
2.4. YAŞLANMA TEORİSİ .....	16
2.4.1. Yaşlandırma İşlemi .....	18

2.4.1.1. Solüsyon Alma.....	18
2.4.1.2. Su Verme.....	19
2.4.1.3. Çökeltme .....	20
BÖLÜM 3 .....	24
BAKIR BERİLYUM ALAŞIMLARI.....	24
3.1. YAŞLANDIRILMIŞ BERİLYUM BRONZUNUN YAPISI.....	25
3.2. KULLANIM ALANLARI .....	26
BÖLÜM 4.....	28
MALZEME VE METOT.....	28
4.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	29
4.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	29
4.3. AŞINMA TESTLERİ.....	29
BÖLÜM 5.....	32
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	32
5.1 MİKRO YAPI İNCELEMELERİ.....	32
5.2. SERTLİK VE ELEKTRİK İLETKENLİĞİ ÖLÇÜMLERİ.....	33
5.3. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI .....	36
5.4. SEM İNCELEMELERİ .....	38
BÖLÜM 6 .....	46
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	46
6.1. SONUÇLAR .....	46
6.2. ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR .....	48
ÖZGEÇMİŞ .....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Sürtünme esnasında gerçek temas noktaları .....	5
Şekil 2.2. Sürtünme çeşitleri .....	5
Şekil 2.3. Statik sürtünme ölçümü için bir tasarım .....	6
Şekil 2.4. Statik sürtünmenin ölçümü için eğik yüzey metodu.....	7
Şekil 2.5. Aşınma eğrilerinin üç örneği.....	8
Şekil 2.6. Aşınmanın Anahtar Kelimeleri ve Temas Tiplerinin Tanımlanmaları .....	9
Şekil 2.7. Dört aşınma tipinin şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.8. Adhesiv aşınma test cihazı.....	11
Şekil 2.9. Abrasiv aşınma test cihazı.....	12
Şekil 2.10. Yorulma aşınma test cihazı.....	13
Şekil 2.11. Korozyon aşınma test cihazı .....	14
Şekil 2.12. Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işlemi .....	15
Şekil 2.13. Yaşlanma kademeleri.....	16
Şekil 2.14. Aşırı yoğun katı eriyik- transmisyon latisi- dengeli çökelek gösterimi .....	17
Şekil 2.15 Bakır-Berilyum alaşımlarının faz diyagramları .....	19
Şekil 2.16. Aşırı doymuş katı eriyikten ayrışma (çökeltme) şekilleri.....	21
Şekil 2.17. Al-Cu sisteminde oluşan bazı ara fazların şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.1. Yaşlandırılmış ve ezme uygulanmış Cu-Be alaşımında oluşan sertlikler.....	25
Şekil 4.1. Aşınma test cihazının şematik gösterimi .....	30
Şekil 5.1. Optik fotoğraflar .....	33
Şekil 5.2. 800°C ve 900°C de 2 saat çözeltiye alınmış değişik sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmış C17200 ve C17500 Cu-Be alaşımının sertlik değerleri .....	34

Şekil 5.3. Yaşlandırılmış C17200 ve C17500 alaşımlarının 20 N yük ve 2000 m aşınma mesafesinde, elektrik akımına bağlı aşınma kayıpları .....	36
Şekil 5.4. Yaşlandırılmış C17200 ve C17500 alaşım numunelerinin 20 N yük ve 2000 m aşınma mesafesinde elektrik akımına bağlı sürtünme katsayısı değerleri.....	38
Şekil 5.5. 330°C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 0 A akım altında.....	39
Şekil 5.6. 330°C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 10 A akım altında.....	40
Şekil 5.7. 330°C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 20 A akım altında.....	40
Şekil 5.8. 330°C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 30 A akım altında.....	41
Şekil 5.9. 500°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 0 A akım altında .....	42
Şekil 5.10. 500°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 10 A akım altında .....	42
Şekil 5.11. 500°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 20 A akım altında .....	43
Şekil 5.12. 500°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 30 A akım altında .....	43

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. C17200 ve C17500 kimyasal bileşimi (ağırlık %)	28
Çizelge 4.2. C17200 ve C17500 alaşımlarının yaşlandırma sıcak ve süreleri	30
Çizelge 4.3 Uygulanan Aşınma Deneyindeki Parametreler	31
Çizelge 5.1. 17200 ve C17500 alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri	35
Çizelge 5.2. 20A akım altında aşındırılmış C17200 alaşımı yüzeyinden alınan genel EDS analizi	44
Çizelge 5.3. 30A akım altında aşındırılmış C17200 alaşımı yüzeyinden alınan genel EDS analizi	45

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER ve KISALTMALAR

$\mu$	: Sürtünme katsayısı
F	: Kuvvet
$F_s$	: Sürtünme kuvveti
N	: Newton
$\tau_T$	: Mikro kaynak noktalarının kayma gerilmesi.
$\mu_k$	: Dinamik sürtünme katsayısı.
$P_a$	: Yumuşak olan malzemenin akma basıncı
$A_r$	: Gerçek temas alanı
m	: Metre
s	: Saniye
g	: Gram
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Bakır Berilyum (Cu-Be) alaşımları yüksek dayanım, iyi elektriksel ve ısıl iletkenlik özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu alaşımlar genel olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir. Yaklaşık %1,6 – 2,0 arasında berilyum ile %0,3 kobalt içeren C17200 serisi Cu-Be alaşımları, en yüksek dayanım grubu alaşımlarından biridir. Bakırın, berilyum ve kobalt ile alaşımlandırılması ile elde edilen bu Cu-Be (berilyum bronzları) yüksek mekanik özelliklerinden dolayı punta ve alın kaynağında elektrot olarak kullanılır. Ayrıca mükemmel ısı iletim özelliklerinden dolayı soğuma hızını önemli oranda arttırdığı için plastik enjeksiyon ve şişirme kalıplarında kullanılır. Yaklaşık %0,2 – 0,7 berilyum ile yüksek oranda nikel veya kobalt içeren C17500 serisi ise, fevkalade yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip yüksek iletim grubu Cu-Be alaşımlarından birisidir.

Cu-Be alaşımları bir çökelme sertleşmeli özelliğine sahiptir. Yaşlandırma işlemi ile neticesinde yüksek dayanım ve sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Plastik şişirme kalıplarında, plastik enjeksiyon kalıplarının hızlı soğuması gereken yerlerinde elektrot olarak, kıvılcım çıkarmayan el aletleri yapımında, aşınma dayanımı yüksek olan yatak malzemelerinin yapımında kullanılmaktadır. Berilyum bronzlarına ısıl işlem uygulandığında, hazır sertleştirilmiş çeliklere yakın bir sertlik değeri elde edilmektedir. Berilyum bronzları ayna parlaklığına kadar parlatılabilir. Ve daha iyi bir yüzey aşınma direnci için, krom kaplanabilir. Berilyum bronzları, birim ağırlık başına yüksek metal maliyetine rağmen, özellikle oyuncak, heykel ve buna benzer parçalar için, enjeksiyon kalıpları olarak, gittikçe artan bir şekilde kullanılmaktadır. İyi bir şekilde uygulandığında bu kalıp malzemesi, çeliğe kıyasla bazı avantajlara sahiptir. En önemli avantajı ise, bu malzemenin daha yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasıdır. Bu özellik tek tip plastik parça imalatı için geçen süreye (tek bir parçanın imalat periyodu) azaltır. Neticede berilyum bronzları çelik kalıpların seçilen kısımların



da veya tüm bir kalıp malzemesi olarak kullanıldığında verimi azami %25 arttırır [1,2].

Berilyum bronzlarının yüksek dayanımları, diğer bronzlar gibi (kalay ve alüminyum bronzları) oluşturulan yeni katı çözeltilerinin değil yaşlandırma ısıl işleminin bir sonucudur. Berilyumun bakır içerisindeki çözünürlüğü, 864 °C de % 2,1 iken oda sıcaklığında % 0,25 den daha düşüktür. Bu azalma, berilyum bronzlarının yaşlandırma işlemine uygun olduğunu göstermektedir. Denge diyagramlarından bu durum açık olarak görülebilir. Yavaş soğutulmuş yapılarda,  $\gamma$  genellikle  $\alpha$  tane sınırlarında çökeler. Su verilmiş yapı ise %100  $\alpha$  içeren bir yapıdır. Yaşlandırma işlemi  $\gamma$  fazının ince çökelti biçiminde  $\alpha$  taneleri içinde çökmesini sağlar. Aşırı yaşlandırılan alaşımlarda hem çökelen fazın taneleri ve hem de içinde çökeldikleri taneler irileşir. Ticari bakır-berilyum alaşımları ayrıca kobalt ve nikel elementlerini veya her ikisini birden içermektedir. Bu alaşım elementleri normalde sıvı metal içerisinde çözümlü halindedir. Ancak berilyuma olan kuvvetli kimyasal ilgileri nedeniyle, berilyum ile birleşirler ve katılaşma esnasında partiküller halinde ayrılırlar.  $\beta$  fazı bir BeCu<sub>2</sub> bileşiğidir ve bakır-berilyum alaşımları içerisinde dengeli  $\gamma$  fazı Be-Cu dır. Ancak  $\beta$  fazı, % 0,7 den daha az berilyum içeren yüksek iletken grubu bakır-berilyum alaşımlarında görülmez [2-4].

Bu çalışmada mevcut bir aşınma test cihazı yeniden düzenlenmiş ve yalıtımı yapılarak 200 A'lık 35 V bir alternatif akım üretici sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca bu sistem için aşındırıcı diskler imal edilmiştir. Sistem üzerinde mevcut olan yük hücresi, devir göstergesi, kuvvet uygulama noktası tekrar kalibre edilmiştir.

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda C17500 ve C17200 alaşımları için yaşlandırma sıcaklık aralığı ve yaşlandırma koşulları, aşındırma mesafesi ve aşındırma zamanı, sisteme uygulanacak elektrik akım şiddeti ve aşındırma kuvvetleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce ön testler yapılmıştır. Yapılan ön testlerde başarılı sonuçlar elde edilince de, deneysel çalışmalara geçilmiştir.

Yapılan bu çalışmada C17200 ve C17500 alaşımlarının yaşlandırma koşulları, yaşlandırmanın sertliğe etkisi, elektrik akım şiddeti altındaki ve akım şiddeti uygulanmadan malzemenin aşınma dirençleri, yaşlandırma öncesi ve sonrası numunelerin elektrik iletkenliği, sürtünme kuvveti, aşınma miktarı, SEM resimleri çekilerek adhesiv aşınma sonrası yüzey kalitesi ve yüzeylerde meydana gelen aşınma mekanizmaları, SEM, EDS ve optik resimleri alınarak yaşlandırma sıcaklıklarındaki tane boyutları, alaşım farklılıkları ve oluşan mikro yapılar araştırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### SÜRTÜNME VE AŞINMA

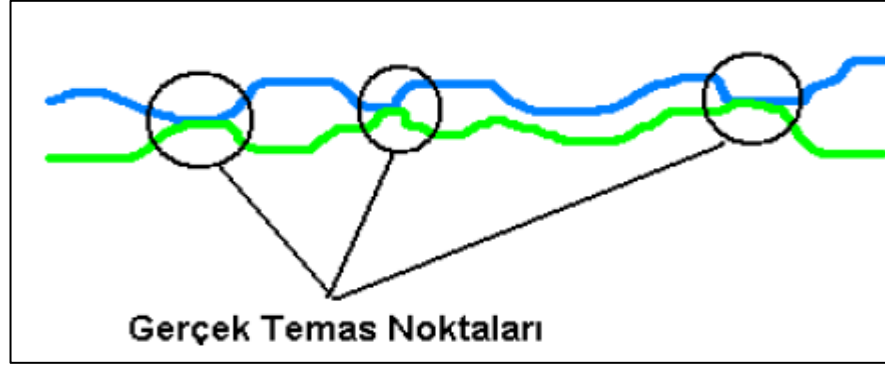
#### 2.1. SÜRTÜNME

Sürtünme birbirine yüzeysel olarak temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket eden ya da hareket etme eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdiği dirençtir [5].

Sürtünme kuvveti cisimler hareket ettikleri yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklanan ve yer değiştirmeye zıt yönde ortaya çıkan kuvvettir. Bir yüzeyde bulunan cismi hareket ettirebilmek için zıt yönde oluşan sürtünme kuvvetinden daha büyük bir kuvvet uygulanmalıdır ki o cisim hareket edebilsin. Aksi takdirde cisim hareketsiz kalır [6].

Yüzeyler ne kadar düzgün görünse de mikroskobik olarak girinti ve çıkıntılar vardır. İki yüzey üst üste geldiğinde, yüzeyler arasındaki temas her iki yüzeyin tepe noktaları arasında olmaktadır. Böylelikle temas yüzeyleri küçük olur. Bu oluşan küçük temaslarına uygulanan yüklerden dolayı bu bölgede yapışma ve bölgesel kaynaklar oluşur. Cisimler birbiri üzerinde hareket ettirilmeye çalışıldığında önce bu bölgesel kaynakları koparmak gerekecektir. Bu nedenle malzemenin yüzeyi ne kadar pürüzlü ise sürtünme katsayısı o kadar yüksek olacaktır (Şekil 2.1).

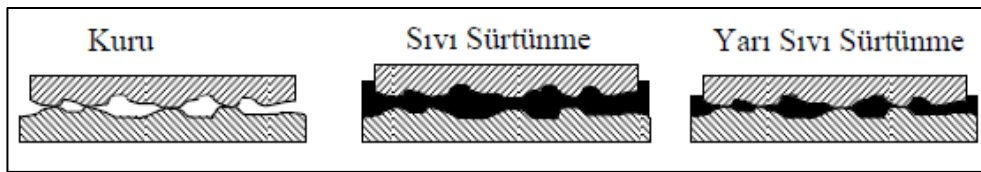
Aynı şekilde cismin ağırlığı ya da uygulanan yük arttırıldığında cismin ve yüzeyin girinti çıkıntıları birbirine girerek sürtünme de büyüyecektir. Bu nedenle hareketi sağlamak için daha fazla kuvvet gereklidir [6].



Şekil 2.1. Sürtünme esnasında gerçek temas noktaları [7].

Sürtünme genel statik ve dinamik sürtünme olarak ikiye ayrılır. Birbirine temas eden yüzeyler arasında bağıl bir hareket yoksa statik bir sürtünmeden bahsedilmelidir. Eğer varsa dinamik veya kinetik sürtünmeden bahsedilmelidir.

Bağıl hareket yapan yüzeyler arasında yağlayıcı madde konulup konulmamasına göre sürtünme kuru, yarı sıvı ve sıvı olmak üzere üçe ayrılır. Şekil 2.2’de sürtünme çeşitleri gösterilmektedir. Birbirlerine göre bağıl harekette olan yüzeyler doğrudan doğruya temasta iseler kuru, yüzeyler bir yağlayıcı tarafından ayrılıyorsa sıvı, yağlayıcı yüzeyleri birbirinden tam olarak ayırmıyorsa yarı sıvı sürtünme meydana gelir [8].



Şekil 2.2. Sürtünme çeşitleri [9].

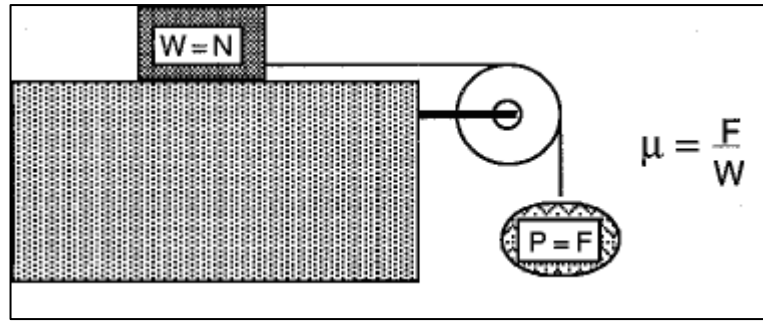
### 2.1.1 Kuru Sürtünme

Kuru sürtünme yağlanmamış iki katı cisim arasındaki sürtünmedir. Fiziksel ortamda kuru sürtünme sadece vakum ortamında mevcuttur. Sürtünme, sürtünmenin meydana geldiği çevredeki olumsuz etki eden elemanların (oksit, yağ, su buharı, pislik v.s. gibi) etkisindedir. Bunlar sürtünmeyi birazda olsa azaltır ve bir yağlayıcı gibi rol oynarlar. Bu yüzey tabakaları düzgün bir şekilde fiziksel ve kimyasal yöntemlerle

vakum da temizlenir ise düzgün temiz bir yüzey elde edilir. Bu tip yüzeylerde metal-metal teması sağlamak mümkün olur ve böylece kuru sürtünme meydana gelir [4,6-8]. En hassas işlemede bile yüzeyde pürüzlülük olacağından, yüzeyler arasındaki temas noktalarında oluşan yüksek basınç kaynak bağlantısı oluşmasına sebep olacak ve bu sebeple ortaya çıkan sürtünme kuvveti oldukça artmaktadır [9].

### 2.1.2. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi

Sürtünme katsayısının ölçümünde, kaymayı başlatmak için F sürtünme kuvveti ve N normal kuvvet olarak iki büyüklük bulunur. Sürtünme katsayısının ilk ölçümlerinin bazıları Şekil 2.3’de görülen ağırlıklar ve makaralı sistem düzenlenerek yapılmıştır.



Şekil 2.3. Statik sürtünme kuvveti ölçümü için bir tasarım [10].

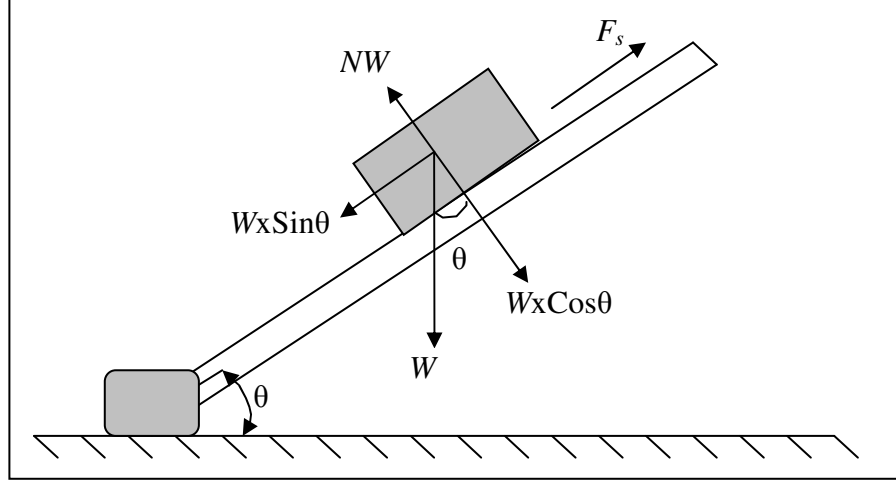
Kayma başlayıncaya kadar, yük (F) artırılır ve kayma başladığı andaki uygulanan yük sürtünme kuvveti ( $F_s$ ) olarak belirlenir. Normal kuvvet ağırlığa eşit ( $W=N$ ) olarak kabul edilir. Statik sürtünme katsayısı ( $\mu_s$ );

$$\mu_s = \frac{F_s}{N} \quad (2.1)$$

Kinetik sürtünme katsayısı ( $\mu_k$ ) ölçümü için ise, makaralı ipe bir ağırlık ilave edilir. Eğer kayma durursa, sabit bir kayma hızı elde edilinceye kadar yeni bir deneme için daha fazla ağırlık uygulanır. Bu durumda son yük kinetik sürtünme kuvvetidir ( $F_k$ ). Kinetik sürtünme katsayısı ( $\mu_k$ );

$$\mu_k = \frac{F_k}{N} \quad (2.2)$$

Sürtünme ölçümü için ikinci bir metot olan eğik yüzey metodu Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Statik sürtünmenin ölçümü için eğik yüzey metodu [10].

Bu metotta eğik yüzey blok kaymaya başlayıncaya kadar 0 °den itibaren kaldırılır. Ağırlığın etkisiyle kayma başladığı andaki yüzeyi bastıran kuvvet, statik sürtünme kuvvetidir ( $F_s$ ).

$$F_s = \mu_s \times N \quad (2.3)$$

$$F_s = \mu_s \times W \cos \theta \quad (2.4)$$

$$W \times \sin \theta = \mu_s \times W \cos \theta \quad (2.5)$$

olup statik sürtünme katsayısı ( $\mu_s$ );

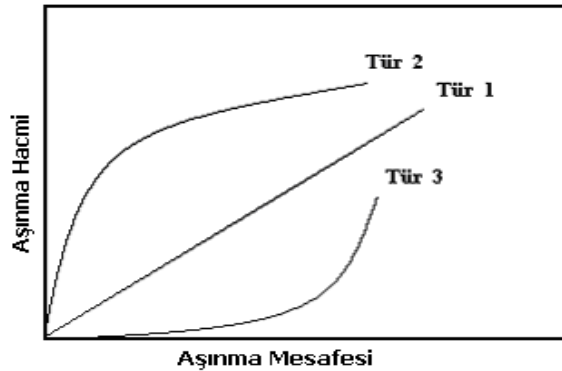
$$\mu_s = \frac{W \times \sin \theta}{W \times \cos \theta} = \tan \theta \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanır [11].

## 2.2. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınma mekanizmaları, sürtünme süresince meydana gelen kompleks değişikliklere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Genelde aşınma, tek bir aşınma mekanizması süresince yer almamaktadır. Bu nedenle sistemde bu şekilde, her bir tür aşınmadaki her bir aşınma mekanizmasının anlaşılması önemlidir. Aşınma, kimyasal bozulma veya temas ara yüzeyinde ergime suretiyle oluşan mikro çatlaklar sebebiyle, fiziksel ayrılma olarak, malzemenin kaldırılması sonucuyla meydana gelmektedir. Bu bağlamda aşınmanın birkaç tipi mevcuttur. Aşınma şiddeti, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınma parçacık şekli, bize aşınmanın sınıflandırılması konusunda, önemli bilgi vermektedir [12].

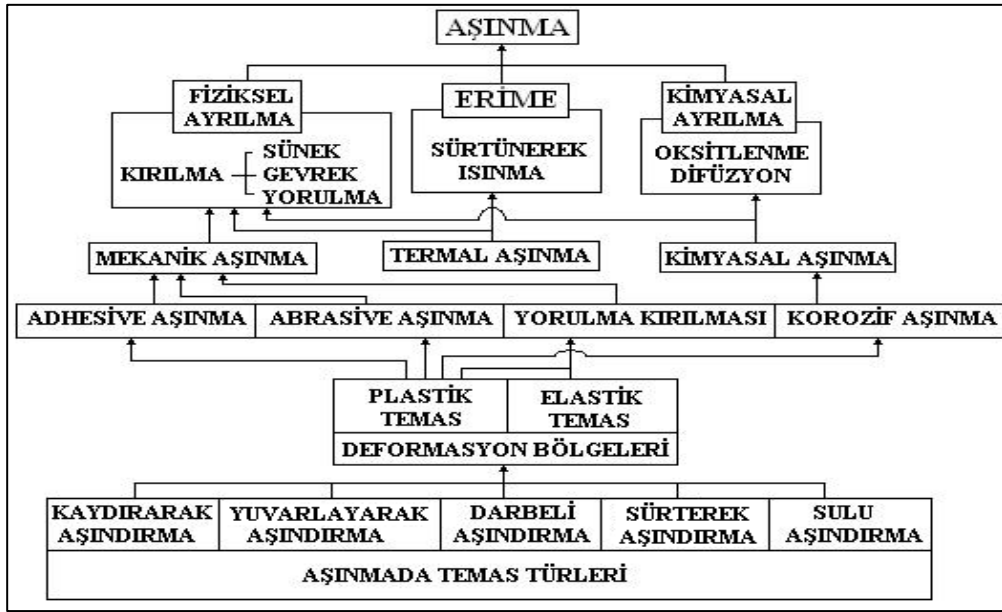
Aşınma şiddeti eğrileri Şekil 2.5’de, gösterilmiştir. 1. tür, bütün işlemin başından sonuna kadar sabit bir aşınma oranını gösterilmektedir. 2. türde, başlangıçtakinden yüksek bir aşınma oranından düşük bir orandaki sabit aşınmaya kadar olan geçişi gösterilmektedir. Aşınmanın bu tipi, metallerde oldukça sık gözlenir. 3. türde ise, bu şekilde bir çatlama meydana gelmesiyle, başlangıçtaki aşınmanın düşük oranın yüksek bir orandaki aşınmaya, daha kötü bir geçişini gösterilmektedir. Aşınmanın bu tipi, daha çok seramik malzemelerde görülmektedir [13,14].



Şekil 2.5. Aşınma eğrilerinin üç örneği.

Genel olarak aşınma, aşınma yüzeyinin durumu ve kaybolan malzemenin miktarı ile değerlendirilmektedir. Aşınmanın derecesi, aşınma oranı, özel aşınma oranı ve aşınma katsayıları değerleri ile tanımlanmaktadır. Aşınma oranı, her bir aşınma

mesafesi ve aşınma yüklemesi için aşınma şiddeti olarak tarif edilir. Sürtünme katsayısı da, belirli aşınma oranı ve malzemenin sertliği ile tarif edilir [15]. Aşınmayı tarif eden birçok terim mevcuttur. Bunlar daima çok büyük farklılıklar göstermezler. Bu çoğu zaman, aşınma mekanizmasının birbirine karıştırılmasına sebep olur. Dolayısıyla, aşınma mekanizmalarının analizine yaklaşımımızda anlaşılabilirliği daha iyi gerçekleştirmek için aşınmanın tanımlayıcı anahtar kelimeleri ve bunların karşılıklı özellikleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir [10]. Aşınma bir malzeme özelliği değildir ve bu durum bir sistem karşılığıdır. Aşınma, dinamik parametrelerin, çevresel parametrelerin ve malzeme parametrelerinden meydana getirilen bir sürtünme sistemi içerisindeki küçük bir değişiklik ile bile, büyük farklılıkların ifade edildiği bir kavramdır [16].



Şekil.2.6. Aşınmanın anahtar kelimeleri ve temas tiplerinin tanımlanmaları.

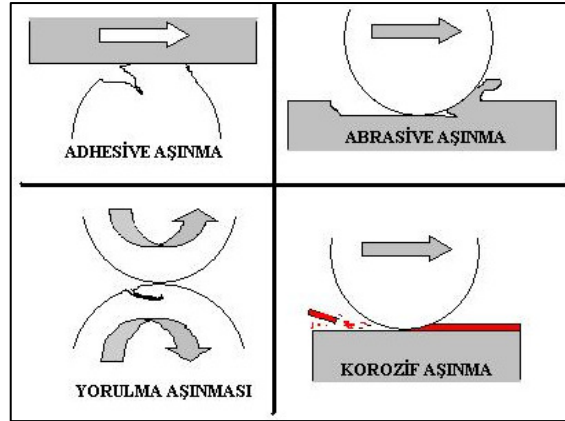
Aşınmada temas türleri; aşınma sistemleriyle ilişkili olduğundan, temas ara yüzündeki gerçek ve anlaşılır temas koşulları, bu temas yapılandırmalarıyla ilgili ayrıntılar olmaksızın ortaya çıkmaktadırlar. Temasın şiddeti, bu aşınma mekanizmalarının en basit şekilde ve direkt olarak anlaşılması bakımından elastik temas veya plastik temas olmaktadır. Sürtünme sistemi ise, dinamik parametreler, malzeme parametreleri ve atmosferik parametreler olarak tanımlanmaktadır.



Aşağıda dört aşınma mekanizması ve temel ve en önemli olanları tanınmaktadır [17]. Bunlar;

- Adhesiv Aşınma
- Abrasiv Aşınma
- Yorulma Aşınması
- Korozif Aşınma

Geleneksel olarak kabul edilen dört aşınma tipi, Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmektedir. Bu aşınma tiplerine dayalı aşınma mekanizmaları, detaylı olarak açıklanmaktadır [16].

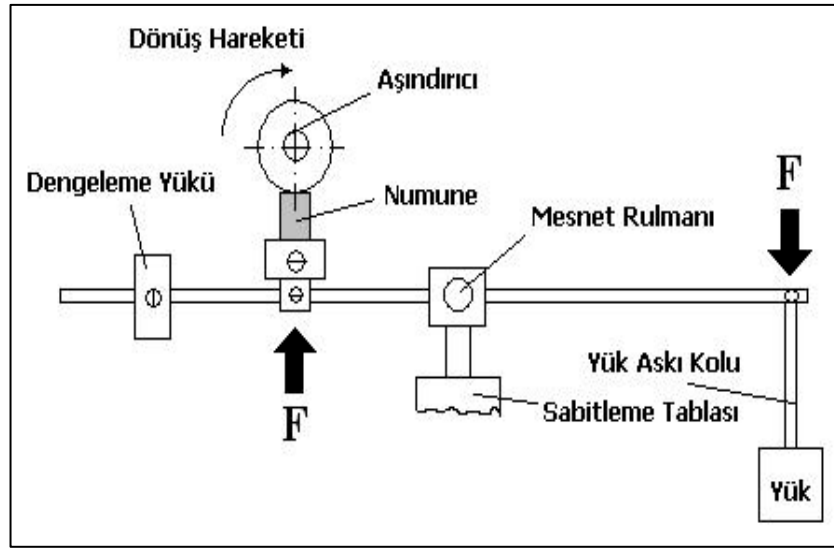


Şekil 2.7. Dört aşınma tipinin şematik gösterimi.

### 2.2.1. Adhesiv Aşınma

Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, bu noktadaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz

molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [19]. Şekil 2.8’de adhesiv aşınma aparatı modeli görülmektedir [18].



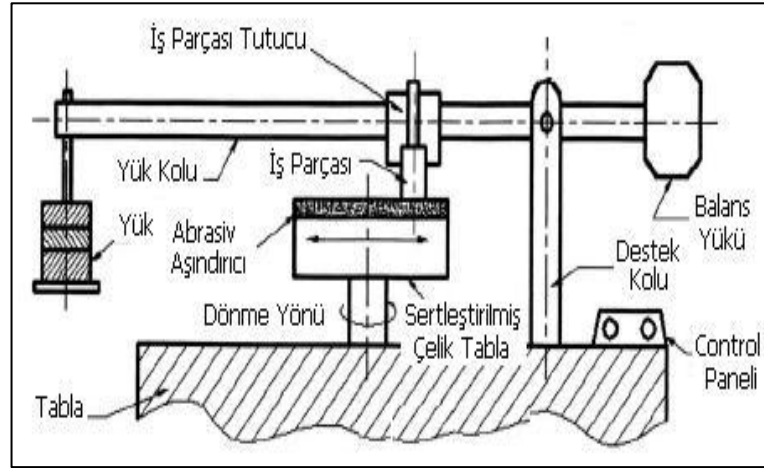
Şekil 2.8. Adhesiv aşınma test cihazı [18].

### 2.2.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı kapsar.

Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, “İki Cisimli Abrasiv Aşınma”dır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmaya “Üç Cisimli Aşınma” denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler

İki cisimli abrasiv aşınmayı göstermektedir. Daha sert olan cismin pürüzleri yumuşak olan malzemeyi çizerek mikro talaş kaldırmaktadır [20,21]. Şekil 2.9’de Abrasiv aşınma test cihazı verilmiştir [12].

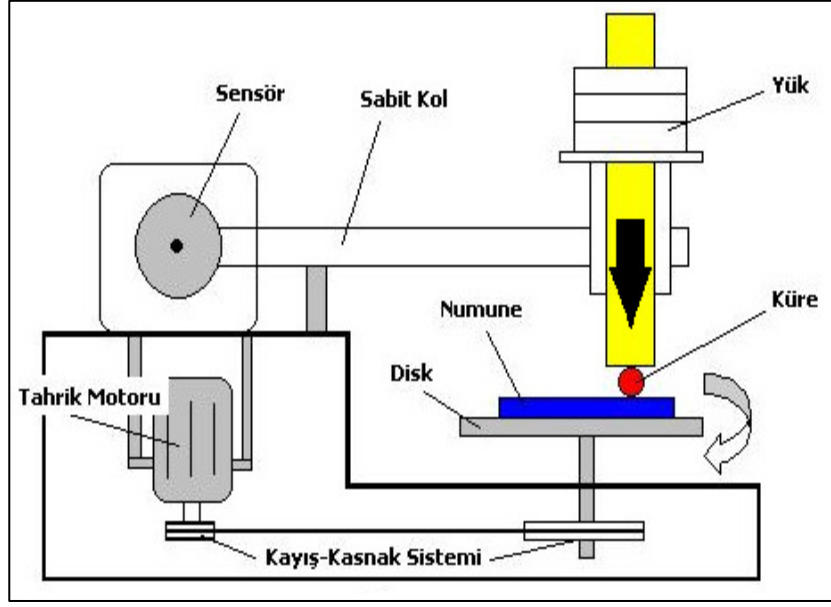


Şekil 2.9. Abrasiv aşınma test cihazı [12].

### 2.2.3. Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanana zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Bu olay daima yüzeyden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması dediğimiz pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında içyapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi çözümler olur.

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyonlara bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir. Şekil 2.10'da yorulma aşınma aparatı modeli görülmektedir [22,23].

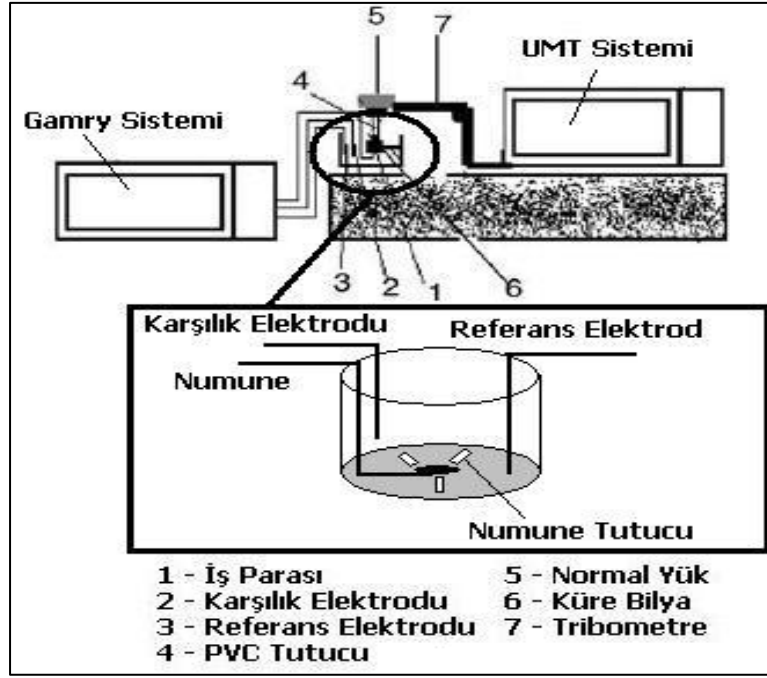


Şekil 2.10. Yorulma aşınma test cihazı.

#### 2.2.4. Korozi Aşınma

Makine ve malzeme mühendisleri herhangi bir tasarım için uygun metali seçmeden önce malzemelerin bazı açılardan incelenmeleri gerekir. Örneğin; gerekli hallerde malzemede şekil değiştirme derecesi, tokluk, yorulma ve korozyon direnci ölçülmelidir. Çalışma şartlarındaki malzeme seçimini etkileyen faktörler ise çalışma sıcaklığı, korozi ortam ve yüzey dayanıklılığıdır.

Korozyon; endüstriyel, ekonomik ve insan açısından pek çok problem ortaya çıkarmaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalardan, metal konstrüksiyonlarda meydana gelen hasarların raporlarından; korozyonun sebep olduğu kayıpların büyüklüğü açıkça görülmektedir. Göz ardı edilen korozyonun ortaya çıkardığı hasarları gidermek amacıyla aylarca bakıma alınan fabrikaların uğradığı zarar, bir asma çelik köprünün halatlarının kopması sonucu pek çok insanın hayatını kaybetmesi gibi yaşanmış pek çok örnek bu konunun ne kadar incelenmeye değer olduğunun göstergesidir [24]. Şekil 2.11’de korozyon aşınma test cihazı görülmektedir [25]. Korozi aşınma, metallerin oksidatif aşınmalarını daha çok temsil etmektedir.



Şekil 2.11. Korozyon aşınma test cihazı.

## 2.3. YAŞLANMA

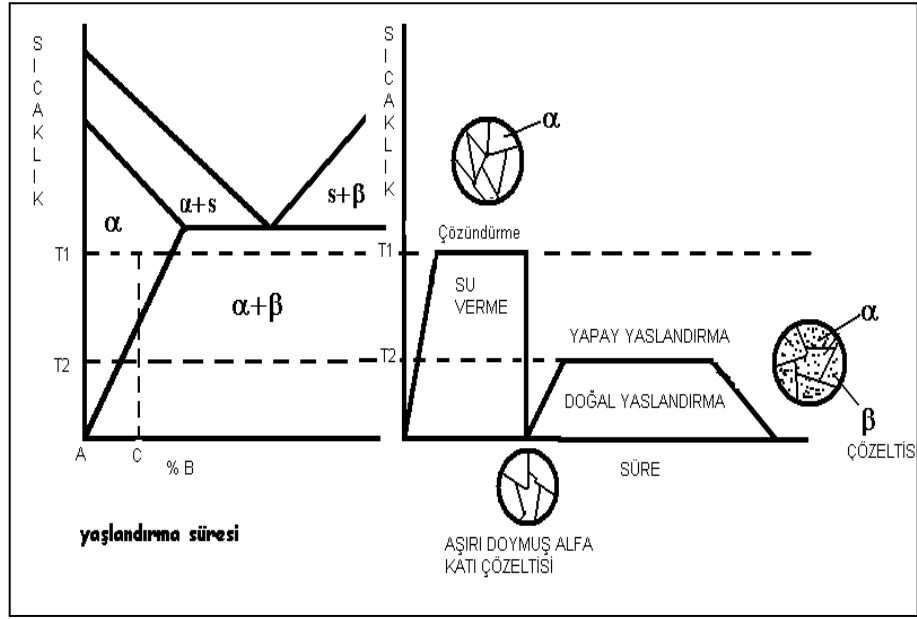
### 2.3.1. Yaşlanmanın Tanımı

Aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisi ile yeni bir fazın meydana gelmesi “yaşlanma” olarak tanımlanır.

Yaşlanma veya çökelti mukavemetlenmesi yumuşak ve daha sünek matriste ince sert uyumlu çökeltinin düzenli dağılımını sağlamak için yapılır. Çözündürme su verme ve yaşlandırma ile önemli bir mukavemetlenme etkisi sağlayan uyumlu çözelti oluşur. İki çeşit yaşlandırma yöntemi vardır:

- Yapay yaşlandırma
- Doğal yaşlandırma

Şekil 2.12’de çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işlemini gösteren şematik diyagram verilmiştir.



Şekil 2.12. Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işlemi.

### 2.3.2. Yapay Yaşlandırma

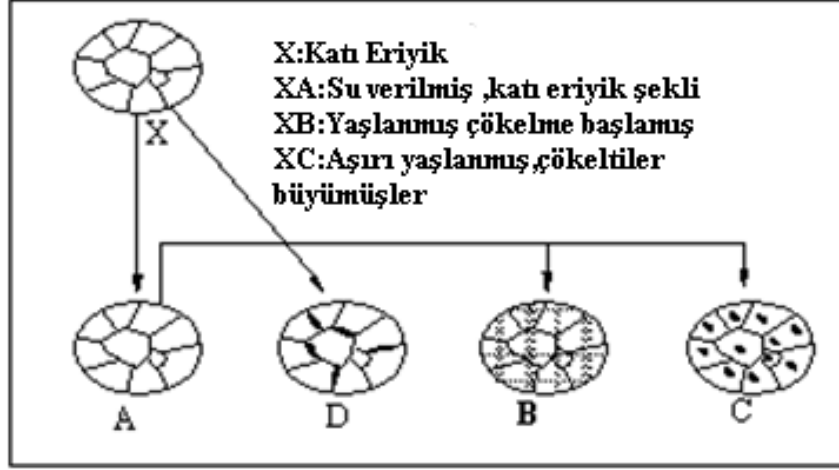
Çökeltinin oluşması için, gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla çözüldürülmüş ve su verilmiş alaşımı, solvüs eğrisinin altında sıcaklığa yeniden ısıtılmasıdır [4]. Oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemine yapay yaşlandırma olarak adlandırılır.

### 2.3.3. Doğal Yaşlandırma

Çözündürme uygulanmış ve su verilmiş yaşlandırılabilir alaşımdan oda sıcaklığında optimum dayanım sağlayan uyumlu bir çökeltinin oluşmasıdır. Oda sıcaklığında yapılan yaşlandırma doğal yaşlandırma olarak adlandırılır.

Burada dikkat edilecek husus, meydana getirilen ikili fazın (üçlü ve daha fazla olabilir),  $\beta$  şeklinde değil de  $\beta$  fazının  $\alpha$  fazı içinde hapsedilerek meydana getirilmesi gerektiğidir. Bu durum ise katı-hal reaksiyonları vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Aslında esas olarak yaşlanma olayı da bir katı-hal reaksiyonudur. Yaşlanma olayı

uygulanabildiği alaşımlarda müspet yönde büyük mekanik özellik değişimleri oluşturur. Şekil 2.13'te yaşlanma kademeleri gösterilmektedir [26].



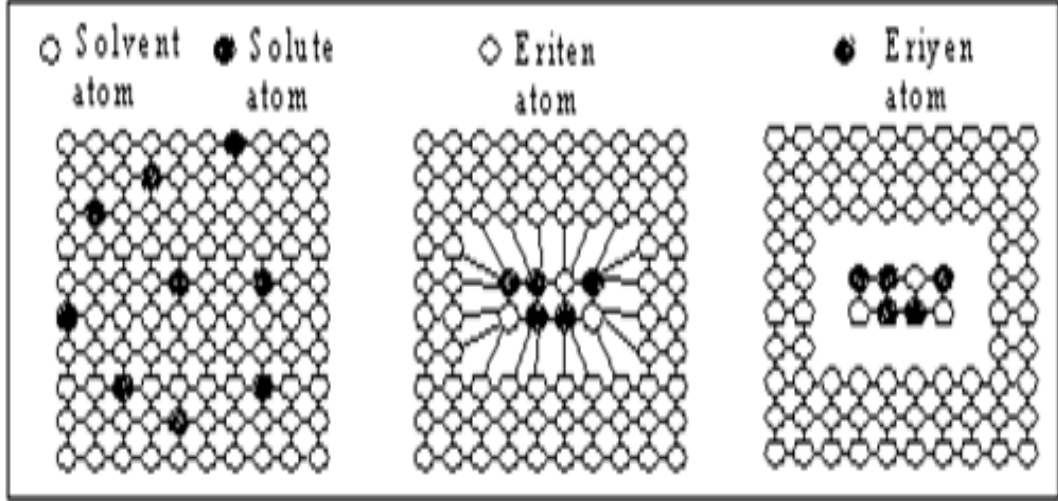
Şekil 2.13. Yaşlanma kademeleri [25].

Yaşlanma ile sertleşme elde etmek için önce katı eriyiğe alma işlemi yapılır. Daha sonra aşırı doymuş katı eriyik elde etmek için alaşıma su verilir. Su verme işlemi genel olarak çökelme hızının çok yavaş olduğu bir sıcaklıkta yapılır. Su verdikten sonra çökelmenin çok uzun bir sürede meydana gelmesine engel olmak için alaşım ortalama bir sıcaklığa ısıtılır. Şekil 2.13'te XA ve XB kademeleri yaşlanarak sertleşmeyi göstermektedir [26,27].

## 2.4. YAŞLANMA TEORİSİ

Yaşlanma olayını izah eden birçok teori ortaya atılmış olmasına rağmen bunlardan en tutarlısı 1935 yılında Wassermann ve Weert tarafından ortaya atılmıştır. Bu araştırmacı bilgin teorilerini Al-Cu alaşımını X-ışını ile inceledikten sonra ortaya atmışlardır. Bu incelemelerde Al-Cu denge diyagramından görülen  $\theta$  fazı ya da  $\text{CuAl}_2$ 'a benzeyen bir faz görülmüştür. Bu faza geçiş fazı (geçiş latisi) adını verip  $\theta$  ile göstermişlerdir. Ayrıca içinde bulunduğu matrise bağlı olarak yönelme olduğunu da belirlemişlerdir. Yaptıkları açıklamada da dengeli çökeltilerin ancak bu geçiş latisinin gelişip büyümesi ile meydana geldiğini belirtmişlerdir [26,27]. Aşırı yaşlanmanın nedeni olarak da, yapının oluşumu ile koherensliğin kaybolması

gösterilmiştir. Daha sonraları bu teoriye “Transmisyon Latis Teorisi” adı verilmiştir. (Şekil 2.14)



Şekil 2.14. Aşırı yoğun katı eriyik-transmisyon latisi-dengeli çökelek gösterimi [27].

1938’de Preston ve Guinier birbirlerinden habersiz olarak transmisyon latis çökmesinin bir önceki kademesini buldular. Diffüze olmuş değişmelerin matris bölgesinde olduğunu gösterdiler. Şayet çözünen atomlar, çözücü atomlardan boyut yönünden önemli miktarda farklı ise matris latisi distorsiyona uğrar. Fakat yeni ve kesin olmayan kristal yapıları bu kademedede de zenginleşen bölgelerde birleşemez. Bu bölgelerde “GUİNER-PRESTON” ya da “GP” bölgesi denir [26,27].

Guinier’e göre GP bölgeleri düğüm ya da salkım şeklindedir ve yaşlanma sertleşmesinin kaynağını teşkil etmektedirler. Geissler ve arkadaşları, Guinier ve Preston tarafından gözlenen difaksion için ayrı bir açıklama yapmışlardır. Diffüze çizgileri, çok küçük boyutlardaki partiküller ve bu partikülleri de  $\theta'$  transmisyon latisinin ilk büyütme durumunun kaynağı olarak açıklamışlardır. Bu görüşe göre GP bölgeleri transmisyon latisinin büyümesi ile oluşmaktadır. Bugün en iyi açıklamayı yapan teori yukarıdaki açıklamaların ve gelişmelerin bir sonucudur. Şöyle ki: Alaşımdaki kimyasal elementlerin yer yer konsantrasyon olması sonucunda çökeleğin basit çekirdekleri oluşur. Bu çekirdekler eriyen metal atomları cinsinden zengindirler. Bu nedenle, çekirdeklerin büyümesi de ancak eriyen atomların bu çekirdeklere yayılmasıyla mümkündür. Çökmenin yayılma ile kontrol edilebilir



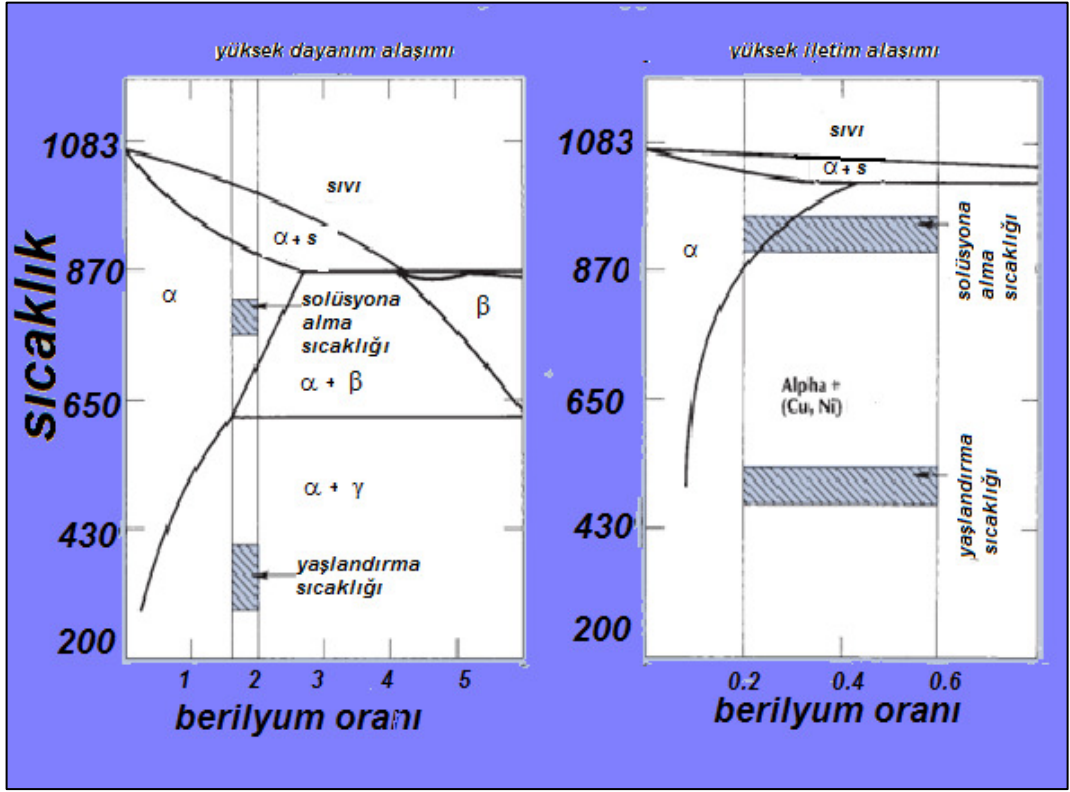
olması, çökeltme ısı işlem sıcaklığı yükseldikçe çökeltme hızının niçin arttığını açıklamak için yeterlidir. Şekil 2.14’de görüldüğü gibi transmisyon kafesinde iki yapı arasında bir atom dizilişi uygunluğu mevcut ise katı eriyik distorsiyona uğramaktadır. Çökelek başlangıçta genellikle küçük boyutludur. Boyutları küçük olduğu sürece de normal difraksiyon ışınması yerine Guiner Preston ilkeleri olarak belirtilen özel X ışınları yansımaları oluşur. Birçok çökeltme sertleşmesi sistemlerinde tane yapıları transmisyon kafesi teşkil edecek derecede gelişmeden sonra ana kafesten ayrılır ve denge halinde çökelek durumuna geçerler. Denge çökeleği içinde olduğu matrise göre belirli doğrultularda bulunuyorsa da ara tane yapılarını teşkil eden bu kafes arasında atom atoma bir uyum yoktur. Fakat denge çökeleğinin meydana getirdiği sertlik düşüktür. Dolayısıyla aşırı yaşlanma (yumuşama) bu dengeli yapının oluşumu ile ilgilidir. Birçok alaşım sistemlerine ara yapı yeterli miktarda bir kafes distorsiyonu meydana getirmeden önce çökeleği oluşturduğundan önemli derecede sertleşme olur.

#### **2.4.1. Yaşlandırma İşlemi**

Yaşlanmanın bir katı-hal reaksiyonu olduğu daha önce belirtilmişti. Bir reaksiyonun meydana gelmesi ise bazı özel şartlar gerekir. Reaksiyon başlangıcında ise belli safhalardan geçerek, evrimini tamamlar. Bu genel açıklamada olduğu gibi yaşlanma olayı da bazı şartları gerekir.

##### **2.4.1.1. Solüsyon Alma**

Çözeltiye alma işleminin amacı yüksek sıcaklıkta çözünürlüğünün artmasından faydalanılarak yapıdaki bileşik ve çökeltileri tek faz içinde çözündürüp, aşırı doymuş tek fazlı bir katı eriyik elde etmektir. Bunun için yaşlanabilir alaşım, solvüs eğrisinin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta yapıda yer alan II. faz (örneğin;  $\beta$ )  $\alpha$  –katı fazı içinde tamamen çözününceye kadar bekletilir. Yapı tamamen  $\alpha$  ya dönüştükten sonra alaşım aniden soğutulur. Cu-Be alaşımlarında çözeltiye alma sıcaklığı 800-900 °C’dir. Şekil 2.15’de Cu-Be alaşımlarının faz diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.15 Bakır-Berilyum alaşımlarının faz diyagramları a) yüksek dayanım grubu (C17200 serisi) Cu-Be alaşımları için b) Yüksek iletim grubu (C17500 serisi) Cu-Be alaşımları için [26].

#### 2.4.1.2. Su Verme

Eriyen elementler katı eriyik haline geçtikten sonra yeniden çökelmelerine engel olmak için malzemeye su vermek gerekir. Su verme sırasında katı eriyik kararsız hale gelir ve çökme eğilimindedir. Üç farklı su verme metodu mevcuttur. Bu üç metot, istenen özelliklere ve gösterdikleri kolaylıklara göre kullanılır.

**Soğuk Suda Su Verme:** Alaşımlara soğuk su banyolarında su verilir. Su verme için su sıcaklığı max. 30 °C olmalıdır. Sıcaklık değişimi 10 °C geçmemesi için yeterli hacimde su bulundurulmamalıdır. Bu tür bir su verme şekli çok etkilidir.

**Sıcak Suda Su Verme:** Büyük ve kalın kesitli dökme parçalara 75-90 °C'de hatta kaynar suda, yani 100 °C'da su verilir. Bu tip su verme, distorsiyonu minimize eder ve su vermede kullanılan suyun sıcaklığı malzemenin korozyon mukavemetine büyük ölçüde etki ettiği için dövme alaşımlarda, bu tip su verme usulü kullanılır.

**Püskürterek Su Verme:** Yüksek hızla su püskürtülerek su verme usulü, levhalar ve geniş yüzeyli parçalara tatbik edilir. Bu tip su verme distorsiyonu minimum kılar ve su vermeden dolayı olan çatlamayı önler.

### 2.4.1.3. Çökelme

Aşırı doymuş katı eriyik içerisinde çözülmüş halde bulunan ikinci faz, sıcaklık ve zamanın etkisiyle kararlı bir faz olarak çökeler. Bu dönüşüm;

$\alpha$  aşırı doymuş  $\longrightarrow$   $\alpha + \beta$  çökelti

Bu dönüşüm için önce  $\beta$  fazının önce çekirdeklenmesi ve sonra yayınma(difüzyon) ile büyümesi gerekir. Eğer alaşım ani soğutulmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa yayınma hızı çok yavaş olduğundan  $\beta$  fazı genellikle oluşmaz veya oluşması uzun zaman alır(doğal yaşlanma). Difüzyon hızını artırmak amacıyla ani soğutulmuş alaşım, yüksek bir sıcaklıkta tutulursa çökelme daha kısa bir zamanda oluşur (yapay yaşlanma) [27].

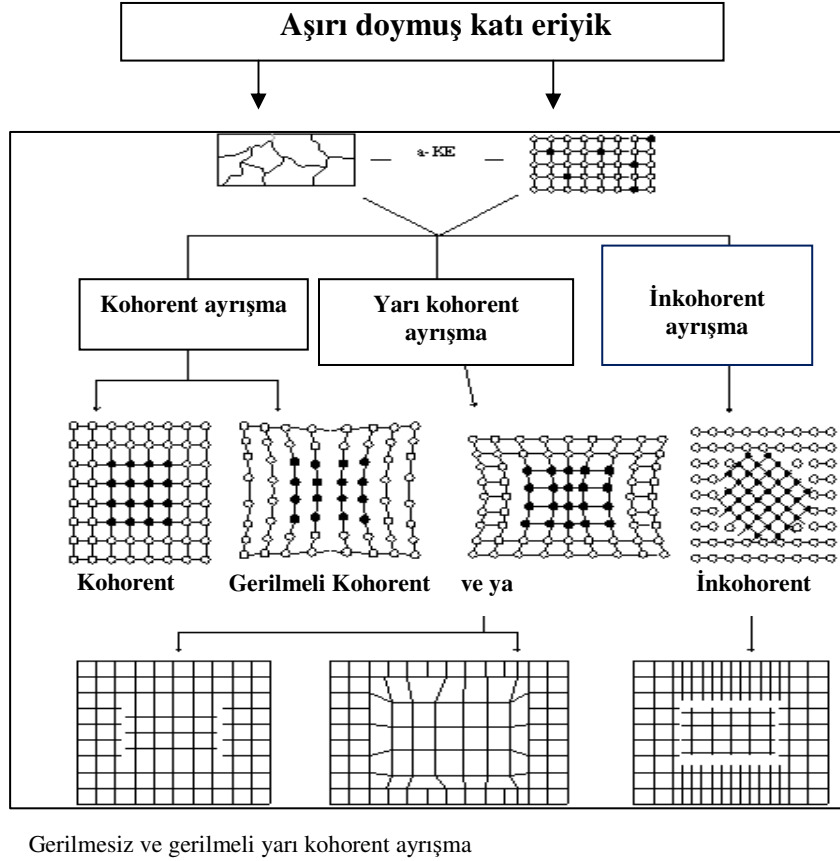
### Çökelme Sertleşmesinde Oluşan Dönüşümler

Çökeltiye alma ve ani soğutma kademelerinden sonra alaşım aşırı doymuş haldedir ve oda sıcaklığında ya da daha yüksek bir sıcaklık yapılan yaşlandırma sırasında, bu aşırı doymuş katı faz içersinden yeni fazlar çökelmektedir. Yaşlanma süresince yarı kararlı ya da kararlı çökelti fazlarının oluşum sırası genel olarak;

Aşırı doymuş katı çözeltili  $\longrightarrow$  yarı kararlı geçiş fazları  $\longrightarrow$  kararlı denge fazı şeklindedir [28].

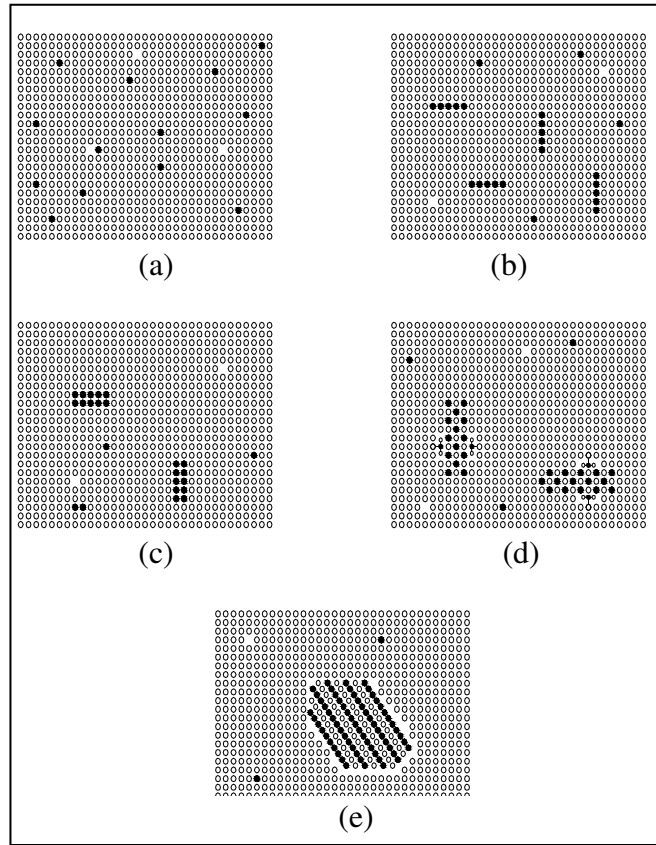
Katı çözeltilerde çözünen atomlar tek fazlı bir yapı içersinde dağılmışlardır. Yaşlandırma sırasında oluşan çökelti fazları, matrisle uyumlu, yarı uyumlu ya da uyumsuz olabilmektedir Uyumluluk, çökeltinin ve matrisin kafes düzlemlerinin bire bir karşılık gelmesidir. Yaşlandırma süresi artıkça, uyumluluk korunmakla birlikte, oluşan yeni fazın etrafındaki atomlar bir miktar distorsiyona uğrar. Bu sırada

uyumdan kaynaklanan bir deformasyon bölgesi oluşur. Şekil 2.16’de aşırı doymuş katı eriyikten ayrışma (çökeltme) gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Aşırı doymuş katı eriyikten ayrışma (çökeltme) şekilleri.

Uyumluluk, çökeleğin ve matrisin kafes düzlemlerinin bire bir karşılık gelmesidir. Bu sırada uyumluluk deformasyonu nedeniyle bir deformasyon bölgesi oluşur. Çökelek partikülü büyüdükçe, dislokasyonun oluşumu, kafes etrafındaki deformasyon alanını ve buna bağlı olarak her iki kafes düzlemi arasındaki bire bir uyumu bir miktar azaltır. Bu durum, yarı uyumluluk olarak adlandırılır. Şekil 2.17’de görülen küçük boyutlu matrisle uyumlu olan  $\Theta''$  çökelti fazı bazen GP-2 bölgesi olarak da adlandırılır. Kafes etrafındaki deformasyonun yarattığı gerilme alanları dislokasyon hareketlerini engellemekle oldukça etkilidir. Uyumsuzluk, iki kafes düzleminin bire bir karşılıklı olarak yönlenmesidir. Şekil 2.17’de Al-Cu sisteminde oluşan bazı ara fazlar şematik olarak gösterilmiştir.



- a) katı çözelti,
- b) GP-1 bölgeleri,
- c) GP-2 bölgeleri,
- d)  $\Theta$  fazı,
- e)  $\Theta$  fazı.

Şekil 2.17. Al-Cu sisteminde oluşan bazı ara fazların şematik gösterimi [16].

Aşırı yaşlanma sonucu oluşan  $\Theta$  çökelti fazı, boyutlarının büyümesine bağlı olarak matrisle uyumsuzdur ve kafes yapısındaki deformasyon alanının azalmasından dolayı dislokasyon hareketlerini engellemede  $\Theta$  fazı kadar etkili değildir [14]. Uyumlu, yarı uyumlu ya da uyumsuz bileşenler, tüm yapı içerisinde homojen olarak dağılmakta özellikle tane sınırları yakınında çökelti oluşmayan bölgeler bulunmaktadır. Tane sınırları yakınındaki bu bölgeler, çökelti içermeyen bölge olarak adlandırılmaktadır.

Çökeltisiz bölge oluşumu, çözünen atomların tane içlerinde kolaylıkla yayınması sonucu, tane sınırlarının her iki yanında yaklaşık 50 nm genişliğinde, çözünen atomca fakir bir bölgenin oluşması ve/veya tane sınırlarındaki boşluk konsantrasyonunun daha az olmasından kaynaklanmaktadır [16].

Boşluk konsantrasyonu, tane sınırlarında tane içine doğru üstel olarak artmaktadır. Belirli bir yaşlandırma sıcaklığında çökelti fazının oluşumu için kritik bir değerin

üzerinde boşluk konsantrasyonu gerektiğinden, boşluk konsantrasyonu kritik değerin altında kaldığı tane sınırlarına yakın bölgelerde çökelti fazları oluşmaktadır. Çökelti sertleşmesi işlem parametreleri değiştirilerek tüm yapı içerisindeki boşluk konsantrasyonu artırıldığında, kritik değerin altında kalan bölgenin genişliği azalacağından, çökeltisiz zon boyutu da azalmaktadır. Yaşlandırma sıcaklığının düşürülmesi de daha düşük boşluk konsantrasyonuna sahip bölgelerde çökelti fazlarının oluşumuna ve böylece çökeltisiz bölge boyutunun azalmasına neden olmaktadır.

## BÖLÜM 3

### BAKIR BERİLYUM ALAŞIMLARI

Berilyum bronzlarının yüksek dayanımları, diğer bronzlar gibi oluşturulan yeni katı çözeltilerinin değil yaşlandırma ısı işleminin bir sonucudur. Berilyumun bakır içerisindeki çözünürlüğü, 864 °C de %2,1 iken oda sıcaklığında %0,25 den daha az bir değere düşer. Bu azalma, berilyum bronzlarının yaşlandırma işlemine uygun olduğuna bir işarettir.

En iyi dayanım özellikleri %2 Be içeren berilyum bronzlarında elde edilmektedir. %2 Be içeren bir berilyum bronzu 850 °C de %100  $\alpha$  fazından oluşmaktadır. Oda sıcaklığında ise yapı  $\alpha$  ve  $\gamma$  fazlarından oluşmaktadır. Yavaş soğutma yerine bu alaşım 850 °C den aniden soğutulacak olursa yapısında ne  $\beta$  ve ne de  $\gamma$  fazı çökeler, yalnızca aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi kalır. Böyle bir yapının mekanik özellikleri  $\alpha$  fazının özelliklerini taşır. Bu yapı soğuk biçimlendirmeden sonra ya da doğrudan 575 °C altındaki bir sıcaklığa ısıtılacak olursa, aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi ayrılarak  $\gamma$  fazını çökeltir.  $\gamma$ 'nın  $\alpha$  fazı içerisinde bağdaşık olarak çökmesi sonucu, yapıda yaşlandırma sertleştirilmesi meydana gelmiş olur.

Bazı sanayi uygulamalarında, %2 Be bronzuna 590 – 600 °C de çözündürme ısı işlemini uygulandıktan sonra su verilmekte, soğuk biçimlendirme işleminden sonrada 315-325 °C de yaşlandırılmaktadır.

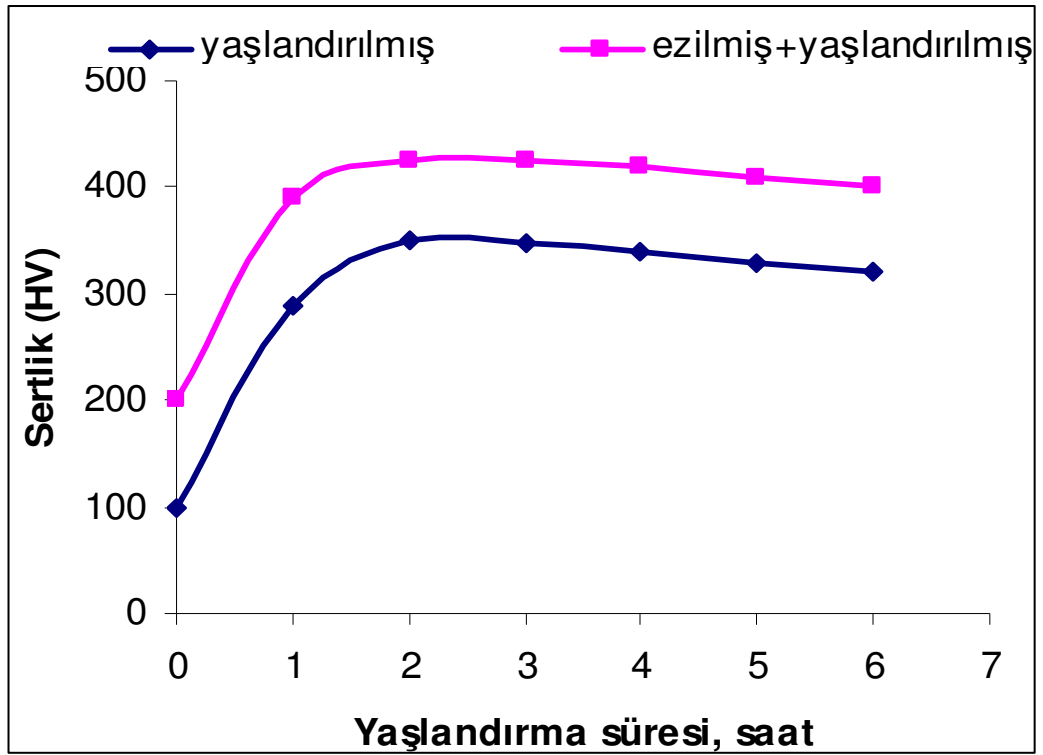
Yavaş soğutulmuş yapılarda,  $\gamma$  genellikle  $\alpha$  tane sınırlarında çökeler. Su verilmiş yapı ise %100  $\alpha$  içeren bir yapıdır. Yaşlandırma işlemi  $\gamma$  fazının ince çözeltiler biçiminde  $\alpha$  taneleri içinde çökmesini sağlar. Aşırı yaşlandırılan alaşımlarda hem çökelen fazın taneleri ve hem de içinde çökeldikleri taneler irileşir.

### 3.1. YAŞLANDIRILMIŞ BERİLYUM BRONZUNUN YAPISI

- Su verilmiş yapı
- Yaşlandırılmış yapı, ince  $\gamma$  çökeltileri
- Aşırı yaşlandırılmış yapı

Bazı döküm yapılarında katılaşma sırasında  $\beta$  fazı da çökeler ve sonraki işlemlerde de yok olmaz. Bunlar genellikle yapı içerisinde kopuk iplik parçaları görüntüsünde dizilmiş olarak bulunurlar.

Örneğin % 2,2 Be ve %0,3 Co içeren alaşım, 800 °C de su verilmekte ve 300 °C de yaşlandırılmaktadır. Yaşlandırma işleminden önce alaşıma % 40 soğuk şekillendirme uygulanırsa, yaşlandırılmış alaşımın sertliği Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Yaşlandırılmış ve ezme uygulanmış Cu-Be alaşımında oluşan sertlikler [3].  
a)300 C de yaşlandırılmış b)% 40 deforme edildikten sonra yaşlandırılmış.



Döküm alaşımı olarak da kullanılan söz konusu Cu-Be-Co alaşımının mekanik özellikleri, işlem görmüş alaşımdan daha düşüktür.

### 3.2. KULLANIM ALANLARI

Bakır Berilyum (Cu-Be) alaşımları yüksek dayanım, iyi elektriksel ve ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar iki ana grupta değerlendirilmektedir. Bu gruplar; % 1.6-2.0 arasında berilyum ve % 0.3 kobalt içeren grup olan yüksek dayanım grubuyla, % 0.2-0.7 berilyum ile yüksek oranda nikel ve kobalt içeren yüksek iletim grubudur. Bunlar, iyi yorulma dayanımları nedeniyle tekrarlı yüklemeye maruz bırakılarak açma-kapama işleminin gerçekleştirildiği elektronik parçalarda kullanılırlar. Manyetik olmayışları ve kıvılcım çıkarmamaları nedeniyle sensör elemanı ve takım malzemesi olarak kullanışlıdır. Elastik özellikleri yay davranışı açısından iyidir. Korozyon ve oksidasyona dirençleri, bu alaşımların diğer avantajlı yönleridir. Bu alaşımlarda, yaşlandırma veya çökelme sertleştirmesi mekanizmasıyla yüksek dayanımlar elde edilmektedir [4].

Berilyum bronzları, yumuşak durumda yüksek biçimlenebilirlik özellikleri yanında, yaşlandırılmış durumda da yüksek akma dayanımı, yüksek yorulma ve sürünme dayanımları özelliklerinden dolayı yaylar için seçilirler. Yüksek dayanımlarına ilave olarak yüksek aşınma dayanımları, yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle diyafram, kontak köprüleri, tıp aletleri, civata ve vida yapımı gibi birçok özel alanlarda kullanılmaktadır. Çeliğe karşı çalışan ve aşınma direnci istenen uygulamalarda ateşleme pimleri ve çeşitli kalıplarda kullanılmaktadır. Diğer önemli bir kullanım alanı, kıvılcım sıçraması istenmeyen patlayıcı, yanıcı vb maddelerin bulunduğu işyerlerinde keski, testere vb takım yapımında kullanılmaktadır [29].

Bakır Berilyum alaşımları, pahalı olmalarına rağmen, enjeksiyon dökümlerde çok kullanılırlar. Bu malzemenin çeliğe karşı büyük üstünlükleri vardır. Isıl iletkenliği yüksek olduğundan diğer çeliklere karşı üretim %25 daha fazla olabilir. Küçük toleranslar gerekmiyorsa kalıp boşlukları plastik veya ağaç model kullanmakla ve vakum dökümle yapılabilir. Plastik veya ağaç model kullanılarak önce bir alçı kalıp

yapılır. Daha sonra bu kalıbın, berilyum-bakırın yüksek döküm sıcaklığına dayanabilecek seramik bir kopyası yapılır. Berilyum-bakır kalıp en ince ayrıntıların tutulmasına çok elverişlidir. Isıl işlem den sonra sertleştirilmiş çeliğe çok yakın bir sertlik kazanabilir [30].

## BÖLÜM 4

### MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, C17200 ve C17500 Cu-Be alaşımlarının yaşlandırma koşullarını belirleyerek optimum yaşlandırma sıcaklık aralığını ve yaşlandırma süresini tespit ederek çeşitli sıcaklıklarda yaşlandırılmış numunelerin elektrik akımı olmadan ve elektrik akımı altındaki aşınma özellikleri ve sürtünme davranışları pin-on-disk tipi deney cihazında incelenmek amaçlanmıştır. Bu amaçla da mevcut bir aşınma test cihazı yeniden düzenlenmiş, sisteme 200 Amperlik bir alternatif akım üretici monte edilmiştir. Ayrıca bu çalışma için özel olarak aşındırıcı diskler üretilmiştir. Sistem üzerinde mevcut olan yük hücresi, devir göstergesi ve yük uygulama noktası yeniden kalibre edilmiştir.

Aşınma testlerinde kullanılan C17200 ve C17500 alaşımları Sağlam Metal A.Ş. tarafından üretilmiştir. Daha sonra bu alaşımlar işlenerek Ø 10 mm çap ve 15 mm boyunda hazırlanmıştır. Cu-Be alaşımlarının kimyasal bileşimi (Spectromaxx) spektrometre ile belirlenerek Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. C17200 ve C17500 kimyasal bileşimi (ağırlık %).

Numune	Cu	Be	Co	Ni	Fe	Diğer
C17200	97.6	1.8	0.41	0.1	0.06	0.04
C17500	97.2	0.37	2.1	0.14	0.03	0.16

C17200 alaşımı numuneler 800 °C de 2 saat çözeltiye alındıktan sonra hızla soğutulularak (suda) numuneler Çizelge 4.2’de belirtilen şartlarda yaşlandırılmıştır [31,32].

C17500 alaşımı numuneleri ise 900 °C de 2 saat saat çözeltiliye alındıktan sonra hızla soğutularak (suda) numuneler Çizelge 4.2’de belirtilen şartlarda yaşlandırılmıştır [31,32].

#### **4.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ**

İstenilen ölçülerde hazırlanan C17200 ve 17500 Cu-Be alaşımlarının mikro yapılarını inceleyebilmek için standart metalografik işlemler yapılmıştır. Metalografik işlemler tamamlandıktan sonra numuneler persülfat/hidroksit veya potasyum dikromat kullanılarak hazırlanan dağlayıcı ile dağlanmıştır.

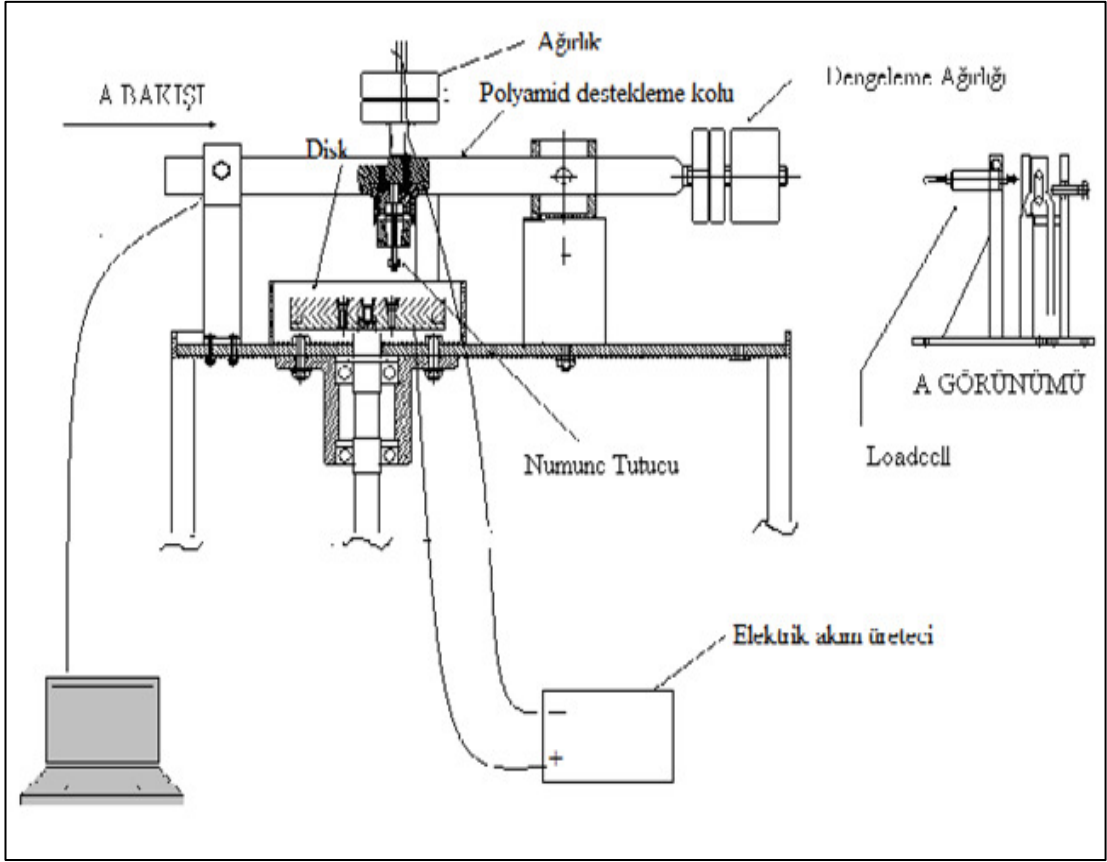
#### **4.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ**

Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Laboratuvarında bulunan "AFFRI" marka RSD251 model cihazda sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri, numune üzerinden en az 5 ayrı noktadan yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır.

#### **4.3. AŞINMA TESTLERİ**

Aşınma testlerinde, aşındırıcı disk olarak aşındıracak olan disk Ø 180 mm çapında ve 15 mm kalınlığında ve 53 HRc sertliğinde AISI 1045 çelik malzemedden hazırlanan disk kullanılmıştır. Kullanılan AISI 1045 çelik diskler ısıl işlem sonrasında düzlem taşlama yapılarak yüzey taşlama işlemi yapılmıştır.

Aşınma ve sürtünme testleri, 1 m/s kayma hızında, 2000 m yol ve 20 N yük altında, akımsız, 10A, 20A ve 30A elektrik akımları altında çalışan bir pin on disk aşınma cihazında atmosferik ortamda gerçekleştirilmiştir. Elektrik akımı altında aşınma testlerinde kullanılan pin-on disk tipi aşınma test cihazı, Karabük Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümünde tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneysel çalışmaların yapıldığı aşınma test cihazı şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Aşınma test cihazının şematik gösterimi.

Çizelge 4.2. C17200 ve C17500 alaşımlarının yaşlandırma sıcaklık ve süreleri.

Malzeme	Yaşlandırma sıcaklıkları (°C)					Yaşlandırma süresi (saat)
	300	315	330	345	360	
C17200	300	315	330	345	360	3
C17500	410	440	470	500	530	3

Aşınma cihazı; 1,5KW'lık 3 Faz AC motor, hız kontrol ünitesi, düşey dönme hareketi sağlayan sertleştirilmiş çelik disk, poliamid destekleme kolu, numune tutma mekanizması, yük hücresi (ESİT STCS 50 kg Cs Loadcell), tabla, dengeleme aparatı ve ağırlık ile bir DC elektrik akımı üreticiden meydana gelmiştir. Hem disk hem de numune tutucu, üzerine uygulanacak elektrik akımını başta motor olmak üzere aşındırma cihazının diğer kısımlarına iletmeyecek şekilde yalıtılmıştır. Sürtünme katsayısı değerlerinin hesaplanabilmesi için yük hücresi aşınma cihazına bağlanmış ve bilgisayara sürekli veri akışı sağlanmıştır. Elde edilen sürtünme kuvveti verileri değerlendirilerek sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca maksimum

aşınma meydana gelen aşınma yüzeyleri SEM ile aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşınma parametreleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Uygulanan aşınma deneyindeki parametreler.

<b>Alınan yol (m)</b>	<b>Devir (d/dk)</b>	<b>Hız (m/sn)</b>	<b>Uygulanan kuvvet (N)</b>	<b>Uygulanan elektrik akımı (A)</b>			
2000	100	0.98	20	0	10	20	30

## BÖLÜM 5

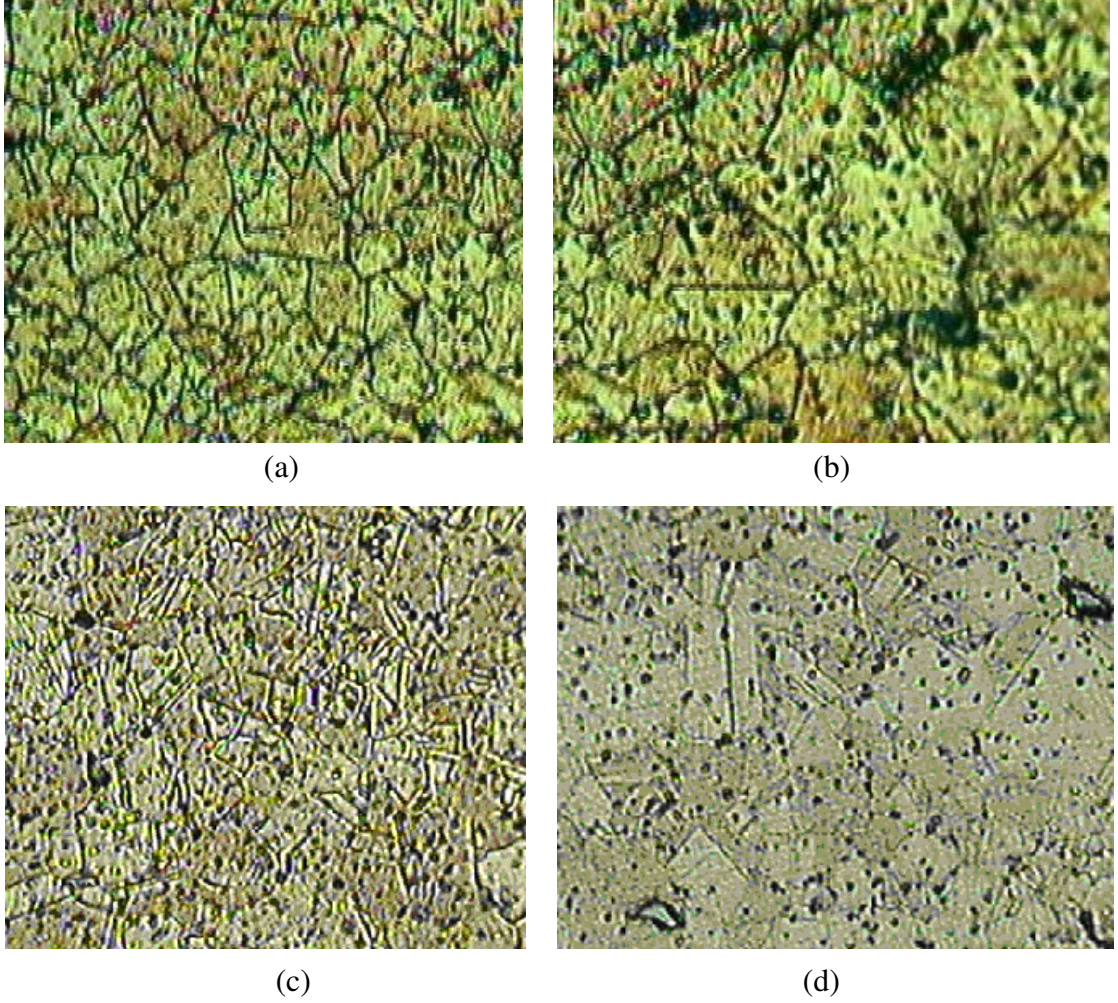
### DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de belirtilen C17200 ve C17500 alaşımları aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi için yaşlandırılmıştır. C17200 alaşımı 800 °C sıcaklıkta 2 saat solüsyona alındıktan sonra oda sıcaklığına hızlı (suda) soğutulmuştur. Hızlı soğutma işleminden sonra numuneler 300 °C, 315 °C, 330 °C, 345 °C ve 360 °C sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmıştır. C17500 alaşımı 900°C sıcaklıkta 2 saat solüsyona alındıktan sonra oda sıcaklığına hızlı (suda) soğutulmuştur. Hızlı soğutma işleminden sonra numuneler 410 °C, 440 °C, 470 °C, 500 °C ve 530°C sıcaklıklarda 2 saat yaşlandırılmıştır.

#### 5.1 MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Şekil 5.1’de 330 °C’de a) 17200 Cu-Be alaşımının 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış b) 360 °C de 3 saat yaşlandırılmış c) 17500 Cu-Be alaşımının 500 °C de 3 saat yaşlandırılmış d) 530 °C de 3 saat yaşlandırılmış alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

C17200 Cu-Be alaşımı 330 °C de 3 saat yaşlandırıldığında yapıda eş eksenli  $\alpha$  fazının olduğu görülmektedir (Şekil 5.1.a). Fakat C17200 Cu-Be alaşımı 360 °C de 3 saat yaşlandırıldığında ise tanelerin irileşmektedir (Şekil 5.1.b). C17500 Cu-Be alaşımı 500 °C de 3 saat yaşlandırıldığında eş eksenli  $\alpha$  fazı oluşmaktadır (Şekil 5.1.c). 530 °C de 3 saat yaşlandırıldığında ise taneler irileşmektedir.



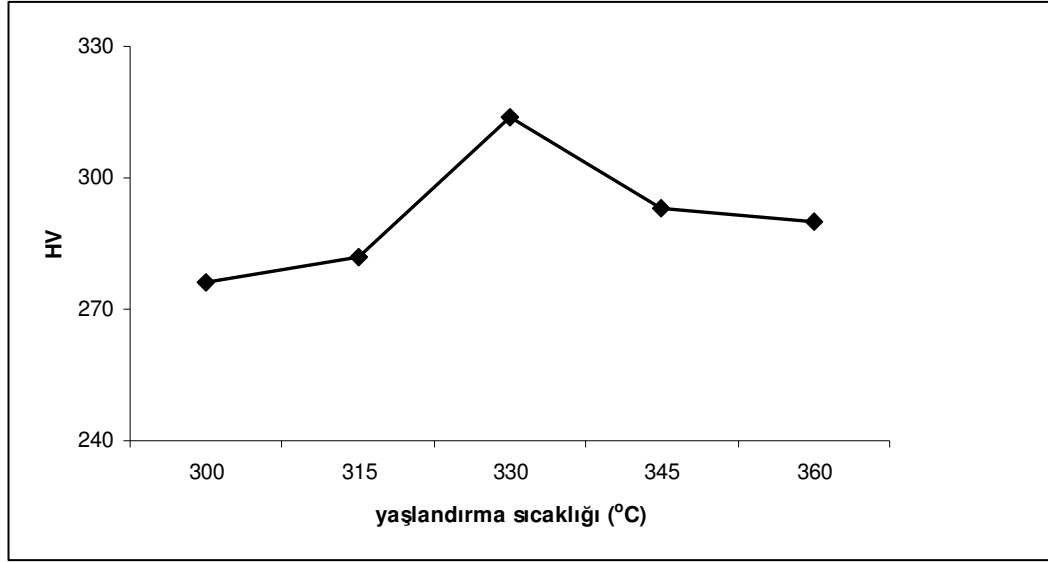
Şekil 5.1. Optik fotoğraflar; a) 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımı X400 b) 360 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımı X400, c) 500°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımı X400, d) 530°C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımı X400.

## 5.2. SERTLİK VE ELEKTRİK İLETKENLİĞİ ÖLÇÜMLERİ

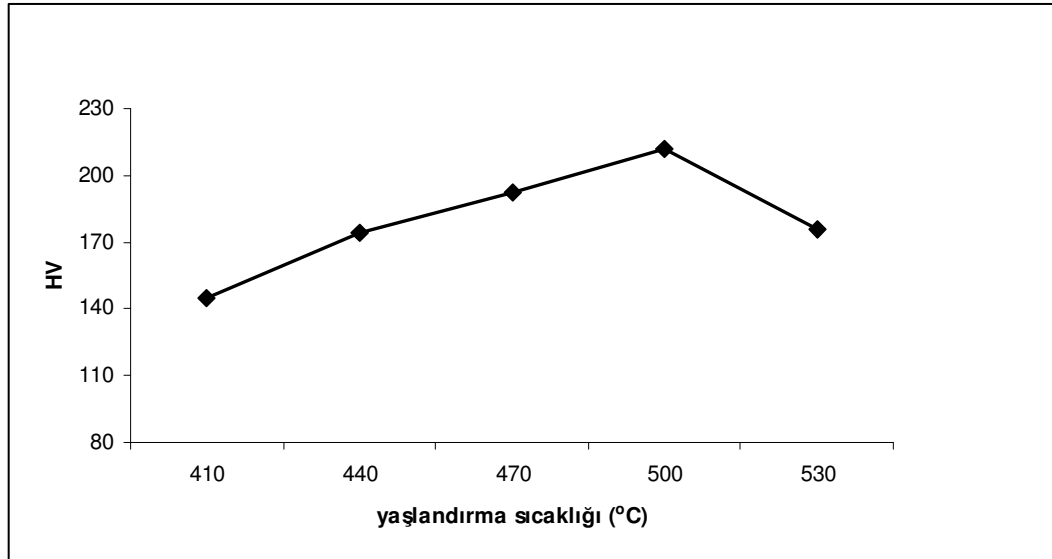
800 °C de 2 saat çözeltiye alınmış değişik sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmış 17200 Cu-Be alaşımının mikro sertlik değerleri; 300 °C de 276 HV, 315 °C de 282 HV, 330 °C de 314 HV, 345 °C de 293 HV ve 360 °C de ise 290 HV'dir (Şekil 5.2a). 17500 Cu-Be alaşımının yaşlandırma ile elde edilen mikro sertlik değerleri; 410 °C de 145 HV, 440 °C de 174 HV, 470 °C de 192 HV, 500 °C de 212 HV ve 530 °C de ise 176 HV'dir (Şekil 5.2b). Bu sonuçlara göre; maksimum mikro sertlik değerini veren yaşlandırma ısıl işlemi, 17200 Cu-Be alaşımının için 330 °C de 3 saat olduğu, 17500



Cu-Be alaşımı için ise 500 °C de 3 saat olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında, her iki alaşımda da sertliğin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda aşırı yaşlanmanın meydana geldiğini göstermektedir.



(a)



(b)

şekil 5.2. a) 800 °C de 2 saat zeltiye alınmış değişik sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmış C17200 Cu-Be alaşımının sertlik değerleri b) 900 °C de 2 saat zeltiye alınmış değişik sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmış C17500 Cu-Be alaşımı sertlik değerleri.

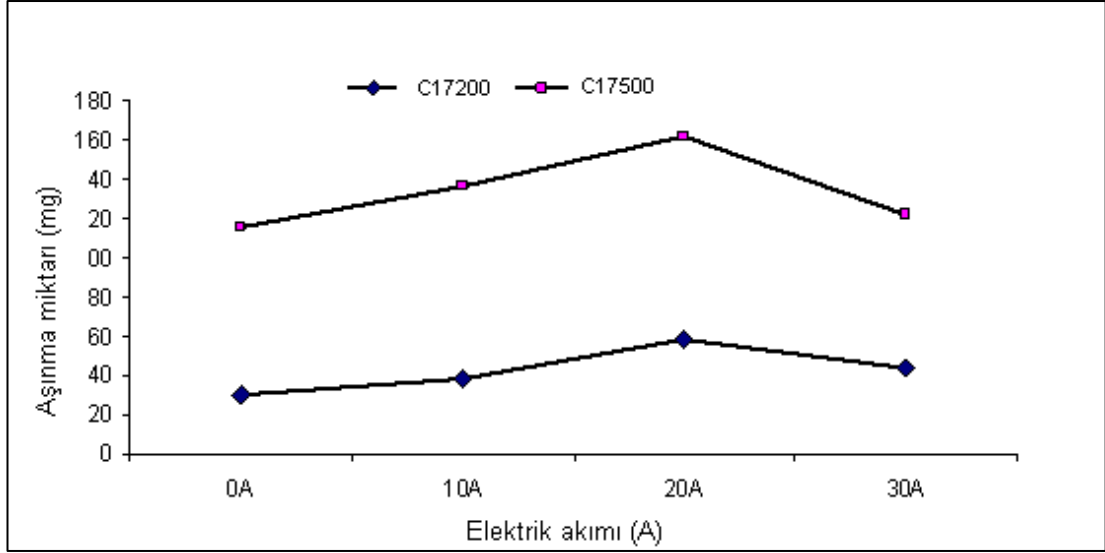
C17200 Cu-Be alaşımı için 800 °C de çözeltiye alma ve 315 °C de 3 saat yaşlandırma, C17500 Cu-Be alaşımı için ise 900 °C de çözeltiye alma ve 480 °C de 3 saat yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Aradaki az bir farklılığın ise üretilen Cu-Be alaşımlarının kimyasal kompozisyonları arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir (izelge 4.1) Daha düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde, sadece Guiner-Preston (GP) bölgelerinin oluştuğu, nispeten yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde ise aşırı yaşlanmanın meydana geldiği ve ince çökeltilerin kabalaşması sonucu sertlik değerlerinde bir düşme meydana gelmektedir [33,34].

Bu çalışmada, yaşlandırılma ısıl işlemi ile Cu-Be alaşımlarının sadece sertliklerinin değil aynı zamanda elektrik iletkenliklerinin de önemli oranlarda arttığı açık olarak görölmektedir (izelge 5.1). Yaşlandırma ısıl işlemi ile elektrik iletkenliği, C17200 alaşımında yaklaşık % 62 oranında, C17500 alaşımında ise yaklaşık % 57 oranında artmıştır. Literatürde de benzer sonuçlar elde edilmiştir [35]. Beklendiği gibi, C17200 alaşımının yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen sertlik değeri C17500 göre çok daha yüksek çıkmıştır. C17500 alaşımının da elektrik iletkenliği C17200 alaşımına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 17200 ve C17500 alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri.

<b>Numune</b>	<b>Sertlik (HV)</b>	<b>Elektrik iletkenliği (%IACS)</b>
Yaşlandırılmamış C17200	93	17
Yaşlandırılmış C17200	314	27,6
Yaşlandırılmamış C17500	80	25
Yaşlandırılmış C17500	212	44

### 5.3. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

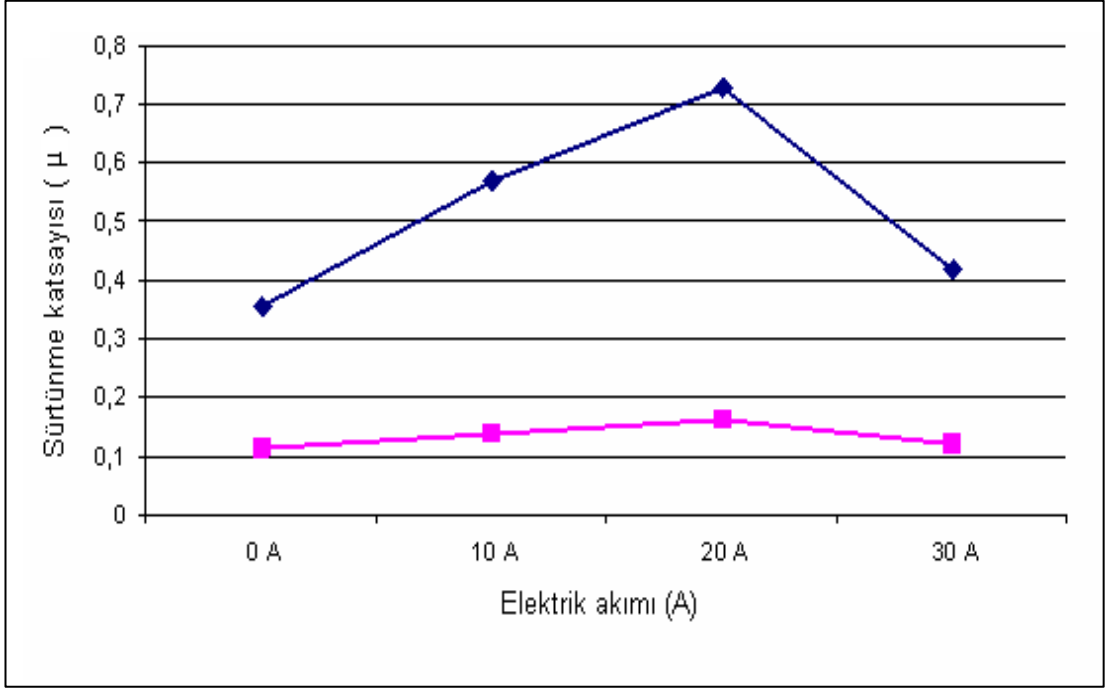


Şekil 5.3. Yaşlandırılmış C17200 ve C17500 alaşımlarının 20 N yük ve 2000 m aşınma mesafesinde, elektrik akımına bağlı aşınma kayıpları.

C17200 ve C17500 alaşımlarının aşınma deneylerine başlamadan önce numunelere daha önce maksimum sertlik değerinin elde edildiği yaşlandırma ısıl işlemleri (C17200 alaşımı için 330 °C de 3 saat yaşlandırma, C17500 alaşımı için ise 500 °C de 3 saat yaşlandırma) uygulanmıştır. 20 N yük ve 2000 m yol sonunda, farklı elektrik akımları altında yapılan aşınma deneyi sonucunda; hem C17200 alaşımı hem de C17500 alaşımı numunelerinde elektrik akımı arttıkça aşınma miktarında önce artma gözlenmiştir. Ancak 30 A akım uygulandığında, C17200 ve C17500 alaşımlarının aşınma miktarında artış değil tam tersine düşme olduğu belirlenmiştir. (Şekil 3.3). Örneğin C17200 alaşımı için hesaplanan ağırlık kaybı; 20A elektrik akımı altında 58 mg iken 30A elektrik akımı altında 43,8 mg olmuştur. C17500 alaşımı için ölçülen ağırlık kaybı ise; 20A elektrik akımı altında 162 mg, 30A elektrik akımı altında 121,7 mg dır. Elektrik akımı uygulanmadan yapılan aşınma deneylerinde ölçülen ağırlık kayıpları ise; C17200 ve C17500 alaşımları için sırasıyla 30,2 mg ve 115,3 mg olmuştur. Burada elektrik akımı olmadığı için aşınma miktarlarının minimum çıkması beklenen bir durumdur. Cu-Be alaşımları için elektrik akımı altında yapılmış aşınma deneyleri ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak

Cu-Nb kompoziti ve sertleştirilmiş bir takım çelik disk kullanılarak yapılan bir elektriksel aşınma deneyinde; hem aşınma oranının hem de sürtünme katsayısı değerlerinin küçük elektrik akımı yoğunluğunun altında önce artma gösterdiği, elektrik akımı yoğunluğu yükseldiğinde ise tam tersine düştüğü ifade edilebilir. Bu durumu da elektrik akımı yoğunluğuna bağlı sıcaklık artışına ve giderek artan oksidasyon oranına bağlanabilir. Yani meydana gelen kalın oksit tabakasının adhesyonu ciddi oranda azalttığı rapor edilmiştir. Cu-Cr-Zr alaşımı ile bir pirinç disk kullanılarak yapılan çalışmada Cu-Ag-Cr ve Cu-Ag-Zr alaşımları ile bir bakır esaslı bir disk kullanılarak yapılan başka aşınma çalışmalarında ise, elektrik akımı arttıkça aşınma oranının arttığı ifade edilmiştir. Söz konusu araştırmalara göre; elektrik kontağı altında görülen başlıca aşınma mekanizmalarından birisinin de ark erozyonu olduğunu, ayrıca yüksek dayanım ile yüksek iletkenliğe birlikte sahip olan malzemelerde genellikle ark erozyon dayanımı yükselmektedir.

Aşınma testlerinde elde edilen en önemli bulgulardan birisi de, C17200 alaşımının aşınma dayanımının her durumda C17500 alaşımından daha iyi olduğudur. Yani tüm aşınma testlerinde, C17200 alaşımı numuneleri C17500 alaşımı numunelerine göre hem çok daha az aşınmış hem de sürtünme katsayısı değerleri oldukça düşük çıkmıştır. Diğer bir ifade ile döküm içerisindeki berilyum oranı arttıkça, yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen sertlik değerinde ve aşınma dayanımında oldukça önemli oranlarda artış meydana gelmiştir. Şekil 5.4'de, alaşım numunelerine uygulanan farklı elektrik akımının sürtünme katsayısına etkisi de incelenmiştir.

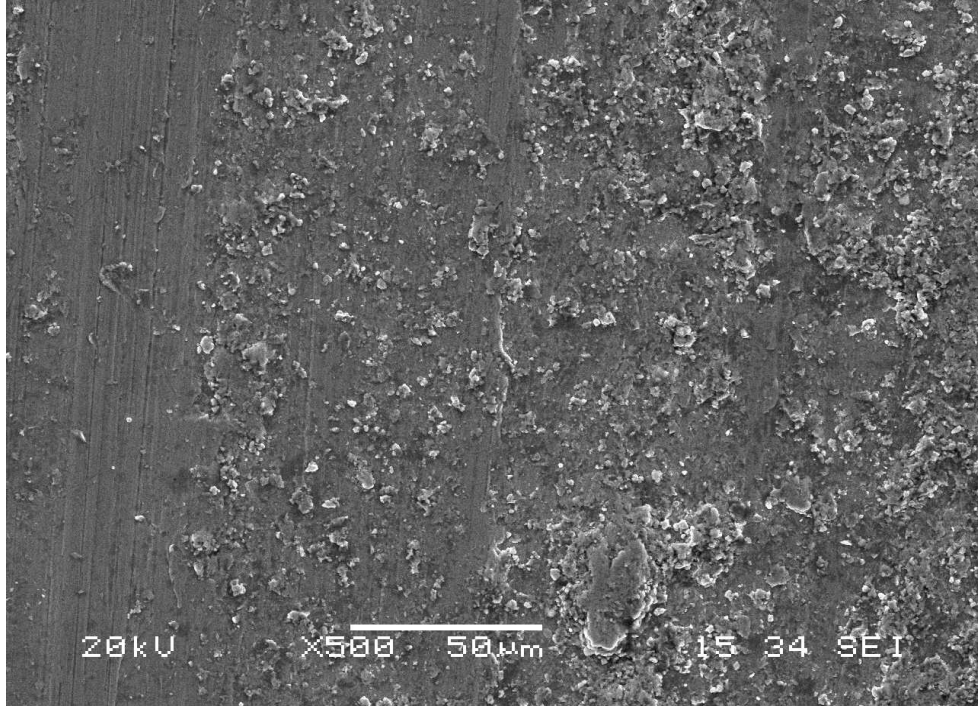


Şekil 5.4. Yaşlandırılmış C17200 ve C17500 alaşım numunelerinin 20 N yük ve değerleri.

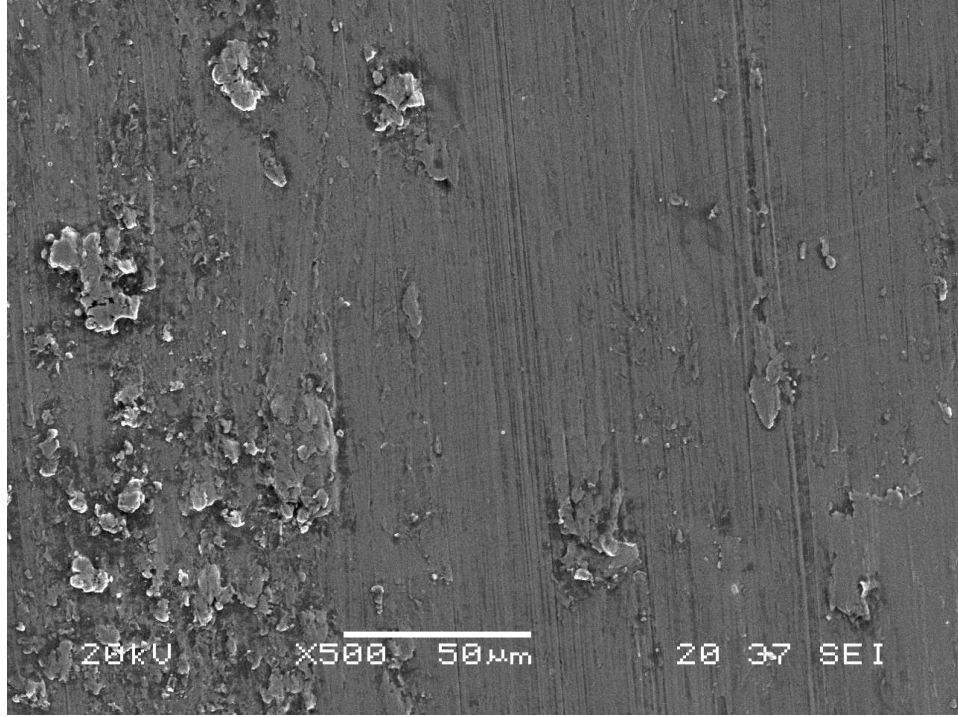
#### 5.4. SEM İNCELEMELERİ

C17200 alaşımı için bulunan ortalama sürtünme katsayıları 0A, 10A, 20A ve 30A elektrik akımları altında sırası ile 0.35, 0.57, 0.73 ve 0.42 dir. C17500 alaşımı için bulunan ortalama sürtünme katsayıları ise 0A, 10A, 20A ve 30A elektrik akımları altında sırası ile 0.11, 0.14, 0.16 ve 0.12 dir. Uygulanan elektrik akımına bağlı olarak sürtünme katsayısı önce artmış ancak daha yüksek akım değerinde (30 A) ise düşmüştür. Aşınma deneyindeki aşınma kaybı değerleri ile birlikte düşünüldüğünde bu beklenen bir sonuçtur. Yüksek elektrik akımı altında meydana gelen sıcaklık ve bunun sonucunda oluşan oksit tabakasının sürtünme katsayısını da düşürdüğü tahmin edilmektedir. Ayrıca elektrik akımı arttıkça yüzeyde artan oksit tabakasını sebebiyle sürtünme katsayısının düştüğü, fakat koruyucu gaz (argon) kullanılarak yapılan aşınma deneyinde ise, elektrik akımı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı daha önce yapılan bazı çalışmalarda belirlenmiştir [37]. Bu durumda, ergime ve yumuşamanın en önemli erozyon nedeni olduğu söylenebilir. Sonuç olarak elektrik akımı altındaki aşınma deneyleri sırasında, adhesif aşınmanın etkili olduğunu söylenebilir. Şekil 5.5-5.8'de yaşlandırılmış C17200 alaşımının farklı elektrik akımı değerleri altında

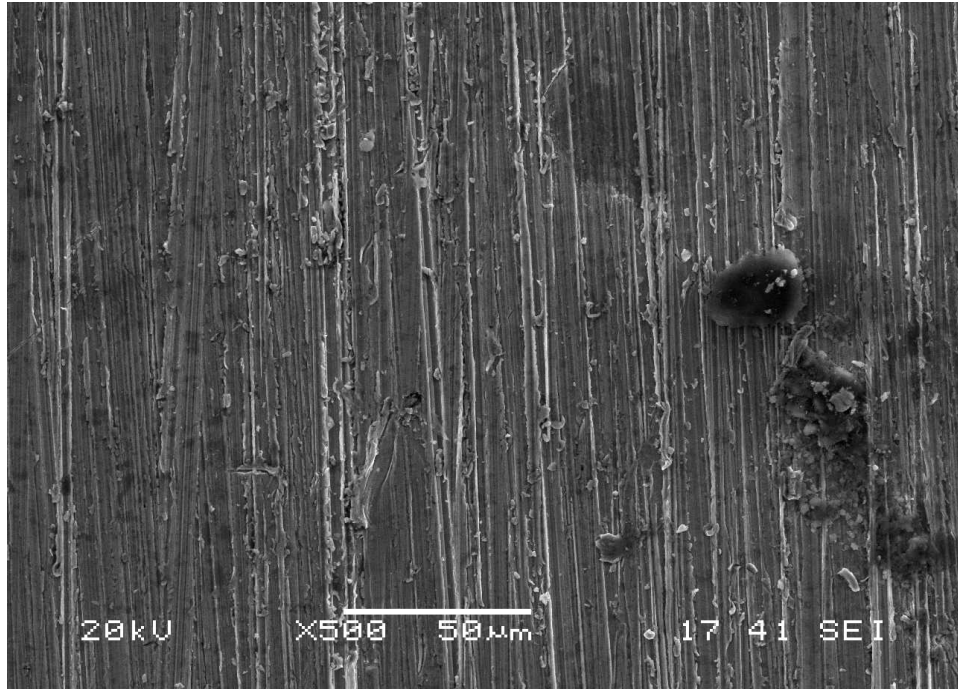
aşındırılmış yüzeylerinden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. 0A akım altında aşındırılmış numune yüzeyindeki aşınmış parçacık boyutlarının ve aşınma izi derinliği elektrik akımı altında aşındırılan numune yüzeyleri ile karşılaştırıldığında genel olarak daha küçük olduğunu söyleyebiliriz. Elektrik akımı ve buna bağlı oluşan sıcaklık artışı sonucunda, özellikle aşınma derinliğinde artış olduğu ve daha büyük aşınmış parçacıkların meydana geldiği rahatlıkla görülebilmektedir. Bu durum adhesiv aşınmanın oluştuğuna göstermektedir (Şekil 5.8). Ancak 30A elektrik akımı altında aşındırılmış yüzeyi incelendiğinde, 20A elektrik akımı altında görülen derin aşınma izlerinin ve büyük aşınmış parçacıkların pek görülmediğini söylenebilir. (Şekil 5.9). Bu görüntü, 30A elektrik akımı altında niçin aşınma miktarında azalma ve sürtünme katsayısında ise artış olduğu konusu kısmen açıklamaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi 30A akım altında daha kalın oksit tabakasının oluştuğu düşünülmektedir.



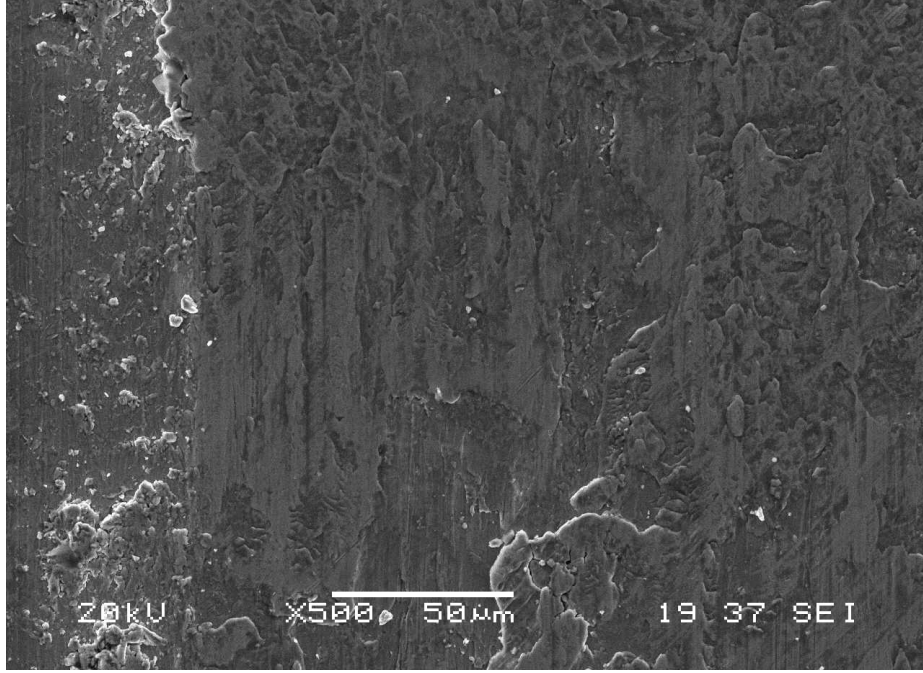
Şekil 5.5. 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 0 A akım altında



Şekil 5.6. 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 10 A akım altında



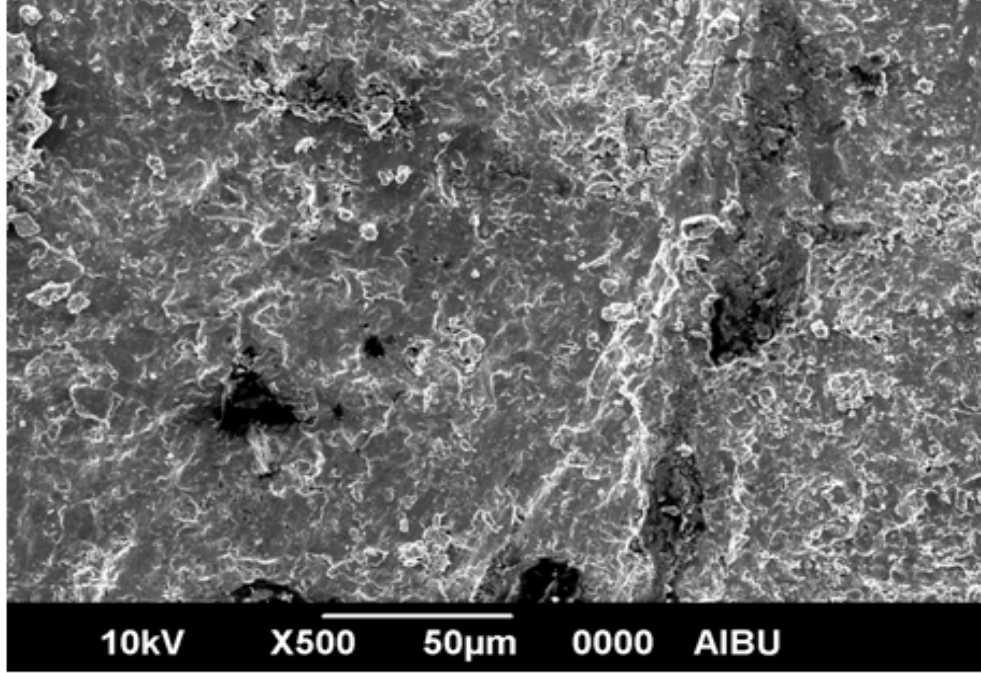
Şekil 5.7. 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 20 A akım altında



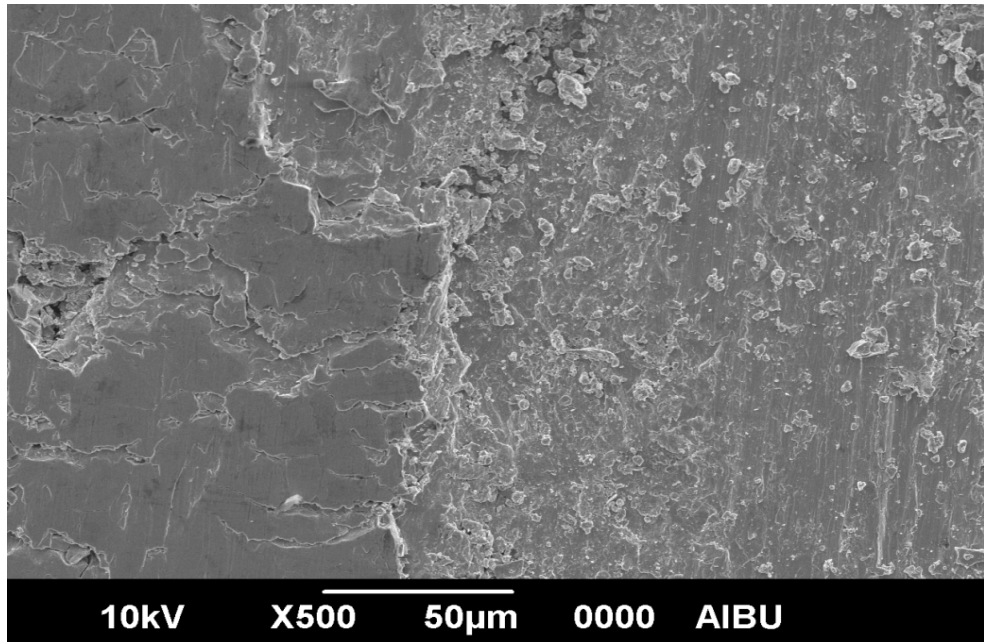
Şekil 5.8. 330 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri; 30 A akım altında.

Şekil 5.9-5.12’de ise yaşlandırılmış C17500 alaşımında farklı elektrik akımı değerleri altında aşındırılmış yüzeylerinin SEM mikro yapıları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aşınma sıvanma şeklinde gelişmiştir. Buda aşınmada etken mekanizmanın adhesiv aşınma olduğunun bir göstergesidir.

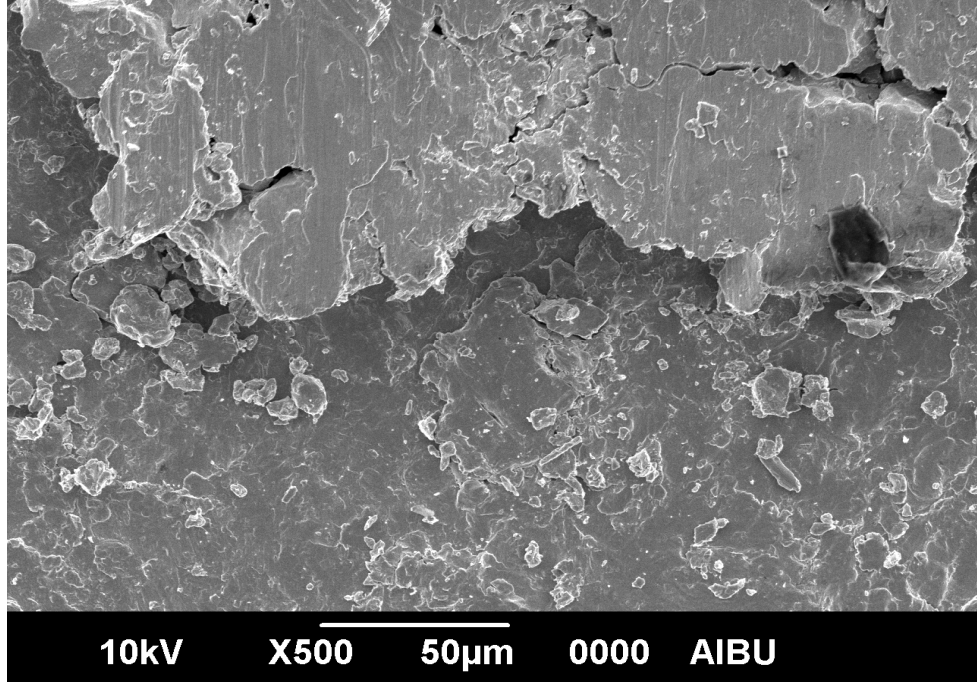




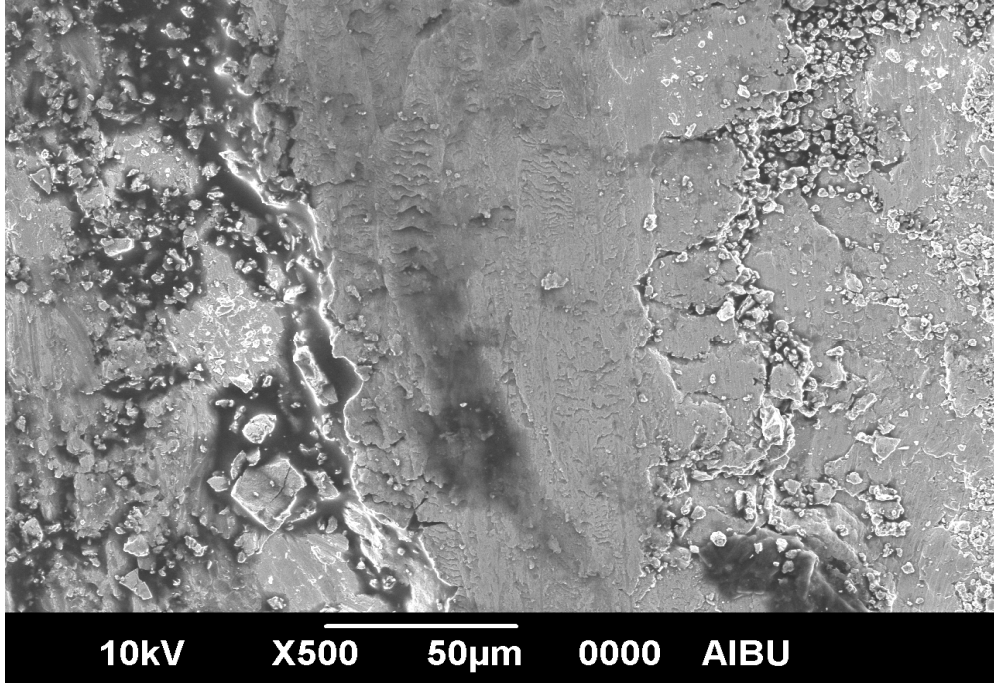
Şekil 5.9. 500 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 0 A akım altında



Şekil 5.10. 500 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 10 A akım altında



Şekil 5.11. 500 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 20 A akım altında



Şekil 5.12. 500 °C de 3 saat yaşlandırılmış C17500 alaşımının 2000 m yol, 20 N yük aşınmış yüzey görüntüleri; 30 A akım altında

C17200 alaşımına ait SEM görüntüleri C17500 alaşımı ile karşılaştırıldığında yüzeydeki sıvama miktarının daha az olduğu söylenbilir. C17500 alaşımına ait SEM görüntülerinde daha büyük parçaların yüzeyden koparak sıvandığı net bir Şekilde grlmektedir.

C17200 alaşımı numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan genel EDS analizlerinde; 20A elektrik akımı ile kıyaslandığında, 30A elektrik akımı altında yapılan aşınma deneylerinde daha çok oksitlenmenin olduğu açık olarak grlmektedir (izelge 5.2 ve 5.3). Daha önce de ifade edildiği gibi EDS analizinde, kullanılan EDS cihazında berilyum filtrasyon sistemi kullanıldığı için tablolarda berilyum oranı sıfır çıkmıştır. Yukarıda C17200 alaşımının spektral analizinde Be oranı % 1,8 olarak verilmiştir. Çizelge 5.1). Ancak yine de aşağdaki tablolardaki oranlardan C17200 alaşımının aşınmış yüzeyleri hakkında yaklaşık bir fikir elde edilmektedir.

Çizelge 5.2. 20A akım altında aşındırılmış C17200 alaşımı yüzeyinden alınan genel EDS analizi.

Element.	Line	Yoğunluk (m/v)	Error 2-sig	Conc	Units	
Be	Ka	0.00	0.000	0.000	wt.%	
O	Ka	6.54	1.616	4.186	wt.%	
Fe	Ka	1.24	0.703	0.188	wt.%	
Co	Ka	1.42	0.753	0.203	wt.%	
Ni	Ka	0.50	0.447	0.159	wt.%	
Cu	Ka	197.53	8.886	95.264	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Çizelge 5.3. 30A akım altında aşındırılmış C17200 alaşımı yüzeyinden alınan genel EDS analizi.

<b>Element.</b>	<b>Line</b>	<b>Yoğunluk (m/v)</b>	<b>Hata 2-sig</b>	<b>Conc</b>	<b>Units</b>	
Be	Ka	0.00	0.000	0.000	wt.%	
O	Ka	12.15	2.204	7.966	wt.%	
Fe	Ka	1.04	0.644	0.170	wt.%	
Co	Ka	1.85	0.859	0.288	wt.%	
Ni	Ka	0.28	0.335	0.095	wt.%	
Cu	Ka	180.56	8.497	91.482	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 6.1. SONUÇLAR

Yaşlandırma sertleşmesi uygulananmış iki farklı Cu-Be döküm alaşımları üzerine yapılan mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve elektrik akımı altında kuru sürtünmeli aşındırma deneyleri ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Maksimum sertlik değerlerini veren yaşlandırma ısıl işlemi; C17200 Cu-Be alaşımı için 800 °C 2 saat çözeltiye alma ve 330 °C'de 3 saat yaşlandırma iken C17500 alaşımı Cu-Be için 900 °C 2 saat çözeltiye alma ve 500 °C'de 3 saat yaşlandırmadır. Daha yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında aşırı yaşlanma meydana gelmiş ve sertlik değerleri düşmüştür. Ayrıca yaşlandırılmış C17200 Cu-Be alaşımının sertliği C17500 alaşımına göre oldukça yüksek çıkmıştır.
- 800 °C'de 2 saat çözeltiye alınmış değişik sıcaklıklarda 3 saat yaşlandırılmış C17200 alaşımının mikro sertlik değeri maksimum çıkmıştır. C17500 alaşımının yaşlandırma ile elde edilen mikro sertlik değeri maksimum çıkmıştır.
- Elektrik akımı altında aşınma deneylerinde, hem aşınma kaybı hem de sürtünme katsayısı değerleri elektrik akımı arttıkça ilk olarak yükselme göstermiş ancak daha sonra düşmüştür. Her iki alaşımda da (C17200 ve C17500) 20A elektrik akımı altında maksimum aşınma kaybı meydana gelirken 30A elektrik akımı altında aşınma kaybı azalmıştır. Her iki alaşımda da(C17200 ve C17500) 30A elektrik akımı altında daha düşük elektrik akımı altında yapılanlara göre daha kalın oksit tabakasının oluştuğu tahmin edilmektedir. C17200 alaşımının aşınma kaybı C17500 alaşımına göre tüm aşınma deneylerinde oldukça düşük çıkmıştır.

- C17200 alaşımına ait SEM görüntüleri C17500 alaşımı ile karşılaştırıldığında yüzeydeki sıvama miktarının daha az olduğu söylenebilir. C17500 alaşımına ait SEM görüntülerinde daha büyük parçaların yüzeyden koparak sıvandığı grlmektedir. Elektriksel aşınma deneylerinde, adhasif, aşınma mekanizması etkin olmuştur.

## 6.2. ÖNERİLER

- Elde edilen sonuçların malzeme bilimcileri, tasarımcıları ve metal-kaynak ve enjeksiyon kalıbı üretim sanayinde çalışanlar açısından oldukça yararlı olacağı düşünülmektedir.
- Hem soğuk deformasyon hem de yaşlandırma ısıl işleminin aynı anda uygulandığı Cu-Be alaşımları için de elektriksel aşınma testleri yapılabilir. Ayrıca farklı yaşlandırma ısıl işlemlerinin elektriksel aşınma dayanımına, sürtünme katsayısına ve elektrik iletkenliğine etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Chauhan, N., Jariwala, C., Raole, P. M., Alphonsa, J., Jhala, G., Chainani, A., and John, P. I., Electronic structure, microstructure, and crystal structure of the precipitation-hardened alloy Cu<sub>98</sub>Be<sub>1.8</sub>Co<sub>0.2</sub>, *Physical Review B*. 71, (10), id 104202, (2005).
2. Harkness, J. C. and Guha, A., “Guide to copper beryllium”, *Brush Wellman Inc.Cleveland*, 9-15, (2007).  
[www.brushwellman.com/alloy/tech.../GuideToCopperBeryllium.pdf](http://www.brushwellman.com/alloy/tech.../GuideToCopperBeryllium.pdf)  
(25.08.2010).
3. Tekin, E., “Demirdışı metallere ve alaşımlarının uygulamalı optik metalografisi” 2. Baskı, *SEGEM* , 309-311, (1984).
4. [www.metaldünyasi.com](http://www.metaldünyasi.com) (05.07.2009).
5. Akkurt, M., “Makine Elemanları Cilt 2” , *İTÜ*, İstanbul, 22-50, (1992).
6. Akkurt, S., “Plastik Malzeme Bilgisi”, *Birsen Yayınevi* , 96-118,193-196, İstanbul (1991).
7. <http://www.shef.ac.uk/mecheng/tribology/teaching/whatistribology.htm>  
(10.06.2009).
8. Khrais, S.K., Lin, Y.J., Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel, *Wear*, 262, 64-69, (2007).
9. Babalık, F.C., Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri, Cilt 1, *U.Ü Basımevi*, 15-70, (1997).
10. Ludema, K. C., “Friction”, *Modern Tribology Handbook*, 3, *CRC Press*, 175-225, (2001).
11. Bhushan, B., “Tribology: Friction, wear and lubrication”, *The Engineering Handbook*, 80-120, (2000).
12. Yılmaz, F., “Sürtünme ve aşınma”, *9. Uluslar Arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 229-247, (1997).
13. Chiou, Y.C., Kato, K., and Kayaba, T., Effect of normal stiffness in loading system on wear of carbon steel—part 1:Severe-mild wear transition, *ASME, J. Tribology*, 107, 491-495, (1985).

14. Cho, S.J., Hockey B.J., and Lawn B.R., Grain-size and R-curve effects in the abrasive wear of alumina, **J. Am. Ceram. Soc.**, 72, 1949-1952, (1989).
15. Archard, J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, **J. Appl. Phys.**, 24, 981-988, (1953).
16. Bayer, R.G., Mechanical wear prediction and prevention, **Marcel Dekker**, New York, 280-300, (1994).
17. Burwell, J.T., Survey of possible wear mechanisms, **Wear**, 1, 119-141., (1957/58).
18. Özel, S., Cu-Sn-Zn-Al bronz alaşımlı yüzeyine ferromangan kaplamasının aşınma direncine etkisinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi **F.Ü. Fen Bil. Enst**, Elazığ, 15-35, (2004).
19. Bouchouchaa, A., Chekroud, S., and Paulmierc, D., Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper-stainless steel, **Appl Surf Sc**, 223, 330-342, (2004).
20. Kaya H., “Malzeme”, Ankara Erkek Teknik Öğretmen Okulu Yayınları 1. **Gün Matbaası**, İstanbul, 30-70, (1961).
21. Hokkirigawa, K., and Kato, K., An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear, **Tribology Int.**, 1, 21, 51-57, (1988).
22. Pei X., Wang Q., Chen J., Tribological responses of Phenolphtha-lein Poly (ether sulfone) on proton irradiation, **Wear**, 719-724, (2005).
23. Koç, R., “Vagon boji bagalarına alternatif polimer malzemelerin deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi, **SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, 25-45, Sakarya, (2004).
24. Finkin, E.F., “What happens when parts wear”, **Machine Design**, 19, 149 – 154, (1970).
25. Wang, X.Y., Li D.Y., Application of an electrochemical scratch technique to evaluate contributions of mechanical and electrochemical attacks to corrosive wear of materials, **Wear**, 1490-1496, (2005).
26. Dennis ,W. H., (Çeviri: H. Erman TULGAR), Demir Dışı Metaller Metalürjisi Kitabı, **İTÜ Yayınları**, 50-85, (2000).
27. Tekin, E., Demir dışı metaller ve alaşımlarının uygulamalı optik metalografisi, **SAGEM Yayınları**, 25-60, (1984).



28. Özer, H.H., 7075 alaşımında retregasyon ve yeniden yaşlandırma ısı işleminin sonucu mekanik özelliklerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, 30-55, (2004).
29. Koçak, H., Bakır alaşımları el kitabı, *Sağlam Metal A.Ş Yayını*, 45-60, (2000).
30. [www.ofismuhendis.com](http://www.ofismuhendis.com) (22.05.2009).
31. ASM Metals Handbook, *Heat treating*, 04, 175-200, (2004).
32. ASM Metals Handbook, *Metallography and Microstructures*, 09, 752-761, (2004).
33. Tekin, E., “Demirdışı Metaller ve Alaşımların Uygulamalı Optik Metalografisi” 2. Baskı, *SEGEM*, 309-311, (1984).
34. Tu, J.P., Qi, W.X., Yang, Y.Z., Liu, F., Zhang, J.T., Gan, G.Y., Wang, N.Y., Zhang, X.B., and Liu, M.S., Effect of aging treatment on the electrical sliding wear behavior of Cu-Cr-Zr alloy, *Wear*, 249, 1021-1027, (2002).
35. Martin, J.W., Micromechanisms in particle hardened alloys, *Cambridge University Press*, 62, 20-30, (1980).
36. Jia, S.G., Liu P., Ren, F.Z., Tian, B.H., Zheng, M.S., and Zhou, G.S., Electrotribological behavior of Cu-Ag-Cr contact wire against copper-base strip, *Met Mater-Int.*, 11, 71-76, (2005).
37. Paulmier, D., El Mansori, M., Zaidi H., Study of magnetized or electrical sliding contact of a steel XC48/graphite couple, *Wear*, 203-204, 148-154, (1997).

## **ÖZGEÇMİŞ**

27.08.1979 Yılında Uşak'ta doğdu. Denizli'nin Honaz ilçesine bağlı Kocabaş Kasabasında İlköğretimini, Denizli Atatürk Teknik Lisesinden mezun olduktan sonra 2000-2002 yılları arasında KTÜ Meslek Yüksek Okulu Elektrik bölümünü iyi bir derece ile bitirdi. 2004 ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliğini kazandı. 2008 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. Halen; 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Irlıganlı Kasabası DENİZLİ

Tel : 0 506 876 99 88

E-posta : musaonal1@hotmail.com