

**SAE 8620 SEMENTASYON ÇELİKLERİNDE SERTLİK DERİNLİĞİNİN ABRASİF  
AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Metin KAYABAŞI**

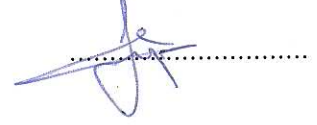
**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK  
Şubat 2011**

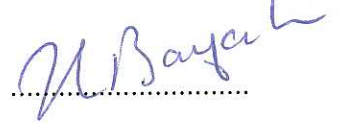
**KABUL:**

Metin KAYABAŞI tarafından hazırlanan "SAE 8620 SEMENTASYON ÇELİKLERİNDE SERTLİK DERİNLİĞİNİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 09/02/2011

Başkan: Doç. Dr. Figen KAYA (ZKÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Handan BAYCIK (ZKÜ)  
(Tez Danışmanı)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Bülent EKMEKÇİ (ZKÜ)



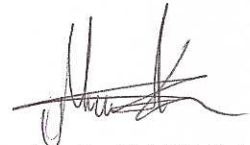
**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 3.3./2011



Prof. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL  
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.”*



Metin KAYABAŞI

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SAE 8620 SEMENTASYON ÇELİKLERİNDE SERTLİK DERİNLİĞİNİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Metin KAYABAŞI

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Handan BAYCIK  
Şubat 2011, 117 sayfa

Bu çalışmada, gaz sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğinin sertlik derinliğine bağlı olarak abrasif aşınma davranışı incelenmiştir. 920°C sıcaklıkta 1, 4 ve 7 saat süre ile gaz ortamda karbürleme yapılan numuneler yağda sertleştirilmiş ve 180°C sıcaklıkta 90 dakika süreyle temperlenmiştir. Aşınma deneyleri pin-disk deney cihazı ile yapılmıştır. Numuneler, 10 mm çaplı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilyalar ile kuru ve yağlı ortamda farklı yük ve kayma mesafelerinde aşındırılmıştır. Numunelerin mikroyapı, sertlik derinlikleri ve aşınma oranları karşılaştırılarak irdelenmiş ve abrasif aşınma dayanımlarındaki değişim belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** SAE 8620, gaz sementasyon, abrasif aşınma, sertlik derinliği.

**Bilim Kodu:** 625.02.05



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THE EFFECT OF CASE DEPTH ON ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR OF SAE 8620 CARBURIZED STEELS**

**Metin KAYABAŞI**

**Zonguldak Karaelmas University  
Graduate School of Natural and Applied Science  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Asst. Prof. Handan BAYCIK**

**February 2011, 117 pages**

The abrasive wear performance of gas carburized SAE 8620 steel was evaluated as a function of case depth in this study. Specimens carburized at 920°C temperature for 1, 4 and 7 hours, oil hardened and tempered at 180°C temperature for 90 minutes. Wear tests were carried out using pin-disc test machine. Specimens were abraded under different loads and sliding distances by using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> balls 10 mm in diameter in dry and oily environments. Microstructures, case depths and wear resistances of specimens were examined by comparing and the changes of abrasive wear resistances were determined.

**Key Words:** SAE 8620, gas carburizing, abrasive wear, case depth.

**Science Code:** 625.02.05



## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın her aőamasında desteğini ve katkılarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Handan BAYCIK'a (ZKÜ), deneysel çalıőmalarına destek sağlayan ZKÜ Bilimsel Araőtırma Projeleri Birimine, malzeme temini ve deney numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan Doğansan firması sahibi Haldun BEDÜK'e, sementasyon işleminde yardımcı olan Ayze Metal Makine firması yetkililerine, XRD, SEM, EDS ve mikrosertlik deneylerinin yapılmasında yardımını esirgemeyen değerli Sakarya Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve çalıőanlarına, deney çalışmalarında yardımını esirgemeyen Araő. Gör. Sudi KALAMAN'a (ZKÜ), yüksek lisans eğitimi süresinde desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma ve yöneticilerime teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Eğitim ve çalışma hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teőekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
BÖLÜM 3 SEMENTASYON VE SEMENTASYON ÇELİKLERİ.....	11
3.1 SEMENTASYON.....	11
3.2 SEMENTASYON YÖNTEMLERİ.....	13
3.2.1 Katı Ortamda Sementasyon.....	13
3.2.2 Sıvı Ortamda Sementasyon.....	14
3.2.3 Gaz Ortamda Sementasyon.....	16
3.3 SERTLEŞTİRME.....	20
3.3.1 Doğrudan Sertleştirme.....	21
3.3.2 Basit Sertleştirme.....	21
3.3.3 Çift Sertleştirme.....	23
3.3.4 Temperleme.....	23
3.4 SEMENTASYON ÇELİKLERİ.....	24

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4.1 Sementasyon Çeliğinin Mikroyapısı.....	25
3.4.2 SAE 8620 Sementasyon Çeliği.....	28
3.5 ETKİLİ SERTLİK DERİNLİĞİ.....	29
BÖLÜM 4 SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	31
4.1 SÜRTÜNME.....	31
4.1.1 Kuru Sürtünme.....	32
4.1.2 Sınır Sürtünme.....	33
4.1.3 Sıvı Sürtünme.....	33
4.1.3.1 Hidrodinamik Sıvı Sürtünme.....	34
4.1.3.2 Hidrostatik Sıvı Sürtünme.....	35
4.2 AŞINMA.....	35
4.2.1 Tribolojik Sistemin Elemanları.....	36
4.2.2 Aşınma Faktörleri ve Aşınma Direncine Etkileri.....	36
4.2.3 Aşınma-Zaman İlişkisi.....	37
4.3 AŞINMA MEKANİZMALARİ.....	38
4.3.1 Abrasif Aşınma.....	39
4.3.2 Adhesif Aşınma.....	41
4.3.3 Yorulma Aşınması.....	43
4.3.4 Tribooksidasyon Aşınması .....	43
4.3.5 Erozyon ve Kavitasyon Aşınması.....	44
4.3.6 Yenme Aşınması.....	45
4.3.7 Difüzyon Aşınması.....	45
4.4 AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	46
4.4.1 Ağırlık Farkı Metodu.....	46
4.4.2 Kalınlık Farkı Metodu.....	46
4.4.3 İz Değişimi Metodu.....	47
4.4.4 Radyoizotop Metodu.....	47
4.4.5 İz Alanı Karşılaştırma Metodu.....	47

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
5.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER.....	49
5.2 DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	50
5.3 SEMENTASYON İŞLEMİ.....	50
5.4 SERTLİK VE MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	52
5.5 MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	53
5.6 AŞINMA DENEYİ.....	55
BÖLÜM 6 DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	57
6.1 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	57
6.2 MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI.....	59
6.3 AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI.....	67
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
EK AÇIKLAMALAR A ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.65 VE 0.8 MM OLAN NUMUNELERİN XRD ANALİZLERİ.....	83
EK AÇIKLAMALAR B ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.4 VE 0.65 MM OLAN NUMUNELERİN GEÇİŞ BÖLGESİ EDS ANALİZLERİ.....	87
EK AÇIKLAMALAR C KURU VE YAĞLI ORTAMDA AŞINDIRILAN NUMUNELERİN SÜRTÜNME GRAFİKLERİ.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	117



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Demir-sementit denge diyagramı .....	12
3.2 925°C sıcaklıkta sertlik derinliğine zamanın etkisi.....	14
3.3 925°C sıcaklıkta SAE 8620 çeliğinin farklı sürelerde elde edilen sertlik değerleri ve sertlik derinlikleri.....	16
3.4 Dört farklı sıcaklık için karbürleme zamanına bağlı olarak sertlik derinlikleri....	17
3.5 SAE 8620 çeliğinin 1,5 mm sertlik derinliği elde edebilmek için zamana bağlı karbürleme sıcaklıkları.....	18
3.6 Propandan türetilen endotermik gaz için CO <sub>2</sub> miktarı ve karbon miktarı ilişkisi .	19
3.7 Metandan türetilen endotermik gaz için CO <sub>2</sub> miktarı ve karbon miktarı ilişkisi..	19
3.8 Nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı ilişkisi.....	20
3.9 Propandan türetilen endotermik gaz için yoğunlaşma sıcaklığı karbon miktarı ilişkisi.....	20
3.10 Sementasyon sonrası doğrudan sertleştirme .....	21
3.11 Sementasyon sıcaklığından soğutma sonrası sertleştirme .....	22
3.12 Ara tavlamadan sonra sertleştirme .....	22
3.13 İzotermik dönüşüm sonrası sertleştirme .....	23
3.14 Sementasyon sıcaklığından soğutma sonrası çift sertleştirme .....	23
3.15 Bazı çeliklerin temperleme eğrileri .....	24
3.16 SAE 8620 çeliğinin SEM görüntüsü (x400).....	25
3.17 SAE 8620 çeliğinin ZSD diyagramı.....	26
3.18 SAE 8620 çeliğinin Jominy sertlik bantları.....	29
3.19 Etkili sementasyon derinliğine bir örnek.....	30
4.1 Statik ve dinamik sürtünme kuvveti ilişkisi.....	31
4.2 Kuru sürtünme modeli.....	33
4.3 Hidrodinamik sıvı sürtünme .....	34
4.4 Tribolojik sistemin şematik gösterimi .....	36
4.5 Aşınma-zaman bağıntısı .....	38

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Abrasif aşınma .....	39
4.7 Abrasif aşınmada oluşan temas türleri .....	40
4.8 Adhesif aşınma.....	41
4.9 Yorulma aşınması.....	43
4.10 Korozif aşınma.....	44
4.11 Aşınma izi profilinin şematik görünümü.....	47
5.1 OBLF marka spektrometre cihazı .....	49
5.2 Numunelerin taşlama işlemi .....	50
5.3 Atmosfer kontrollü kuyu tipi gaz sementasyon fırını.....	51
5.4 Sementasyon işlemine ait sıcaklık-zaman grafiği.....	51
5.5 Volpert marka sertlik test cihazı .....	52
5.6 Leica VMHT MOT marka mikrosertlik test cihazı.....	52
5.7 Metkon Gripo-2V zımparalama ve parlatma tezgahı.....	53
5.8 Metkon IMM 901 marka optik mikroskop ve Clemex görüntü analiz cihazı .....	54
5.9 JEOL JSM 6060LV SEM ve IXRF systems Inc. 500 Processing EDS cihazı.....	55
5.10 RIGAKU D/MAX/2200/PC XRD cihazı.....	55
5.11 Tribotechnic marka pin-disk aşınma cihazı.....	56
5.12 Tribotechnic marka yüzey profilometre cihazı.....	56
6.1 Karbürleme süresine bağlı olarak yüzeyden mesafe-sertlik ilişkisi.....	57
6.2 Karbürleme süresi 1 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği .....	58
6.3 Karbürleme süresi 4 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği .....	58
6.4 Karbürleme süresi 7 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği .....	59
6.5 Isıl işlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).....	59
6.6 ESD = 0.4 mm olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).....	60
6.7 ESD = 0.65 mm olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).....	60
6.8 ESD = 0.8 mm saat olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).....	60
6.9 ESD = 0.4 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500) .....	62
6.10 ESD = 0.65 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500) .....	62
6.11 ESD = 0.8 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500) .....	62
6.12 ESD = 0.4 mm olan numunenin XRD analizi .....	63
6.13 ESD=0.8 mm olan numunenin karbürleme bölgesi EDS analizi.....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
6.14 ESD = 0.8 mm olan numunenin geçiş bölgesi EDS analizi .....	65
6.15 ESD = 0.8 mm olan numunenin matris bölgesi EDS analizi.....	66
6.16 Aşındırılan ısıtılmış işlem görmeyen numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki iz alanı.....	67
6.17 Kuru ortamda aşındırılan ESD = 0.8 mm olan numunenin sürtünme grafiği.....	68
6.18 Yağlı ortamda aşındırılan ESD = 0.8 mm olan numunenin sürtünme grafiği.....	69
6.19 Kuru ortamda aşındırılan numunelerin 9 N yükte aşınma grafiği.....	69
6.20 Yağlı ortamda aşındırılan numunelerin 64 N yükte aşınma grafiği.....	71
6.21 ESD = 0.4 mm olan numunelerin aşınma grafiği.....	72
6.22 ESD = 0.65 mm olan numunelerin aşınma grafiği.....	73
6.23 ESD = 0.8 mm olan numunelerin aşınma grafiği.....	73
6.24 Kuru ve yağlı ortamlarda farklı karbürleme süreleri ve kayma mesafelerindeki numunelerin toplu grafikleri.....	74
A.1 ESD = 0.65 mm olan numunenin XRD analizi.....	85
A.2 ESD = 0.8 mm olan numunenin XRD analizi .....	86
B.1 ESD = 0.4 mm olan numunenin geçiş bölgesi EDS analizi .....	89
B.2 ESD = 0.65 mm olan numunenin geçiş bölgesi EDS analizi .....	90
C.1 Kuru ortamda ısıtılmış işlem görmeyen numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	93
C.2 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	94
C.3 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	95
C.4 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	96
C.5 Kuru ortamda ısıtılmış işlem görmeyen numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	97
C.6 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	98
C.7 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
C.8 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	100
C.9 Kuru ortamda ısıtma işlemi görmeyen numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	101
C.10 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	102
C.11 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	103
C.12 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	104
C.13 Yağlı ortamda ısıtma işlemi görmeyen numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	105
C.14 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.....	106
C.15 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	107
C.16 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	108
C.17 Yağlı ortamda ısıtma işlemi görmeyen numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	109
C.18 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	110
C.19 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	111
C.20 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	112
C.21 Yağlı ortamda ısıtma işlemi görmeyen numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	113
C.22 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	114

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
C.23 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	115
C.24 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği .....	116



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	Düşük ve yüksek sıcaklık banyolarının karşılaştırılması .....	15
3.2	Dört farklı sıcaklık değeri ve farklı karbürleme zamanlarında elde edilen sertlik değerleri .....	18
3.3	SAE 8620 çeliğinin uluslararası standartlardaki karşılıkları .....	28
3.4	SAE 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	28
3.5	SAE 8620 çeliğinin 200°C tavlandıktan sonra çapa bağlı olarak çekme dayanımları.....	28
3.6	SAE 8620 çeliğinin ısıtılma şartları.....	29
3.7	Sementasyon sıcaklığına bağlı k sabiti değerleri .....	30
4.1	Bazı sürtünme katsayısı değerleri .....	32
5.1	Deneyisel çalışmada kullanılan SAE 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi .....	49



## EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
A	ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.65 VE 0.8 MM OLAN NUMUNELERİN XRD ANALİZLERİ.....	83
B	ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.4 VE 0.65 MM OLAN NUMUNELERİN GEÇİŞ BÖLGESİ EDS ANALİZLERİ .....	86
C	KURU VE YAĞLI ORTAMDA AŞINDIRILAN NUMUNELERİN SÜRTÜNME GRAFİKLERİ.....	89



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$Al_2O_3$	: alümina
C	: karbon
$C_{(Fe)}$	: ostenit fazında çözünen karbon
$C_2H_4$	: etilen
$C_3H_8$	: propan
$C_4H_{10}$	: bütan
$CH_4$	: metan
Ca	: kalsiyum
cm	: santimetre
CO	: karbonmonoksit
$CO_2$	: karbondioksit
Cr	: krom
cSt	: kinematik viskozite birimi ( $mm^2/s$ )
Cu	: bakır
F	: kuvvet
Fe	: demir
$Fe_3C$	: sementit
$F_k$	: dinamik sürtünme kuvveti
$F_n$	: normal kuvvet
$F_s$	: statik sürtünme kuvveti
g	: gram
$H_2$	: hidrojen
$H_0$	: minimum yağ tabakası kalınlığı
HRC	: Rockwell sertliği
HV	: Vickers sertliği
k	: sabit
kg	: kilogram
m	: metre

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$M_f$	: martenzit bitiş sıcaklığı
mg	: miligram
mm	: milimetre
Mn	: mangan
Mo	: molibden
MPa	: mega pascal
$M_s$	: martenzit başlangıç sıcaklığı
N	: newton
$N_2$	: azot
NaCN	: sodyum siyanür
NaCNO	: sodyum siyanat
Ni	: nikel
$O_2$	: oksijen
P	: fosfor
$R_t$	: yüzeyin maksimum pürüzlülüğü
S	: kükürt
s	: saniye
Si	: silisyum
SiC	: silisyum karbür
T	: sıcaklık
t	: süre
$W_a$	: aşınma oranı
$W_r$	: aşınma direnci
$\alpha$ -Fe	: alfa demiri
$\gamma$ -Fe	: gama demiri
$\mu$	: sürtünme katsayısı
$\mu_k$	: dinamik sürtünme katsayısı
$\mu_m$	: mikrometre
$\mu_s$	: statik sürtünme katsayısı

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)**

### **KISALTMALAR**

ASM	: American Society for Materials
ASTM	: American Society for Testing and Materials
EDS	: Energy Dispersion Spectrum
EN	: Avrupa Normu
ESD	: Etkili Sementasyon Derinliği
ISO	: Uluslararası Standard Organizasyonu
SAE	: Society of Automotive Engineers
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
TS	: Türk Standardı
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
ZSD	: Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm Diyagramı



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Endüstride en büyük mali kayıplardan birini aşınma oluşturur. Bu nedenle aşınmaya karşı malzemelerin daha dirençli hale getirilmesinin önemi büyüktür. Aşınmaya maruz parçaların dış kısımlarının sert ve aşınmaya dayanıklı, iç kısımlarının ise tok olması istendiğinden bu parçalara yüzey sertleştirme işlemi uygulanır. Yüzey sertleştirme işlemleri makine parçalarında yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, aşınmanın ve yorulmanın azaltılması için uygulanır. Aşınmayı azaltmak için endüstride geniş çapta uygulanan yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri de sementasyondur. Sementasyon, yüksek yüzey sertliği, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı ile matriste tokluk elde etmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir.

Sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması, sementasyon çeliklerine uygulanan ısıl işlemler, sertlik derinliğine etki eden faktörler, difüzyona ve difüzyon olayına etki eden faktörler, alaşım elementlerinin sertlik ve difüzyona olan etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından irdelenmiştir. Karbürleme süresine bağlı olarak yüzeyde karbon miktarının arttığı, maksimum sertliğin yüzeyde olduğu ve yüzeyden içeriye doğru sertliğin azaldığı bilinmektedir.

Sementasyon çelikleri, dişli, mil, piston pimleri, zincir baklaları ve makaraları gibi makine elemanlarında kullanılır. Ayrıca, aşınmaya çalışan malzemelerin, kuru veya yağlı ortamda çalışmaları da önem arz eder. Yağlı ortamlarda yapılan deneylerde sürtünmenin de çok az olduğu ve bunun da aşınmayı azalttığı bilinmektedir.

Tez çalışmasında, genellikle dişli imalatında kullanılan SAE 8620 çeliği kullanılmıştır. Bu çalışmada gaz sementasyon yapılarak çeşitli sertlik derinliklerine sahip olan SAE 8620 çeliğinin mikroyapı, sertlik derinlikleri irdelenmiş, kuru ve yağlı ortamlarda farklı yük ve kayma mesafelerindeki abrasif aşınma dayanımlarındaki değişim belirlenmiştir.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Aşınma, günümüz sanayisinde makine arızalarına ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmasına sebep olduğundan dolayı büyük mali kayıplara neden olur. Literatürde aşınma, aşınma partikülleri, aşınma türleri, aşınma deneylerinde kullanılan cihazlar detaylı olarak irdelenmiştir (Bejar 2006, Sundström 2001, Belevi ve Eş 2007, Garcia et al. 2003, Hawk 1999, Modi et al. 2002, Pintaude et al. 2003, Selçuk vd. 2002, Tabur 2003, Çelik vd. 2007).

Aşınmaya maruz makine parçalarının yüzeylerinin sert ve aşınmaya dayanıklı, iç kısımlarının ise tok kalması istendiğinden dolayı yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır. Dişli, mil, piston pimleri, zincir baklaları ve makaraları, diskler, kılavuz yatakları, kesici takımlar, rulmanlı yataklar gibi makine parçalarının yüzey sertleştirilmesi için uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinden biri de sementasyondur. Sementasyon, sementasyon çelikleri, makine parçalarının aşınması konularında yapılan çok çeşitli çalışmalar ve ilgili standartlar mevcuttur (Bepari 2004, Straffelini 2008, Xu 2006, Asi et al. 2008, Erdoğan ve Tekeli 2002, Farfan et al. 2004, Findley et al. 2009, Benedetti 2002, , TS 2850 EN 10084 2001, TS ISO 10825 2001).

Sementasyon çelikleri, dişli, mil, piston pimleri, zincir baklaları ve makaraları gibi makine elemanlarında kullanılır. Tez çalışmasında, genellikle dişli imalatında kullanılan SAE 8620 çeliği kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, SAE 8620 çeliğine değişik karbürleme sürelerinde gaz sementasyon yaparak sertlik derinliğinin abrasif aşınma davranışına etkisini irdelemektir.

Karagöz (2007) sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması, sementasyon çeliklerine uygulanan ısıl işlemler, sertlik derinliğine etki eden faktörler, difüzyona ve difüzyon olayına etki eden faktörler ve ayrıca alaşım elementlerinin sertlik ve difüzyona olan etkilerini incelemiştir. SAE 8620 çeliğine sementasyon işlemi, 930°C sıcaklıkta 6 ve 7 saat süre ile tuz ortamında yapmış ve sementasyon sonucunda sert tabaka kalınlıkları 1.00 ve 1.10 mm, sertlik değerleri de 832 ve 860 HV elde edilmiştir. Sertliğin 0.2 mm derinliğe kadar maksimum

seviyede olduğunu, 6 saatlik numunelerde yüzeye doğru yönelen martenzitik yapı görüldüğünü, 7 saatlik numunelerde ise matris bölgeye doğru yapının kabalaştığını ve perlitik yapıdan beynite dönüştüğünü ifade etmiştir.

Krauss (2000), sementasyon işleminin gevreklik etkisinin genel olarak sert martenzitik mikroyapı ile ilgili olduğunu ifade etmiştir. Karbon miktarı ne kadar fazla olursa, martenzitin gevrek davranış gösteren çeşitli mikro çatlaklar içerebildiği belirtilmiştir. Genel olarak, çelikteki yüksek karbon ve fosfor miktarının veya karbürleme sırasında hidrojen absorpsiyonunun taneler arası gevrek kırılmaya neden olduğu ifade edilmiştir.

Bepari et al. (2004), karbürlenmiş ve sertleştirilmiş düşük karbon çeliklerindeki Mo ve Ni miktarlarının yapıya etkisini irdelemişlerdir. Çalışmada, Mo ve Ni'in martenzit boyutu, tabaka sertliği, matris sertliği ve tokluk değerlerini farklı etkilediği detaylı olarak irdelenmiştir. Mo ve Ni'in kalıntı ostenit oluşumunu artırdığı, Ni'in Mo'den daha etkin olduğu da iddia edilmiştir.

Findley et al. (2009), sementasyon çeliklerinin mikroyapıları ve kalıntı gerilmelerinin yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, gaz sementasyon yapılmış SAE 8179 çeliğinin mikroyapısında yüzeye yakın bölgede levha martenzit ve kalıntı ostenit olduğu ifade edilmiştir.

Bensely et al. (2006), dişli hasar istatistiklerinin, aşınma nedeniyle %13.2, ısıl işlem hatası nedeniyle %16.2 olduğunu ifade etmiştir.

Boniardi et al. (2006), dişli hasarlarında sementasyon ve nitrürlemenin etkisini irdelemişlerdir. Çalışmalarında, sert tabaka kalınlığı arttıkça yüzeyde %C ve kalıntı ostenit miktarının arttığını ve tane sınırlarında oksitlenme ve karbür çökelmelerinin olduğunu ifade etmişlerdir.

Straffellini and Versari (2008) sementasyon yapılmış pinyon dişlisinin tanelerarası kırılma davranışını incelemişlerdir. 16MnCr5 çeliğine, gaz karbürleme 5 saat süre ile 930°C sıcaklıkta, homojenleştirme 840°C sıcaklıkta, yağda su verme 80°C sıcaklıkta, temperleme ise 2 saat süre ile 180°C sıcaklıkta yapılmıştır. Makalede, kısıtlı çekme gerilmeleri için karbürlenmiş makine parçalarının, temas basma yükleri veya yorulma yükleri altında hidrojen

gevrekliği ile gevrek kırılma göstermeyebileceği ifade edilmiştir. Fakat, yüksek gerilme yoğunluğu ve martenzitik yapı ile birlikte, çeliğin yüksek çekme gerilmeleri altında tanelerarası gevrek kırılmaya uğrayabileceği belirtilmiştir.

Genel ve Demirkol (1998), sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğinin yorulma dayanımına sertlik derinliğinin etkisini araştırmışlardır. SAE 8620 çeliğine karbürleme işlemi, 900°C sıcaklıkta 3, 5 ve 7.5 saat süre ile tuz ortamında yapılmıştır. Sementasyon tabakasının mikroyapısının levha martenzit ve kalıntı ostenit iğerdiği belirtilmiştir. Sementasyon sonucunda etkili sertlik derinlikleri 0.73, 0.90 ve 1.10 mm, kalıntı gerilmeler sırasıyla -265, -220, -200 MPa, yorulma dayanımları da 840, 980, 1140 MPa olarak bulunmuştur. Etkili sertlik derinliğinin artışı ile yorulma dayanımının da arttığı ifade edilmiştir. SAE 8620 çeliğinin ostenit tane büyüklüğünün ASTM 7 ve kalıntı ostenit miktarının ortalama %20 olduğu belirtilmiştir. Yüzeyin 20 µm altında sertlik derinliğine bağlı olarak kalıntı gerilmelerin 200 ve 265 MPa olduğu; daha kalın sert tabakalarda yüzeyde ve/veya yüzeye yakın bölgede daha düşük basma kalıntı gerilmesi olduğu ifade edilmiştir.

Asi (2004) çalışmasında, sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğine kalıntı ostenitin etkisini irdelemiştir. Karbürleme işlemini 940°C sıcaklıkta 45 dakika, 3 ve 5 saat bekleme sürelerinde gaz ortamında yapmış, sert tabaka kalınlıklarını 0.73, 0.90 ve 1.10 mm, sertlik değerlerini de 740, 760 ve 762 HV olarak bulmuştur. Kalıntı ostenit miktarları sırasıyla % 35.8, % 19.4 ve %15 olarak tespit edilmiştir. Sementasyon sonucu meydana gelen kalıntı ostenit miktarının yüksek olmasının; parçanın sertliğini, aşınma dayanımını ve yorulma dayanımını azalttığını; bundan dolayı kalıntı ostenit miktarının mümkün olduğu kadar azaltılması için karbürleme işlemi sonucunda çeliğin yüzeydeki karbon miktarının %0.7'den düşük olmasına ve su verme sıcaklığının martenzit bitiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda olmasına dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Asi et al. (2008), sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğinin sertlik derinliği ile eğme yorulma dayanımı arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. 940°C sıcaklıkta 45 dakika, 3 ve 5 saat süreler ile C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ile zenginleştirilmiş %33 H<sub>2</sub>, % 28 CO, % 0.8 CH<sub>4</sub> gaz ortamında karbürleme yapmışlardır. Atmosfer kontrollü fırında yüzeydeki %C miktarı yaklaşık olarak %0.7 olarak ayarlanmıştır. 850°C sıcaklıkta homojenleştirme sonrası doğrudan yağda su verilen çeliklere 170°C sıcaklıkta 2 saat süre ile temperleme yapılmıştır. Sementasyon tabakasında temperlenmiş martenzit ve kalıntı ostenit yapısı; matriste ise temperlenmiş iğne martenzit ve

kalıntı ostenit olduğu ifade edilmiştir. Çeliklerde sert tabaka kalınlığı değerleri 0.39, 0.86 ve 1.2 mm olarak ölçülmüştür. Yüzeğe yakın bölgelerde her üç çelik için de iç oksidasyon gözlemlenmiştir. Daha kalın sert tabaka kalınlığına sahip çeliklerde yüzeyde daha yüksek iç oksidasyon derinliği ve miktarı belirlenmiştir (yaklaşık olarak 10, 50, 70 µm derinlikte). 0.39 mm sert tabaka kalınlığına sahip çeliğin yüzeyde diğer çeliklerden daha yüksek kalıntı ostenit miktarına sahip olduğu (%30.5), 0.86 ve 1.2 mm sert tabaka kalınlığındaki çeliklerde ise kalıntı ostenit miktarının yaklaşık olarak aynı olduğu (%15.6, %15); yorulma dayanımlarının da tabaka kalınlığı azaldıkça düştüğü (1410, 1195 ve 1170 N / mm<sup>2</sup>) ifade edilmiştir.

Spice et al. (2002) SAE 8620 çeliğine sementasyonu, başlangıçta karbon potansiyeli %1.27, banyoda %1.14 olacak şekilde 893°C sıcaklıkta 380 dakika süre ile karbürleme, 121°C sıcaklıkta yağda su verme, 149°C sıcaklıkta 1 saat temperleme şeklinde gaz ortamda yapılmıştır. Kalıntı gerilmelerin yüzeyden mesafeye göre -100 ve -300 MPa aralığında olduğu, yüzeyden mesafe arttıkça 0.15 mm'ye kadar arttığı, sonra azalma gösterdiği; kalıntı ostenit miktarının da yaklaşık %13-18 miktarlarında olduğu, yüzeyden mesafe arttıkça 0.15mm'ye kadar arttığı, sonra azalma gösterdiği; oksidasyon derinliğinin yaklaşık %18 olduğu ifade edilmiştir.

Özsaraç vd. (2002) SAE 8620 çeliğinin kutu sementasyonunda karbürleme, 930°C sıcaklıkta 0.5, 1, 5, 10 saat süre ile yapılmıştır. Karbürleme sürelerine göre sertlik derinliği değerleri 0.5, 0.9, 1.1 ve 1.8 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, karbürleme sürelerine bağlı olarak sertlik değerleri irdelendiğinde; yüzey ve sert tabaka minimum sertlik değerleri aralığı 660-498, 742-533, 766-636 ve 766-536 HV olarak belirlenmiştir. 0.5 saat karbürlenen çeliğin sertleşen bölgedeki mikroyapısında düz martenzit ve perlit tanecikleri; 1 saat karbürlenen çeliğin mikroyapısında yüzeye yakın bölgelerde iğneli martenzit, iç kısma doğru perlitik yapı üzerinde sementit; 5 saat karbürlenen çeliğin mikroyapısında yüzeye doğru iğneli martenzit; 10 saat karbürlenen çeliğin mikroyapısında ise matris bölgeye doğru yapı kabalaşması ve perlitik-beynitik yapı olduğu ifade edilmiştir. Sertlik derinliğinin artması yüzeydeki artık basma gerilmesinin minimum olduğu noktayı içeri çeker ve artık basma kuvvetinin artması matristeki artık çekme kuvvetinin, dolayısı ile artık çekme gerilmesi akma sınırını geçtikten sonra yüzeydeki basma dayanımı düşer. Bu durum yorulma direncini olumsuz etkiler. Bu durumu önlemek için matris mukavemeti zayıf çeliklere sertlik derinliği fazla, mukavemeti iyi olanlara ise daha az sertlik derinliği verilmelidir.

Kahraman ve Akcan (2007) gaz karbürlenmiş SAE 8620 çeliğinin, karbon profiline, zaman ve fırın atmosferi gibi proses parametrelerinin etkilerini araştırmışlar ve bu amaçla karbürleme işlemini 925°C sıcaklıkta 2 ve 4 saat sürelerde yapmışlardır. Sementasyon sonunda 0.9 mm ve 1.3 mm tabaka kalınlığı elde edilmiş ve yüzeyde 740 HV, numunelerin merkezinde 295 HV ortalama sertlik ölçülmüştür. Yüzeydeki karbon miktarının artışı ile yüzeydeki sertliğin de arttığı, karbürleme süresine bağlı olarak yüzeydeki karbon miktarının da arttığı, maksimum sertliğin yüzeyde olduğu ve yüzeyden içeriye doğru sertliğin azaldığını ifade etmişlerdir.

Farfan et al. (2004), farklı sürelerde karbürleme yapılmış SAE 8620 çeliğinin sert tabaka kalınlıklarını 0.4, 1, 1.1 ve 1.35 mm, bu çeliklerin yüzeydeki %C miktarlarını ise 0.8, 4.1, 4.3 ve 1.65 olarak belirtmişlerdir. Çalışmada, çok ince sert tabakaların haricinde, daha kalın sert tabakalara sahip çeliklerin yorulma dayanımlarının daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Dişli hasarlarına en çok aşınma, yorulma, darbe koşullarında rastlandığını; 1500'ün üzerindeki dişli hasarları incelendiğinde ise hasar çeşitlerinin %32'sinin sözü edilen hasarlar olduğu ifade edilmiştir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan dişlilerde sert tabaka kalınlığının 0.8-1.4 mm olduğunu ifade etmiştir.

Höhn and Michaelis (2004), çalışmalarında dişlilerde yağlama sistemindeki yağ sıcaklığının aşınma gibi bir takım dişli hasarlarına neden olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıkların düşük viskoziteye ve kırılmada en tehlikeli durumu oluşturan ince yağ filmine, ayrıca yüksek kimyasal aktivite ve iyi sürtünme tabaka formasyonuna sebep olduğu ifade edilmiştir.

Walton and Goodwin (1998) karbon çeliği, sfero dökme demir, alüminyum ve bronzdan imal edilmiş tahrik dişlilerinin yağsız ortamda kuru çalışma performanslarını incelemişler, bir grup dişliye de farklı kaplamalar uygulayarak karşılaştırmışlardır. Katı yağlama yapılabilen dişlilerde gres kullanılarak aşınmanın önemli ölçüde azaltılabileceğini ve bunun daha ekonomik olacağını ifade etmişlerdir.

Sundström et al. (2001) farklı mikroyapılara sahip düşük alaşımlı çeliklerin aşınma davranışını incelemişlerdir. Aşınma dayanımının malzemenin mikroyapısına ve karbon içeriğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ağırlık kaybının sertlikle doğru orantılı olarak değişmediğini ancak benzer mikroyapıya sahip çeliklerin tane büyüklüğü ve uzama değerlerinin düşüşü ile ağırlık kayıplarındaki düşüşün paralellik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Belevi ve Eş (2007) 16 MnCr5 çeliğinden üretilen yüzey işlemi yapılmamış ve yüzeyi sementasyonla sertleştirilmiş disklerin, kuru ve yağlı kayma-yuvarlanma koşulları altında aşınma davranışını araştırmışlardır. Karbürleme işlemini 930°C sıcaklıkta 150 dakika süre ile yapmışlar ve sementasyon sonunda 0.7 mm sertlik derinliği elde etmişlerdir. Yüzeyi sertleştirilmiş disklerin sertleştirilmemiş disklerle göre çok daha az aşındığını, yüzey sertleştirilmenin aşınma dayanımını arttırmada etkili bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir. 300 N yük altında, 700 dev/dak sabit yuvarlanma hızında, farklı kayma-yuvarlanma oranlarında toplam çevrim 200.000 çevrime ulaşana kadar (yaklaşık 5 saat) aşınma deneyleri yapıp, yağlı kayma-yuvarlanma temas koşullarında kuru koşullara göre aşınmanın daha az olduğunu belirtmişlerdir. Yağ olarak Shell Tellus 37 kullanılmıştır. Yağlı ortamlarda yapılan deneylerde sürtünmenin de çok az olduğu ve bunun da aşınmayı azalttığı vurgulanmıştır.

Kim and Kweon (1996), çalışmalarında sementasyon yapılmış SAE 8620 ve 4140 çeliklerine kuru kayma aşınma davranışlarında kalıntı ostenitin etkisini irdelemişlerdir. 20 kg yük altında kuru kayma aşınmaya kalıntı ostenit etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu, 40 kg yük altında ise %6'dan %30'a yükselen kalıntı ostenit miktarı ile aşınma dayanımının düştüğünü, bununla birlikte kalıntı ostenit miktarının %30'un üzerine çıkmasıyla 40 kg yük altında aşınma dayanımının tekrar arttığını iddia etmişlerdir.

Uluğ (2006) yüzeyi sertleştirilmiş 8620 çeliğine sıfır altı ısıl işlemini uygulayarak, bu işlemin mikroyapı, kalıntı ostenit hacim oranı, sertlik, darbe dayanımı ve aşınma dayanımı üzerine etkilerini incelemiştir. Karbürleme işlemi 930°C'de asetilen ortamında 120 dakika süre ile sıfır altı ısıl işlemi ise -70°C'de 60 dakika süre ile uygulanmıştır. Sertleştirmeyi takiben yapılan sıfır altı işlemi, kalıntı ostenit oranını %38 azaltmıştır. Sıfır altı ve temperleme işlemi ile sertleştirme sonrası elde edilen aşınma dayanımının ise düştüğü ifade edilmiştir.

İzciler ve Tabur (2005) SAE 8620 çeliğine karbürleme işlemini 925°C sıcaklıkta 660 ve 320 dakika bekleme sürelerinde gaz ortamında yapmışlar ve sert tabaka kalınlıkları 1.67 ve 0.86 mm, sertlik değerlerini de 840 ve 770 HV elde etmişlerdir. Aşınma deneyleri pin-disk abrasif aşınma cihazında 10, 25 ve 40 N yük uygulayarak 100, 200 ve 300 metre kayma mesafelerinde yapılmıştır. Çalışmada, çeliğin dış yüzeylerinin martenzitik yapıda oldukları, sementasyon süresinin artmasıyla ostenit tane büyüklüğünün küçüldüğü ve tabaka kalınlığının da arttığı, sementasyon derinliği ve yüzey sertliği fazla olan numunenin aşınmaya karşı daha fazla direnç gösterdiği ifade edilmiştir.

İzciler ve Tabur (2006), çalışmalarında gaz sementasyon yapılmış SAE 8620 dişli çeliğinin farklı sertlik derinliklerindeki abrasif aşınma dayanımını irdelemişlerdir. Sementasyon işlemi, 660 ve 320 dakika süreler için 925°C sıcaklıkta karbürleme, 130°C sıcaklıkta 5 dakika yağda su verme, 180°C sıcaklıkta 45 dakika temperleme olmak üzere gaz ortamda yapılmıştır. Kuru pin-disk aşınma deneyleri, 10, 25 ve 40 N yük uygulayarak 100, 200 ve 300 metre kayma mesafelerinde yapılmıştır. Artan yüklerle aşınmanın arttığını, kayma mesafesi arttıkça aşınma oranının arttığı, SiC aşındırıcıların Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcılardan daha fazla abrasif aşınma oranına sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Sementasyon tabaka kalınlığı arttıkça çeliğin abrasif aşınma dayanımının artacağı da çalışmada ayrıca belirtilmiştir.

Silva (1999) sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğinin aşınma dayanımı ve yorulma çatlak oluşumu üzerinde kalıntı ostenit miktarının etkisini incelemiştir. Karbürleme işlemini, 930°C sıcaklıkta 3 saat bekleme süresinde tuz ortamında yapmış ve numunelerine karbürleme sonrası farklı ısıl işlemler uygulamıştır. Aşınma deneyleri, pin-disk aşınma cihazında SiC aşındırıcı ortamında 0.03 MPa yük uygulanarak 1400 ve 200 tur dönme mesafelerinde yapılmıştır. Kalıntı ostenit miktarı arttıkça sertlik değerlerinin ve aşınma dayanımının arttığı ifade edilmiştir.



## BÖLÜM 3

### SEMENTASYON VE SEMENTASYON ÇELİKLERİ

#### 3.1 SEMENTASYON

Sementasyon işlemi, yüzey sertleştirme metotlarından birisi olup, düşük karbonlu çelik parçasının yüzeyine karbon emdirilmesi işlemidir. Karbon emdirilmesi, çeliğin karbonmonoksit (CO) içeren bir ortamda, ostenit faz sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla gaz-metal reaksiyonu sonucu oluşur. Genellikle 850-950°C sıcaklık kullanılır ki, bu sıcaklığa sementasyon sıcaklığı adı verilir (ASM 1991).

Aşağıdaki reaksiyona göre,

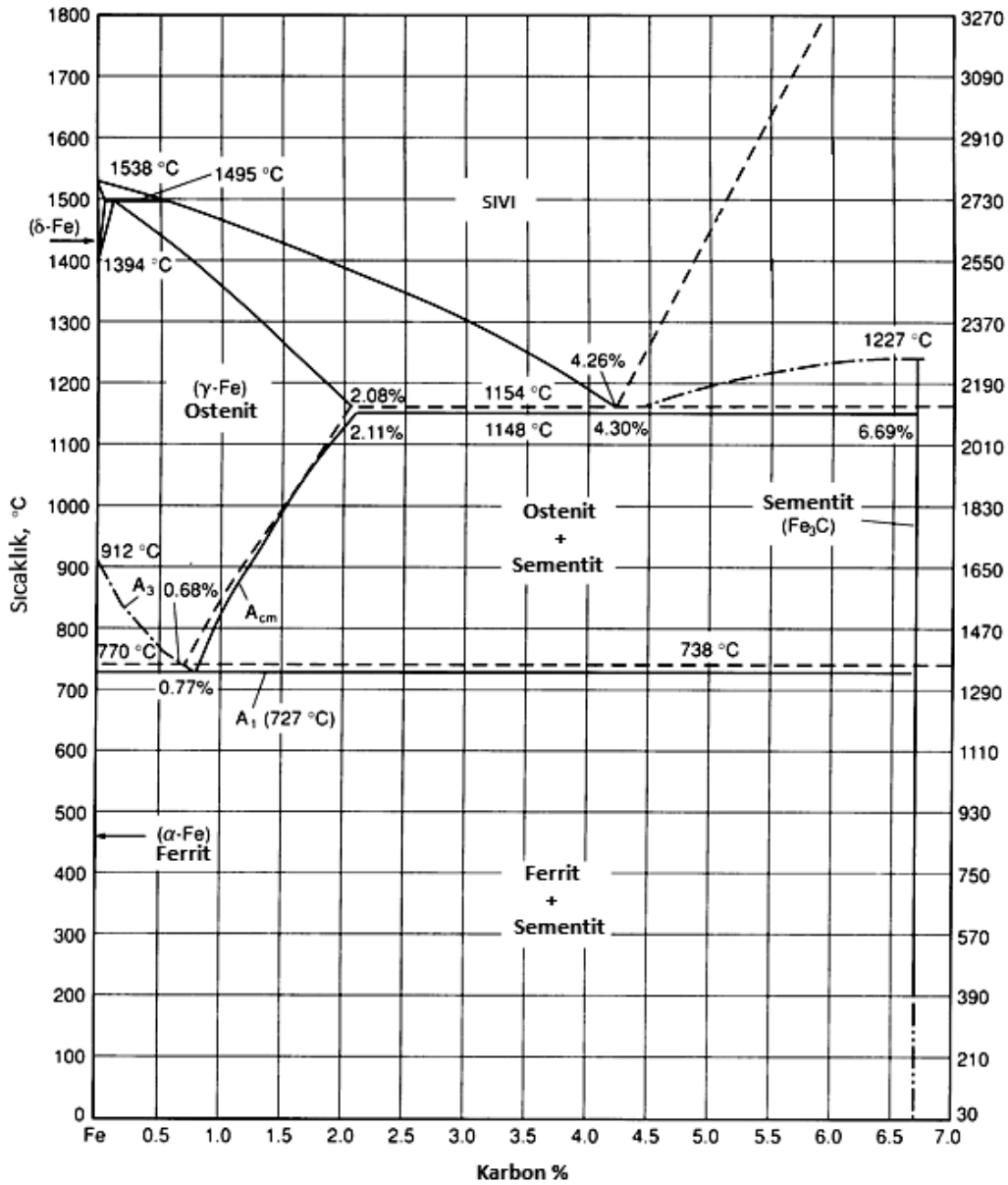


oluşan karbonmonoksit, kullanılan sementasyon sıcaklığında, ostenit faza getirilmiş çelik parçasının yüzeyinde parçalanır ve açığa çıkan atomik karbon (C) çelik bünyesine emilerek çözünür. Burada  $C_{(\text{Fe})}$ , ostenit fazda çözünen karbonu ifade etmektedir.



Karbon, yüksek konsantrasyondaki parça yüzeyinden düşük konsantrasyondaki fırın atmosferine geçer. Karbürleme yapılan parçaların sertleştirilmesi için su verme banyosuna alma ve sertleştirmek için yeniden ısıtma sırasında karbonsuzlaşma meydana gelebilir. Karbonsuzlaşma, çeliğin yüzeyindeki karbon oranının azalması demektir. Genellikle karbürleme yapılmış parçalarda istenmeyen bir durumdur. 700°C'nin üzerindeki fırın atmosferlerinde karbon ile reaksiyona girebilen ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  gibi) gazların bulunması durumunda meydana gelir (Parrish 1999). Çelik yüzeyindeki karbonsuzlaşma tabakası, sementasyon sonrası yapılacak sertleştirme işleminde martenzit yapıya dönüşmeyeceği için yüzeyde yumuşak bir bölge oluşur. Fırın atmosferinde endotermik gaz karışımı sağlayarak çelik

parçasının yüzeyi karbondioksit, oksijen ve su buharından korunmak suretiyle karbonsuzlaşma tabakasının oluşumu önlenbilir (Asil Çelik 1986). Kullanılan sementasyon sıcaklığında, ostenit fazda çözünebilir maksimum karbon miktarı demir-sementit denge diyagramında  $A_{cm}$  eğrisinden bulunabilir. Örneğin, %1.3 karbonlu çelik için sementasyon sıcaklığı 925°C'dir (Şekil 3.1) (ASM 1991). Bu sıcaklıkta, çelik parçasının yüzeyi yaklaşık %1.3 miktarına kadar karbon emmesi yaparken, parçasının çekirdek kısmı düşük karbon miktarını korumaya devam eder.



Şekil 3.1 Demir-sementit denge diyagramı (ASM 1991).

Sementasyon işleminden sonra, cidar bölgesindeki karbon miktarının yaklaşık %0,7 ila %0,8 arasında olması gerekir. Ötektoidüstü çeliklerde ağ şeklinde gevrek sementit oluşur, daha düşük karbon miktarlarında da maksimum sertliğe ulaşamaz (Topbaş 1998).

### 3.2 SEMENTASYON YÖNTEMLERİ

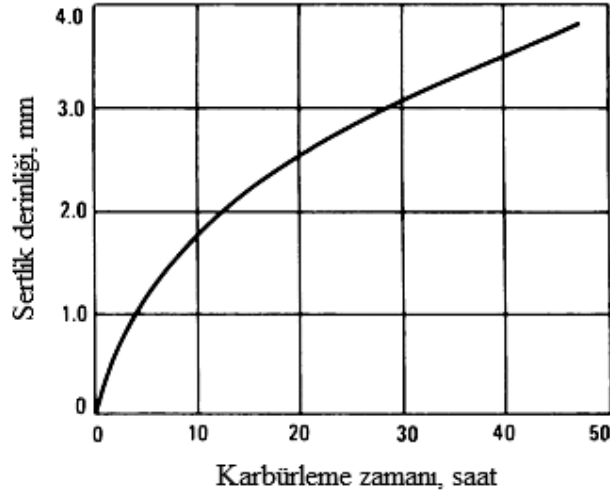
Sementasyon işlemi, katı, sıvı veya gaz formunda karbon verici ortamlarda gerçekleştirilebilir. Gaz sementasyon, en iyi kontrol edilebilen ve en ekonomik sementasyon yöntemidir. Karbon verici gaz olarak, karbonmonoksit (CO) ve gaz formunda hidrokarbon içeren gaz karışımları kullanılır. Sıvı sementasyon ortamı olarak daha çok sodyum siyanür ve potasyum siyanür gibi karbon verici maddeleri içeren ergitilmiş tuzlardan yararlanır. Aktifleştirici maddeler ilave ederek, karbon verme etkisi çok geniş sınırlar içerisinde değiştirilebilir. Tuz banyolarındaki sementasyon, özellikle küçük parçalar için uygundur ve sementasyon derinliğinin çok sık değiştirilebilir olma üstünlüğü vardır. Buna karşın, banyo buharı ve tuzların zehirli olması önemli bir sakıncadır. Katı karbon verici ortam daha çok el işçiliği gerektirir ve teknik olarak da daha zor uygulanır (Topbaş 1998).

#### 3.2.1 Katı Ortamda Sementasyon

Katı kömür tozlarından sıcaklığın etkisiyle beraber oluşan reaksiyonlarla karbonmonoksit açığa çıkarılması ve karbonmonoksitten karbonun ayrışarak, çelik yüzeyine difüzyonunun sağlanması ile karbürleme işlemi gerçekleştirilir. Karbonmonoksit oluşumu baryum karbonat, potasyum karbonat ve sodyum karbonat gibi katalizörler aracılığı ile hızlandırılabilir. Kömür tozu ile aktivatör olarak baryum karbonat kullanıldığında meydana gelen reaksiyonlar ile karbonmonoksit oluşumu 3.3 ve 3.4 denklemlerindeki gibi ifade edilmektedir (Thelning 1981).



İşlem sıcaklığı genellikle 815-955°C aralığındadır ve sıcaklık arttıkça elde edilebilen sertlik derinliği artmaktadır. Şekil 3.2'de 925°C'de zamana bağlı olarak katı karbürleme ile elde edilebilecek sertlik derinlikleri verilmektedir (Foreman 1991).



Şekil 3.2 925°C sıcaklıkta sertlik derinliğine zamanın etkisi (Foreman 1991).

Katı ortamda sementasyon metodunun en önemli avantajı, önceden hazırlanması gereken gaz atmosferine ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu metot çoğunlukla büyük parçaların sementasyonunda kullanılır. Ancak çelik parçasında hassas toleranslı (0,25 mm), ince sementasyon derinliği (0,75 mm'den aşağı) istendiği durumlar için pek uygun bir metot değildir. Yüzeydeki karbon miktarının kontrolü güçtür. Bu metodun kullanımındaki diğer bir dezavantaj ise, ısıtma ve soğutma için her defasında fazladan zamana ihtiyaç vardır (Tabur 2003).

### 3.2.2 Sıvı Ortamda Sementasyon

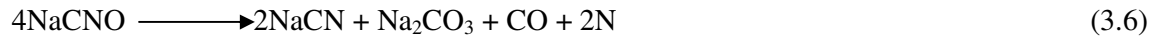
Çelik ve dökme demirlere uygulanabilen yöntem, sıvı banyo içerisinde ostenitlenen parçanın banyodan çıkarılarak hızlı bir şekilde soğutulması esasına dayanır. İlk önce parçalar 100-140°C'de ön tavlama tutulur. Parçalar ön tavlama işleminden sonra sudan arındırılmış bir tuz eriyiği içerisinde asılırlar. İşlem sıcaklığı 850-950°C'dir.

Sıvı karbürleme ile ince tabaka (0,9 mm'ye kadar) elde edebilmek için düşük sıcaklık banyoları (845-900°C), kalın tabaka (3 mm'ye) elde edebilmek için ise yüksek sıcaklık banyoları kullanılır (900-955°C). Çizelge 3.1'de iki banyo içeriği karşılaştırılmıştır (Godding 1991).

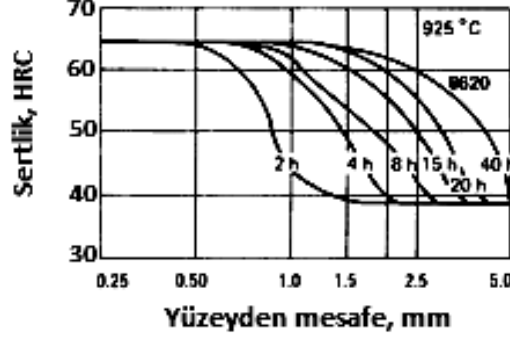
Çizelge 3.1 Düşük ve yüksek sıcaklık banyolarının karşılaştırılması (Godding 1991).

Eriyik	Banyo bileşimi, %	
	İnce tabaka, düşük sıcaklık (845-900°C)	Kalın tabaka, yüksek sıcaklık (900-955°C)
Sodyum siyanür	10–23	6–16
Baryum klorür	-	30–55
Diğer alkali metal tuzları <sup>(a)</sup>	0–10	0–10
Potasyum klorür	0–25	0–20
Sodyum klorür	20–40	0–20
Sodyum karbonat	30 (en çok)	30 (en çok)
Alkali metaller <sup>(b)</sup>	0–5	0–2
Sodyum siyanid	1 (en çok)	0,5 (en çok)
Ergimiş tuz banyosunun yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	1,76 (900°C'de)	2,0 (925°C'de)
(a) Kalsiyum ve stronsiyum klorür kullanılır. Kalsiyum klorür daha etkilidir, ancak çok fazla nem çekiyor olması kullanımını sınırlandırır.		
(b) Mangandioksit, sodyum florür ve sodyum fosfat karışımı.		

Tuz seçimi, istenilen sementasyon derinliğine ve sıcaklığına göre yapılmaktadır. Sıvı karbürleme banyosu için genellikle siyanür kullanılır. Siyanürle hazırlanan banyoda az da olsa azotun da difüzyonu söz konusudur. Sodyum siyanür ile hazırlanan banyoda meydana gelen reaksiyonlar ile karbonmonoksit oluşumu 3.5, 3.6 ve 3.7 denklemlerinde verilmiştir (ASM 1991).



İlk reaksiyon siyanür tuzu ile havanın oksijeni arasında olur. Açığa çıkan NaCNO ayrışarak CO ve atomik azot verir. 850-950°C'de ostenit fazdaki çelik, CO ile reaksiyona girerek karbonu bünyesine alır. Bu arada bir miktar azot da çelik tarafından emilir. Çeliğin karbon ve azot emme miktarı önemli ölçüde banyodaki siyanür oranına ve sementasyon sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.3'de, sıvı ortamda karbürleme süresinin artışı verilmiştir (ASM 1991).



Şekil 3.3 925°C sıcaklıkta SAE 8620 çeliğinin farklı sürelerde elde edilen sertlik değerleri ve sertlik derinlikleri (ASM 1991).

Tuz banyosu genellikle küçük ve orta ölçekli parçalarda kullanılır. Sementasyon derinliği az olan parçalarda daha ekonomiktir. Toplam işlem süresi diğer sementasyon yöntemlerine nazaran daha kısadır. Tuz, malzemeyi tam olarak sardığında sementasyon homojendir ve malzeme yüzeyi temiz kalır. Parçalar, kendi ağırlıklarıyla banyo içerisinde sallandıklarından daha az deforme olur. Bununla birlikte büyük sementasyon derinliklerinde maliyetin yüksek olması, siyanür tuzlarının zehirli olması, büyük parçalarda potanın büyüklüğü ve uygulamadaki zorluklar tuz banyosunun dezavantajlarıdır (Topbaş 1998).

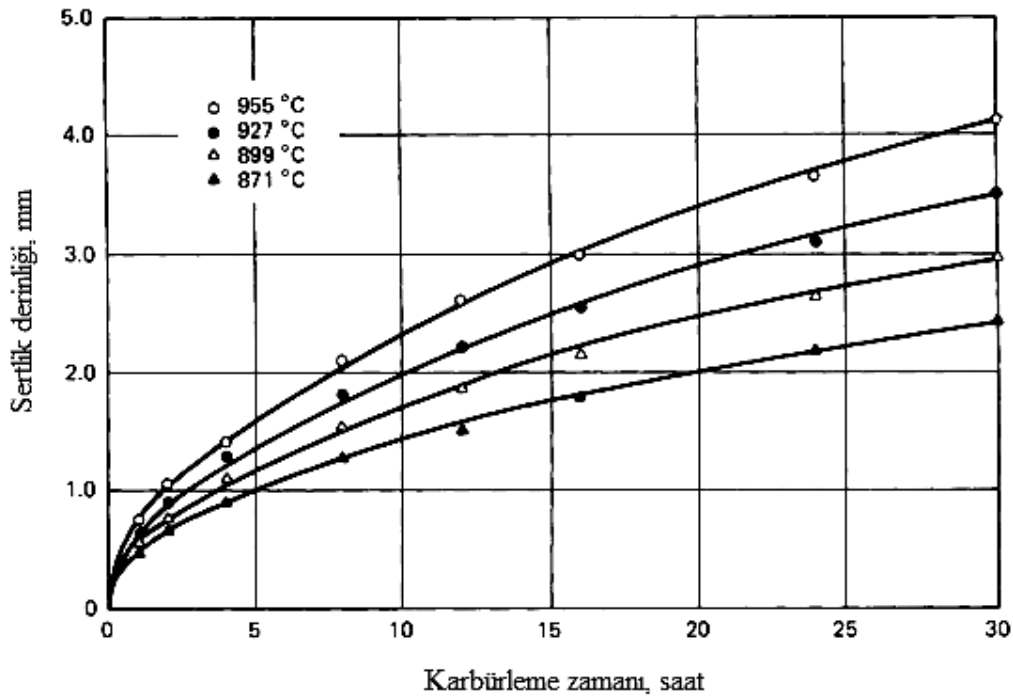
### 3.2.3 Gaz Ortamda Sementasyon

Karbonca zengin gaz atmosferi genellikle hidrokarbonlar, örneğin metan (CH<sub>4</sub>), propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) ve bütan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) gibi gazlar kullanılarak elde edilir. İşlem 850°C ve üzerinde gerçekleştirilir. İşlemin en büyük avantajı gaz atmosferinin kontrol edilebilirliğidir. Böylece çeliğin ostenit fazında çözüdürebileceği karbon oranından daha fazla serbest karbon oluşturulmaması ve dolayısı ile fırın içerisinde oluşabilecek kurum vb. en aza indirilebilmesidir. Propan kullanıldığında meydana gelen reaksiyonlar 3.8, 3.9 ve 3.10 denklemlerinde verilmiştir (Jackquet et al. 2002).



Karbürleme prosesi değişkenleri; sıcaklık, zaman ve atmosferdir. Sıcaklık artışına bağlı olarak karbon difüzyon oranı da artış gösterir. 925°C'deki karbon difüzyonu, 870°C'deki karbon difüzyonundan %40 daha fazla olmaktadır. Karbürleme için en yaygın kullanılan sıcaklık 925°C'dir. Bu sıcaklık, kısmen ısıya karşı dirençli fırın ekipmanlarını fazla bozmaksızın oldukça hızlı bir karbürleme sağlar. Karbürleme sıcaklığı, daha kısa sürelerde sertlik derinliği elde etmek için 955°C ya da 980°C' ye çıkabilmektedir.

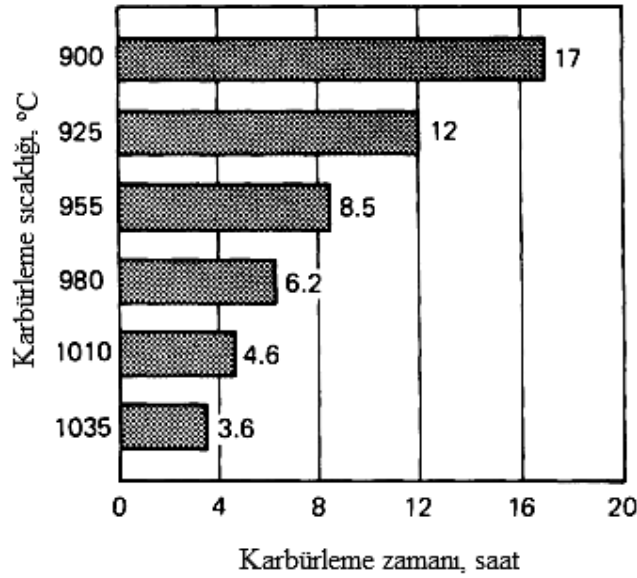
Kabuk derinliğine zaman ve sıcaklığın etkisi Şekil 3.4'te ve Çizelge 3.2'de verilmiştir (ASM 1991). Zaman ve sıcaklık arttıkça sertlik derinliğinin arttığı görülmüştür. SAE 8620 çeliğinde 1,5 mm sertlik derinliği elde edebilmek için zamana bağlı karbürleme sıcaklıkları sıcaklık artışı Şekil 3.5'te verilmiştir (ASM 1991). Sıcaklık artışı ile karbürleme zamanının azaldığı görülmektedir. Ağır küçük parçalar ya da geniş parçalarda karbürleme süresinde birkaç saatlik artış olabilir. Parçalar daha ısıtma sürecinde karbürlemeye maruz kalabilir. Benzer şekilde soğuma esnasında da ilave difüzyon ve karbon yer değişimleri olabilir. Böylece gerçek sertlik derinlikleri Çizelge 3.2'deki değerlerden farklı olabilir (ASM 1991, Sönmez 1996).



Şekil 3.4 Dört farklı sıcaklık için karbürleme zamanına bağlı olarak sertlik derinlikleri (ASM 1991).

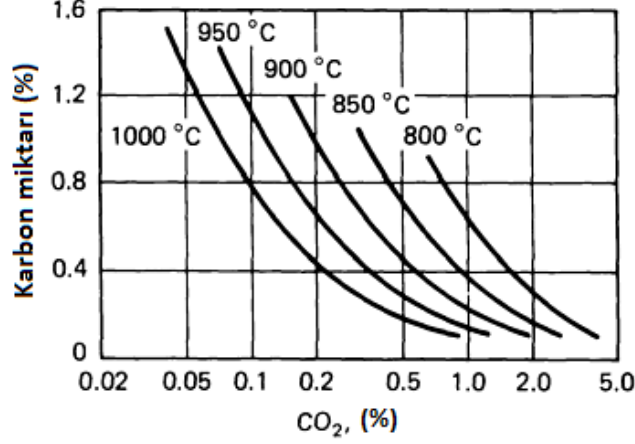
Çizelge 3.2 Dört farklı sıcaklık değeri ve farklı karbürleme zamanlarında elde edilen sertlik değerleri (ASM 1991).

Zaman, saat	871 °C	899 °C	927 °C	955 °C
	mm	mm	mm	mm
1	0.46	0.53	0.64	0.74
2	0.64	0.76	0.89	1.04
4	0.89	1.07	1.27	1.30
8	1.27	1.52	1.80	2.11
12	1.55	1.85	2.21	2.59
16	1.80	2.13	2.54	2.97
24	2.18	2.62	3.10	3.66

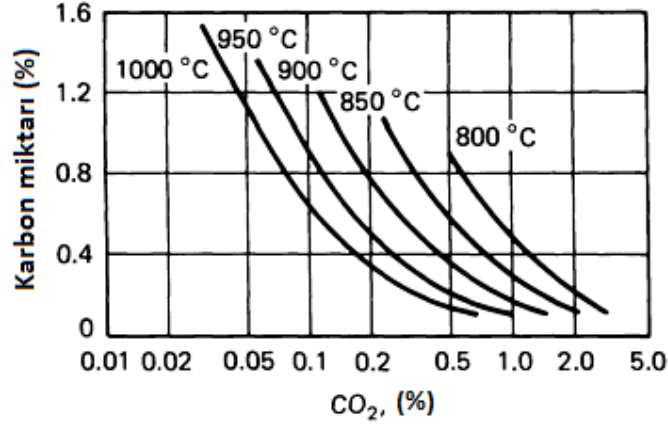


Şekil 3.5 SAE 8620 çeliğinin 1.5 mm sertlik derinliği elde edebilmek için zamana bağlı karbürleme sıcaklıkları (ASM 1991).

Propandan üretilen endotermik gazın karbon içeriği %23, metandan üretilen endotermik gazın karbon içeriği ise %20'dir. Bundan dolayı propandan üretilen atmosferin karbon potansiyeline bağlı olarak CO<sub>2</sub> içeriği, metana göre daha yüksektir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de propan ve metandan üretilen endotermik gaz için CO<sub>2</sub> miktarı ve karbon miktarı ilişkisi verilmiştir (ASM 1991).

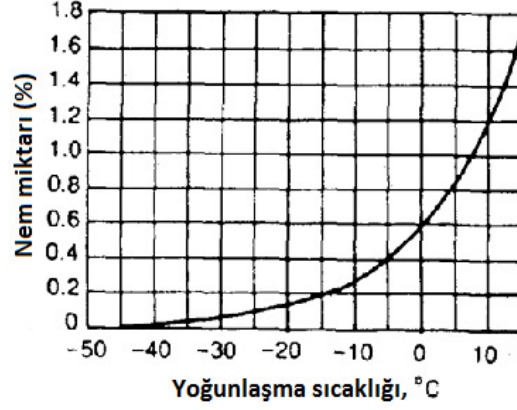


Şekil 3.6 Propandan türetilen endotermik gaz için CO<sub>2</sub> miktarı ve karbon miktarı ilişkisi (ASM 1991).



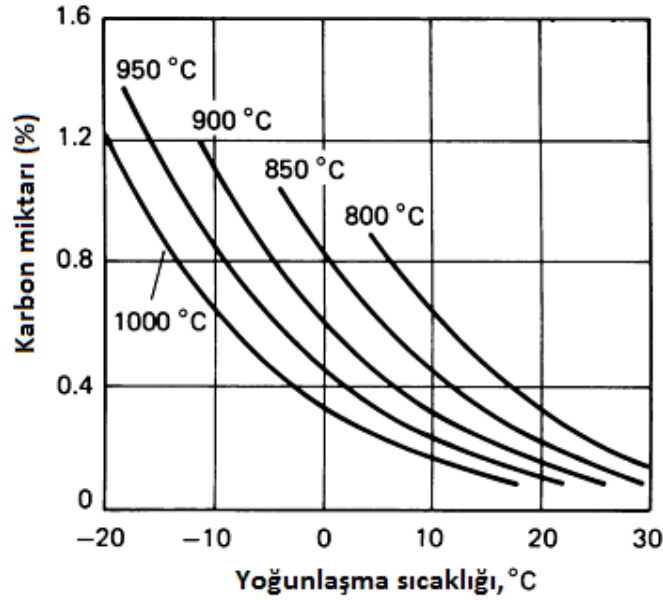
Şekil 3.7 Metandan türetilen endotermik gaz için CO<sub>2</sub> miktarı ve karbon miktarı ilişkisi (ASM 1991).

Fırın atmosferinde oluşan gaz bileşiminin, özellikle nem miktarının çelik yüzeyinde elde edilecek karbon miktarına önemli etkisi vardır. Nem miktarı ise, gazın yoğunlaşma sıcaklığının tespiti ile ölçülebilir. Yoğunlaşma sıcaklığı, su damlacıklarının gaz karışımından çökeldiği sıcaklıktır. Şekil 3.8'de nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı arasındaki ilişki gösterilmiştir (ASM 1991).



Şekil 3.8 Nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı ilişkisi (ASM 1991).

Farklı karbürleme sıcaklıklarında yoğunlaşma sıcaklığı ve yüzeyde elde edilecek karbon miktarı Şekil 3.9'da verilmiştir (ASM 1991).



Şekil 3.9 Propandan türetilen endotermik gaz için yoğunlaşma sıcaklığı karbon miktarı ilişkisi (ASM 1991).

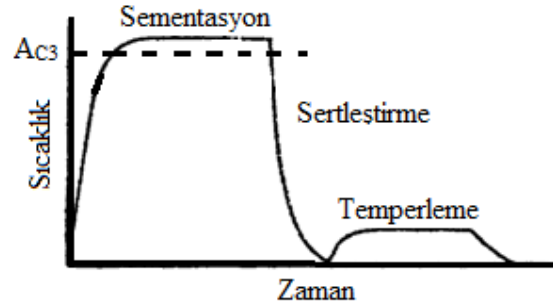
### 3.3 SERTLEŞTİRME

Sertleştirme, çeliklerin A<sub>3</sub> veya A<sub>1</sub> sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklıktan, yüzeyde veya aynı zamanda kesitte önemli sertlik artışı sağlayacak bir hızda soğutulmasıdır. Böylece genelde martenzite dönüşen iç yapıda, ferrit ve perlit oluşumu engellenir.

Sementasyon sonunda, dış tabakası yaklaşık % 0,8, çekirdek kısmı ise % 0,2 karbon içeren farklı özelliklere sahip bir yapı elde edilir. Bu farklı karbon oranları sonucunda, su verme ve martenzit dönüşüm sıcaklıkları da farklı olur. Çekirdeğe göre sementasyon tabakasının sertleştirme sıcaklığı yaklaşık 100°C, martenzit başlangıç sıcaklığı ( $M_s$ ) ise yaklaşık 250°C daha düşüktür. İş parçası sementasyon sıcaklığından doğrudan doğruya suya veya yağa konulursa, dış tabaka çok sert ve gevrek olur. Sementasyon işleminde kullanılan yüksek sıcaklıklar ve uzun süreler nedeniyle iç yapı kabalaşır ve bu yüzden sertleştirme çok yüksek sıcaklıklarda yapılan normal sertleştirmenin özelliklerini gösterir. Bu nedenle sementasyon sonucunda, basit bir su verme işleminden daha farklı özel ısıl işlemler yapılır. Sertleştirme işlemi parçanın yüzeyinde veya çekirdeğinde veya her iki bölgesinde elde edilmesi istenen sertlik değerine bağlı olarak çeşitli şekillerde yapılır.

### 3.3.1 Doğrudan Sertleştirme

Sementasyon sonrası, malzeme sementasyon sıcaklığından uygun ortamda (yağ, su) doğrudan soğutulur ve temperlenir (Şekil 3.10). Uzun ve aşırı ısıtma nedeniyle kabukta kaba martenzit ve çok miktarda kalıntı ostenit, göbekte de tane irileşmesine bağlı olarak tokluk düşüşü görülür. Bu yöntem ince taneli çelikler için pratik ve ekonomik bir yöntemdir.

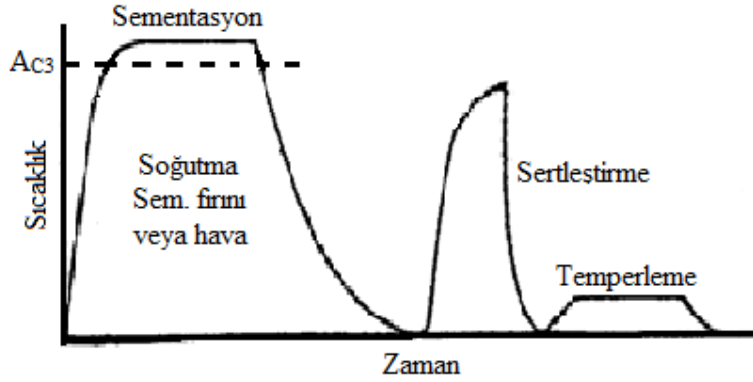


Şekil 3.10 Sementasyon sonrası doğrudan sertleştirme (Asil Çelik 1986).

### 3.3.2 Basit Sertleştirme

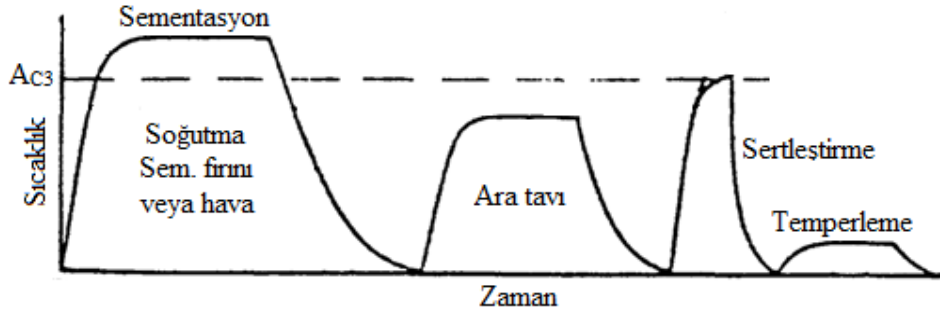
Sementasyon sonrası parça sementasyon fırınında veya havada soğumaya bırakılır. Daha sonra, isteğe göre parçanın yüzeyinin sertleştirilmesi için yüzey dönüşüm sıcaklığına ısıtılır, uygun ortamda soğutulur ve temperlenir (Şekil 3.11). Tekrar ısıtma ile iç bölgeler ince taneli

bir yapıya sahip olur. Yüzey bölgesinde ince (iğneli) martenzitik yapı elde edilir. Bu yöntem farklı kesitteki parçalarda çarpılmaların istenmediği hallerde uygulanır.



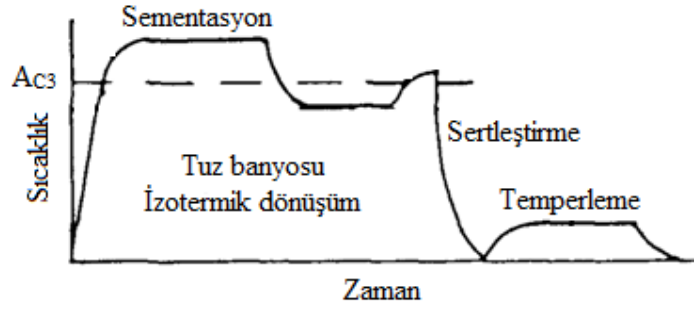
Şekil 3.11 Sementasyon sıcaklığından soğutma sonrası sertleştirme (Asil Çelik 1986).

Bir ara tavlamadan sonra, bir de izotermik dönüşüm sağlandıktan sonra yapılan iki basit sertleştirme yöntemi vardır. Ara tavlamadan sonra yapılan basit sertleştirmede, çelik karbürlemeden sonra, havada soğumaya bırakılır. Sonra  $A_1$  ötektoid sıcaklığı altında genellikle 630-650°C sıcaklıkta ara tavi yapılır. Parçanın yüzeyinin sertleştirilmesi için, yüzey dönüşüm sıcaklığına ısıtılır, uygun ortamda soğutulur ve temperlenir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Ara tavlamadan sonra sertleştirme (Asil Çelik 1986).

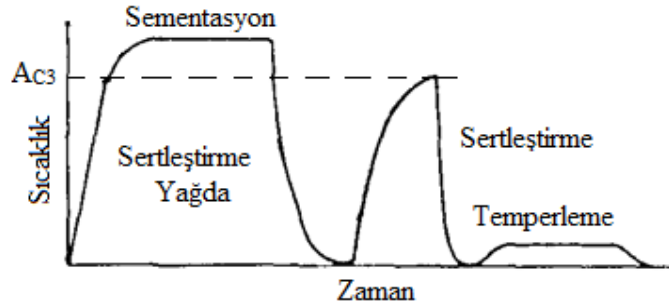
İzotermik dönüşüm sağlandıktan sonra yapılan basit sertleştirmede, sementasyon sonrası, parça, 650-680°C sıcaklıkta tavllanır, daha sonra yüzey dönüşüm sıcaklığı altında 500-650°C sıcaklıkta uygun bir tuz banyosunda perlit yapının izotermik dönüşümü tamamlanincaya kadar bekletilir. Ostenitin izotermik dönüşümüyle iç bölgelerde iyi özellikte, ince lamelli perlitik bir iç yapı elde edilir. Yüzey sertleştirilmesi için gerekli sıcaklığa tekrar ısıtılır, uygun ortamda soğutulur ve temperlenir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 İzotermik dönüşüm sonrası sertleştirme (Asil Çelik 1986).

### 3.3.3 Çift Sertleştirme

Sementasyon sonrası malzeme doğrudan sertleştirilir. İkinci sertleştirme işleminden önce parça 650-680°C sıcaklıkta gerilme giderme tavlamasına tabi tutulur. Daha sonra, yüzey dönüşüm sıcaklığına kadar ısıtılarak tekrar sertleştirilir ve temperlenir (Şekil 3.14). Yüzey bölgesinde iyi özellikte ince martenzitik yapı elde edilir.



Şekil 3.14 Sementasyon sıcaklığından soğutma sonrası çift sertleştirme (Asil Çelik 1986).

### 3.3.4 Temperleme

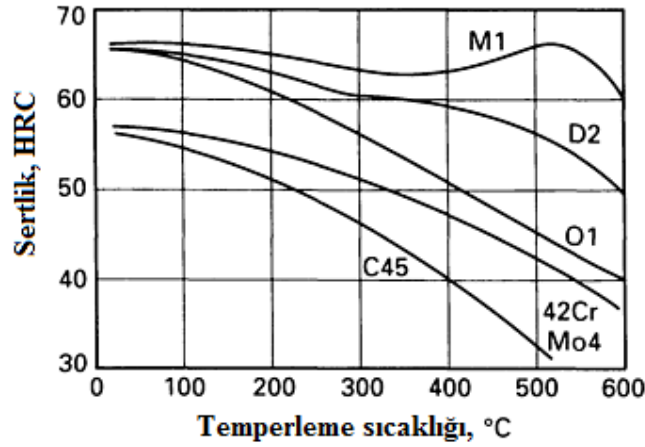
Temperleme işlemi, sertleştirme işlemi sonrası oluşan sert ve kırılgan martenzit yapıdaki çeliğin tokluğunun artırılması için uygulanır. Çeliğin tokluğunun artışı ile sertliğinde de bir miktar azalma meydana gelir. Sertleştirme sonrası temperleme işlemi  $A_1$  sıcaklığının altında belirli sürelerde uygulanır (ASM 1991). Thelning (1984), temperleme prosesi mekanizmalarını 3 aşamada ifade etmiştir:

1. 80-160°C:  $\epsilon$ -karbür ( $Fe_{2-4}C$ ) çökmesi sonucu martenzit içindeki karbon yaklaşık %0.3'e kadar azalır.
2. 230-280°C: Kalıntı ostenit beynite dönüşür.

3.1. 160-400°C: Fe<sub>3</sub>C oluşur ve gelişir.

3.2. 400-700°C: Fe<sub>3</sub>C küreselleşir ve gelişmeye devam eder.

Bazı çeliklerin 2 saat sürede farklı sıcaklıklarda temperlenmesi sonucu sertlik değişimleri Şekil 3.15'te verilmiştir (Thelning 1984). Temperleme sıcaklığı arttıkça sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.15 Bazı çeliklerin temperleme eğrileri (Thelning 1984).

Hollomon ve Jaffe (1945), temperleme sıcaklığı ve süresi ile sertlik ilişkisini, temperleme parametresi P'nin bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir.

$$P=T(k+\log t) \quad (3.11)$$

Yukarıdaki eşitlikte, T sıcaklık (Kelvin), k sabit (yaklaşık 20), t süredir (saat). Sementasyon çeliklerine temperleme işlemi 160-220°C sıcaklık aralığında 1-2 saat süre ile uygulanır. Sertlik değerinin 60 HRC istendiği durumda temperleme sıcaklığı 180°C'den fazla olmamalıdır (Asil Çelik 1986).

### 3.4 SEMENTASYON ÇELİKLERİ

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tokluk özelliğinin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalinde kullanılan alaşımlı veya alaşımsız çeliklerdir. Sementasyon çelikleri; dişliler, miller, zincir

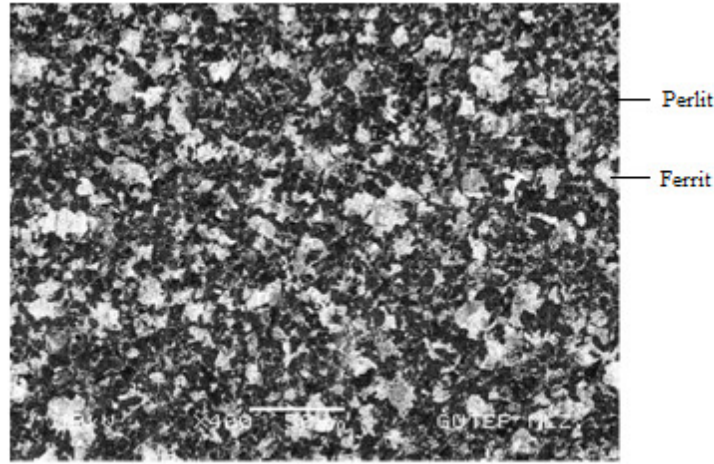
dişlileri, zincir baklaları, diskler, kılavuz yatakları, kesici takımlar ve makaralar gibi makine elemanlarının imalinde kullanılırlar.

Avantajları; Parçanın işlenmesi kolay olup özel pasta veya elektrolitik bakır ile kaplanarak kısmi sertleştirme de yapılabilir. Çarpılmalar oldukça azdır ve çeliğin iç kısımları kolayca işlenebilir. Yüksek karbonlu çeliklere göre daha ucuzdur.

Dezavantajları; Çelik homojen olmayıp yapısında değişik Fe-C alaşımları mevcuttur. Uygun ısıl işlem tecrübe ister ve pahalıdır. Semente edilmiş parçalar taşlamadan önce dikkatli olarak düzeltilmelidirler.

### 3.4.1 Sementasyon Çeliğinin Mikroyapısı

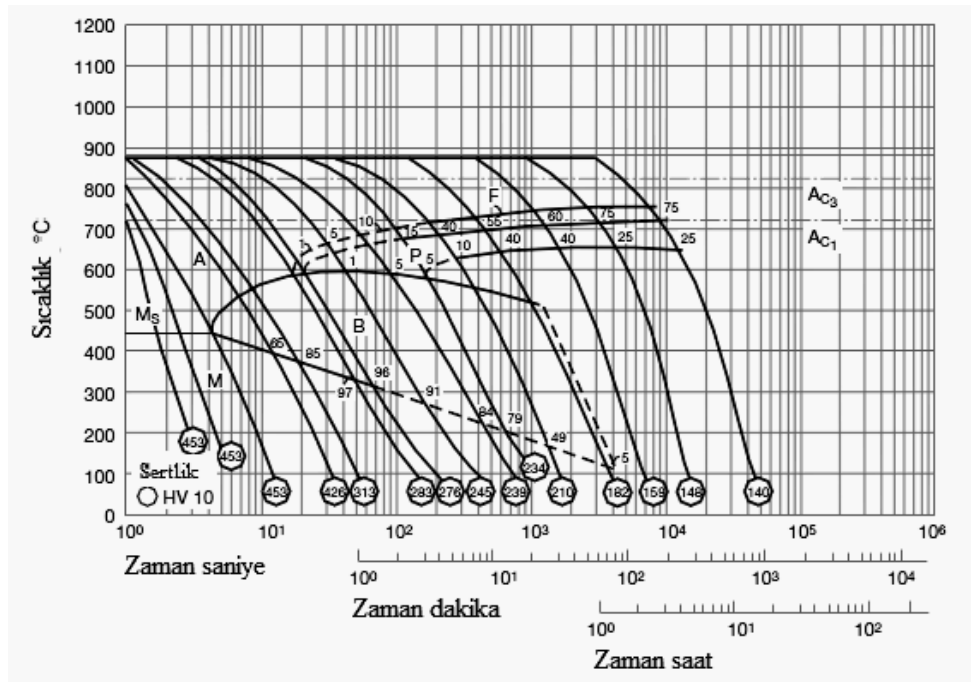
Çeliğin en önemli bileşenleri ferrit ve sementittir ( $Fe_3C$ ). Ferrit ve  $Fe_3C$  değişik şekillerde karışmış olarak bulunabilir. Ferrit, hacim merkezli kübik yapıli demirin içerisinde başta karbon olmak üzere değişik elementleri çözüdüdüğü katı çözeltilidir. Alaşımsız çeliklerde oda sıcaklığında ferrit %0.005 karbon çözebilir.  $Fe_3C$ , demirin karbon ile yapmış olduğu bir ara bileşik olup ortorombik kristal kafesli ve yaklaşık 800 HV sertliğe sahiptir (Metals Handbook 1998). Perlit ise, ötektoit orandaki çeliğin  $A_{C1}$  sıcaklığında dönüşümü ile oluşur. Levha şeklinde bir sıra sementit ve bir sıra ferritten meydana gelir. Şekil 3.16'da SAE 8620 çeliğinin mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 3.16 SAE 8620 çeliğinin SEM görüntüsü (x400) (Tabur 2008).

Ferrit ve perlit karışımı yapı, ötektoidalı çeliklerde görülür. Perlit ve ikincil Fe<sub>3</sub>C, ötektoitüstü çeliklerde soğuma sırasında ostenitin karbon çözündürülebilirliğinin azalması ve 723°C'de en fazla %0.8 karbon çözündürebilmesi nedeniyle bu oranın üzerindeki karbonun kristal kafesinin dışına atılması (ikincil Fe<sub>3</sub>C) ile meydana gelir.

Beynit, çeliğin zaman-sıcaklık-dönüşüm (ZSD) diyagramında perlit burnu altı ile martenzit oluşumu başlangıç sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta, sabit sıcaklık dönüşümü ile elde edilir Şekil 3.17'de SAE 8620 çeliğinin ZSD diyagramı verilmiştir. Beynit içinde Fe<sub>3</sub>C'ler levha şeklinde oluşamaz, parçalı olarak ferrit içinde dağılır.



Şekil 3.17 SAE 8620 çeliğinin ZSD diyagramı.

Martenzit, çeliğin ostenit fazından karbon atomlarının difüzyonuna izin vermeden soğutulmasıyla elde edilen, karbona aşırı doymuş fazdır. Difüzyona izin verilmeden oluşturulduğundan kararsız bir yapıya sahiptir. Martenzit sert, kırılman yüksek bir mikroyapıdır. Bunun nedeni; tane boyutunun küçük olması, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve iç gerilmelerdir. Martenzit dönüşümü için sıcaklık sıfırın altındaki sıcaklıklarda olabilir. Martenzit, çeliğin karbon oranına bağlı olarak, iğneli, karışık ve levha şeklinde oluşabilir. Çeliğin karbon oranı %0.6 dan az ise iğneli, %1.2 den fazla ise levha, %0.6-1.2 arasında ise

karışık oluşur (Parrish 1999). Levha martenzitte çatlaklar oluştuğu için kabuk sertleştirme işlemlerinde yüzeyde %0.6–0.8 karbonlu martenzit tercih edilmektedir.

Isıl işlem doğru uygulanmış bir çeliğin mikroyapısı ağırlıklı olarak temperlenmiş martenzittir. Ancak yüzeyden çekirdeğe doğru martenzitin yapısı, miktarı ve özellikleri değişir. Sementasyon işlemi yapılmış çeliklerin yüzey kısmında özelliklerini ciddi olarak etkileyen diğer mikroyapılar da meydana gelebilir. Bunlar; kalıntı ostenit, kaba karbürler, tane sınırı karbürleri, fosfor segregasyonu ve yüzey oksitleri olabilir (Krauss 1991).

Çekirdek mikroyapıları, sertleşebilirliğe bağlı olarak, temperlenmiş martenzit, beynit veya ferrit ve perlitten meydana gelebilir. Oluşan bu kabuk ve çekirdek mikroyapıları, çeliğin mikroyapısında meydana gelen kalıntı gerilmelerin büyüklüğünü, malzemenin yorulma dayanımını, temas yorulma dayanımını, sertlik ve aşınma dayanımını etkiler (Parrish 1999). Sementasyon işleminden sonra, karbon miktarı genellikle yüzeyde en yüksek olacak şekilde çekirdeğe doğru azalır. Meydana gelen sertlik değerleri de karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Kalıntı ostenit; dönüşüm sertleştirilmesi esnasında martenzite dönüşmeyip, oda sıcaklığına kadar kalabilen ostenittir. Yüzey sertleştirilmesi yapılmış parçalarda kalıntı ostenitin meydana gelmesindeki en önemli faktör ostenitin martenzite dönüşüm sıcaklıkları olan ( $M_s$ ) ve ( $M_f$ )'dir. (Krauss 1995). Çeliklerde, ostenit  $A_{c3}$  ve  $A_{cm}$  sıcaklıklarının üzerinde kararlı haldedir. Bu sıcaklıklardan soğutmakla, ostenit çeliğin kimyasal bileşimine ve soğutma hızına bağlı olarak kararsız ve yeni mikroyapılara dönüşür. Dönüşüm difüzyona müsaade edecek hızda olursa, ferrit, perlit ve beynit gibi yapılar meydana gelir. Bunlar yüksek sıcaklık dönüşüm ürünleridir. Düşük karbonlu çeliklerde bu dönüşümler  $A_{c3}$  ile 400°C arasındaki sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Çeliklerin sertleştirilmesinde ise, ostenitin kritik soğuma hızının üzerindeki bir hızda soğutulmasıyla (difüzyon için gerekli zaman verilmeden) martenzitik bir yapının oluşması hedeflenir.  $M_f$ , su verme ortam sıcaklığının altına düşerse, ostenitin martenzite dönüşümü tamamlanamaz. Karbon oranı %0.5-0.6'dan fazla olan çeliklerde, yapının tamamıyla martenzit olması için çeliğin sıfırın altındaki sıcaklıklara kadar soğutulması gerekir. Düşük karbonlu az alaşımlı çeliklerin martenzit dönüşüm aralığı 450° ile 200°C iken yüksek karbonlu çeliklerin martenzit dönüşüm aralığı ise 200°C ile -100°C arasındadır.  $M_f$  bazı çeliklerde -200°C'nin altına kadar düşmektedir.  $M_f$  sıcaklığının karbon oranına bağlı olarak oda sıcaklığının altına düşmesi yapıda kalıntı ostenit miktarının artmasına ve sertliğin

düşmesine neden olmaktadır. Sementasyon işleminde, yüzey tabakasının karbon konsantrasyonunun %0.7 C'ü aşması  $M_f$  sıcaklığını oldukça aşağıya çeker. % 0.7 karbonlu çelik için  $M_f$  sıcaklığı 20°C'nin altında olduğundan, oda sıcaklığına soğutmakla ostenitin martenzite dönüşümünün tamamlanmasına izin verilmiş olmaz. Sonuçta mikroyapıda ostenit kalır. Böylece sementasyon yapılmış çeliklerin mikroyapıları; temperlenmiş martenzit ve kalıntı ostenitten meydana gelmektedir. Diğer mikroyapısal bileşenler de bulunabilir; fakat mekanik özelliklere, temperlenmiş martenzitten sonra en çok kalıntı ostenit etki eder (Asi 2004).

### 3.4.2 SAE 8620 Sementasyon Çeliği

SAE 8620 sementasyon çeliğinin uluslararası standartlardaki karşılıkları Çizelge 3.3'de, kimyasal bileşimi Çizelge 3.4'de, 200°C tavlandıktan sonra çapa bağlı olarak çekme dayanımları Çizelge 3.5'de, sertleşebilirlik bandı Şekil 3.18'de ve ısıl işlem şartları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.3 SAE 8620 çeliğinin uluslararası standartlardaki karşılıkları.

Çeliğin kısa gösterilişi		Almanya	Fransa	İtalya	İspanya	İngiltere
Adı	No					
20NiCrMo2-2	1.6523	21NiCrMo2	20NCD2	20NiCrMo2	20NiCrMo2	805M20

Çizelge 3.4 SAE 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Çeliğin kısa gösterilişi		Kütlece bileşim %							
Adı	No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
20NiCrMo2-2	1.6523	0.17	0.40	0.65	0.035	≤ 0.035	0.35	0.15	0.40
		0.23		0.95			0.70	0.25	0.70

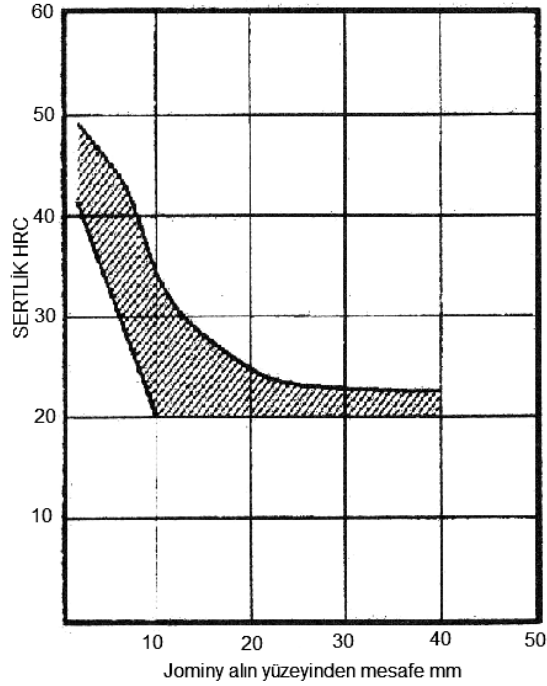
Çizelge 3.5 SAE 8620 çeliğinin 200°C tavlandıktan sonra çapa bağlı olarak çekme dayanımları.

	$d \leq 16\text{mm}$	$16\text{mm} \leq d \leq 40\text{mm}$	$40\text{mm} \leq d \leq 100\text{mm}$
<b>R<sub>m</sub> min</b> (N/mm <sup>2</sup> )	1100	800	700

Çizelge 3.6 SAE 8620 çeliğinin ısıtım şartları.

Çeliğın kısa gösterilişı		Su verme	Karbürleme sıcaklığı	Merkez sertleştirme sıcaklığı	Yüzey sertleştirme sıcaklığı	Tavlama
Adı	No	°C	°C	°C	°C	°C
20NiCrMo2-2	1.6523	920	880-980	860-900	780-820	150-200

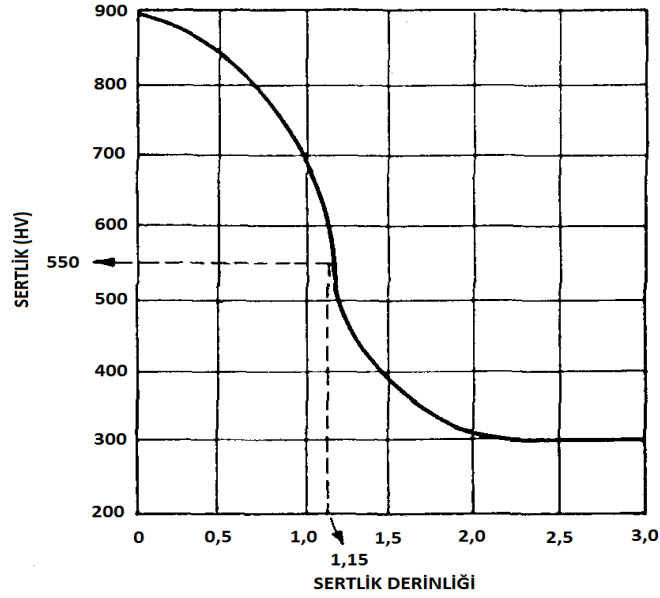
SAE 8620 sementasyon çeliğinin sertleşebilirlik bandı Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 SAE 8620 çeliğinin Jominy sertlik bandı (Topbaş 1998).

### 3.5 ETKİLİ SERTLİK DERİNLİĞİ

Sementasyon işleminden sonra, karbon miktarı genellikle yüzeyde en yüksek olacak şekilde çekirdeğe doğru azalır. Meydana gelen sertlik değerleri de karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Sertleşme kabiliyeti de denilen sertleşme derinliği ise, sertliğin öngörülen bir değeri aştığı kenar tabakasının kalınlığıdır. Etkili sementasyon derinliği, sementasyon işleminden sonra, belirli bir sertlik değeri için tarif edilir (Şekil 3.15). TS EN ISO 2639-2006'ya göre "etkili sementasyon derinliği; Vickers sertliği 550 HV olan karbürlenmiş ve sertleştirilmiş tabaka ile yüzey arasındaki dikey uzaklık" olarak tarif edilmektedir.



Şekil 3.15 Etkili sementasyon derinliğine bir örnek (Asil Çelik 1986).

Difüzyon eşitliği ile sementasyon derinliğinin hesaplanması mümkündür:

$$(x = k \sqrt{t}) \quad (3.12)$$

Burada; x sementasyon derinliğini, t sementasyon süresini verir, k ise sementasyon sıcaklığına bağlı sabittir. Çizelge 3.7’de sementasyon sıcaklığına bağlı k sabiti değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 Sementasyon sıcaklığına bağlı k sabiti değerleri.

Sementasyon sıcaklığı °C	871	899	927
k sabiti	0,46	0,53	0,64

Etkili sementasyon derinliğine etki eden faktörler; sementasyon sıcaklığı, sementasyon süresi, karbürleme ortamının karbon potansiyeli, çeliğin kimyasal bileşimi, parçanın şekli ve büyüklüğü ve su verme esnasındaki soğutma hızıdır (ASM 1991).

## BÖLÜM 4

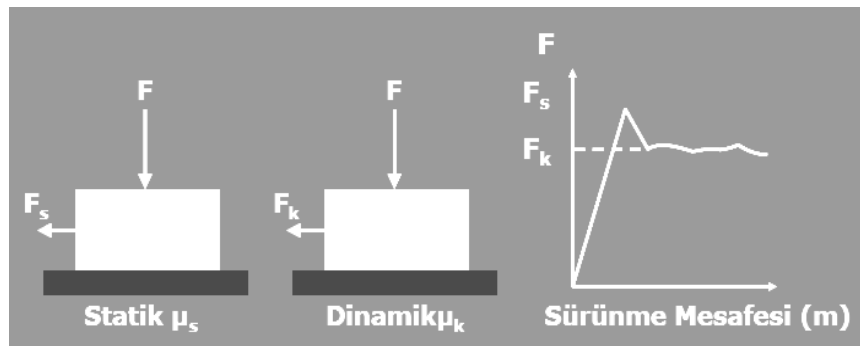
### SÜRTÜNME VE AŞINMA

#### 4.1 SÜRTÜNME

Sürtünme Latince sürtme, ovalama anlamına gelen fricaire kelimesinden gelir. Birbirleri ile temasta olan ve aralarında bağıl hareket yapan cisimlerin hareketlerine ters yönde etki eden kuvvete "sürtünme kuvveti" veya "sürtünme" denir. Gaz-katı arasındaki sürtünme aerodinamik sürtünme, sıvı-katı arasındaki sürtünme sıvı sürtünme, tek bir katı, sıvı veya gaz içinde sürtünme ise iç sürtünme olarak tanımlanır. Birbiri ile temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir (ASM 1992, Akkurt 1992, Selçuk 1991, İpek 1992, Yıldız 2006). Sürtünmenin temel konuları şunlardır:

- Dinamik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti cisimlere gelen normal kuvvet ile doğru orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti temas alanından bağımsızdır.
  - Statik sürtünme dinamik sürtünmeden daha büyüktür.

Şekil 4.1’de statik ve dinamik sürtünme kuvvetlerinin birbirleriyle olan ilişkisi verilmiştir. Bu eşitliklerde;  $F$  normal kuvveti,  $F_s$  statik sürtünme kuvvetini,  $F_k$  dinamik sürtünme kuvvetini,  $\mu_s$  statik sürtünme katsayısını,  $\mu_k$  ise dinamik sürtünme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 4.1 Statik ve dinamik sürtünme kuvveti ilişkisi (Ay 2006).

Sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), kayma mesafesi ve süresinin, temas yüzeyinin sertliği, pürüzlülüğü ve ortalama tane büyüklüğünün artışına bağlı olarak belirli bir değere kadar artar ve daha sonra sabit bir değerde devam eder. Sürtünme nedeniyle meydana gelen güç kaybını azaltabilmek için sürtünme katsayısının değerini azaltmak gerekir. Sürtünme katsayısının azaltılması; yüzeylerin çok hassas işlenmesi, yüzeyler arasında sürtünme katsayısı küçük olan yağlayıcılar konulması ve yüzeyler arasında yuvarlanma sürtünmesi açığa çıkaran yuvarlanma elemanları konulması suretiyle sağlanabilir. Bazı sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Bazı sürtünme katsayısı değerleri (ASM 1992, Akbulut 2007).

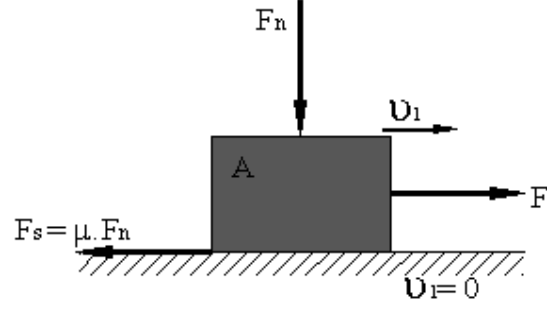
Çok iyi bir yağlama durumunda	0.03
Kuru ortamda	0.5-0.7
Rahat bir insan yürüyüşünde	0.2-0.3
Buz üstünde yürümede	0.05
Frenlemede	0.3-0.6

Sürtünme temas alanı yüzey yapısına göre değişir. Gerçek temas alanı görünen yüzeyden daha küçüktür. Yüzey pürüzlülüğü veya yüzeyin şekli ve mikroyapısıyla birlikte sürtünmeyi etkiler. Çok iyi işlenmiş bir yüzeyde bile tepecik ve çukurlar bulunur. Bu süreksizlikler malzemenin mikroyapısı ve bileşimine de bağlıdır (ASM 1992, Akbulut 2007). İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru sürtünme, sınır sürtünme ve sıvı sürtünme olmak üzere üç halde incelenir.

#### 4.1.1 Kuru Sürtünme

Birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Aslında yüzeylerin arasında atmosferik elementlerin etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları vardır. Elektronik mikroskopları ile görülen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir (ASM 1992).

Temasta olan iki yüzey Şekil 4.2’de gösterildiği gibi normal kuvvetinin etkisi altında ise temas yüzeyleri arasında harekete karşı bir sürtünme kuvveti oluşur. Oluşan sürtünme kuvveti değeri aşağıda ifade edilmiştir.



Şekil 4.2 Kuru sürtünme modeli.

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (4.1)$$

$F_n$  cisme uygulanan normal kuvveti ifade etmektedir. Şekil 4.2'deki A cisminde  $F$  kuvveti uygulanırsa iki durum ortaya çıkabilir:

- $F_n > F$  durumunda cisimler birbiri üzerinde kaymaz. Ancak hareket olanağı olduğundan yüzeyler arasında statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir.

- $F_s \leq F$  durumunda ise  $F$  kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri üzerinde kayar. Bu durumda yüzeyler arasındaki sürtünme dinamik sürtünme olarak adlandırılır. Aşınma, sıcaklık artışı ve enerji kaybı gibi olaylar dinamik sürtünme halinde ortaya çıkar.

#### 4.1.2 Sınır Sürtünme

Yüzeyler arasında yağlayıcı bir madde bulunduğu halde sıvı sürtünme hali meydana gelmediği takdirde sınır sürtünme hali ortaya çıkar. Pratikte çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0.02 ile 0.1 arasında değişir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde bulunması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışır (Akkurt 2000, Selçuk 1991, İpek 1992, Yıldız 2006).

#### 4.1.3 Sıvı Sürtünme

Sıvı sürtünme, izafi hareket yapan yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir. Sürtünme doğrudan doğruya yağlama yağının tabakaları arasında olur. Cismin hareketine karşı koyan direnç kuvveti yağ tabakaları arasındaki kayma

gerilmesine bağlıdır. Yüzeylerin pürüzlülüğü göz önüne alınrsa, analitik bakımdan sıvı sürtünmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

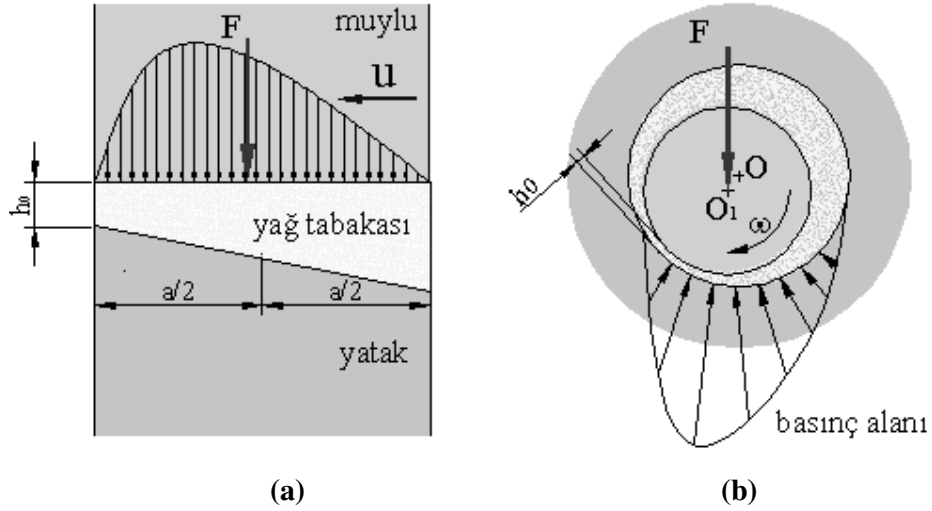
$$H_0 > R_{t1} + R_{t2} \quad (4.2)$$

Burada,  $H_0$  minimum yağ tabakası kalınlığını,  $R_{t1}$  ve  $R_{t2}$  her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğünü ifade etmektedir (ASM 1992).

Sıvı sürtünmenin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Basınç oluşumu hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

#### 4.1.3.1 Hidrodinamik Sıvı Sürtünme

Yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basıncılı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde gerçekleşir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Hidrodinamik sıvı sürtünme a) Eksenel yatak b) Radyal yatak (Akkurt 2000).

#### 4.1.3.2 Hidrostatik Sıvı Sürtünme

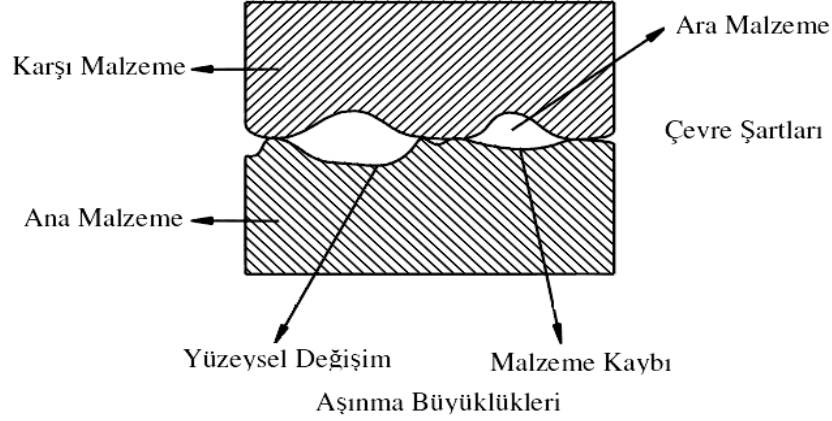
Hidrostatik sıvı sürtünme halinde, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç, bir yüksek basınçlı pompa vasıtası ile dışardan sağlanır ve yağ basınç ile yüzeyler arasına gönderilir. Bu durumda bütün sistemlerde, yüzeyler kinematik ve geometrik şartlara bağlı olmaksızın sıvı sürtünme sağlanabilir; yani hidrostatik sıvı sürtünme hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilir. Böylece bu gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında sıvı sürtünme söz konusudur. Kuru ve sınır sürtünmenin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da yoktur (Selçuk 1991, İpek 1992).

#### 4.2 AŞINMA

Aşınma; birbirine temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimden dolayı yüzeyden malzeme taşınımı olarak bilinir (Akkurt 1992, Belevi 2007, Turhan 2001). Aşınma, mikro kırılmalardan dolayı fiziksel ayrışma ile malzeme taşınımının bir sonucudur. Kimyasal olarak ise temas eden yüzeylerdeki erimeler veya çözünmeler ile meydana gelir. DIN 50320'ye göre aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyinden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulmasıdır.

Aşınma mekanizmaları sürtünme boyunca kompleks değişimler göz önünde bulundurularak tanımlanır. Aşınma kavramı çoğu kaynaklarda “triboloji” adı ile de anılmaktadır. Triboloji kelimesi Latince sürtünme anlamına gelen tribos kelimesinden türemiştir ve sürtünme bilimi anlamında kullanılmaktadır.

Triboloji; sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsar. Tribolojik sistem ise; karşılıklı etkileşen elemanlarda (ana malzeme, karşı malzeme, ara madde) hız, termal şartlar ve yükün bileşimiyle meydana gelen aşınma olayını inceler. Tribolojik sistem Şekil 4.4'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Yıldız 2006, Büyükkelleci 2008).

#### 4.2.1 Tribolojik Sistemin Elemanları

- **Ana malzeme (aşınan):** Aşınması istenen, fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı, şekli tamamen belirlenmiş ve daima katı halde bulunması gereken elemandır.

- **Karşı malzeme (aşındıran):** Aşındıran eleman olup, katı sıvı veya gaz halinde olabilir.

- **Ara malzeme:** Aşınma çifti arasında katı, sıvı, gaz veya bunların karışımı halinde bulunan maddelerdir.

- **Yük:** Aşınma çiftlerinin temas alanını etkileyen önemli bir faktördür. Temas alanının artması yük miktarına bağlı olduğu gibi malzemelerin özelliği ve geometrilerine de bağlıdır. Uygulanan yük, dinamik, titreşimli, darbeli veya statik olabileceği gibi artan veya azalan şekilde de olabilir.

- **Hareket:** Tribolojik sistem içindeki esas ve karşı elemanların birbirine göre yaptığı bağıl harekettir. Bu hareket; kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma ve çarpma şeklinde olabilir. Hareketin yönü ve kat ettiği yol aşınma miktarına etki eder.

- **Çevre:** Vakumsuz bir ortamda gerçekleşen olayda sıcaklık, nem ve atmosfer aşınma üzerinde etkisi olan çevre etkenleridir.

#### 4.2.2 Aşınma Faktörleri ve Aşınma Direncine Etkileri

Aşınmayı etkileyen pek çok faktör mevcuttur. Bu faktörler, işletmeye bağlı faktörler ve tribolojik sistemin elemanlarına bağlı faktörler olarak iki ana gurup altında sıralanmıştır. İşletmeye bağlı faktörler yük, basınç, hız, kayma ve kayma mesafesidir.

Tribolojik sistemin elemanlarına bağlı faktörler; ana malzemeye bağlı faktörler, karşı malzemeye bağlı faktörler ve ortama bağlı faktörler olmak üzere kendi içinde üç gruba ayrılmıştır.

Ana malzemeye bağlı faktörler; malzemenin cinsi, şekli, boyutları, mikroyapısı, gördüğü ısıl işlem ve sertliği, elastiklik modülü, deformasyon özelliği yüzey pürüzlülüğüdür. Karşı malzemeye bağlı faktörler; aşındırıcı tane büyüklüğü, tane şekli ve tane dağılımıdır. Ortama bağlı faktörler ise; sıcaklık, nem ve atmosferdir.

Aynı sertlikteki ostenit ve beynitin aşınma direnci, ferrit, perlit ve martenzite göre daha fazladır. Ostenitin deformasyonu sertleşme hızı ve sünekliğinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Çeliklerde karbon miktarı, çeliğin mekanik özelliklerini büyük oranda etkiler. Karbon miktarının artması, alaşımsız çeliklerde perlit miktarının artması ile, alaşımlı çeliklerde ise ince perlitik yapının martenzit-ostenit yapıya dönüşmesi suretiyle aşınma direncini arttıracaktır (ASM 1992).

Aynı sertlikte fakat daha fazla karbon içeren çelikler, daha yüksek aşınma direncine sahiptir ve karbon oranı ile aşınma direncinin yükselme oranı da belli sertlik için sabittir. Aşınmaya maruz metallerin aşınma dirençlerini arttırmak üzere, kütlese sertlik yanında yüzeysel sertlik artırma işlemleri sık uygulanan bir durumdur. Metallerin yüzey sertleştirme işlemleri ısıl yöntemlerle yapıldığı gibi, yüzeye daha sert bir tabakanın kaplanması suretiyle de gerçekleştirilebilir. Yüzey sertliğinin artırılması, malzemenin çekirdeğinin sünek kalmasını sağlayabildiğinden, darbeli zorlanmalara maruz yerlerde avantaj sağlar. En iyi aşınma direnci için kaplama malzemesinin, ana malzemedan yumuşak olması, kritik kalınlıktan daha ince bir tabakanın ana malzemeye kuvvetlice bağlanması önem arz eder.

#### **4.2.3 Aşınma-Zaman İlişkisi**

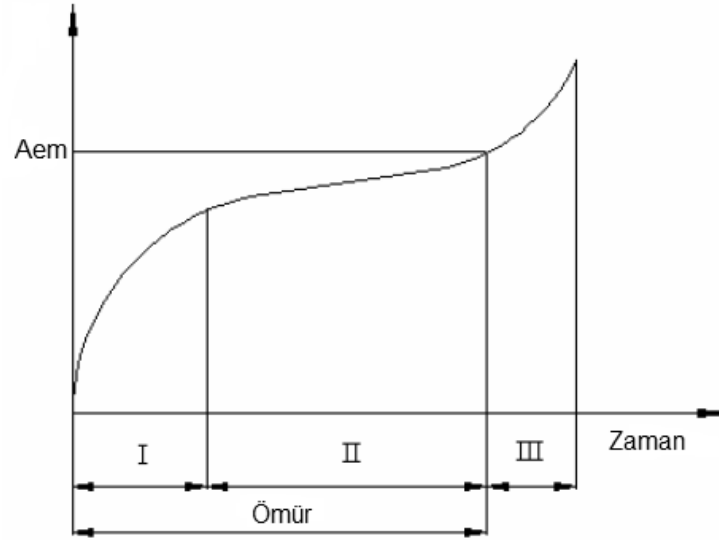
Aşınma zaman ilişkisi iki grupta incelenebilir; bunlar zaman ile gelişen aşınma ve aniden meydana gelen aşınmadır. Zaman ile gelişen aşınmayı da üç safhada incelenebilir (Şekil 4.5).

**1. Safha:** Parçaların birbirine alıştırma safhasıdır. İlk çalıştırma anında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu aşınma daha sonra oluşacak aşınmayı büyük ölçüde etkileyeceğinden

parçaların birbirine alıştırılmasının kısa sürede ve iyi yapılması birinci safhanın önemli şartıdır. Alıştırma işlemi genelde yüksüz ve düşük hızlarda yapılır.

**2. Safha:** Bu safhadaki aşınma, çalışma esnasında temas noktalarında meydana gelir.

**3. Safha:** Artan aşınma hızı ile bu safhada aşınma hızı şiddetli olur.



Şekil 4.5 Aşınma-zaman bağıntısı (Akkurt 1992).

Aşınan parçanın çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı  $A_{em}$  tayin edilerek aşınma-zaman diyagramından normal çalışma ömrü bulunabilir.

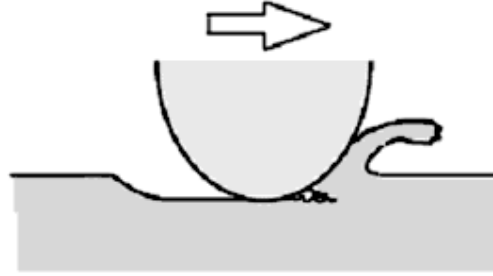
Aniden meydana gelen aşınmada ise parçaların yüzeyleri bozulur veya farklı nedenlerle parçalar kilitlenir ve çalışamaz hale gelir. Eş çalışan malzemelerin yanlış seçilmesi veya yağlamanın yetersiz olmasından bu aşınma meydana gelir (Akkurt 1992, Büyükkelleci 2008).

### 4.3 AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınma mekanizmaları bir çok grupta incelenmiştir. Aşınmanın meydana gelmesi ve sürekliliği için gerekli faktörlerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı fiziksel ve kimyasal etkilerin iletilmesine göre yedi farklı aşınma mekanizması aşağıda verilmiştir.

### 4.3.1 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması suretiyle meydana gelen deformasyondur. Abrasif aşınmaya kazı makineleri, toprak işleme aletleri, eğeleme ve zımparalama işlemi örnek olarak verilebilir. Şekil 4.6'da abrasif aşınmanın şematik şekli görülmektedir.



Şekil 4.6 Abrasif aşınma (Akbulut 2005).

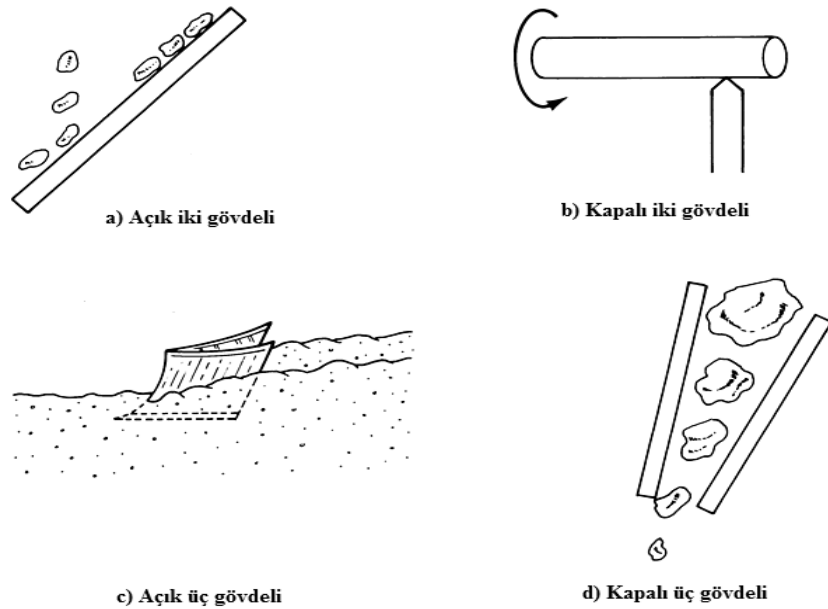
Abrasif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzey, daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında, yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında ortaya çıkar. Abrasif aşınma, ayrıca biraz farklı bir durumda da, sert abrasif partiküller kayma yüzeyleri arasına girdiğinde ve malzemeyi aşındırdığında da meydana gelmektedir.

Abrasif aşınma, Rabinowicz (1995) tarafından iki ve üç boyutlu olmak üzere iki grupta ele alınmıştır. İki boyutlu abrasif aşınmada, dış yüzey üzerindeki sert tümseklerin aşındırması, üç boyutlu abrasif aşınmada ise sert abrasif partiküllerin iki farklı kayma yüzeyi arasında yuvarlanması söz konusudur. İki boyutlu aşınmada, aşınma hızı üç boyutlu aşınmaya göre daha hızlıdır. Abrasif aşınmada, aşındırıcı partikül şekli ile aşınma hızı arasında bir bağıntı vardır. Yuvarlatılmış aşındırıcı partiküller kullanıldığında, aşınma hızı çok yüksek değildir. Bu konuda yapılan çalışmalar sürmektedir. Abrasif ve erozif aşınmada, partikül boyutları 5-500  $\mu\text{m}$  arasında değişir. Eğer farklı boyutlardaki partiküller, malzemenin ortamdaki uzaklaştırılmasında (aşındırılmasında) eşit şekilde etkin ise aşınma hızı sabit olacaktır. Gevrek malzemelerde, aşınma hızı partikül boyutu bağımlılığı daha güçlüdür. Bu kritik değerin üzerinde, aşınma hızı abrasif partikül boyutundan bağımsızdır. Bu kritik değerin altında aşınma hızı, abrasif partikül boyutuna kuvvetle bağımlıdır. Deneysel veriler göstermektedir

ki, büyük (geniş) abrasif partiküller söz konusu olduğunda, toplam aşınma hızı partikül boyutundan bağımsızdır.

Küçük partiküller kullanıldığında aşınma hızı azalır. Bu sonucu, küçük partiküller kullanıldığında batıcı uç geometrisinin farklı olması ya da aşınma enkazının meydana gelmesiyle sistemin tıkanması şeklinde açıklamak mümkündür. Ayrıca çalışılan ortamdaki yüksek nem oranı da aşınma hızını yaklaşık % 15 artırır. Abrasif aşınma esnasında abrasif olarak kullanılacak malzeme ve abrasif aşınma hızının engellendiği ancak, abrasif aşındırıcıların mevcut olduğu durumda kayma malzemesi olarak kullanılacak malzemeler olmak üzere iki tür malzeme kullanılır.

Abrasif olarak kullanılacak malzemelerde sertlik ve keskinlik önemlidir. Abrasif malzeme, aşındıracağı malzemeden sert olmalıdır. Yumuşak malzemenin sertliği sert malzemenin en az 1/3'ü olmalıdır. En uygun olanı, çok yüksek bir aşınma hızına ulaşmadan, aşınma hızının uzun bir süre korunabileceği sert bir abrasif kullanmaktır. Şekil 4.7'de malzemelerin abrasif aşınma hızlarını ölçmekte kullanılan dört yaygın yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



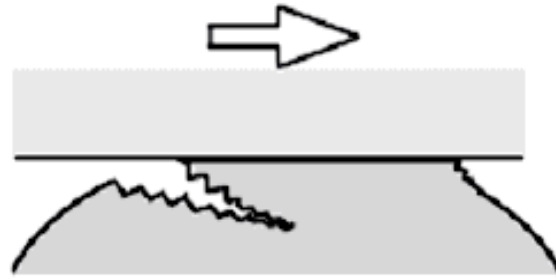
Şekil 4.7 Abrasif aşınmada oluşan temas türleri (ASM 1992).

Bunlardan a, b ve c seçeneklerinde sabitlenmiş abrasif partiküller üzerinde aşınan pim şeklinde bir numune vardır ve iki boyutlu abrasif aşınmayı göstermektedir. Disk üzerinde pim

şeklindeki abrasif aşınmada, numune hep taze abrasif üstünde kayar. Bu olay pimi disk üstünde radyal şekilde aşındırarak gerçekleştirir ve spiral bir iz bırakır. Pimin ağırlığı deneyden önce ve sonra tartılarak aşınma hızı ölçülür. Pim şeklindeki numuneler genelde iki boyutlu abrasif aşınmaya uğrar.

#### 4.3.2 Adhesif Aşınma

Adhesif aşınma, en sık karşılaşılan aşınma türlerinden biridir. Bu aşınma türünde, basıncın ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, metallerin yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Çalışma sırasında bu kaynaklar birbirinden ayrılırken, yüzeylerden ufak parçalar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesif aşınma olarak adlandırılır. Adhesif aşınmanın şematik gösterimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Adhesif aşınma (Akbulut 2005).

Kısaca adhesif aşınma, bir katı malzemenin diğeri üzerinde kaydığında yada ona karşı baskı yaptığıında meydana çıkar. Her ne kadar malzeme kaybı diğere yüzeye transfer olmuş partiküller şeklinde olursa da, bu partiküller şekillerini kaybedebilirler. Ayrıca farklı aşınma türleri arasında ayırt edici kesin bir çizgi de yoktur. Temas eden yüzeylerin yapışma eğilimi, iki malzemenin yüzey atomları arasında mevcut olan çekme kuvvetlerinden kaynaklanır ki yüzey ister normal, ister teğetsel şekilde bir araya getirilip ayrılırsa, bu çekici kuvvetler malzemeyi bir yüzeyden diğereine çekmeye teşebbüs edecek şekilde etkir. Bu şekilde malzeme orijinal yüzeyinden uzaklaştırıldığında, bir adhesif aşınma parçası meydana getirilir (Büyükkelleci 2008, Erdem 2006).

Adhesif aşınma en çok, benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünmeleri nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolay olur.

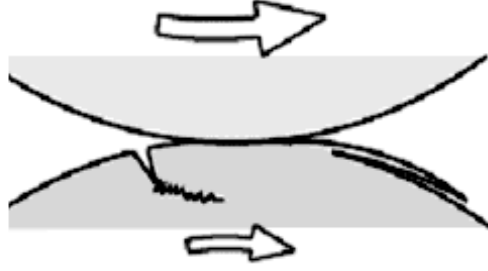
Birbiriyle temas halinde bulunan metaller, yüzeylerindeki pürüzler nedeniyle etkileşirler. Çok düzgün yüzeylerde bile bu durum söz konusudur. Metalin ağırlığında veya herhangi bir yükleme durumunda, pürüz tepelerinde meydana gelen gerilme sonucu plastik deformasyon oluşur. Malzemenin deforme edilebilirliği kolay ise temas alanı artarak bütün yüzeye dağılır. Bu durumda yüzeylerde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, malzeme moleküllerinin direkt temas etmelerine imkan verir. Böylece temas noktalarında soğuk kaynak bölgeleri oluşur. Bu bölgeler bağıl hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasına taşınır. Sürtünme sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması temas yüzeyinde meydana gelirse malzeme kaybı olmaz. Fakat kırılmanın temas yüzeyinin uzağında herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçacıklar bir yüzeyden diğerine geçerek malzeme transferi meydana gelir. Metallerin birinin diğerine göre yumuşak olması durumunda meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Fakat yüzeyde bulunan nitrür ve oksit tabakaları koparak yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi aşındırabilir (ASM 1992).

Adhesif aşınmanın söz konusu olduğu durumlarda, sökölüp takılması ve tamir olması kolay olan parçaların diğerine göre yumuşak olması tercih edilir. Örneğin, ana dişliye göre pinyon dişlinin yumuşak olması istenir. Adhesif aşınma genellikle yataklarda, dişlilerde, kam mekanizmalarında ve demiryollarında çalışan teker-ray sistemlerinde görülür. Yüksek yükleme ve hız durumlarında yağlama aşınmasının azaltılması istenir. Yapılan çalışmalarda azotlu ortamdaki aşınmanın, karbondioksitli ortamda meydana gelen aşınmadan daha fazla olduğu ispat edilmiştir. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO<sub>2</sub>, nem ve N<sub>2</sub> gibi maddeler adhesif aşınma miktarının azalmasını sağlar (Odabaş 1987, Kılınç 1993, Korkut 1991).

Aşınma esnasında kırılma çoğu zaman ara yüzeyde meydana gelir. Bir pürüzden kopan metal parçasının boyutu, kaymanın bağlantı noktasına ne kadar uzakta meydana geldiğine bağlıdır. Aşınma hızını en düşük seviyeye indirmek için, kopan metal parçalarının her birinin boyutu mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bunun sağlanması için temas alanının küçük olması gerekir.

### 4.3.3 Yorulma Aşınması

Makine parçalarında tekrarlanan yüklere maruz kalmaları veya titreşimden dolayı zamanla yorulma meydana gelir. Özellikle, yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları, yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olur. Bu mikroçatlaklar zamanla ilerleyerek, malzemenin yüzeyinden mikro parçaların kopmasına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir. Şekil 4.9'da yorulma aşınması şematik olarak verilmiştir.

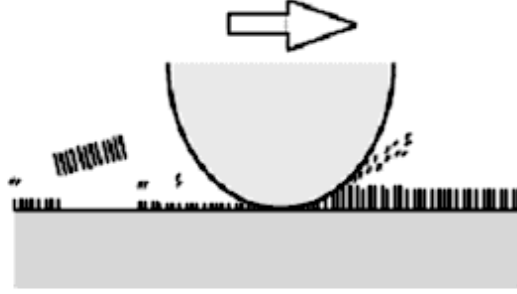


Şekil 4.9 Yorulma aşınması (Akbulut 2005).

Yorulma aşınması yuvarlama hareketi yapan rulmanlı yataklarda, dişli çarklarda ve kam mekanizması gibi yüzeylerde oluşur. Malzemeye etki eden değişken yükler ile elastiklik sınırı geçilmemesine rağmen, malzemedeki boşluk ve kesit daralmalarının bulunduğu süreksizlik bölgelerinde malzeme yüzeyinde küçük boşluklar oluşur. Yapılan araştırmalar sonucunda, pullanmanın başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yorulma aşınma hızının, abrasif aşınma hızından daha düşük olduğu da tespit edilmiştir (Metals Handbook 1989).

### 4.3.4 Triboksidasyon Aşınması

Malzemenin bağlı hareket sırasında statik ve dinamik sürtünme kuvvetlerinin farklılık göstermesi sebebiyle düşük kayma hızlarında yüzeyler arasında titreşimler meydana gelir. Bu titreşimler yüzeyler arasında bir oksit filminin oluşmasına yol açar. Bu olaya tribolojik zorlama esnasında meydana gelmesinden dolayı sürtünme oksidasyonu veya triboksidasyon denir. Korozif aşınmanın şematik gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 Koroziif aşınma (Akbulut 2005).

Sürtünen elmanlar arasında oluşan oksit tabakası ana malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Meydana gelen oksit filmi adhesif aşınmaya karşı direnci artırır. Fakat, devam eden bağıl hareket ile parçalanan oksit filmi malzemeler arasında aşındırıcı tane oluşturarak abrasif aşınmayı hızlandırır.

#### 4.3.5 Erozyon ve Kavitasyon Aşınması

Erozyon; ortam ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozulma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasif tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpmasıyla oluşan enerji, katı cismin basma dayanımını aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucu olarak yüzey aşınır. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği, çarpma açısının değeri ve erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen en önemli faktörlerdir (Tabur 2003).

Kavitasyon aşınması, bağıl hareket halinde bulunan bir sıvı ile katı bir cismin arasında meydana gelir. Sıvı içerisinde bulunan zerreciklerin basıncı, buharlaşma basıncından daha küçük bir ortamdan geçerken zerreciklerin büyümesi ve patlamasıyla oluşan basınç dalgalarının katı cismin yüzeyine çarpması sonucu kavitasyon meydana gelir. Kavitasyon aşınması genellikle, su türbinleri, su pompaları, buhar türbinlerinde görülür. Kavitasyon erozyonu, sırasıyla basma, çekme ve tekrar basma etkisi altında kalan bir sıvının kavitasyonu sonucu meydana gelir. Bir sıvı çekme etkisi altında iken sıvının kendi buharı ile dolu bir kabarcık meydana gelir ve sıvı tekrar basma etkisi altında iken kabarcık çöker ve kabarcığın ortasında bir fiskiye fişkirır, sahip olduğu yüksek hız ile yüzeye çarpar ve yüzeyi yüksek hızlı

erozyon ile hasara uğrattır. Kavitasyon erozyonu, içinde negatif basınç bölgeleri olan tam olarak sıvı yağlanmış sistemlerde meydana gelir.

#### **4.3.6 Yenme Aşınması**

Yenme aşınma mekanizması, adhesif aşınma mekanizmasına benzemektedir. Birbirine kuvvetle bastırılan iki metalin yüzeyinde düşük genlikli titreşim hareketinden dolayı, yüzeylerde bulunan pürüzler, yüzeyden koparak aşınmayı meydana getirirler. Yüzeyden kopan bu parçacıklar oksitlenerek aşındırıcı tane haline gelerek abrasif aşınma miktarını artırır. Kuvvetli etkileşimden dolayı, temas noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelerek titreşim artar. Bu nedenle yüzeyde yorulma çatlakları artarak zararın artmasına neden olur. Bu tür aşınma, iş makinelerinde, sıkı geçmelerde, kama ve cıvata bağlantılarında meydana gelir.

#### **4.3.7 Difüzyon Aşınması**

Birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık artışı kristal kafes içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket difüzyona neden olur. Sürtünme yüzey bölgesinde atom ve moleküllerin çevreye transfer olması ya da karşı sürtünme elemanına girmesi difüzyon esasına dayanır .

Sürtünme esnasında, uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklığın artışı ile birlikte, temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalarak temas alanları artar. Böylece yüzeyler arasında atom alışverişi meydana gelerek, mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka sürtünmeden ve bağıl hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir. Bu aşınma mekanizması fren balatalarında, uzay araçlarında ve takım tezgahlarında görülür (Büyükkelleci 2008).

## 4.4 AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

### 4.4.1 Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan yöntemdir. Dezavantajı ise, her ölçümde deney numunesinin yerinden çıkartılıp yeniden bağlanması gerekliliğidir. Deney, ağırlık kaybı ölçümü ile gerçekleştirilir. Ağırlık kaybının ölçümü,  $10^{-4}$  veya  $10^{-5}$  g hassasiyetine duyarlı bir terazi yardımıyla yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak, sürtünme yolu da metre veya kilometre olarak tespit edilirse; birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g / km), (mg / m) ile ifade edilir. Ağırlık farkı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$W_a = G / d \cdot M \cdot S \text{ (mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m)} \quad (4.3)$$

Burada;

$W_a$  : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ),

$G$  : Ağırlık kaybı (mg),

$M$  : Yükleme ağırlığı (N),

$S$  : Aşınma yolu (m),

$d$  : Cismin yoğunluğu ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ) olarak verilmiştir. Aşınma oranının ( $W_a$ ) tersi, aşınma direnci ( $W_r$ ) olarak gösterilir.

$$W_r = 1 / W_a \text{ (Nm} / \text{mm}^3) \quad (4.4)$$

### 4.4.2 Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılarak elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır (Moore, 1983). Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla  $\pm 1\mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir. Bu metod kullanım zorluğundan dolayı çok tercih edilmez.

#### 4.4.3 İz Değişimi Metodu

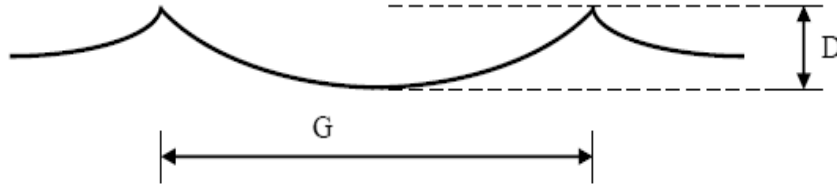
Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deneysel boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (örneğin çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir (Tabur 2003).

#### 4.4.4 Radyoizotop Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü  $\alpha$ -parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metod değildir (Erdem 2006).

#### 4.4.5 İz Alanı Karşılaştırma Metodu

Aşındırıcı kullanılarak deney numunesi üzerinde iz oluşturulur. Oluşturulan izin profili yüzey profilometre cihazı ile en az beş ölçüm yapılarak tespit edilir. İz profili bilgisayara aktarılarak izin alanı eşitlik (4.5) ile hesaplanarak bulunur. İz profilinin şematik görünümü Şekil 4.11'de verilmiştir. Her numune için aşınma deneyindeki koşullar eşit olduğu için, iz profilinden hesaplanan aşınma iz alanı, malzemenin aşınan miktarının bir ölçüsü olarak alınır.



Şekil 4.11 Aşınma izi profilinin şematik görünümü (Uluğ 2006).

$$A = \pi \cdot G \cdot D / 4 \quad (4.5)$$

Burada;

$A$  : Aşınma izinin alanı,

$G$  : İz genişliği,

$D$  : İz derinliği olarak tanımlanmıştır.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada kullanılan SAE 8620 sementasyon çeliği, Ø30x500 mm ebadında özel sektörden temin edilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılmak üzere Ø30x6 mm ebadında 40 adet numune, metalografi ve mikro sertlik ölçümlerinde kullanılmak üzere Ø30x6 mm ebadında 8 adet numune hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan malzemenin kimyasal bileşim analizi OBLF marka spektrometre ile yapılmıştır (Şekil 5.1). Kimyasal bileşim analiz sonucu Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 OBLF marka spektrometre cihazı.

Çizelge 5.1 Deneysel çalışmada kullanılan SAE 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (% ağırlık olarak)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.206	0.175	0.802	0.013	0.037	0.422	0.432	0.152

## 5.2 DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Özel sektörden  $\text{Ø}30 \times 500$  mm ebadında temin edilen SAE 8620 sementasyon çeliği, öncelikle hidrolik testere ile  $\text{Ø}30 \times 7$  mm ebatlarında kesilmiş,  $\text{Ø}30 \times 6$  mm ebadına gelene kadar taşlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 5.2).

Numuneler, sementasyon öncesi normalize edilmiştir. Sementasyon işlemi kuyu tipi atmosfer kontrollü gaz sementasyon fırınında yapılmıştır. Karbürleme sonrası numunelere yağda su verilmiş ve temperleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.2 Numunelerin taşlama işlemi.

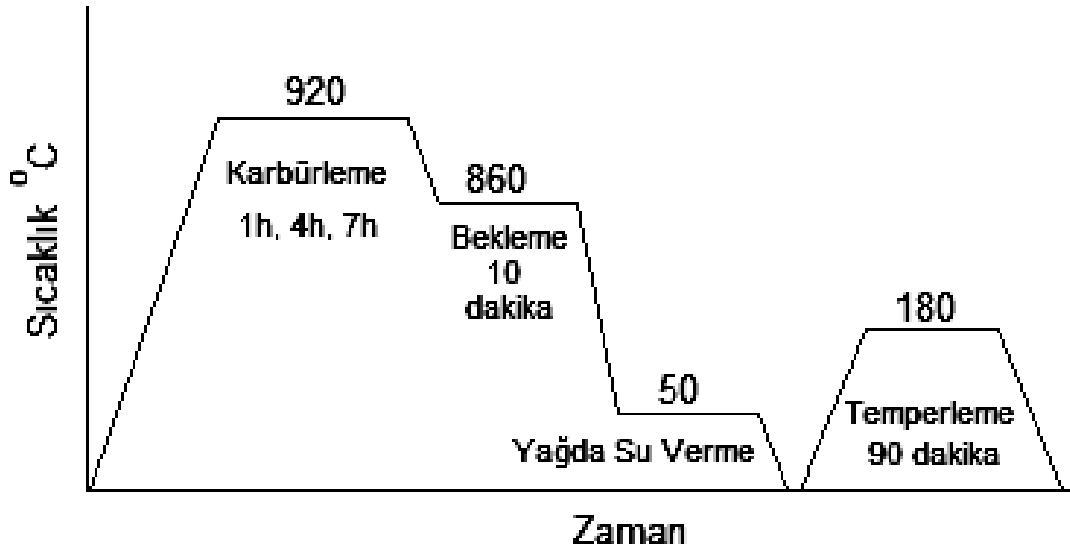
## 5.3 SEMENTASYON İŞLEMİ

Numuneler, sementasyon öncesi  $910^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta normalize edilmiştir. Sementasyon işlemi, Ayze Metal firmasında kuyu tipi atmosfer kontrollü gaz sementasyon fırınında  $920^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta yapılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Atmosfer kontrollü kuyu tipi gaz sementasyon fırını.

Karbürleme 1, 4 ve 7 saat süreler için propan ortamında yapılmıştır. Homojenleştirme 860°C sıcaklıkta 10 dakika bekletilerek yapılmıştır. Su verme ise, 50°C sıcaklıktaki ISO RAPID 277 marka sirkülasyonlu yağda yapılmıştır. Temperleme işlemi 180°C sıcaklıkta 90 dakika süreyle Richelin marka induksiyon fırınında yapılmıştır. Numulere uygulanan sementasyon işleminin sıcaklık-zaman ilişkisi Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4 Sementasyon işlemine ait sıcaklık-zaman grafiği.

## 5.4 SERTLİK VE MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Yüzey sertlik ölçümleri TTK laboratuvarlarında, Volpert sertlik ölçme cihazıyla yapılmıştır (Şekil 5.5). Sertlik ölçümleri, ısıl işlem uygulanan numunelerin matris yüzey sertliklerinin belirlenmesi için Rockwell C (HRC) yöntemiyle 5 adet ölçüm sonucunun ortalaması alınarak yapılmıştır.



Şekil 5.5 Volpert marka sertlik test cihazı.

Mikrosertlik ölçümleri Sakarya Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında, Leica marka mikrosertlik test cihazı ile Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 500 g yük 6 s süre ile uygulanarak yapılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Leica VMHT MOT marka mikrosertlik test cihazı.

Isıl işlem uygulanan numunelere yüzeyden içeriye doğru 200 µm aralıklarla 5 farklı noktadan ölçümler yapılarak etkili sertlik derinlikleri belirlenmiştir. Isıl işlem görmeyen numunenin yüzey sertliği de Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 3 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

## 5.5 MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Optik mikroskop incelemeleri Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerini yapmak için, numuneler sıcak kalıplama ile bakalite alınmıştır. Metkon Metapress-A cihazında 40 mm'lik kalıplar kullanılmıştır. Sonra sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik SiC aşındırıcı kullanarak Metkon Gripo-2V zımparalama ve parlatma tezgahında su ile zımparalanmıştır (Şekil 5.7).

En son olarak 6 µm, 1 µm'lik elmas solüsyonlar ve 0,25 µm'lik alümina kullanılarak parlatma yapılmıştır. Daha sonra % 2'lik nital ile dağlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.7 Metkon Gripo-2V zımparalama ve parlatma tezgahı.

Mikroyapı incelemeleri, Metkon IMM 901 marka optik mikroskop ve Clemex görüntü analiz programı kullanılarak 100 ve 400 büyütmelerde yapılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Metkon IMM 901 marka optik mikroskop ve Clemex görüntü analiz cihazı.

SEM, XRD ve EDS analizleri Sakarya Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

Sementasyon uygulanan numunelerin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) incelemeleri, JEOL JSM 6060LV marka cihaz ile 20 kV gerilimde, 500 büyütmede, yüzey bölgesinden görüntüler alınarak yapılmıştır.

Sementasyon uygulanan numunelerin EDS (Energy Dispersion Spectrum) incelemeleri, IXRF systems Inc. 500 Processing marka cihaz ile 20 kV gerilimde, yüzey bölgesinden, geçiş bölgesinden ve matris bölgesinden görüntüler alınarak yapılmıştır. SEM ve EDS analizi cihazı Şekil 5.9'da verilmiştir.

Sementasyon uygulanan numunelerin X-ışını difraksiyon (XRD) incelemeleri, RIGAKU marka Cu kaynaklı (K $\alpha$ 1;  $\lambda = 1.54056$ ) X ışını tüpüne sahip cihaz ile 40 kV gerilimde, 36 mA akım değerinde,  $\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$  radyasyonu kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.9 JEOL JSM 6060LV SEM ve IXRF systems Inc. 500 Processing EDS cihazı.

Numunelerin yüzeylerinin taranarak elde edilen X-ışını kırınım deseni verileri yaklaşık 120.000 civarında madde ile karşılaştırılarak faz bileşimleri belirlenmiştir.

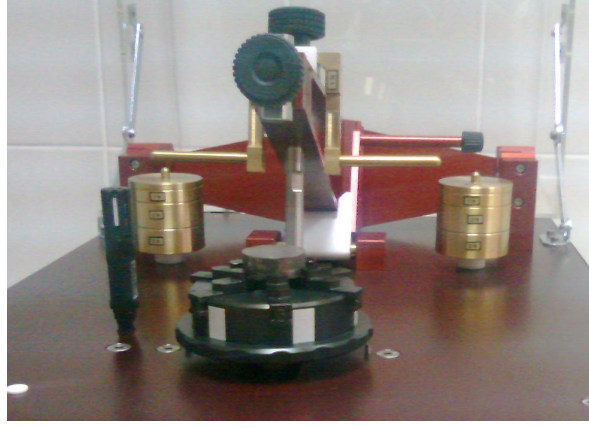


Şekil 5.10 RIGAKU D/MAX/2200/PC XRD cihazı.

## 5.6 AŞINMA DENEYİ

Aşınma deneyleri Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Aşınma deneylerinden önce numunelerin yüzeyleri 1200 mesh'lik SiC su zımparası ile temizlenmiş ve 6µm'lik çuha ile parlatılmıştır. Aşınma deneyleri, numunelerin disk, aşındırıcının ise pin olarak görev yaptığı ve 10 mm çaplı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilya aşındırıcı kullanılarak Tribotechnic marka pin-disk tribotester aşınma cihazında yapılmıştır (Şekil 5.11).

Yağlı ortamda yapılan aşınma deneylerinde kinematik viskozitesi 40°C'de 41.4 – 50.6 cSt olan HYDRO TECH HVI 46 marka hidrolik yağ kullanılmıştır.



Şekil 5.11 Tribotechnic marka pin-disk aşınma cihazı.

Kuru ortamda 9 N, yağlı ortamda ise 64 N yük uygulanarak 100 m, 200 m, 400 m kayma mesafelerinde, 300 dev/dk hızlarda, 8, 10 ve 12 mm sürtünme yarıçapı kullanılarak aşınma deneyleri yapılmıştır. Deney sonrası oluşan iz profili, 10-100-300 µm derinlik ölçme hassasiyetli Taylor Hobson marka yüzey profilometre cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.12). Cihazın yazılım programı ile, oluşan izin kesit alanı beş defa ölçülmüş ve iz alanlarının ortalaması hesaplanarak her numune için aşınma oranı tespit edilmiştir. Aşınma cihazının yazılım programında ölçülen iz alanı değeri yerine konularak aşınma oranları da bulunmuştur.



Şekil 5.12 Tribotechnic marka yüzey profilometre cihazı.

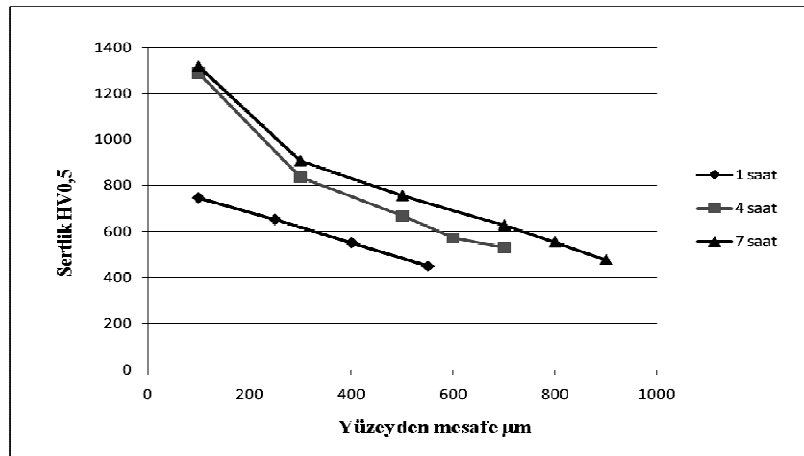
## BÖLÜM 6

### DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

#### 6.1 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

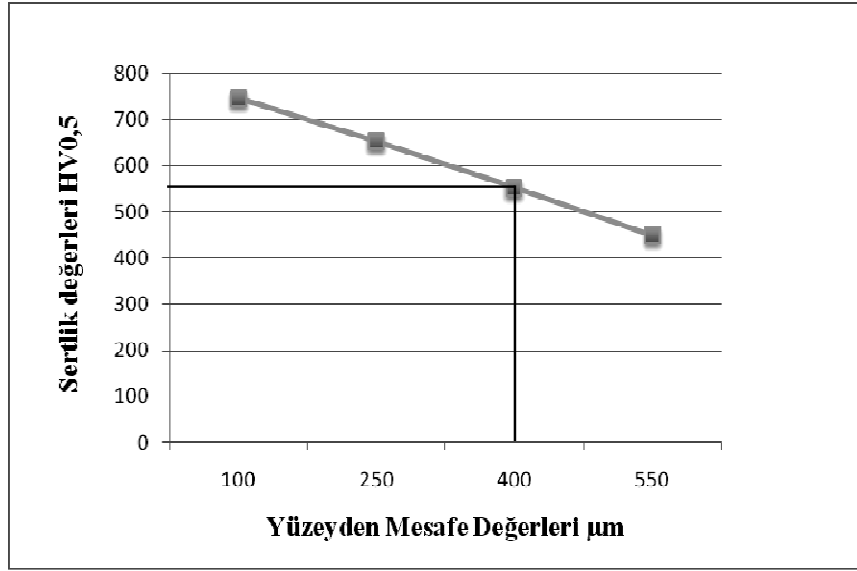
Isıl işlem uygulanmayan numunenin yüzey sertliği 227 HV olarak ölçülmüştür. Karbürleme süreleri 1, 4 ve 7 saat olan numunelerin yüzeydeki karbon oranları, sırasıyla % 0.68, % 0.91, % 1.02 olarak tespit edilmiş ve matris yüzey sertlikleri 37.5 HRC (363 HV), 41 HRC (403 HV) ve 42 HRC (413 HV) olarak ölçülmüştür. Artan karbon miktarının ve karbürleme süresinin yüzey sertliğini artırdığı anlaşılmaktadır. Literatürde de bu sonuç desteklenmektedir (Hernandez et al. 2009, Sundström et al. 2001).

Mikrosertlik ölçümleri sonucunda karbürleme süresine bağlı olarak yüzeyden mesafe-sertlik ilişkileri Şekil 6.1'de verilmiştir. Sementasyon yapılmış numunelerin yüzeyden 100 µm mesafedeki sertlik değerleri, karbürleme sürelerine göre sırasıyla 747 HV<sub>0.5</sub>, 1290 HV<sub>0.5</sub> ve 1319 HV<sub>0.5</sub> iken 300 µm'de 621 HV<sub>0.5</sub>, 836 HV<sub>0.5</sub>, 908 HV<sub>0.5</sub> olarak tespit edilmiştir. Yani, yüzeyden matrise doğru ilerledikçe sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir.

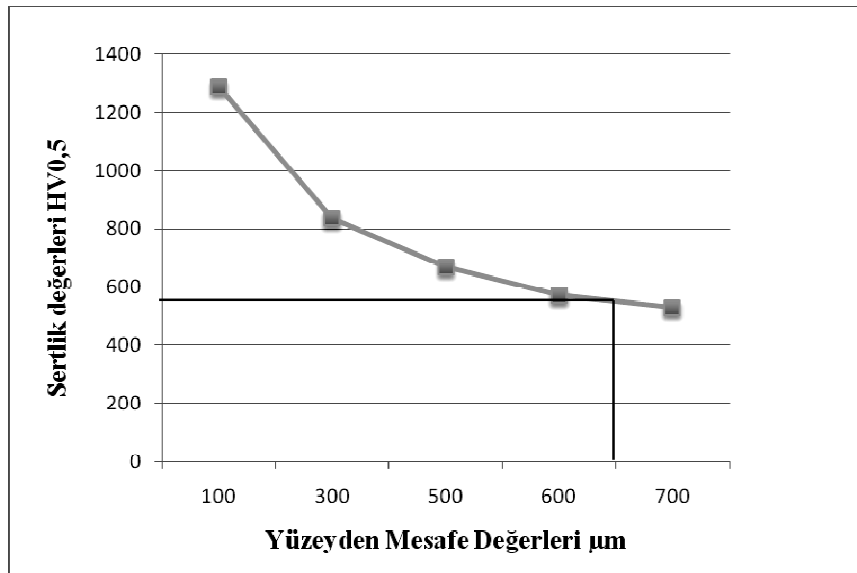


Şekil 6.1 Karbürleme süresine bağlı olarak yüzeyden mesafe-sertlik ilişkisi.

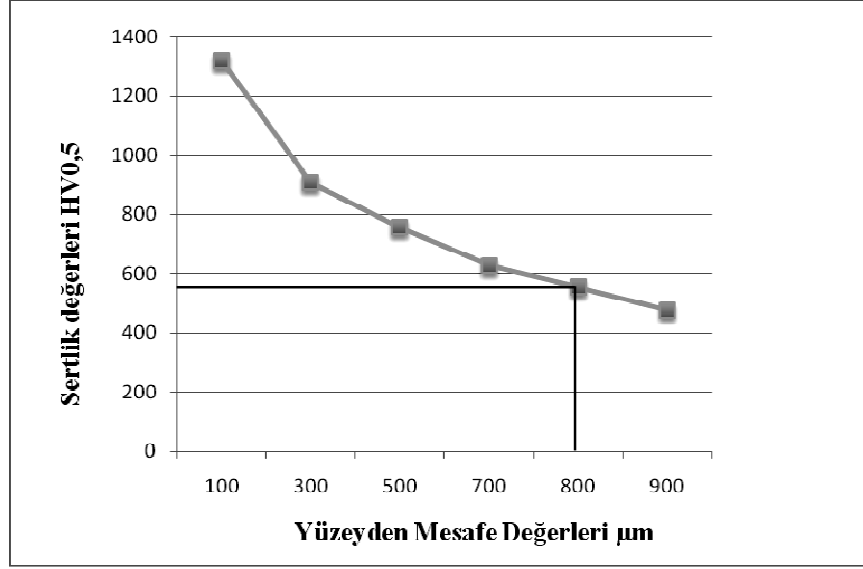
TS EN ISO 2639 - 2006'ya göre "etkili sementasyon derinliği" (ESD), Vickers sertliği 550 HV olan karbürlenmiş ve sertleştirilmiş tabaka ile yüzey arasındaki dikey uzaklık olarak tarif edilmektedir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda, 1, 4 ve 7 saat karbürleme sürelerine göre etkili sementasyon derinlikleri sırasıyla 0.4 mm, 0.65 mm ve 0.8 mm olarak tespit edilmiştir. şekil 6.2, şekil 6.3 ve şekil 6.4'de etkili sementasyon derinlikleri verilmiştir. 7 saat karbürlenmiş numunenin etkili sementasyon derinliğinin daha az süre ile karbürlenmiş numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.



şekil 6.2 Karbürleme süresi 1 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği.



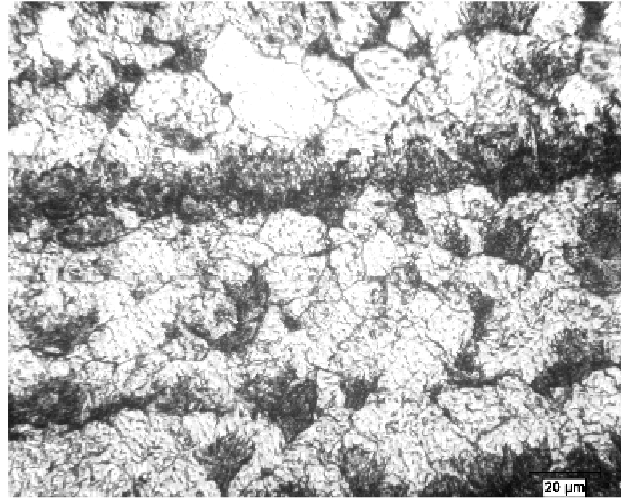
şekil 6.3 Karbürleme süresi 4 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği.



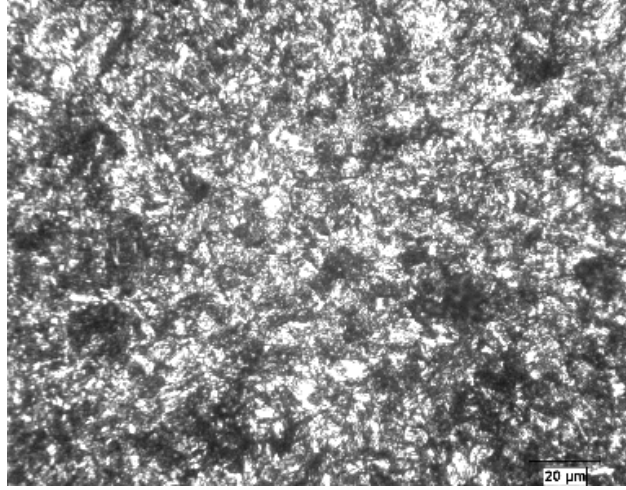
Şekil 6.4 Karbürleme süresi 7 saat olan numunenin etkili sementasyon derinliği.

## 6.2 MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI

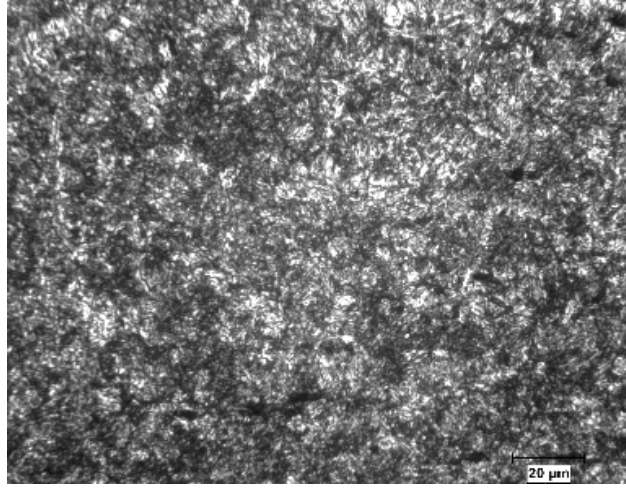
SAE 8620 çeliği, ferritik-perlitik mikroyapıya sahiptir (Şekil 6.5). Sementasyon işlemi sonrasında ise mikroyapıda temperlenmiş martenzit ve kalıntı ostenit vardır. Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de, etkili sementasyon derinliği 0.4, 0.65 ve 0.8 mm olan numunelerin optik mikroskop görüntülerinde martenzit plakaları koyu renk, kalıntı ostenitler ise açık renk olarak görülmektedir. Literatür araştırmaları da bu sonuçları desteklemektedir (Genel ve Demirkol 1999, İzçiler ve Tabur 2006, Asi vd. 2007). Literatürde, ayrıca karbür görüldüğü de ifade edilmiştir (Silva 1999).



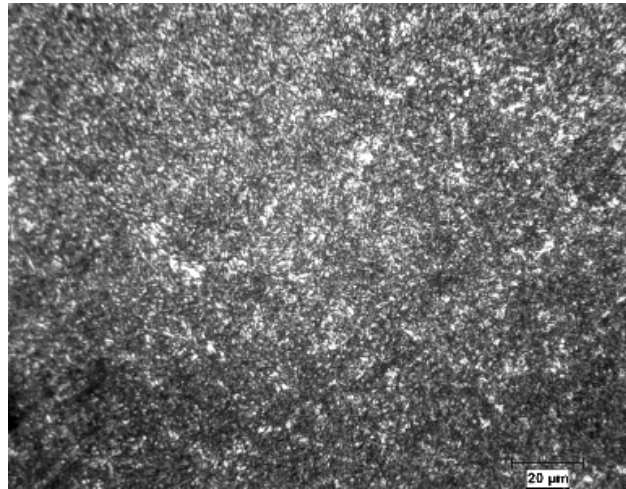
Şekil 6.5 Isıl işlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).



Şekil 6.6 ESD = 0.4 mm olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).



Şekil 6.7 ESD = 0.65 mm olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).



Şekil 6.8 ESD = 0.8 mm olan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x400).

Sementasyon sonrası çeliğin yüzey bölgesinde temperlenmiş martenzitten başka kalıntı ostenit, karbür, oksit yapılarına rastlandığı bilinmektedir (Krauss 1991). Matris mikroyapılarının ise temperlenmiş martenzit, beynit, ferrit, perlit içerebildiği; yüzeyden matrise doğru martenzitin miktarı ve yapısının değiştiği bilinmektedir.

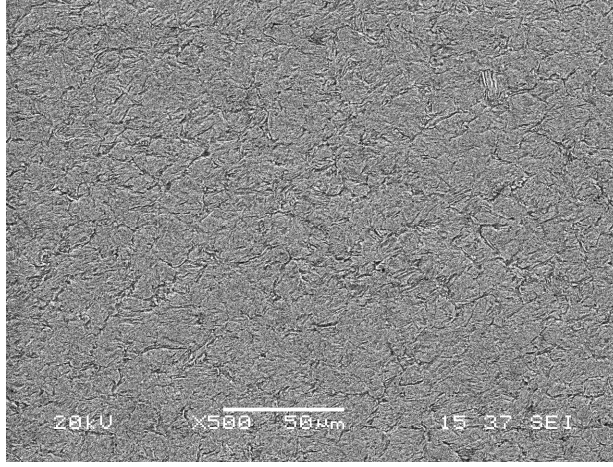
Sementasyon uygulanmış çeliklerin matris mikroyapısı, sertleşebilirlik ve düşük karbon bileşimleri ile irdelenir. Düşük karbonlu martenzitin ferritik-perlitik yapıya göre daha yüksek dayanım ve tokluğa sahip olduğu bilinmektedir (ASM 1991).

Deneysel çalışmada, karbürleme sonrası 860°C'de 10 dakika bekleme işlemi yapılmıştır. Bunun sebebi, genellikle yüzey karbon miktarlarının % 0.8'den daha düşük kalmasının ve dolayısıyla kalıntı ostenit miktarının düşmesinin sağlanmasıdır (Asi 2004, Krauss 1999). Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de, karbürleme süresi arttıkça mikroyapıda kalıntı ostenit yapısının belirginleştiği görülmektedir.

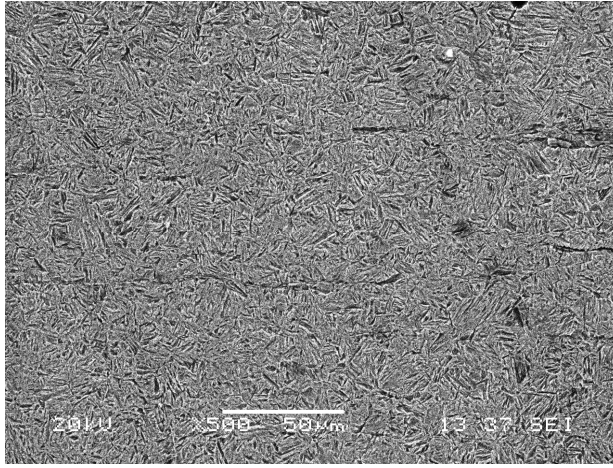
Literatürde, 925°C'de sementasyon uygulanmış SAE 8620 çeliğinin uygulamalarında görüldüğü gibi, yüzeyden mesafe arttıkça kalıntı ostenit miktarı düşmektedir (ASM 1991). Karbürleme süresinin artması ise kalıntı ostenit miktarının artmasına neden olmaktadır (Jeddi 2005, Bepari 2004). Artan karbon miktarının  $M_s$ - $M_f$  sıcaklığını belirgin bir şekilde düşürdüğü ve kalıntı ostenit miktarının arttığı bilinmektedir (Asi 2004, Bepari 2004).

Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11de, etkili sementasyon derinliği 0.4, 0.65 ve 0.8 mm olan numunelerin SEM görüntülerinde süre arttıkça martenzit yapısının daha kaba olduğu görülmektedir. Literatürde de, karbürleme süresi arttıkça kaba martenzit miktarının arttığı ifade edilmiştir (Bepari 2004).

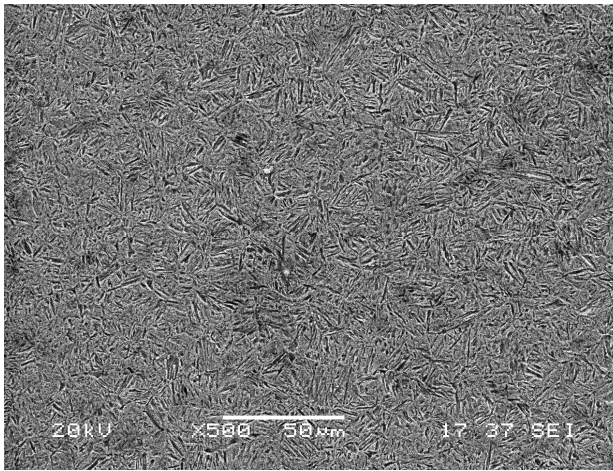
Etkili sementasyon derinliği 0.4 mm olan numunenin XRD analizinde,  $\alpha$  (110) (211) ve  $\gamma$  (200) fazları saptanmıştır (Şekil 6.12). Tüm numunelerin XRD analizlerinin birbirine çok yakın pikler verdiği de tespit edilmiştir. Ek A'da, etkili sementasyon derinliği 0.65, 0.8 mm olan numunelerin XRD pikleri ve analiz sonuçlarının çıktıları verilmiştir. Sementasyon sonrasında tüm numunelerin XRD analizlerinde karbür tespit edilememiştir.



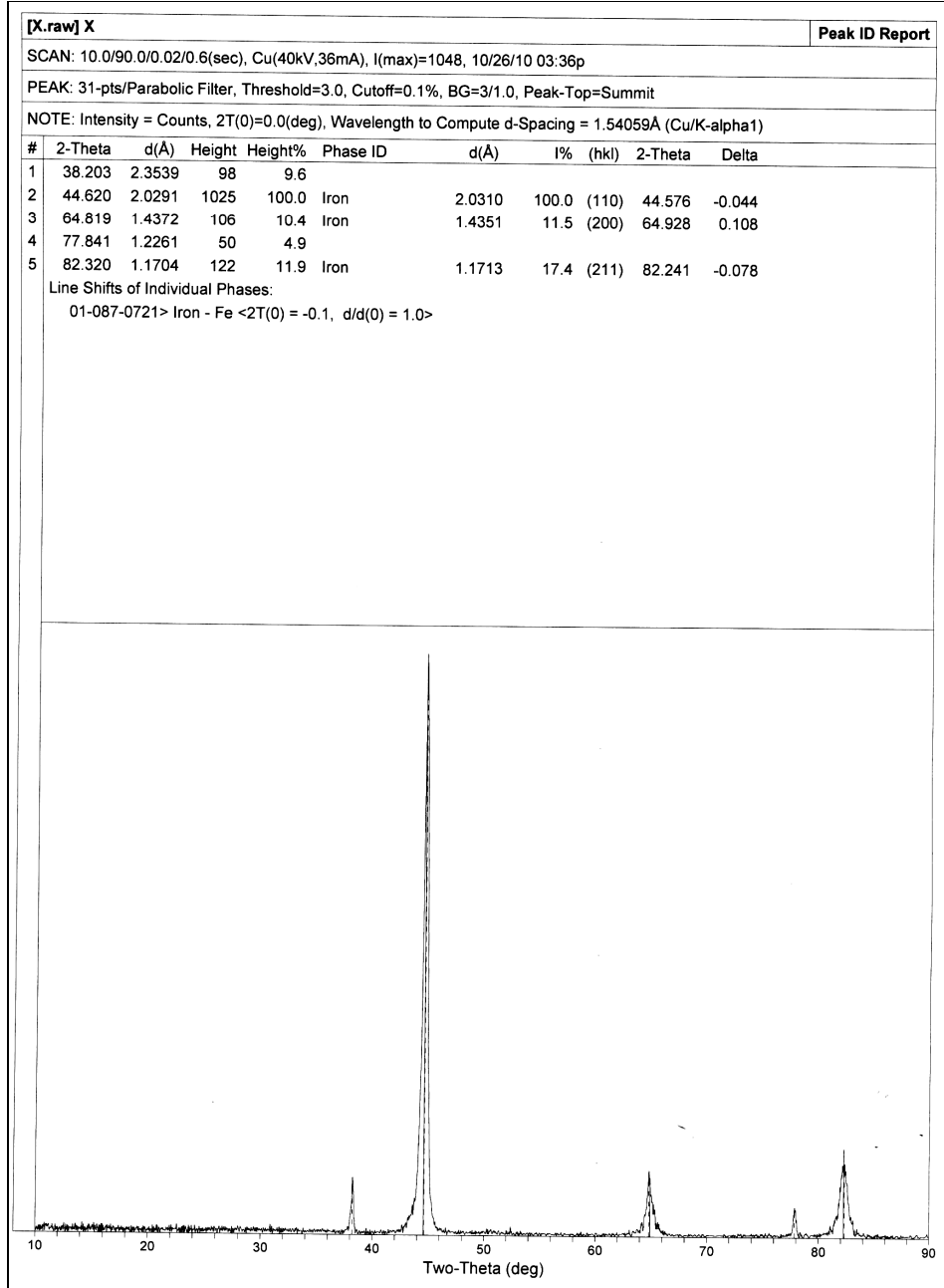
Şekil 6.9 ESD = 0.4 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500).



Şekil 6.10 ESD = 0.65 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500).



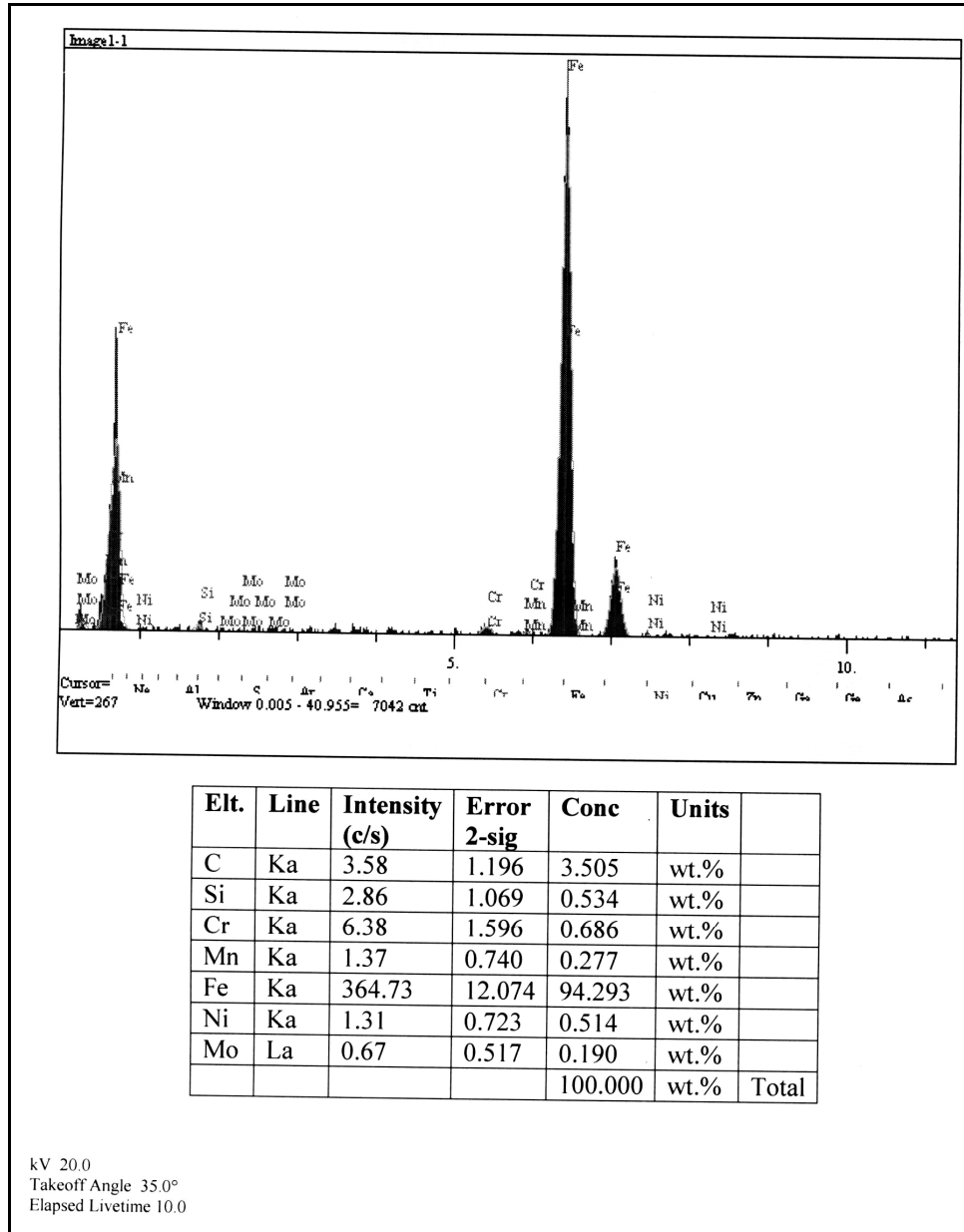
Şekil 6.11 ESD = 0.8 mm olan numunenin SEM görüntüsü (x500).



Şekil 6.12 ESD = 0.4 mm olan numunenin XRD analizi.

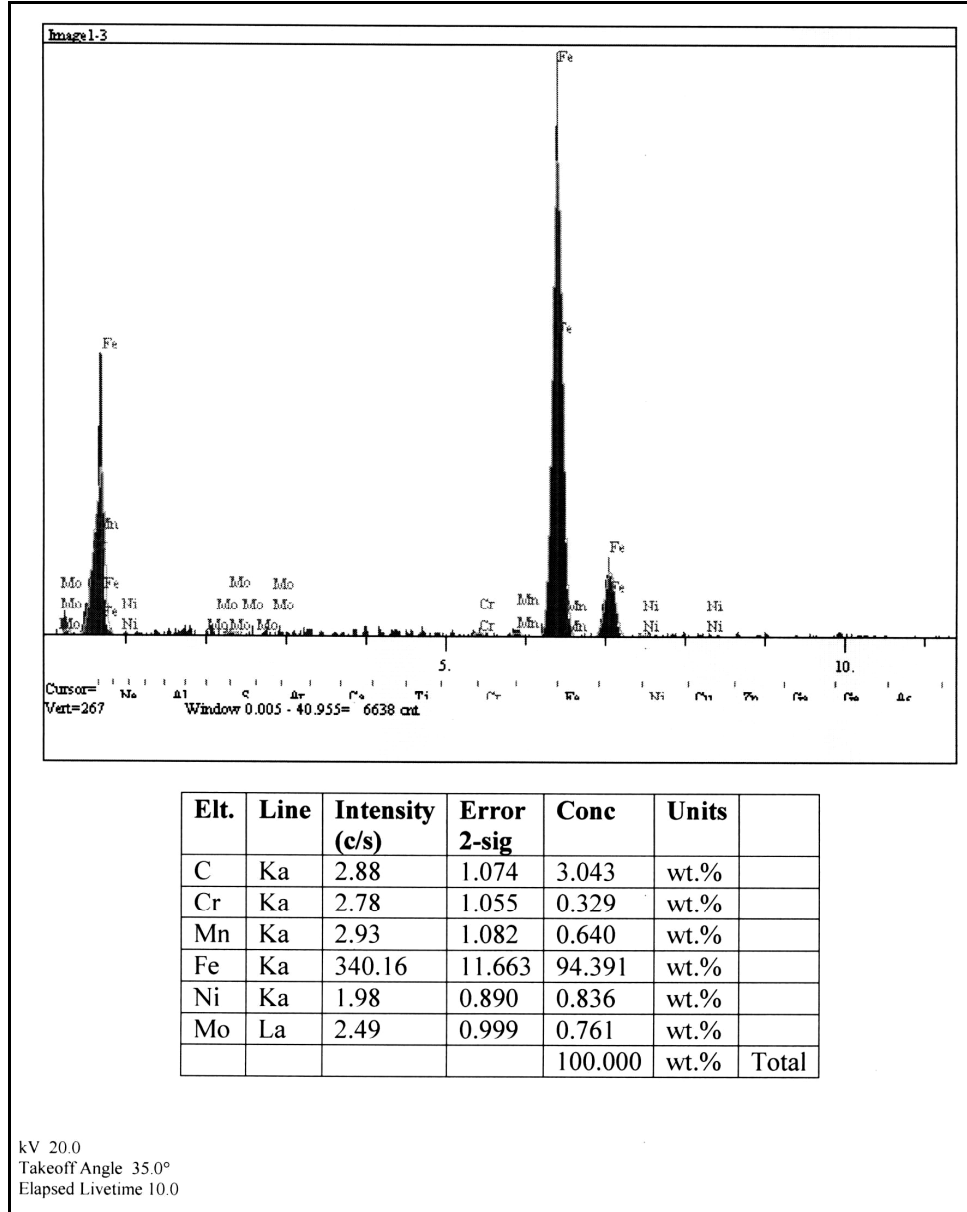
Uluğ (2006) tarafından yapılan çalışmada, asetilen ortamında sementasyon işlemine maruz kaldıktan sonra yağda sertleştirilen aynı çeliğin difraksiyon analizinde, ferrit, ostenit ve martenzit fazlarına ait pikler belirlenmiştir. Yeğen ve Usta (2010) farklı sürelerde karbürlenen aynı çeliğin XRD analizinde martenzit, ostenit, oksit ve demirkarbür fazlarının saptandığını ifade etmiştir. Ayrıca, martenzit pikinin sertleşebilirliği sağlayan Mo ve Ni alaşım elementlerinden dolayı görüldüğü ifade edilmiştir.

Etkili sementasyon derinliği 0.8 mm olan numunenin EDS analizleri, yüzeye yakın bölge, geçiş bölgesi ve matris için yapılmıştır (Şekil 6.13, Şekil 6.14 Şekil 6.15).



Şekil 6.13 ESD = 0.8 mm olan numunenin karbürleme bölgesi EDS analizi.

Yüzey bölgesindeki EDS analizinde yüzde ağırlık olarak sırasıyla Fe, C, Cr, Si, Ni, Mn, Ni, Mo pikleri belirlenmiştir. Yüzey bölgesinde karbon miktarı % 3.505, geçiş bölgesinde % 3.043 ve matris bölgesinde ise % 0,318 olarak bulunmuştur. Yüzeyden matrise doğru C miktarının azaldığı görülmektedir. Geçiş ve matris bölgesinde ise Si elementi saptanmamıştır.

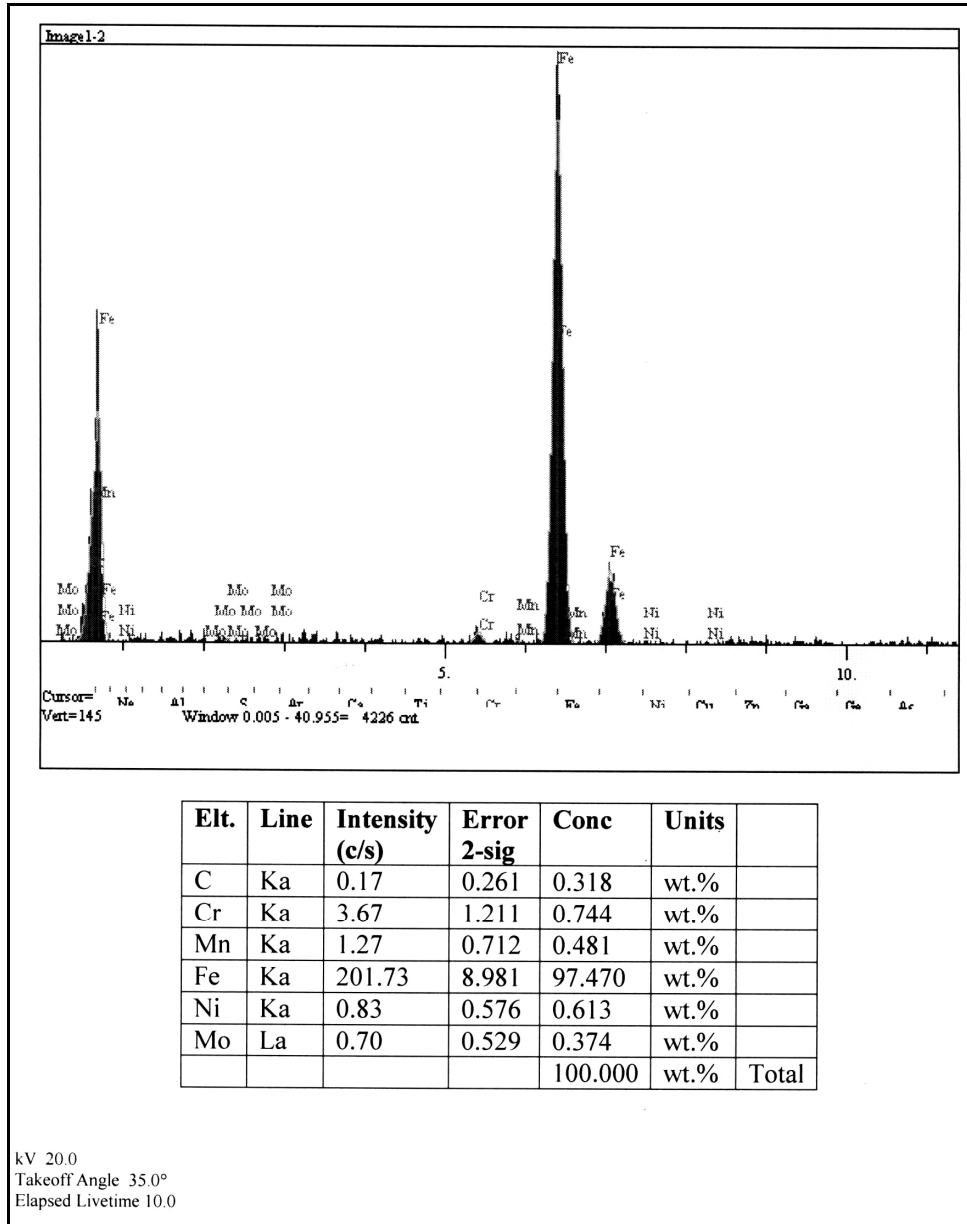


Şekil 6.14 ESD = 0.8 mm olan numunenin geçiş bölgesi EDS analizi.

Matrise yakın bölgenin EDS analizinde ise ısıtma işlemi uygulanmamış numunenin kimyasal bileşim değerlerine yaklaşıldığı görülmüştür (Şekil 6.15).

Farfan (2004) tarafından aynı malzemeye yapılan çalışmanın EDS analizinde, MnS ve MnS-Ca inklüzyonları saptandığı ifade edilmiştir. Sert tabaka kalınlığı 0.4 mm, 1.0 mm, 1.1 mm ve 1.35 mm olan sementasyon uygulanmış numunelerin yüzeydeki karbon miktarları sırasıyla % 0.8, % 4.1, % 4.3 ve % 1.65 olarak belirlendiğinden dolayı karbon miktarındaki değişimin düzgün olmadığı ifade edilmiştir.

Çalık vd. (2009) tarafından karbürleşmiş aynı çeliğin yüzey bölgesinde yapılan XRD ve EDS analizlerinde  $Fe_3C$ 'nin çok nadir görüldüğü ifade edilmiştir.

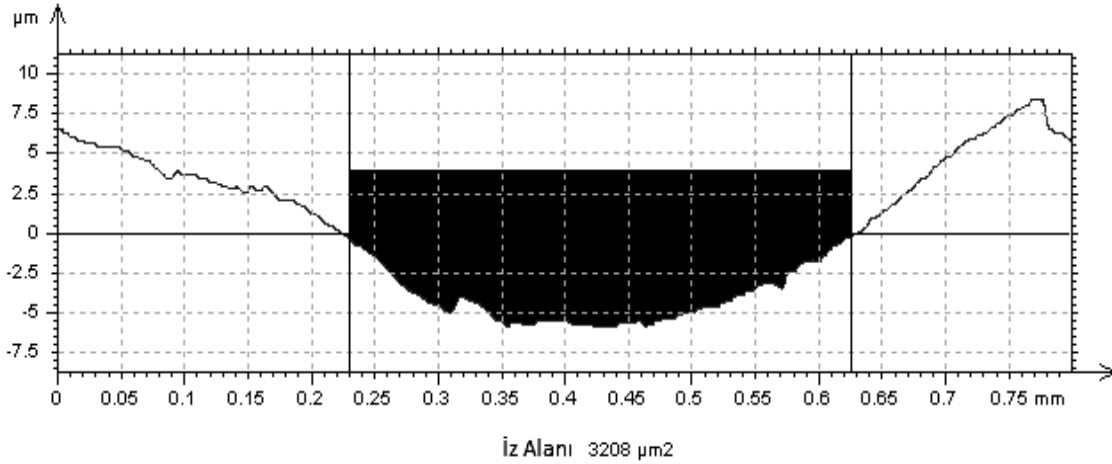


Şekil 6.15 ESD = 0.8 mm olan numunenin matris bölgesi EDS analizi

Ek B'de, etkili sementasyon derinliği 0.4 ve 0.65 mm olan numunelerin EDS analizleri verilmiştir. Yüzey bölgesinde karbon miktarları sırasıyla % 5.630 ve % 4.458 olarak belirlenmiştir. Karbürleme süresine göre karbon miktarındaki değişim uyumlu bir ilişki göstermemektedir.

### 6.3 AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI

Aşınma deneyleri sonrası oluşan izler ölçülerek aşınma oranları tespit edilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunenin 64 N yükte ve 200 m kayma mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonrası ölçülen iz alanı Şekil 6.16'da verilmiştir.



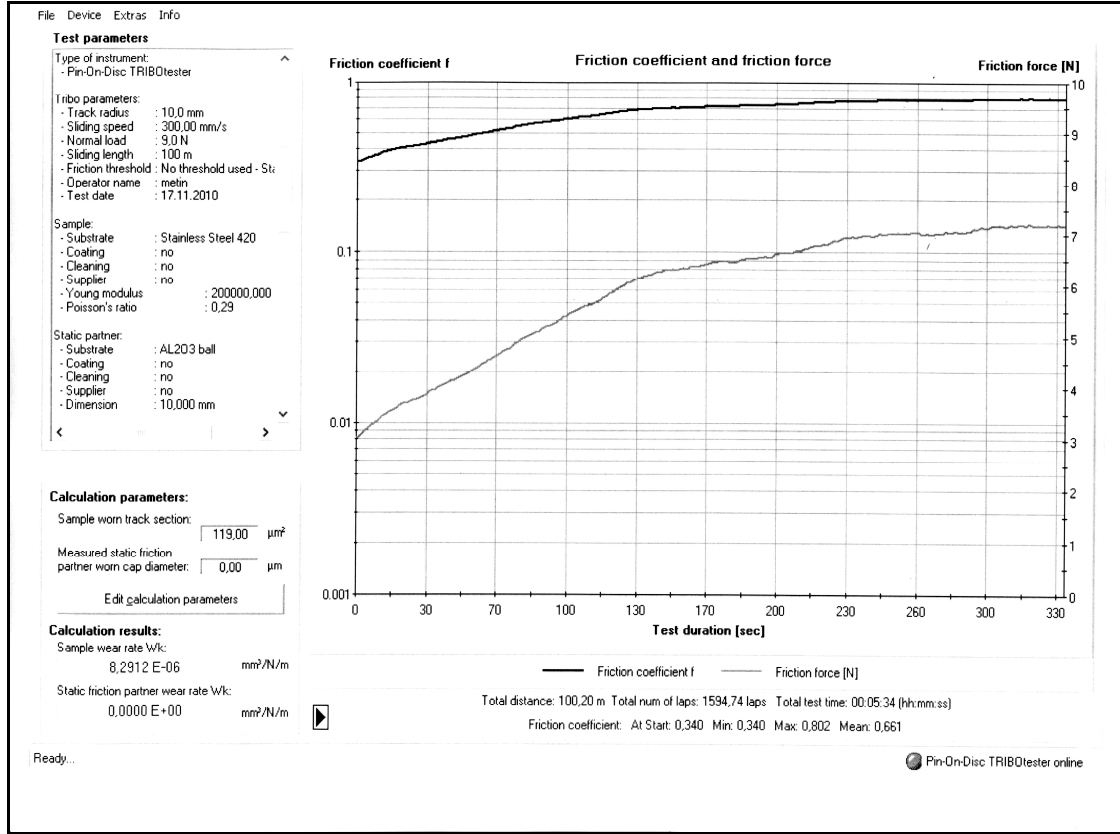
Şekil 6.16 Aşındırılan ısıl işlem görmeyen numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki iz alanı.

ESD = 0.8 mm, kayma mesafeleri 100 m olan numunelerin kuru ve yağlı ortamda aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Bu grafiklerde, numunelerin iz alanları ve iz alanlarından hesaplanan aşınma oranları da görülmektedir.

ESD = 0.8 mm olan numune kuru ortamda 9 N yük ile 100 m aşındırıldığında, test süresi arttıkça sürtünme kuvvetinin başlangıçta doğrusal bir artma gösterdiği, daha sonra ise yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir. Başlangıçta yaklaşık olarak 3 N olan sürtünme kuvveti, test sonunda yaklaşık 7.2 N'a, sürtünme katsayısı ise 0.35'den 0.8 değerine ulaşmıştır.

ESD = 0.8 mm olan numune yağlı ortamda 64 N yük ile 100 m aşındırıldığında ise sürtünme kuvveti yaklaşık (6.5 N) aynı kalmaktadır. Sürtünme katsayısı ise yaklaşık 0.1 dolayındadır.

Belevi ve Eş (2007) yaptıkları çalışmada, yağın sürtünmeyi azaltarak sürtünme kuvvetini de azalttığı dolayısıyla aşınmanın da azaldığını ifade etmişlerdir.

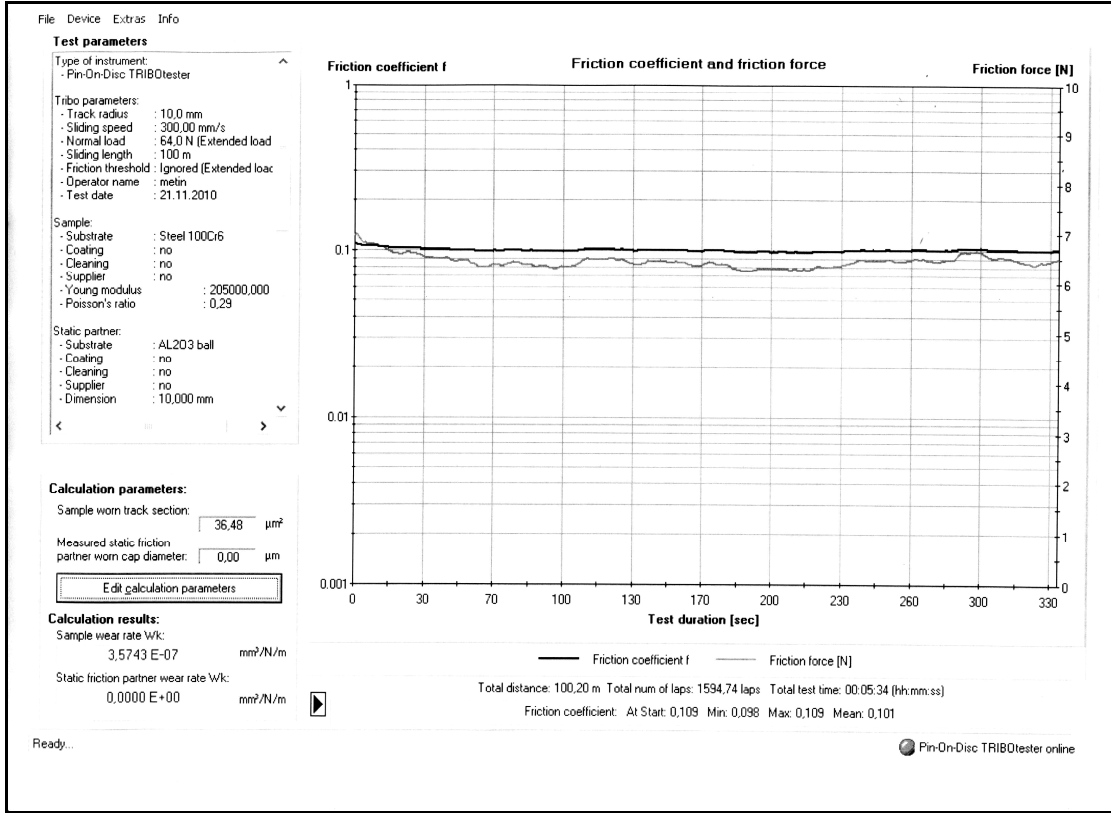


Şekil 6.17 Kuru ortamda aşındırılan ESD = 0.8 mm olan numunenin sürtünme grafiği.

Pintaude et al. (2003) yaptıkları çalışmada sertliği yüksek olan metallerin sürtünme katsayısı değerinin düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

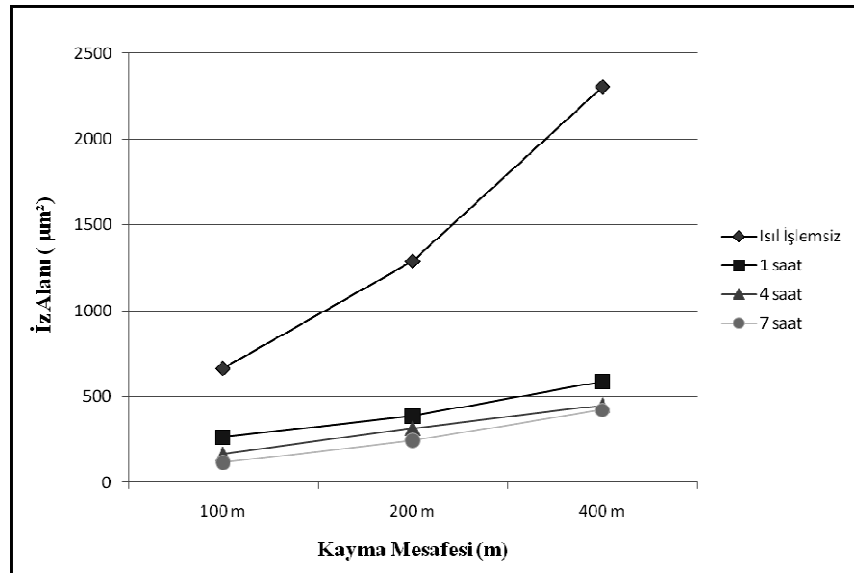
Literatürde Hernandez et al. (2009) yaptıkları çalışmada karbon oranının sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olduğunu, karbon oranının artışı ile aşınma oranının azaldığını ifade etmişlerdir.

Kuru ve yağlı ortamda yapılan deneylerin sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ek C'de, tüm numunelerin aşınma deneyleri sonunda elde edilen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı grafikleri ile aşınma oranları verilmiştir.



Şekil 6.18 Yağlı ortamda aşındırılan ESD = 0.8 mm olan numunenin sürtünme grafiği.

Isıl işlem görmeyen numune ve farklı karbürleme sürelerinde sementasyon uygulanan numunelerin; kuru ortamda 9 N yükte, 100 m, 200 m ve 400 m kayma mesafelerinde yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan iz alanına ait grafik Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19 Kuru ortamda aşındırılan numunelerin 9 N yükte aşınma grafiği.

Isıl işlem uygulanmamış numuneler kuru ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $662.8 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $1288 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $2302.6 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $4.618 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $5.3924 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $2.4112 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

ESD = 0.4 mm olan numuneler kuru ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $263.8 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $386.8 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $588.8 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $1.838 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.619 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $8.2187 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

ESD = 0.65 mm olan numuneler kuru ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $166.2 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $316.4 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $451.4 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $1.158 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.3247 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $6.3 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

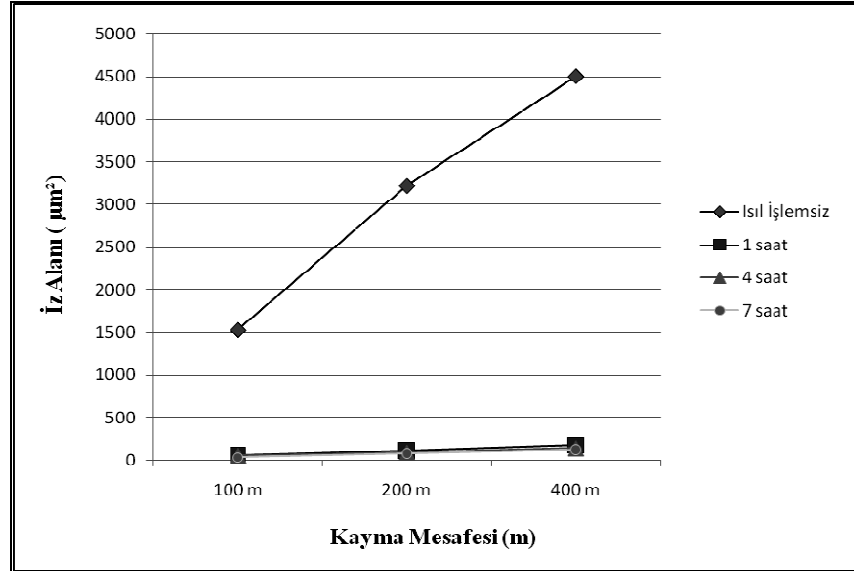
ESD = 0.8 mm olan numuneler kuru ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $119 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $246.4 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $422.2 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $8.29 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.03 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $5.89 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

Kayma mesafesi arttıkça iz alanının yani aşınma oranının arttığı görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış numunenin aşınma oranının çok yüksek olduğu, sementasyon uygulanmış numunelerin ise karbürleme süresi artışına bağlı olarak aşınma oranlarının azaldığı şekilden görülmektedir.

Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin kayma mesafelerine göre aşınma oranlarının, ESD = 0.65 ve ESD = 0.8 mm olan numunelere göre daha yüksek olduğu, ESD = 0.8 mm olan numunenin ise aşınma oranlarının daha düşük olduğu saptanmıştır. Çünkü bu numunelerin yüzey sertlikleri ve etkili sementasyon derinlikleri daha yüksektir.

Çalık vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada aynı çeliğin sertlik ve aşınma karakteristikleri arasında lineer bir ilişki olduğu, test süresi arttıkça aşınmanın da arttığı ifade edilmiştir. Yeğen ve Usta (2010) yaptıkları çalışmada, farklı sürelerde karbürlenen çeliklerin karbürleme süresi arttıkça yüzey sertliklerinin ve sertlik derinliklerinin arttığı, aşınma oranlarının ise azaldığı ifade edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmamış numune ve farklı karbürleme sürelerinde sementasyon uygulanan numunelerin; yağlı ortamda 64 N yükte, 100 m, 200 m ve 400 m kayma mesafelerinde yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan iz alanına ait grafik Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20 Yağlı ortamda aşındırılan numunelerin 64 N yükte aşınma grafiği.

Isıl işlem uygulanmamış numuneler yağlı ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $1528.4 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $3217.6 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $4500.2 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $1.4975 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.8944 \text{ E-}05 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $8.8334 \text{ E-}06 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

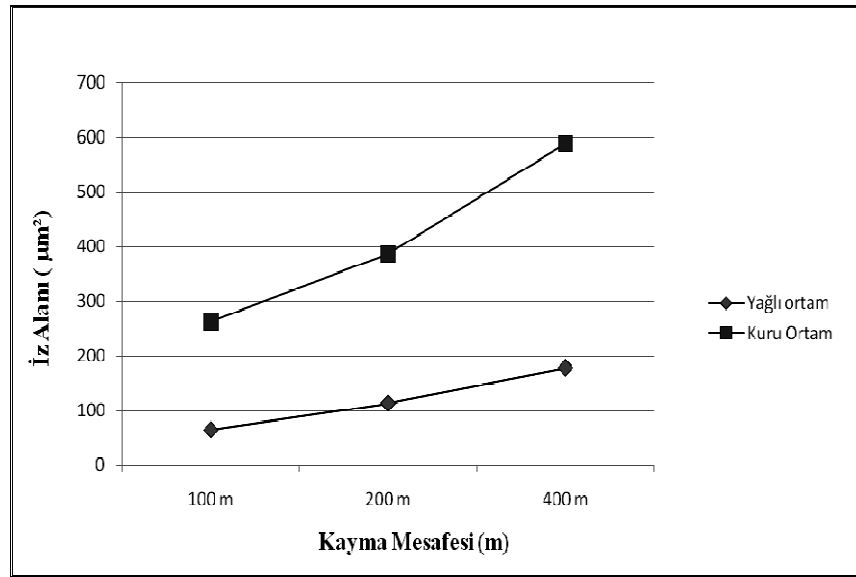
ESD = 0.4 mm olan numuneler yağlı ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $65.18 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $114 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $178.6 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $6.3862 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $6.7118 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $3.5057 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

ESD = 0.65 mm olan numuneler yağlı ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $57.22 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $92,34 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $141 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $5.6063 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $9.0473 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $2.7677 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

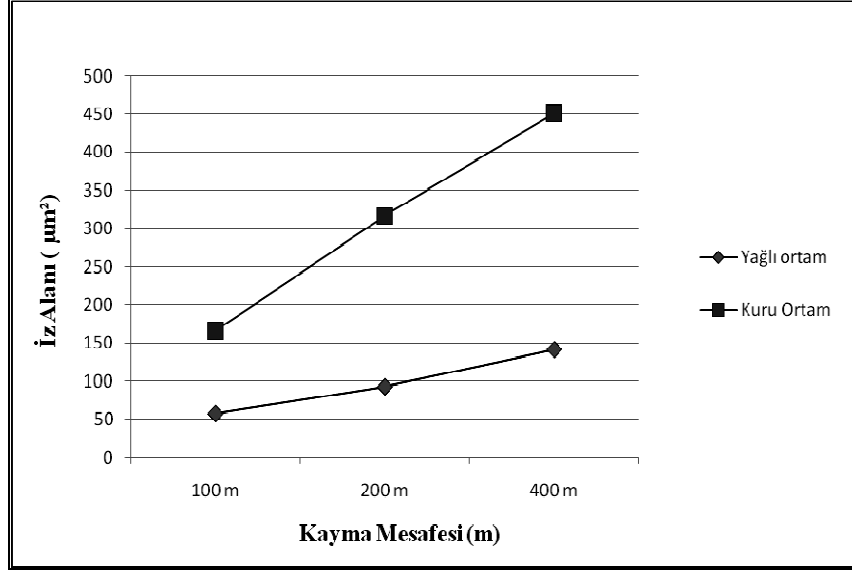
ESD = 0.8 mm olan numuneler yağlı ortamda 100 m aşındırıldığında iz alanı  $36.48 \mu\text{m}^2$ , 200 m aşındırıldığında iz alanı  $82,94 \mu\text{m}^2$ , 400 m olduğunda  $123,4 \mu\text{m}^2$ , aşınma oranları ise sırasıyla,  $3.5743 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $4.8831 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $2.4222 \text{ E-}07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak saptanmıştır.

Burada ısıl işlem uygulanmamış numunelerin diğer numunelere göre çok fazla aşındığı görülmektedir. Karbürlenmiş numunelerin yağlı ortamda aşınma oranlarının oldukça düşük değerlerde olduğu saptanmıştır. Belevi ve Eş (2007) yağlı ortamda çalışma şartlarının ağırlık kaybını yani aşınmayı önemli ölçüde düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

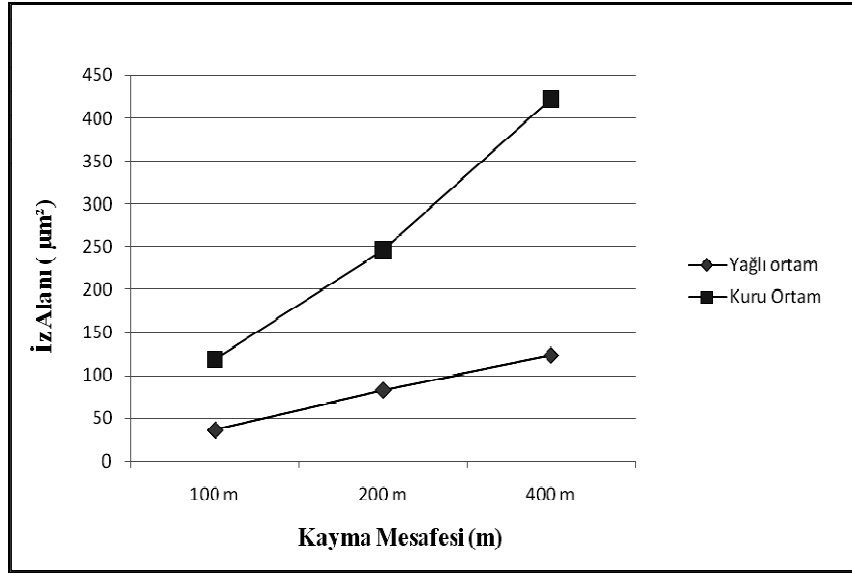
Kuru ve yağlı ortamda aşındırılan numunelerin her karbürleme süresi için oluşturulan aşınma grafikleri Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'de verilmiştir. Kuru ortamdaki numunelerin daha büyük aşınma iz alanları oluşturduğu, dolayısıyla aşınma dirençlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Yani, sementasyon yapılmış numunelerde, kuru ortamda daha az yük ile aşınmanın, yağlı ortam ve daha fazla yüke göre çok yüksek olduğu ve yol arttıkça aşınmanın daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 6.21 ESD = 0.4 mm olan numunelerin kuru ve yağlı ortamlardaki aşınma grafikleri.

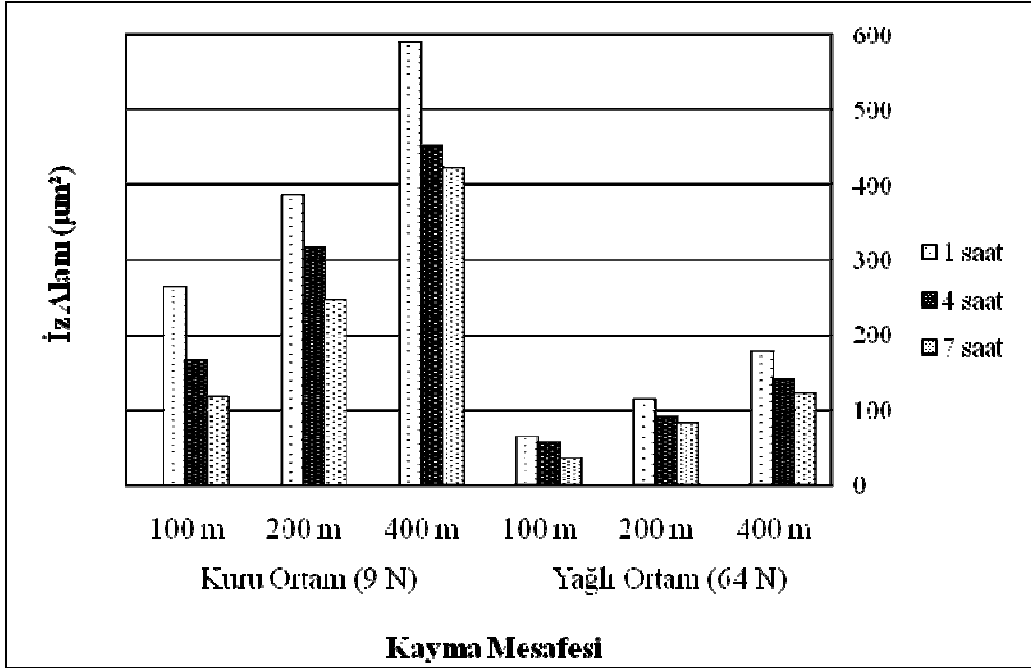


Şekil 6.22 ESD = 0.65 mm olan numunelerin kuru ve yağlı ortamlardaki aşınma grafikleri.



Şekil 6.23 ESD = 0.8 mm olan numunelerin kuru ve yağlı ortamlardaki aşınma grafikleri.

Kuru ve yağlı ortamlarda farklı karbürleme süreleri ve kayma mesafelerindeki numunelerin toplu grafikleri Şekil 6.24'de verilmiştir. Karbürleme süresi arttıkça aşınmanın azaldığı, kuru ve yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan çeliğin en fazla aşınma oranına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.24 Kuru ve yağlı ortamlarda farklı karbürleme süreleri ve kayma mesafelerindeki numunelerin iz alanları.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gaz sementasyon yapılmış SAE 8620 çeliğinin sertlik derinliğine bağlı olarak kuru ve yağlı ortamlar için abrasif aşınma davranışı irdelenmiştir. Sertlik derinliği arttıkça çeliğin aşınma direncinin arttığı, kuru ortamda ise aşınma oranının çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, her iki ortamda da sertlik derinliğine bağlı olarak aşınmanın azaldığı saptanmıştır.

Endüstride genellikle dişli çarklar gibi iş parçalarında kullanılan bu çeliklere uygun yüzey sertliği ve sertlik derinlikleri kazandırıldığında çalışma ömürleri artacaktır. Ayrıca, çalışma ortamında toz, kir, kömür tozu vb. aşındırıcılar bulunması durumunda parça kuru ortamda çok fazla, yağlı ortamda ise çok daha az aşınacaktır ve dolayısıyla ekonomik kayıplar da azalacaktır.

#### Genel Sonuçlar:

- Karbürleme süresi arttıkça yüzeyde karbon miktarları, sertlik değerleri ve sertlik derinlikleri artmaktadır.
- Yüzeyde karbon miktarının artması yüzey sertliğini artırmaktadır.
- Yüzeyden matrise doğru ilerledikçe sertlik değerleri düşmektedir.
- Karbürleme süresi arttıkça sertlik derinliği artmaktadır.
- Sementasyon işlemi sonrasında mikroyapıda ağırlıklı olarak temperlenmiş martenzit ve kalıntı ostenit bulunmaktadır.
- Yol arttıkça aşınma doğrusal olarak artmaktadır.
- Isıl işlem uygulanmamış çeliğin aşınması çok yüksektir.
- Etkili sementasyon derinliği ve yüzey sertliği artışı ile aşınma direnci artmaktadır.
- Yağlama ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti azalmaktadır. Bu da aşınma direncini artırmaktadır.

- Kuru ortamda aşınma oranı çok yüksektir. Kuru ortam ve daha az yük ile aşınma, yağlı ortam ve daha fazla yüke göre çok yüksektir ve yol arttıkça aşınma daha da artmaktadır.

### **Öneriler:**

- Kalıntı ostenit ve detaylı SEM incelemeleri çalışmaya derinlik katacaktır.
- Sementasyon yapılan numunelerde karbon oranının yüzeyden merkeze doğru belirlenmesi yararlı olacaktır.
- Farklı sertlik derinliklerine sahip çeliklerin çekme, eğme, darbe, yorulma dayanımlarının saptanması da endüstride önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut H** (2007) *Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları*. Sakarya Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü, Ders Notları (yayımlanmamış), Sakarya
- Akkurt M** (1992) *Makine Elemanları Cilt 2*, İTÜ, İstanbul, 216 s.
- Akkurt M** (2000) *Makine Elemanları Kitabı*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Asi O** (2004) Sementasyon yapılan SAE 8620 çeliğinde meydana gelen kalıntı ostenit miktarlarının incelenmesi. *G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, s. 103-113
- Asi O, Can A Ç, Pineault J and Belassel M** (2008) The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel. *Materials and Design*
- Asil Çelik** (1986) *Sementasyon Çelikleri*. Teknik Yayınlar 5, Bursa, 33 s.
- ASM** (1991) *Heat Treating*. Volume 4, Handbook, United States of America, 2173 p.
- ASM** (1992) *Friction, Lubrication and Wear Technology*. Handbook, Volume 18, United States of America, 1879 p.
- Ay İ** (2010) *Aşınma Sonucu Doğan Hasarlar*. Hasar Analizi Ders Notları (yayımlanmamış), Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir
- Bejar M A and Moreno E** (2006) Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 352-358
- Belevi M ve Eş M** (2007) 16MnCr5'ten yapılmış silindirlerin kaymalı-yuvarlanma koşullarında aşınma karakteristiklerinin incelenmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, İzmir, s. 45-57
- Benedetti M, Fontanari V, Höhn B-R, Oster P and Tobie T** (2002) Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears. *International Journal of Fatigue*, p. 1127-1136
- Bensely A, Prabhakaran A, Mohan Lal D and Nagarajan G** (2006) Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment. *Cryogenics*, p. 747-754
- Bepari M M A and Shorowordi K M** (2004) Effects of molybdenum and nickel additions on the structure and properties of carburized and hardened low carbon steels. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 1972-1979

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Boniardi M, D\_Errico F and Tagliabue C** (2006) Influence of carburizing and nitriding on failure of gears – A case study. *Engineering Failure Analysis*, p. 312-339
- Büyükkelleci** (2008) *Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 62 s.
- Çalık A, Düzgün A, Ekinci A E, Karakaş S and Uçar N** (2009) Comparison of Hardness and Wear Behaviour of Boronized and Carburized AISI 8620 Steels., *Acta Physica Polonica*, Volume 1164
- Çelik O N, Akbayır Ö, Gaşan H, Er Ü ve Aydınbeyli N** (2008) Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrasif Aşınma Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Eskişehir
- Erdem S** (2006) *Yüksek Karbon İçeriğine Sahip Yüksek Kromlu, Manganlı ve Alaşımız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 83 s.
- Erdoğan M and Tekeli S** (2002) The effect of martensite particle size on tensile fracture of surface carburised AISI 8620 steel with dual phase core microstructure. *Materials and Design*, p. 597-604
- Farfan S, Rubio-Gonzalez C, Cervantes-Hernandez T and Mesmacque G** (2004) High cycle fatigue, low cycle fatigue and failure modes of a carburized steel. *Engineering Failure Analysis*, 673-678
- Findley K O, Krauss G and Matlock D K** (2009) Predicting fatigue lives of carburized steels based on residual stress profiles and microstructural influences. *Proceedings of International Conference on Fracture*, Ottawa, Canada
- Foreman R W** (1991) *Heat Treating*. Volume 4, United States of America, p. 749-751
- Genel K and Demirkol M** (1998) Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel. *International Journal of Fatigue*, p. 207-212
- Garcia Prieto I, Faulkner M D and Alcock J R** (2004) The influence of specimen misalignment on wear in conforming pin on disk tests. *Wear*, p. 157-166
- Godding A D** (1991) *Heat Treating*. Volume 4, United States of America, p.755-757
- Guicciardi S, Sciti D, Melandri C and Pezzotti G** (2007) Dry sliding wear behavior of nano-sized SiC pins against SiC and Si3N4 discs. *Wear*, p. 529-535
- Guo M, Liu A, Zhao M, Hu H and Wanget Z** (2008) Microstructure and wear resistance of low carbon steel surface strengthened by plasma melt injection of SiC particles. *Surface & Coatings Technology*, p. 4041-4046

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hawk J A, Wilson R D, Tylczak J H and Doğan Ö N** (1999) Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, p. 1031-1042
- Hollomon J H and Jaffe L D** (1945) *Time-Temperature Relations in Tempering Steel*. Trans. AIME, Vol 162, p. 223-249.
- Höhn B R and Michaelis K** (2004) Influence of oil temperature on gear failures. *Tribology International*, p. 103-109
- İpek R** (1992) *AISI 1020 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5115 Çeliğinin Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması*. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 221 s.
- İzciler M and Tabur M** (2006) Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel. *Wear*, p. 90-98
- Jackquet P, Rouse D R, Bernard G and Lambertin M** (2002) A Novel Technique to Monitor Carburizing Processes. *Materials Chemistry and Physics*, p. 542–551.
- Kahraman ve Akcan** (2007) Gaz karbürlenmiş AISI 8620 çeliğinin karbon profiline proses parametrelerinin etkisi. *Çukurova Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Adana, s. 1011-1109
- Karagöz İ** (2007) *Sementasyon Çeliklerinde Difüzyon ve Sertlik Derinliğini Arttıracak Isıl İşlem Koşullarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 134 s.
- Khrushchov M M and Babichev M A** (1958) An Investigation of the Wear of Metals and Alloys by Rubbing on an Adhesive Surface. *Friction and Wear in Machinery*, Volume 12, p. 1-13
- Kılınç Y** (1993) *Yağlı Sürtünme Şartlarında Çelik İnce Zırh Yataklarında Üretim Tekniklerinin Aşınma Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, s. 1-25
- Kim H J and Kweon Y G** (1996) High cycle fatigue behavior of gas carburized medium carbon Cr-Mo steel. Volume 27A, *Metallurgical and Materials Transactions*
- Korkut M H** (1991) *Sürtünmeye maruz metalik disklerin aşınma bölgelerinde dolgu kaynak işleminden sonra aşınma özelliklerinin değişiminin deneysel araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, s. 1-25
- Krauss G** (1991) *Microstructure and properties of carburized steel*. Metals Handbook, Heat Treating, Volume 4, ASM, p. 363
- Krauss G** (1995) *Microstructure and Performance of Carburized Steel*. Austenite & Fatigue Special Papers, ASM International, Metals Park OH, p. 5-15

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Krauss G** (1999) Martensite in steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering*, p. 40-57
- Metals Handbook** (1989) *Mechanical Testing*. Volume 8, Ninth Edition, ASM Handbook Committee, USA
- Metals Handbook** (1998) *Structure/Property Relationships in Irons and Steels*. Steels and High Performance Alloys, ASM International, p. 153–173
- Modi O P, Mondal D P, Prasad B K, Singh M and Khaira H K** (2003) Abrasive wear behaviour of a high carbon steel: effects of microstructure and experimental parameters and correlation with mechanical properties. *Materials Science and Engineering*, p. 235-242
- Moore J J and Perez R** (1983) The Influence of Grinding Ball Composition and Wet Grinding Conditions on Metal Wear. *Wear of Materials*, American Society of Mechanical Engineers, p. 67-78
- Odabaş D** (1987) *Ötektoid altı çeliklerin kayma sürtünme aşınmasında adhesiv aşınma katsayılarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, s. 50-65
- Özsaraç U, Yılmaz R, Ekerer F A ve Uzun H** (2002) Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikroyapı değişimlerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, Adapazarı
- Parrish G** (1999) *Carburizing: Microstructures and Properties*, ASM International, Metals Park OH.
- Pintaude G, Tanaka D K and Sinatora A** (2003) The effects of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on-disk apparatus. *Wear*, p. 55-59
- Rabinowicz E** (1965) *Friction And Wear Of Materials*. John Wiley & Sons
- Selçuk B, İpek R and Karamış M B** (2003) A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 189-196
- Silva V F, Canale L F, Spinelli D, Bose-Filho W W and Crnkovic O R** (1999) Influence of retained austenite on short fatigue crack growth and wear resistance of case carburized steel. *JMEPEG*, ASM International, p. 543-548
- Sönmez H E** (1996) *SAE 8620 çeliğinde gaz sementasyon yüzey sertlik derinliğinin eğmeli yorulma mukavemetine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Adapazarı, 72 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Spice J J and Matlock D K** (2002) *Optimized carburized steel fatigue performance as assessed with gear and modified brugger fatigue tests*. Society of Automotive Engineers
- Straffelini G and Versari L** (2008) Brittle intergranular fracture of a thread: the role of a carburizing treatment. *Engineering Failure Analysis*
- Sundström A, Rendon A and Olsson M** (2001) Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear*, p. 744-754
- Tabur M** (2003) *Farklı Isıl İşlemlerdeki 8620 Sementasyon Çeliğinin Abrasif Aşınma Davranışları*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 128 s.
- Tabur M, Izciler M, Gül F and Karacan I** (2009) Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. *Wear*, p. 1106-1112
- Thelning K E** (1984) *Case hardening, Methods of carburizing*, Steel and Its Heat Treatment, Bofors Handbook, Sweden 339 p.
- Topbaş M A** (1998) *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*. İstanbul, 593 s.
- TS EN ISO 2639** (2006) Karbürleme ve Sertleştirmede Elde Edilen Etkili Derinliğin Tayini ve Doğrulanması. *TSE*, 9 s.
- TS EN 10084** (2009) Sementasyon Çelikleri. *TSE*, 34 s.
- TS ISO 10825** (2001) Dişli Çarklar Dişli Çark Dişlerindeki Aşınma ve Hasar. *TSE*, 54 s.
- Turhan E** (2001) *Farklı Isıl İşlemlerdeki 8620 Sementasyon Çeliğinin Abrasif Aşınma Davranışları*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 101 s.
- Uluğ B** (2006) *Sıfırlatı/Kreojenik Isıl İşlemin 100Cr6 ve 8620 Kalite Çeliklerin Özellikleri Üzerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 54 s.
- Ürün R** (2008) *Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 85 s.
- Victoria-Hernandez J, Hernandez-Silva D and Vite-Torres M** (2009) Microstructural characterization and sliding wear behavior of ultra high carbon steels processed by mechanical alloying. *Wear*, p. 340-344
- Walton A and Goodwin A J** (1998) The wear of unlubricated metallic spur gears. *Wear*, p. 103-113

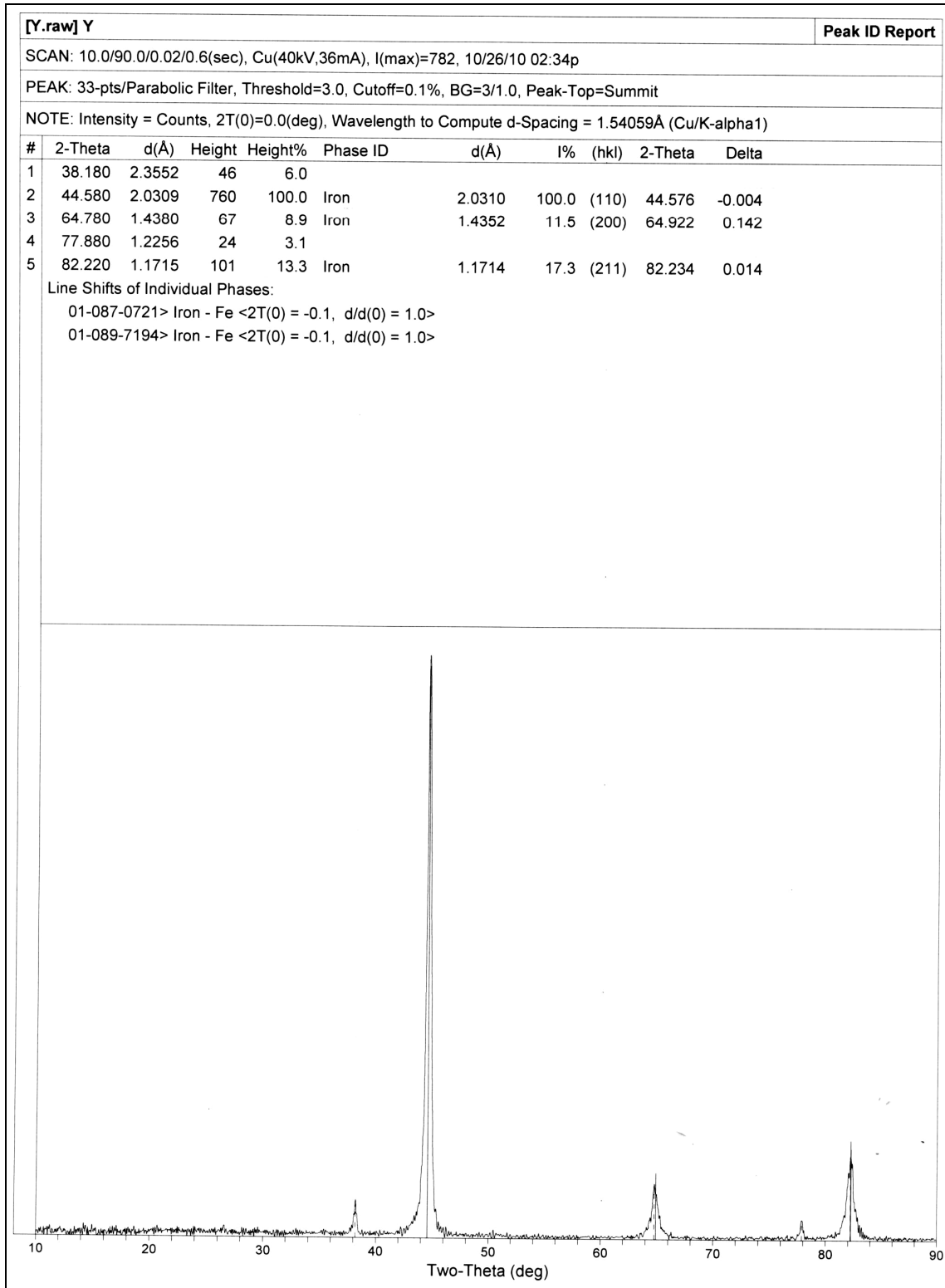
## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Xu X, Yu Z and Ding H** (2006) Failure analysis of a diesel engine gear-shaft. *Engineering Failure Analysis*, p. 1351-1357
- Yeğen İ and Usta M** (2010) The effect of salt bath cementation on mechanical behavior of hot-rolled and cold-drawn SAE 8620 and 16MnCr5 steels. *Vacuum*, p. 390-396
- Yıldız H B** (2006) *CuCrZr ve CuBe Alaşımlarının Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük, 93 s.
- Yin F, Fatemi A and Bonnen J** (2010) Variable amplitude fatigue behavior and life predictions of case-hardened steels. *International Journal of Fatigue*, p. 1126-1135

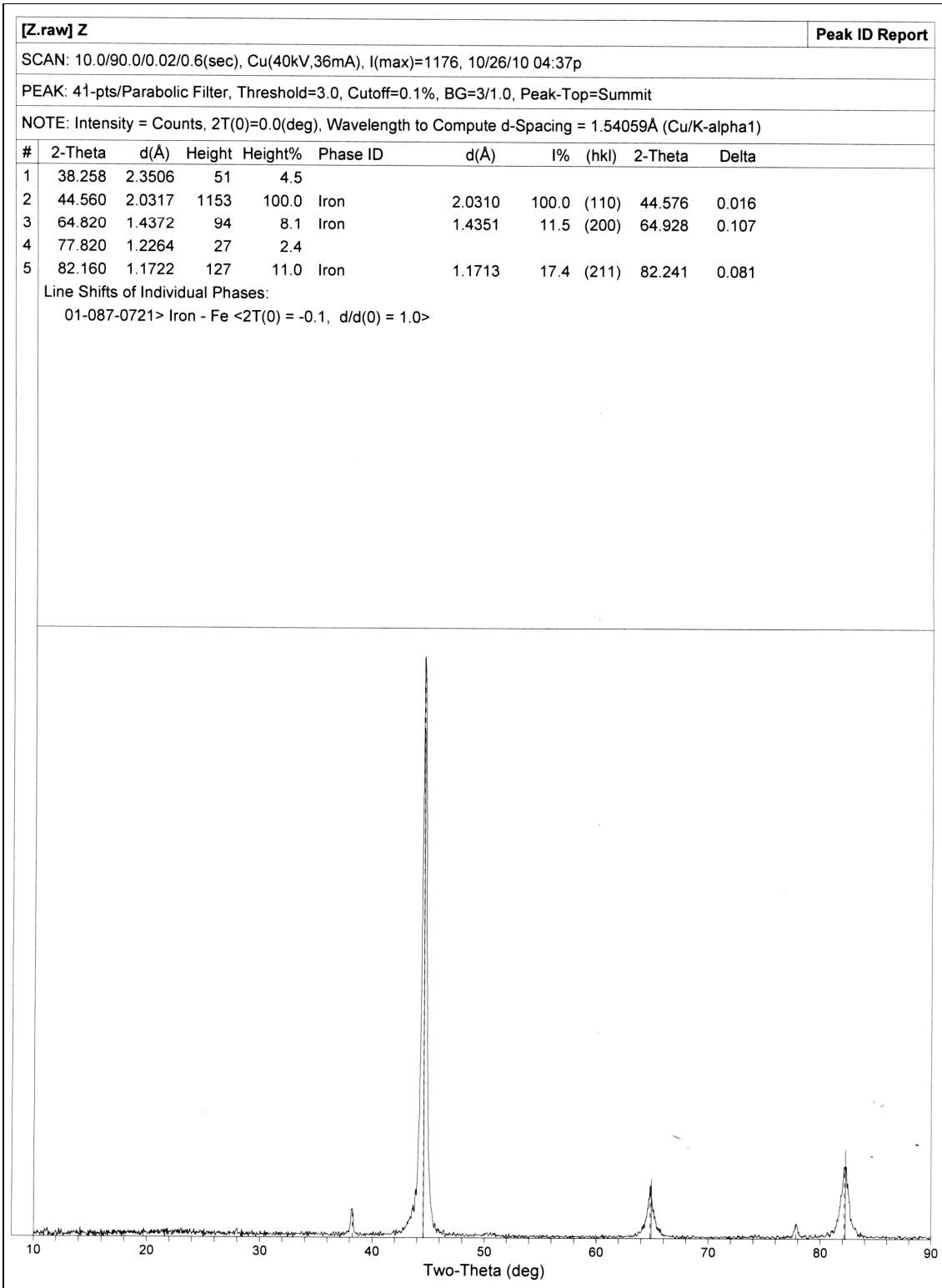
**EK AÇIKLAMALAR A**

**ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.65 VE 0.8 MM OLAN NUMUNELERİN  
XRD ANALİZLERİ**





Şekil A.1 ESD = 0.65 mm olan numunenin XRD analizi



Şekil A.2 ESD = 0.8 mm olan numunenin XRD analizi

**EK AÇIKLAMALAR B**

**ETKİLİ SEMENTASYON DERİNLİĞİ 0.4 VE 0.65 MM OLAN NUMUNELERİN  
GEÇİŞ BÖLGESİ EDS ANALİZLERİ**

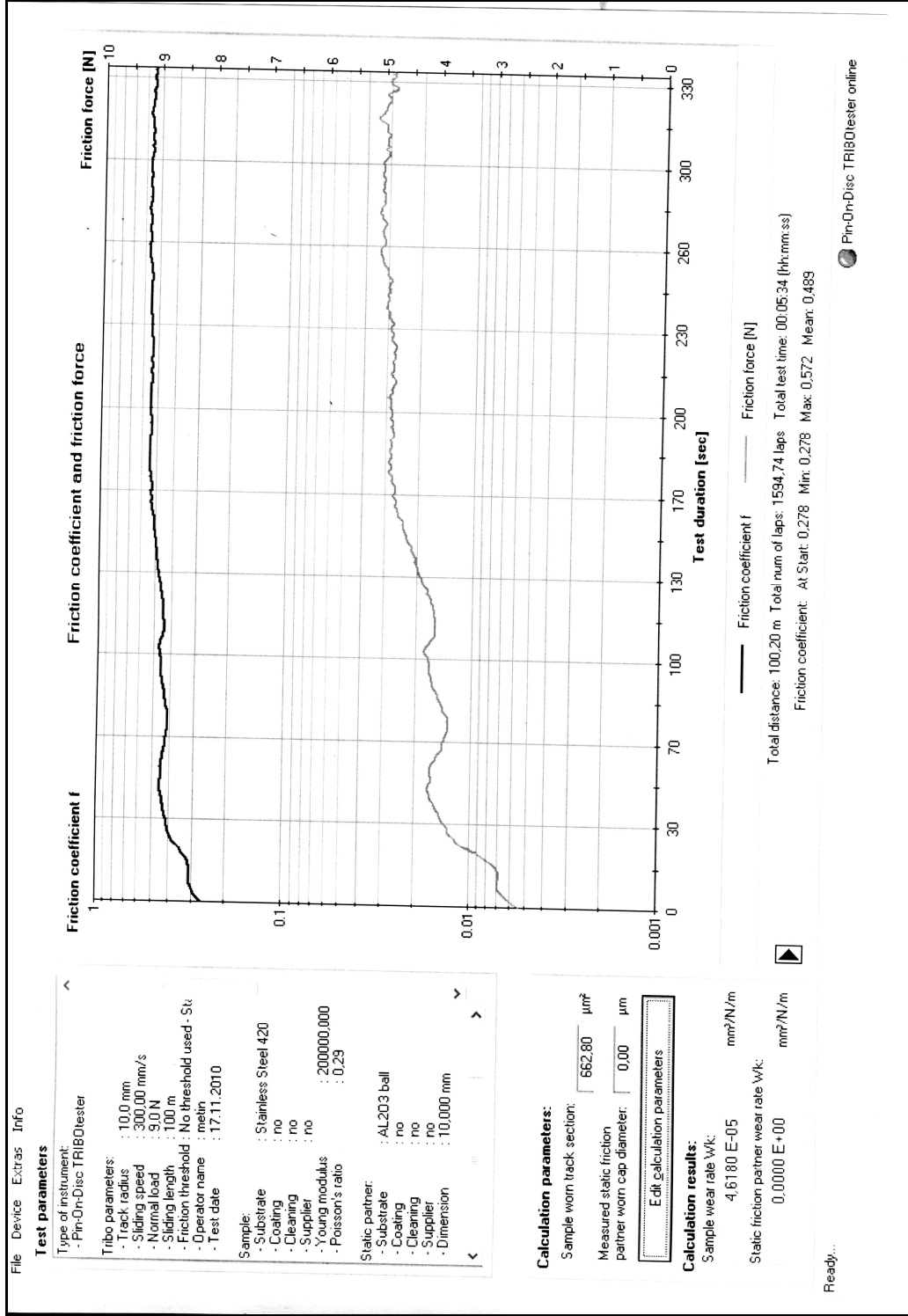




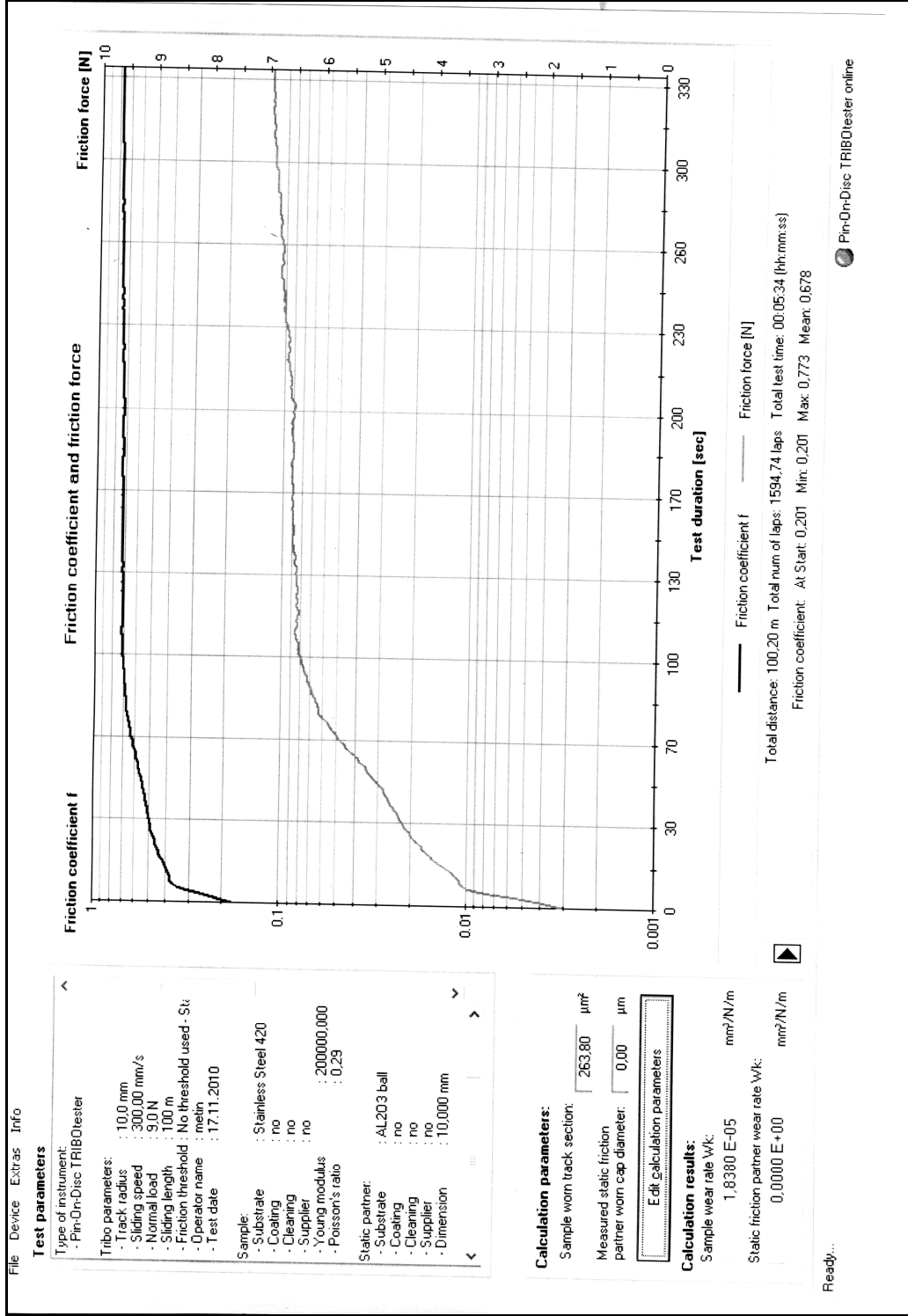


**EK AÇIKLAMALAR C**  
**KURU VE YAĞLI ORTAMDA AŞINDIRILAN NUMUNELERİN SÜRTÜNME**  
**GRAFİKLERİ**

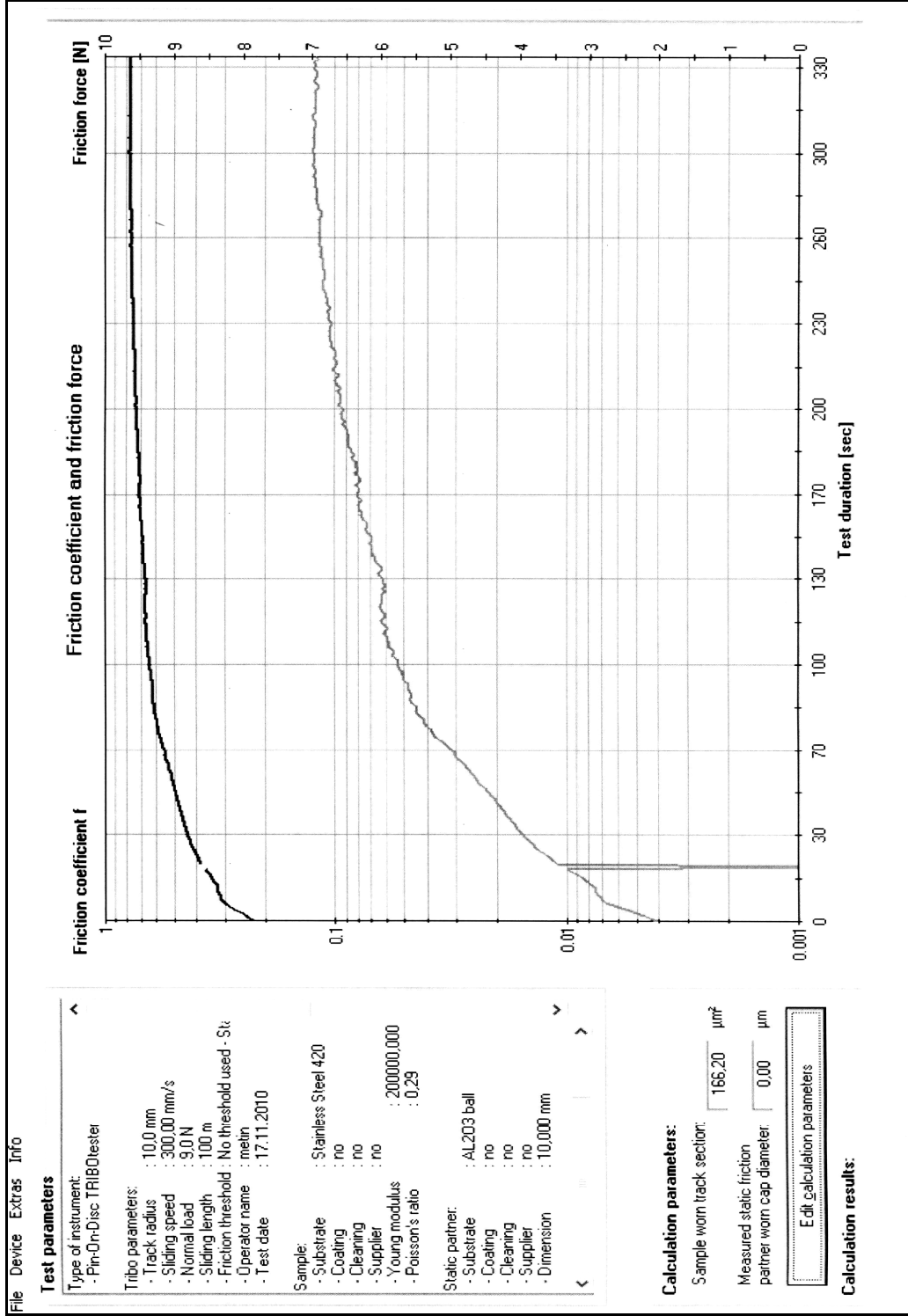




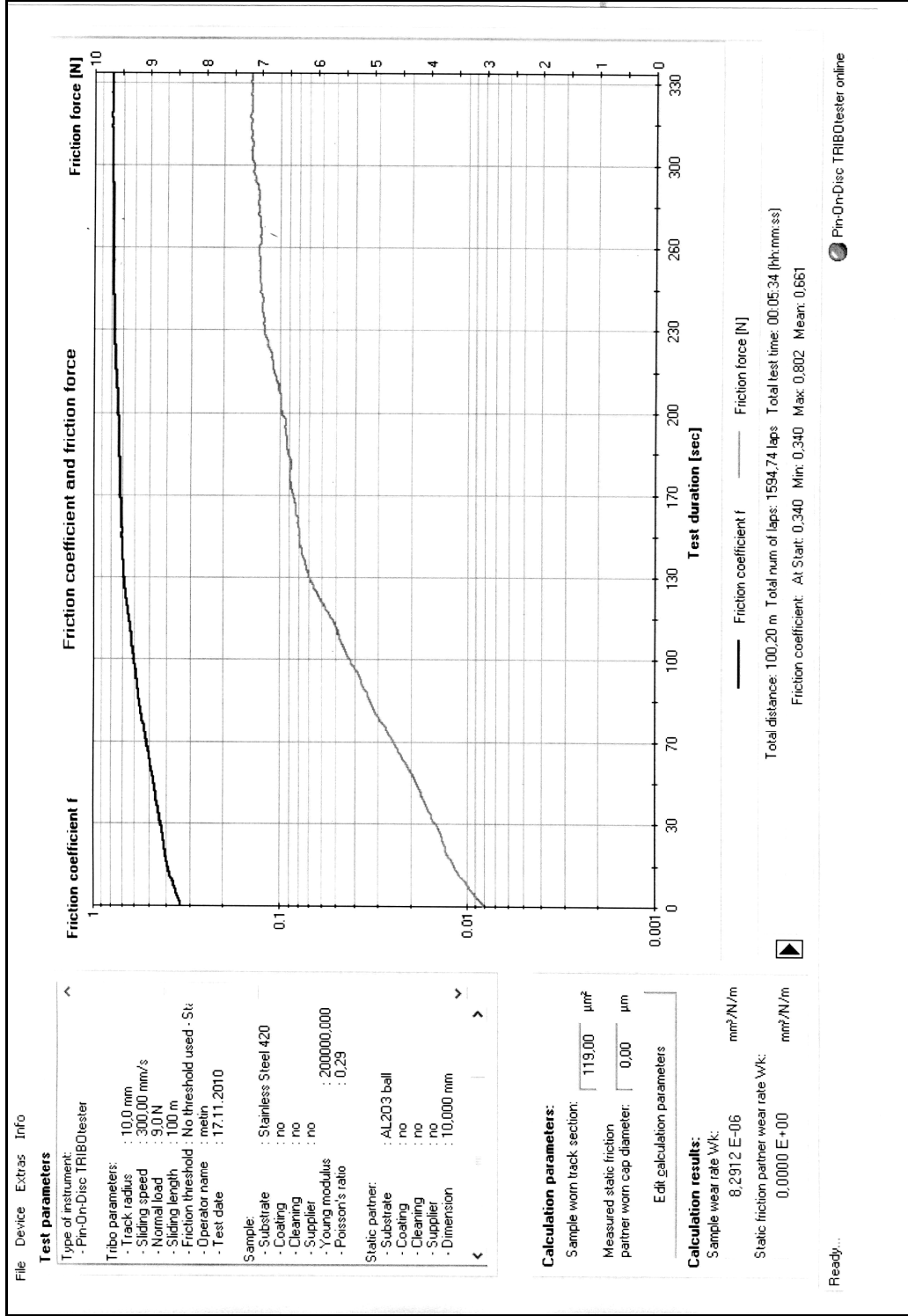
Şekil C.1 Kuru ortamda ısı işlem görmeyen numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme



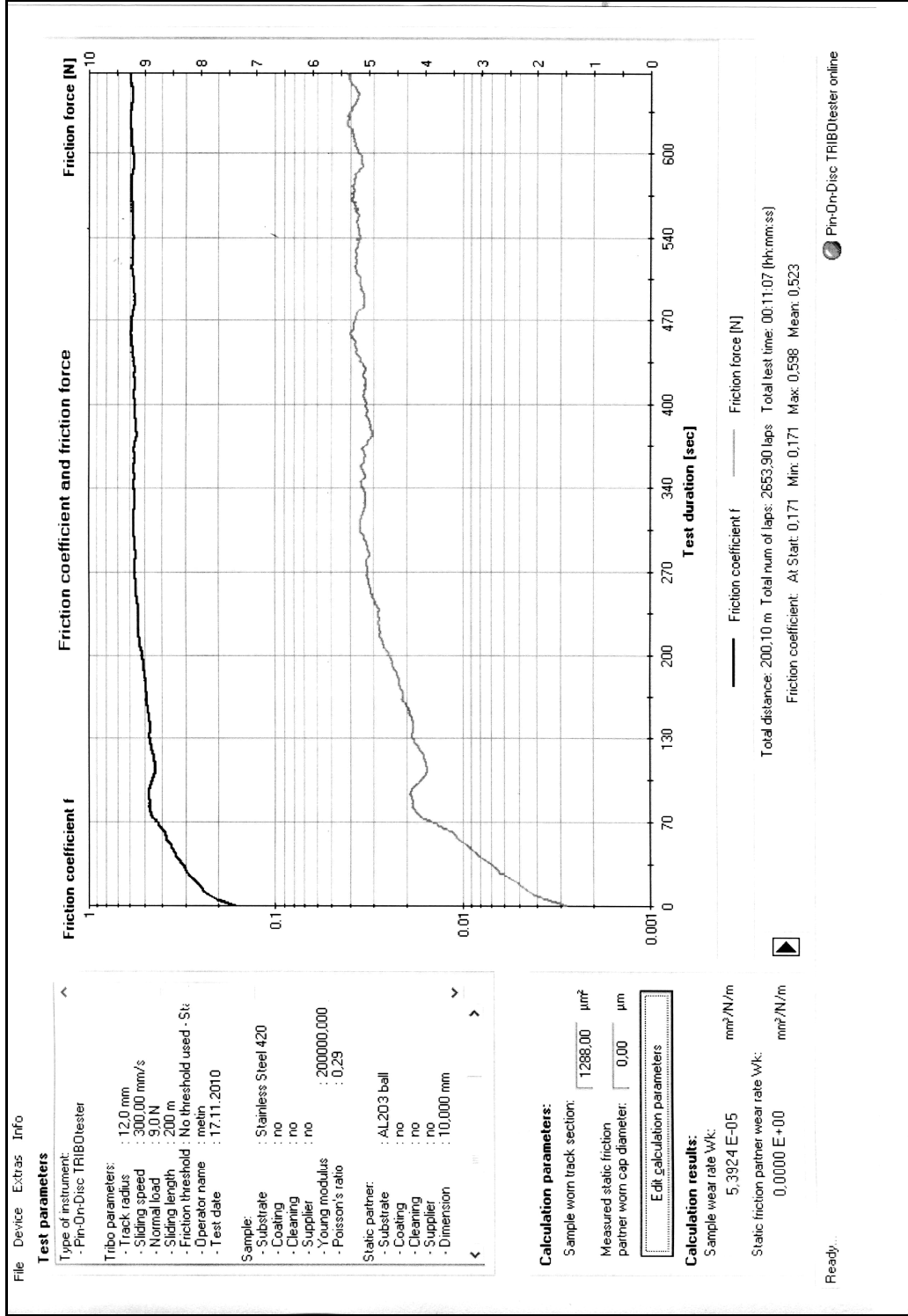
Şekil C.2 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



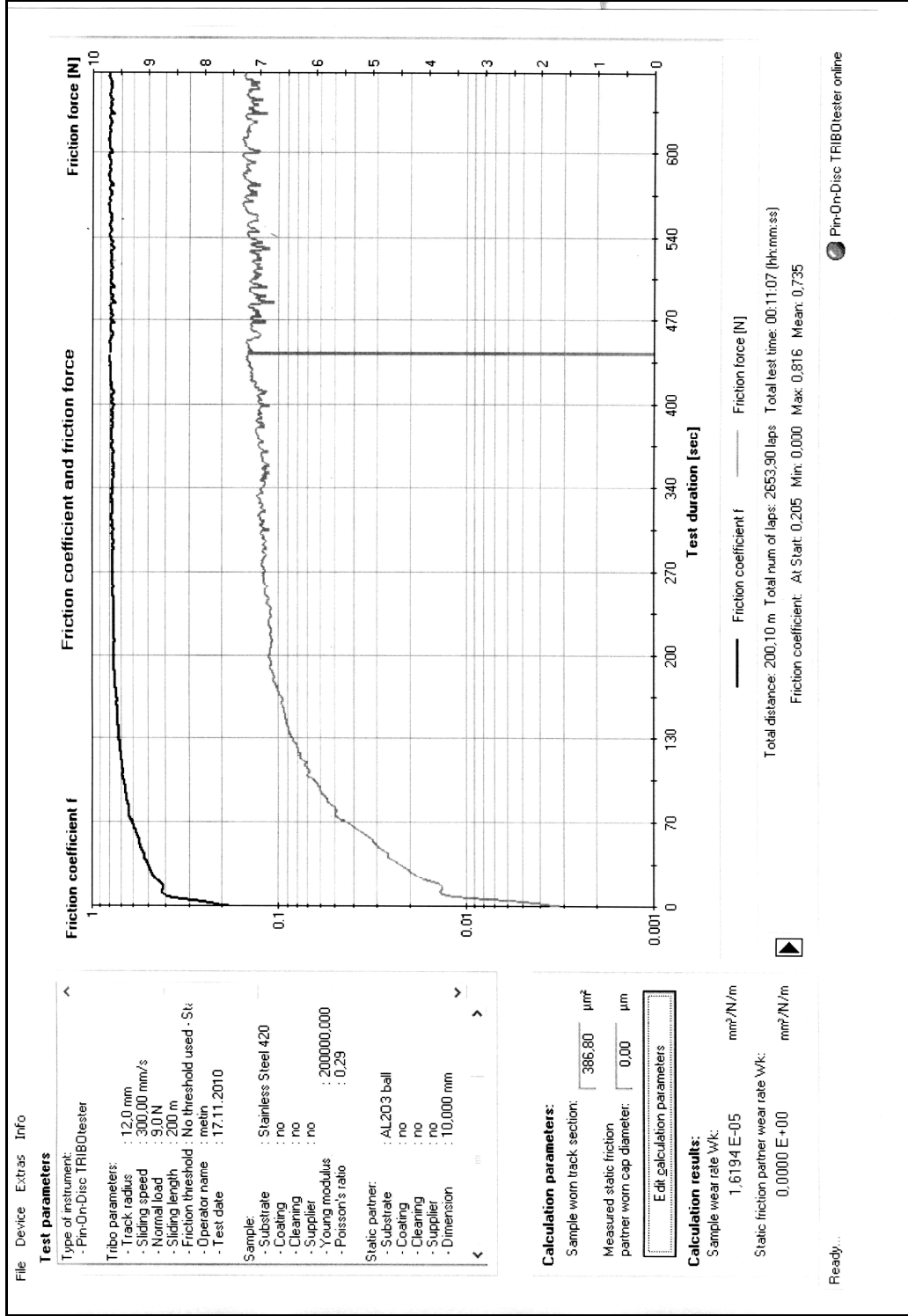
Şekil C.3 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



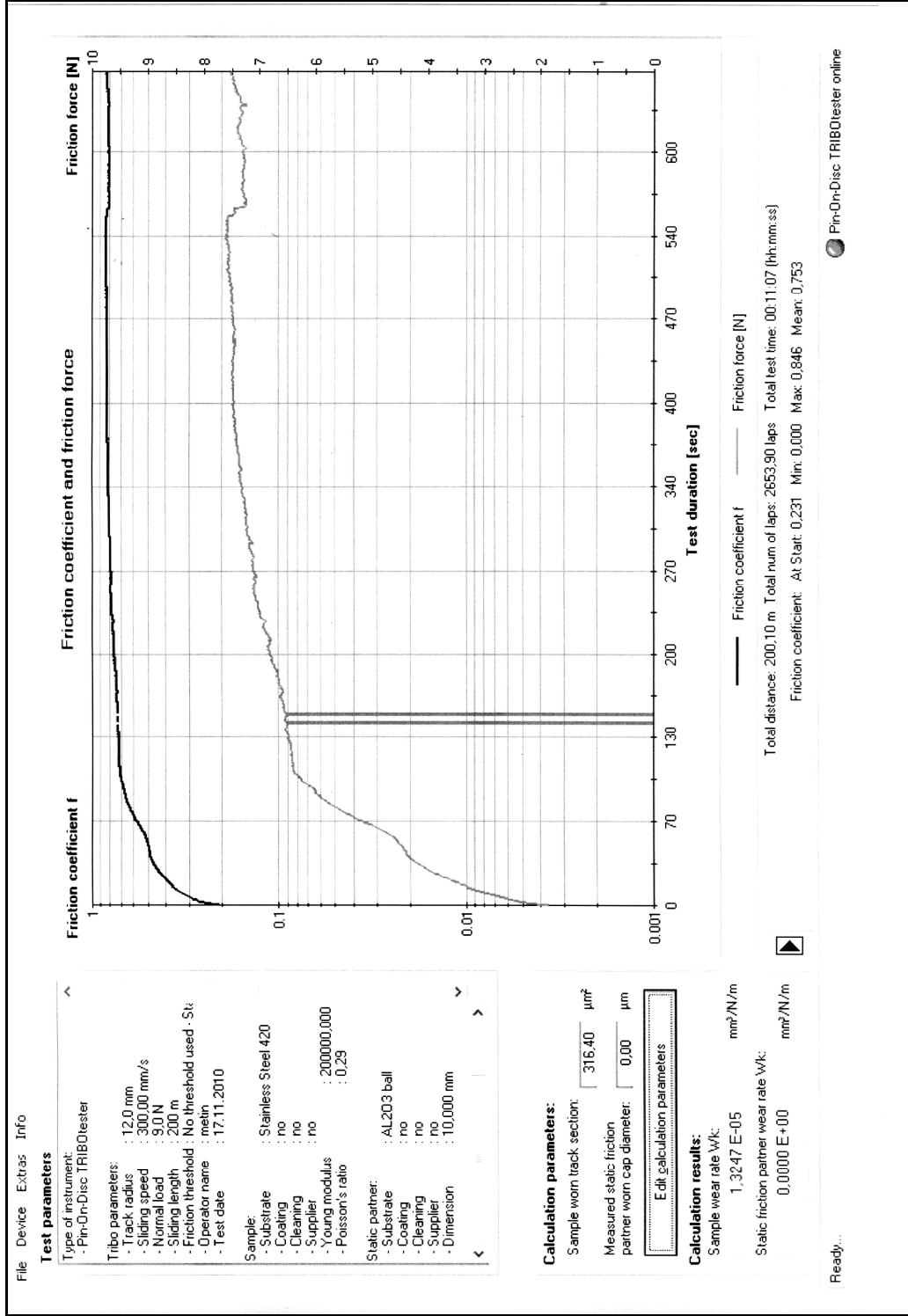
Şekil C.4 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



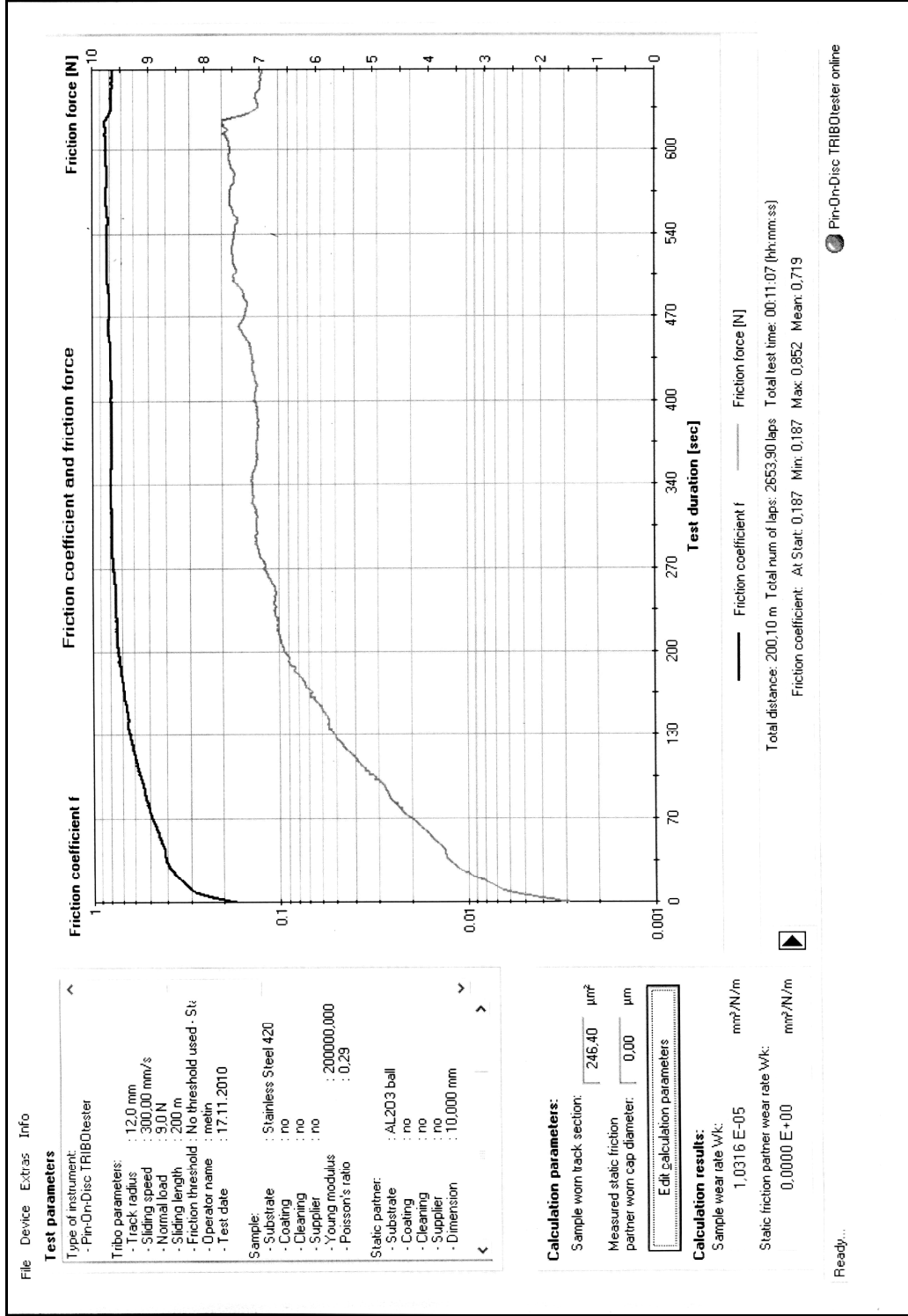
Şekil C.5 Kuru ortamda ısı işlem görmeyen numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



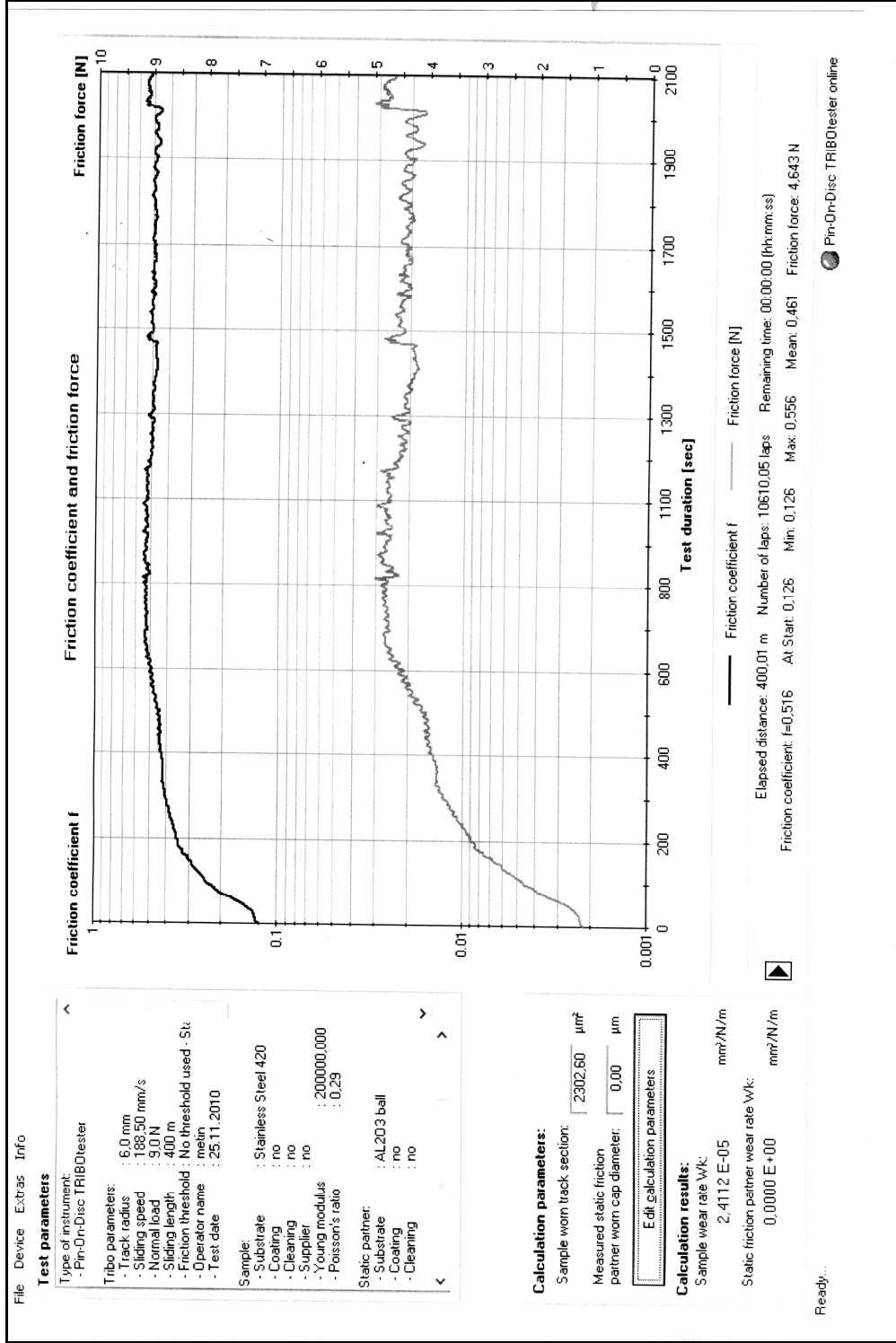
Şekil C.6 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



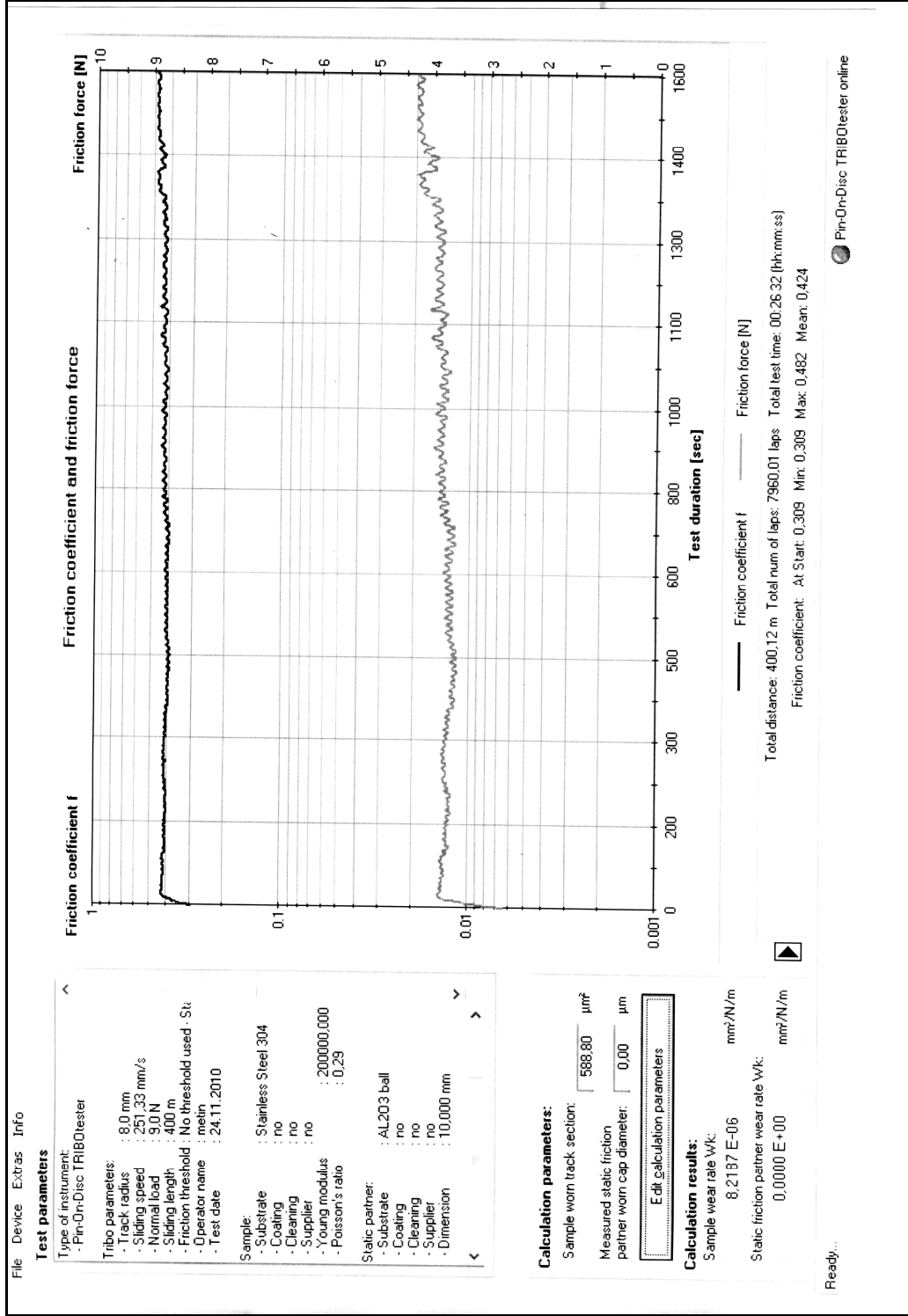
Şekil C.7 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



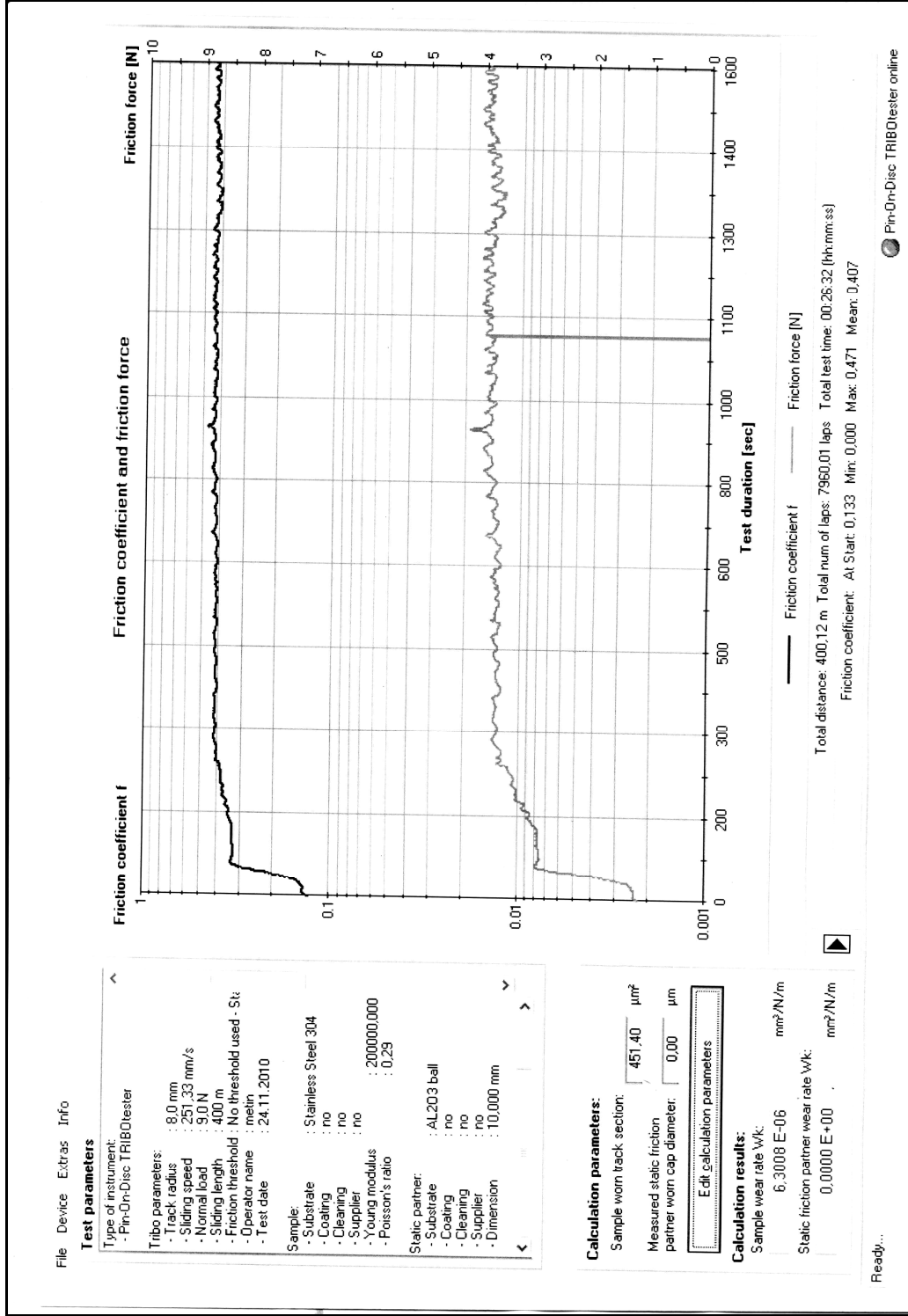
Şekil C.8 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



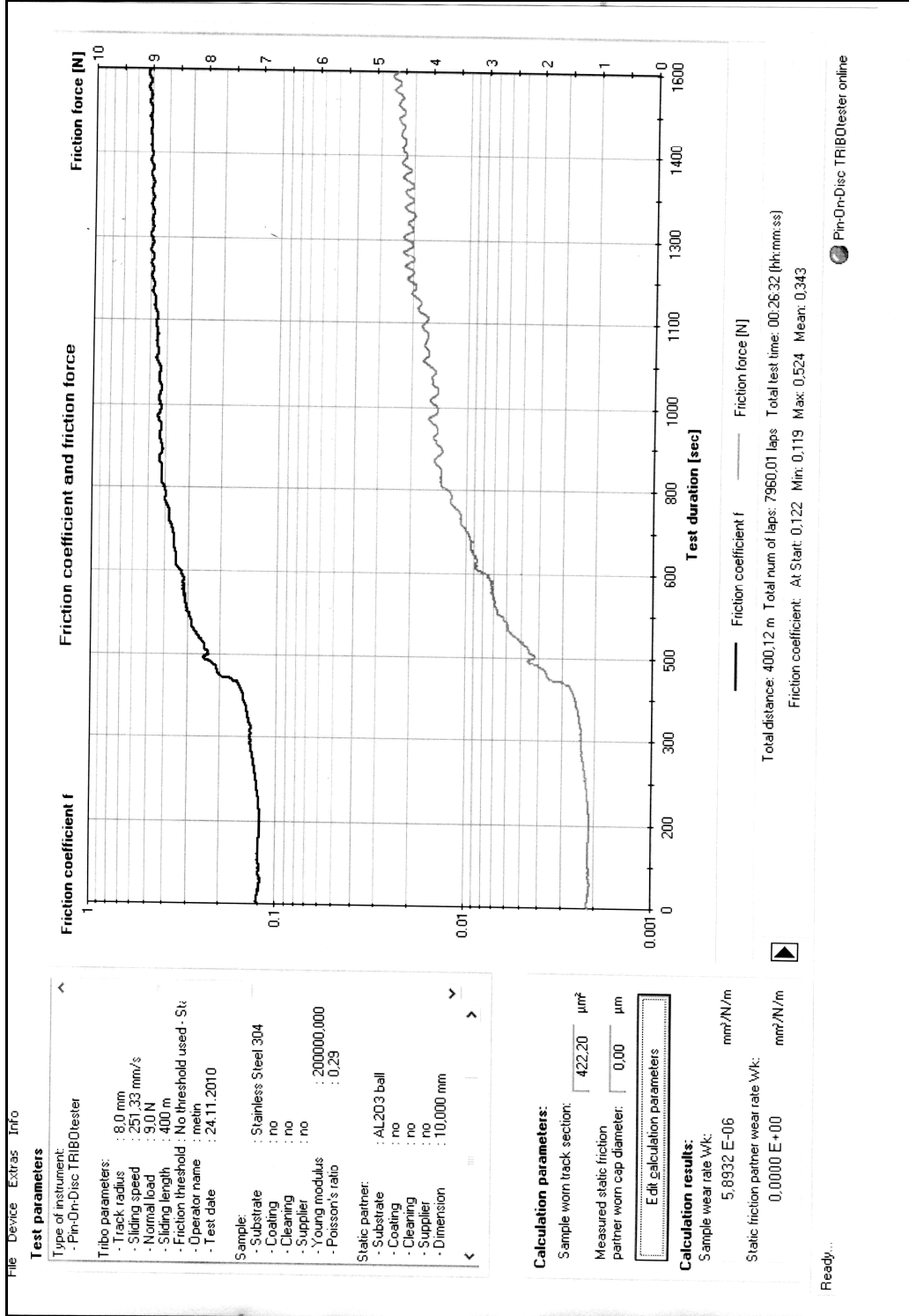
Şekil C.9 Kuru ortamda ısı işlem görmeyen numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



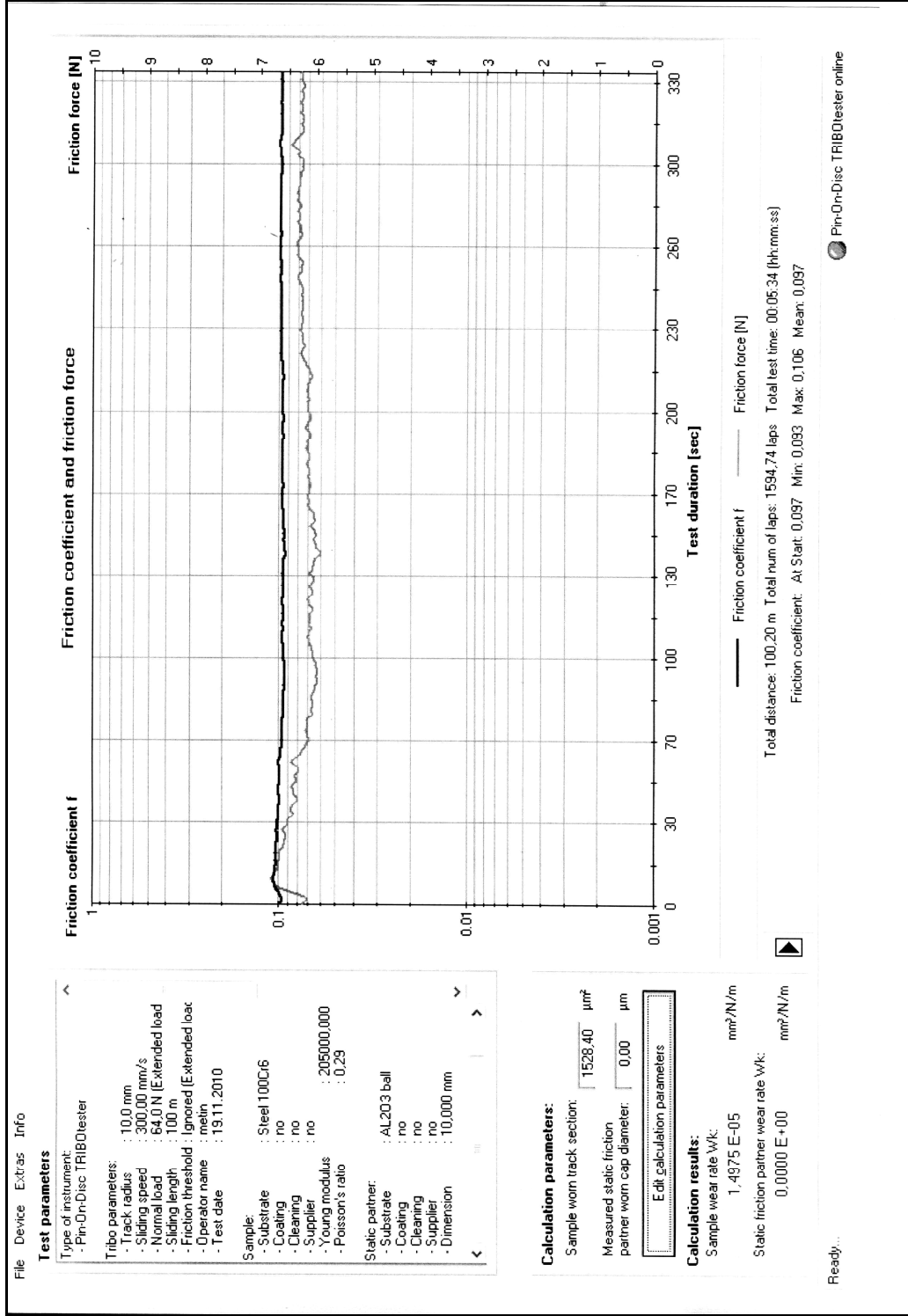
Şekil C.10 Kuru ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



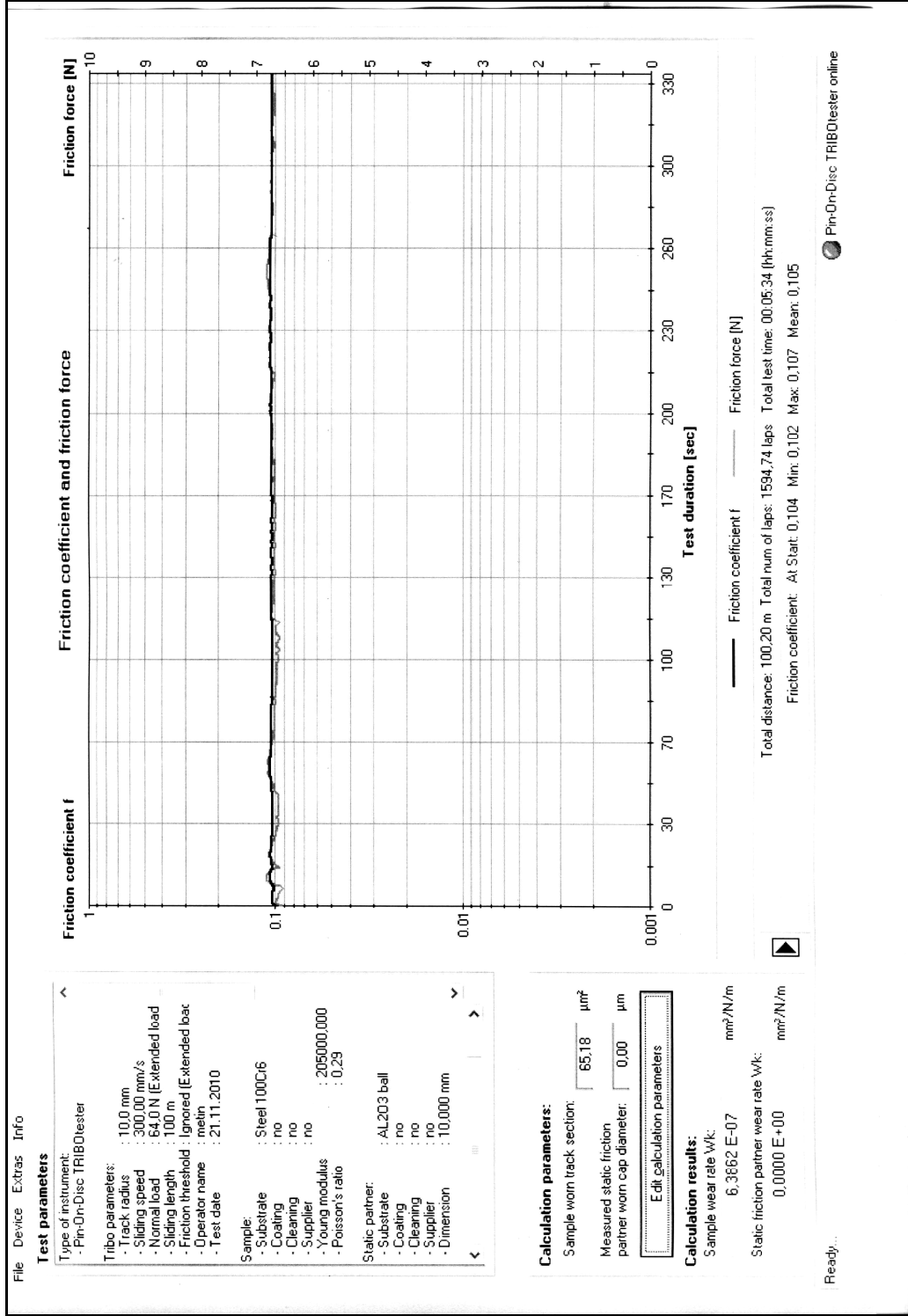
Şekil C.11 Kuru ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



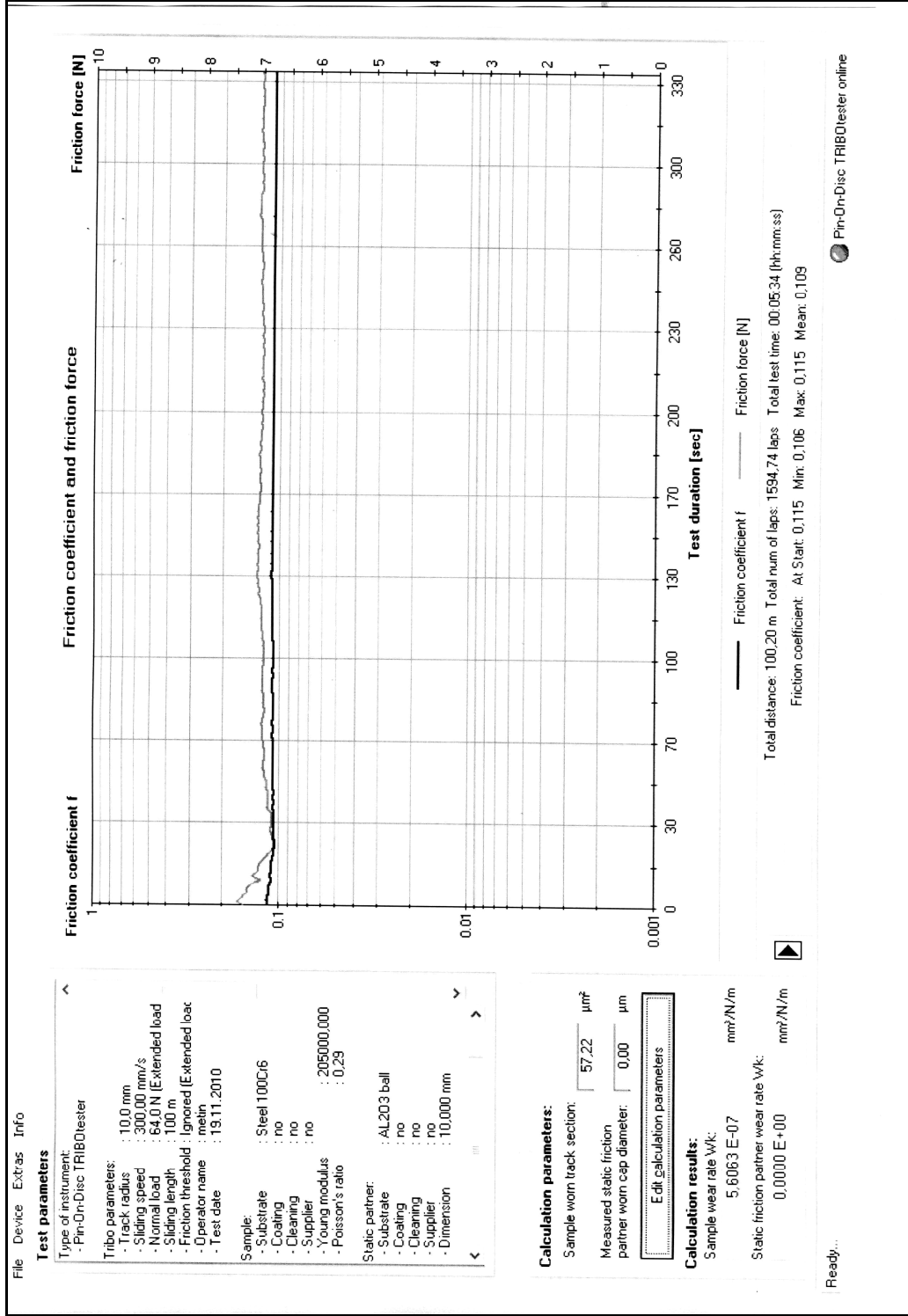
Şekil C.12 Kuru ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 9 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



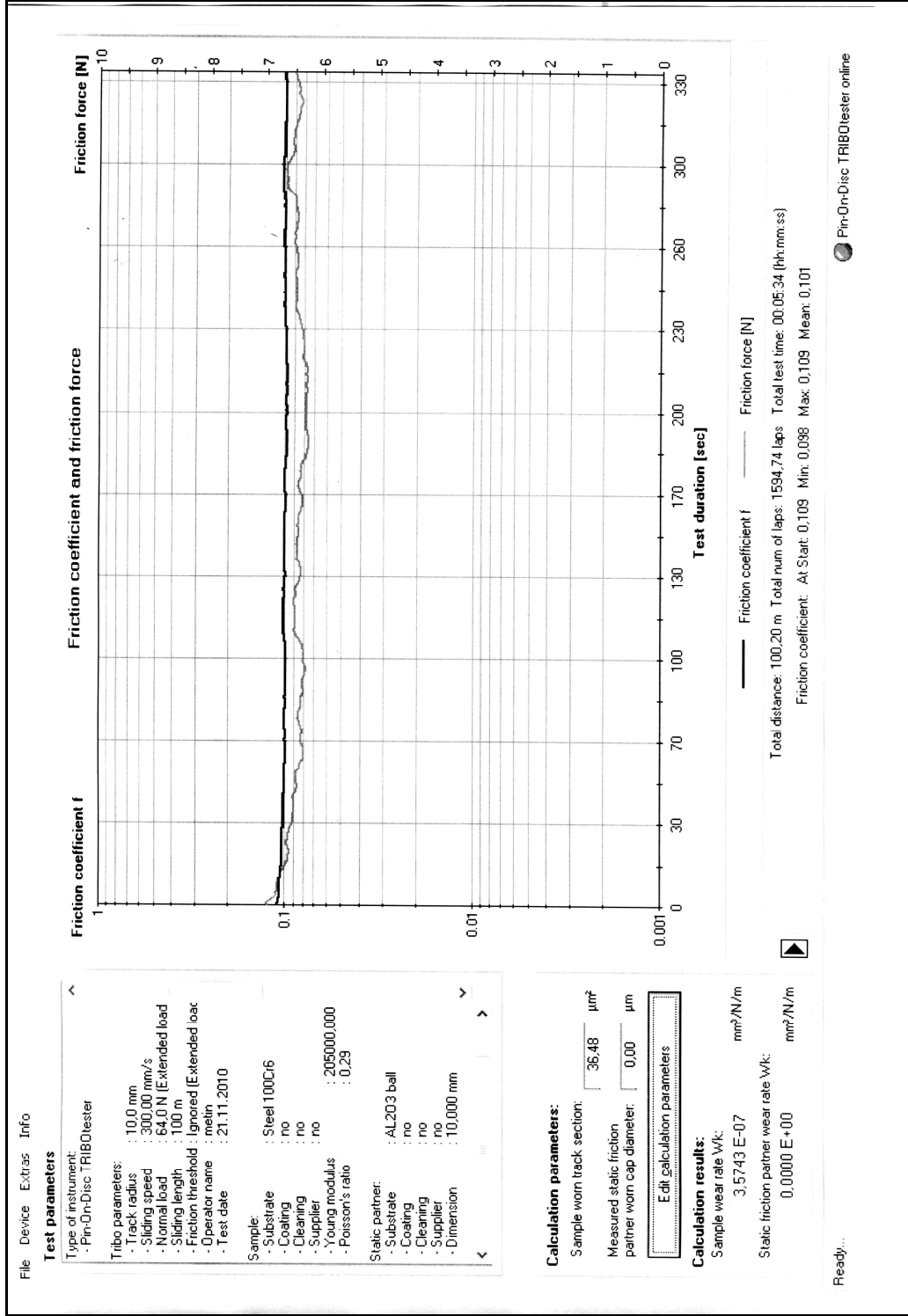
Şekil C.13 Yağlı ortamda 1sıl işlem görmeyen numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



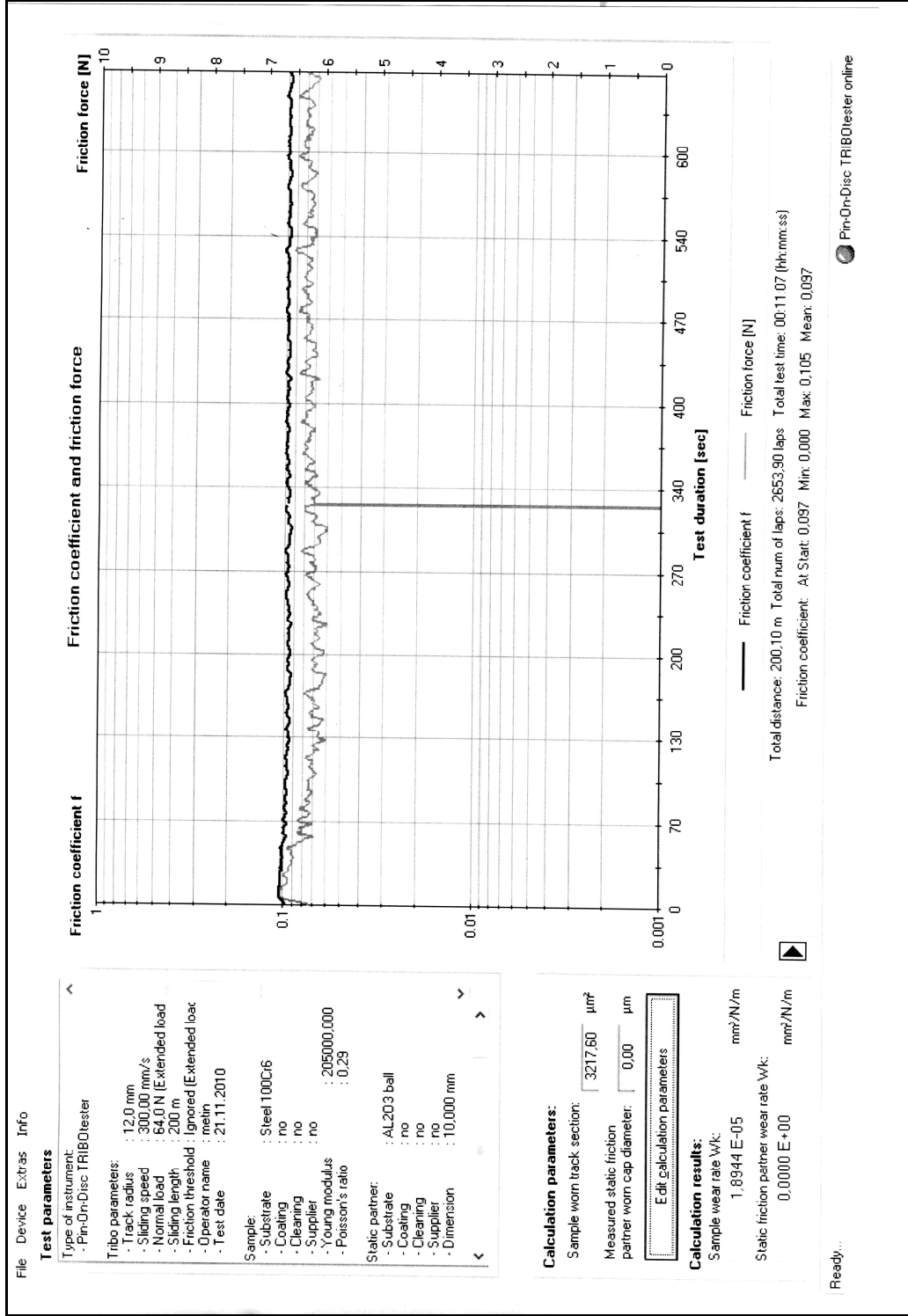
Şekil C.14 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



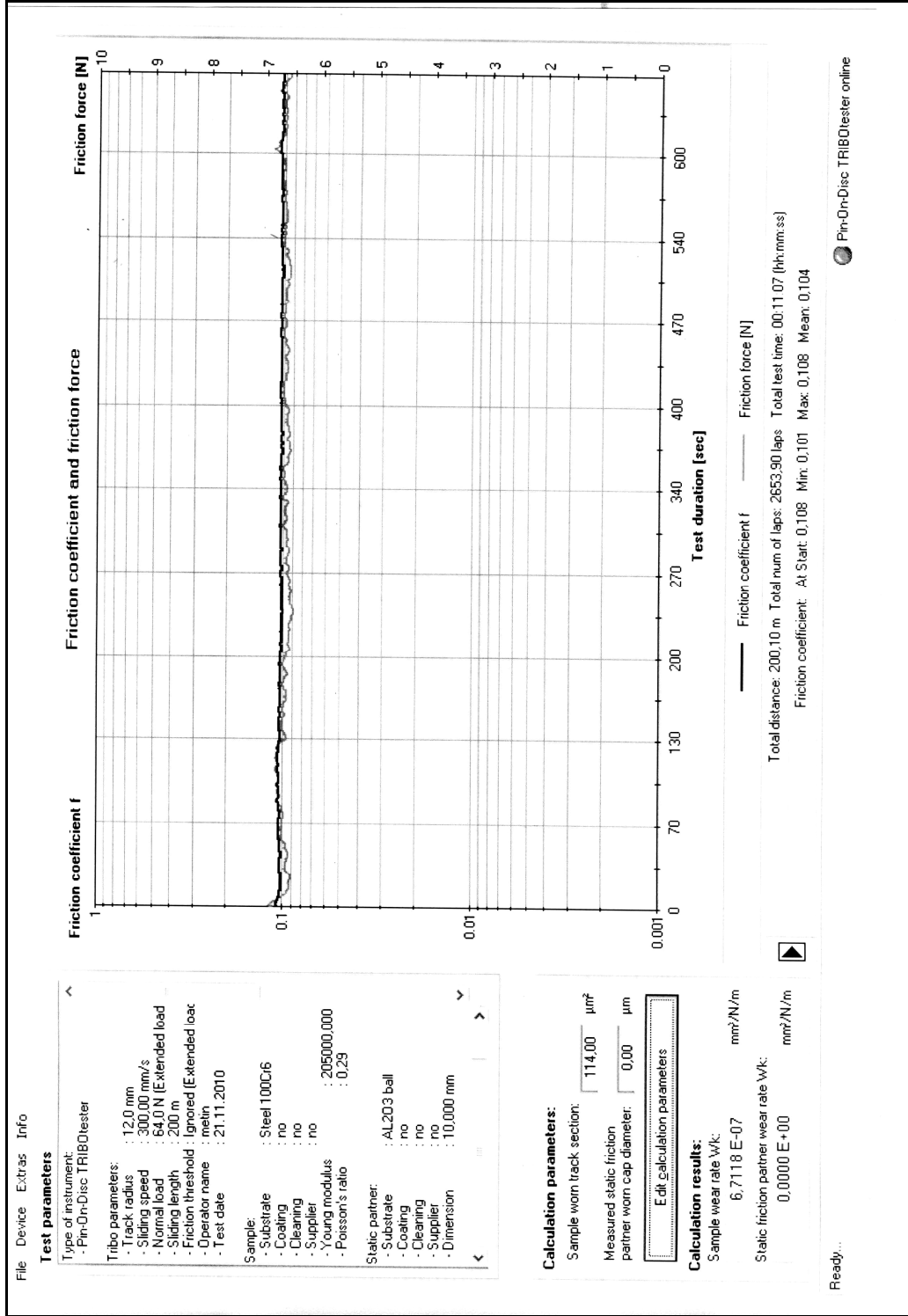
Şekil C.15 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



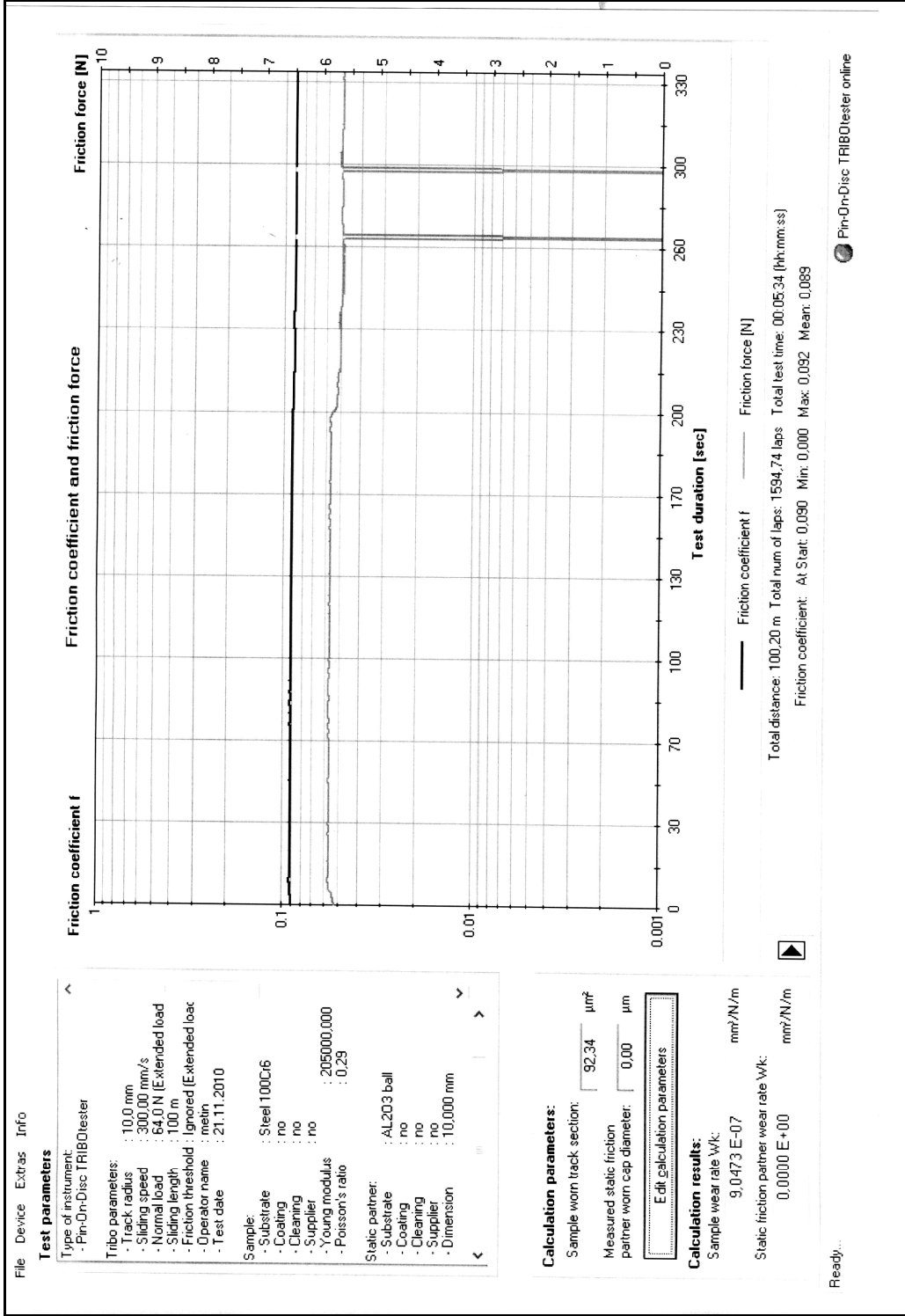
Şekil C.16 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 100 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



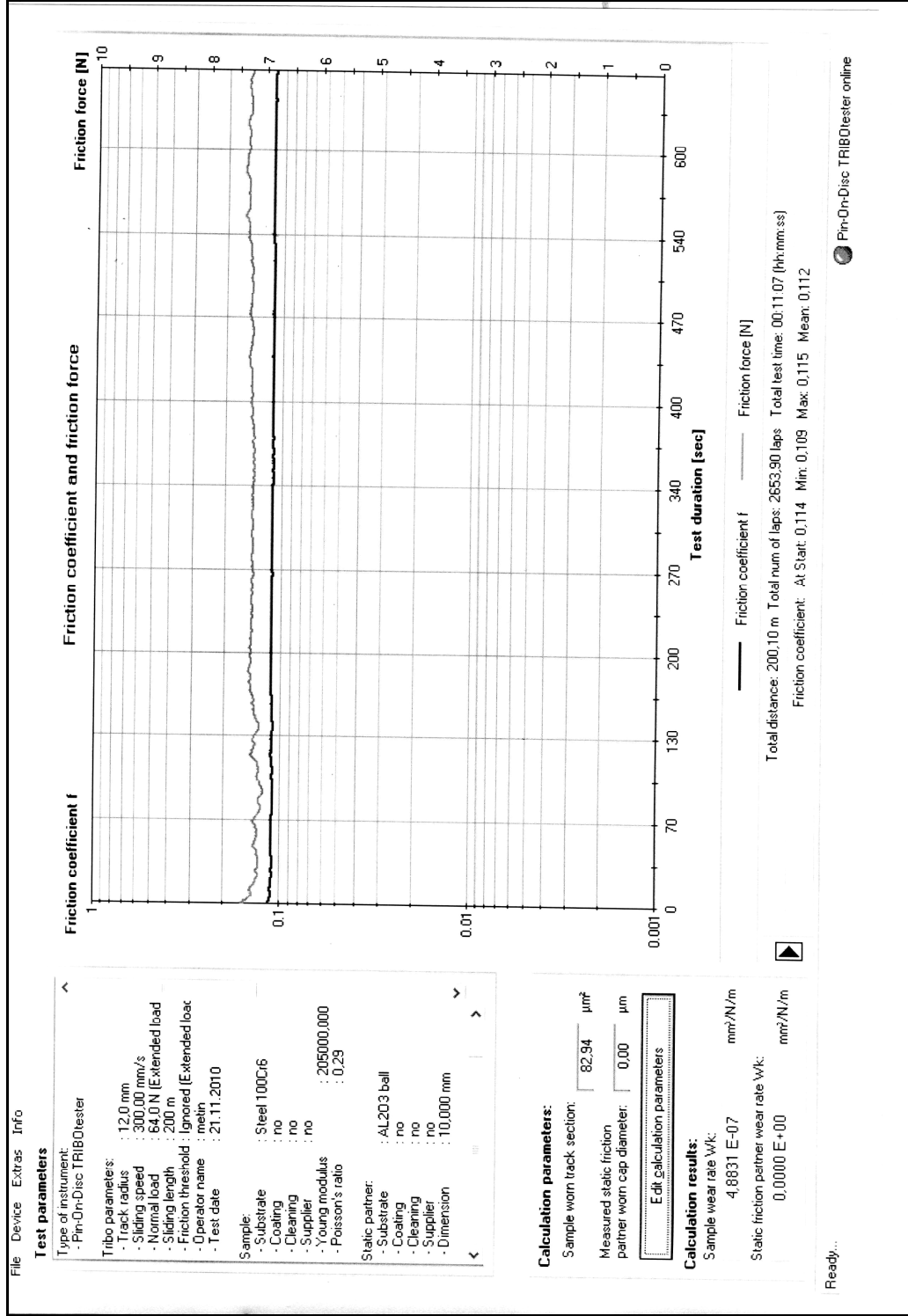
Şekil C.17 Yağlı ortamda ısı işlem görmeyen numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



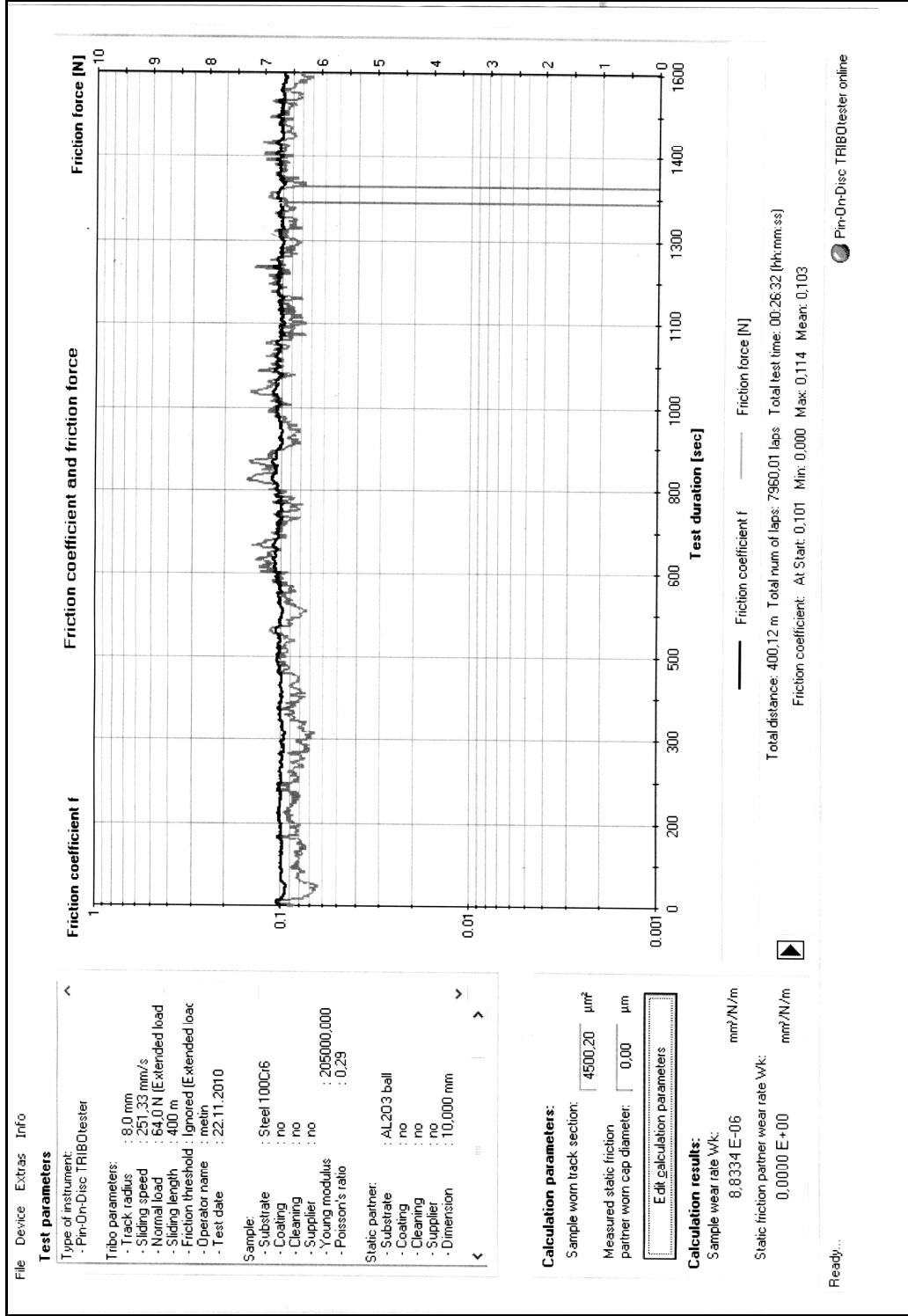
Şekil C.18 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



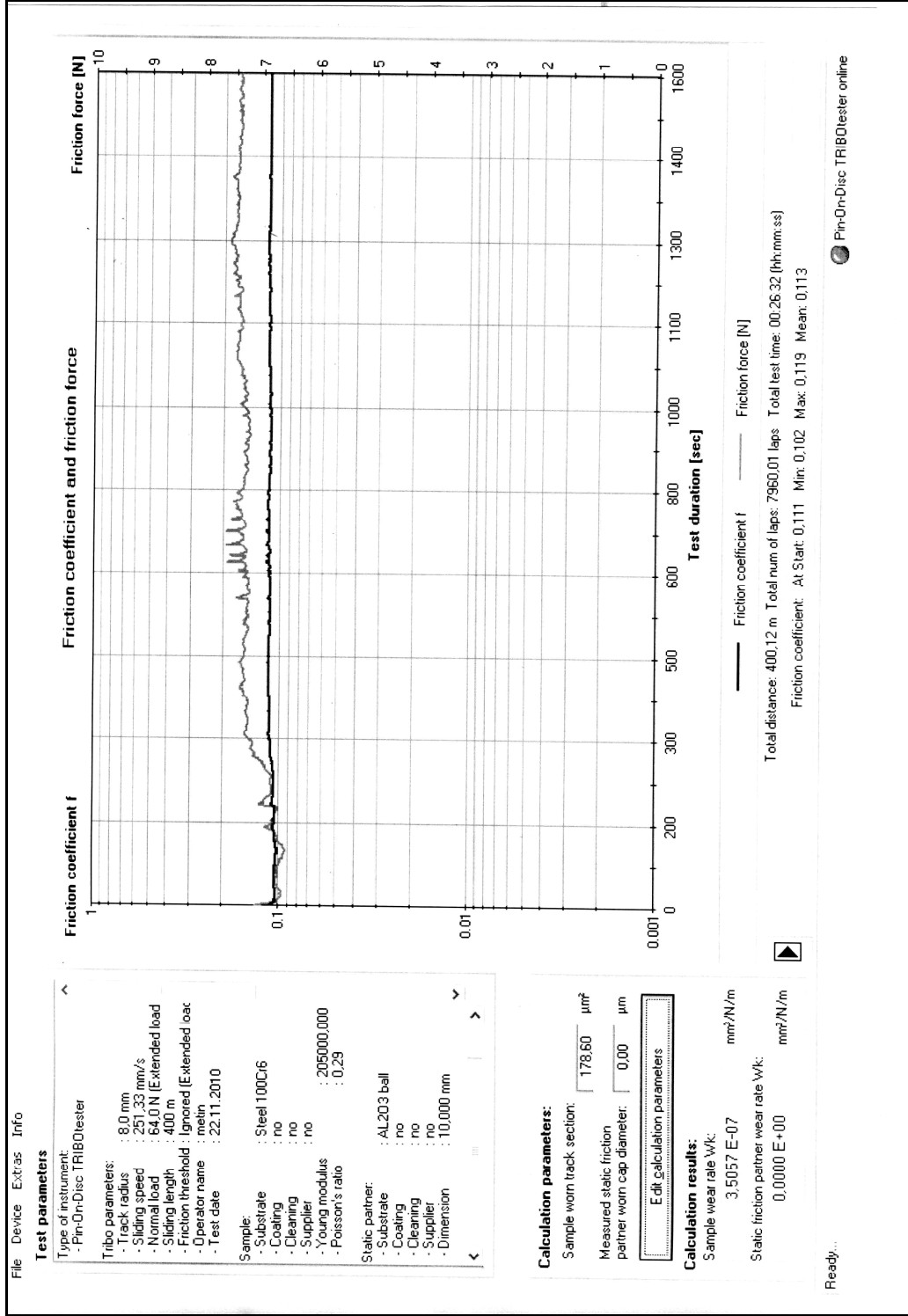
Şekil C.19 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



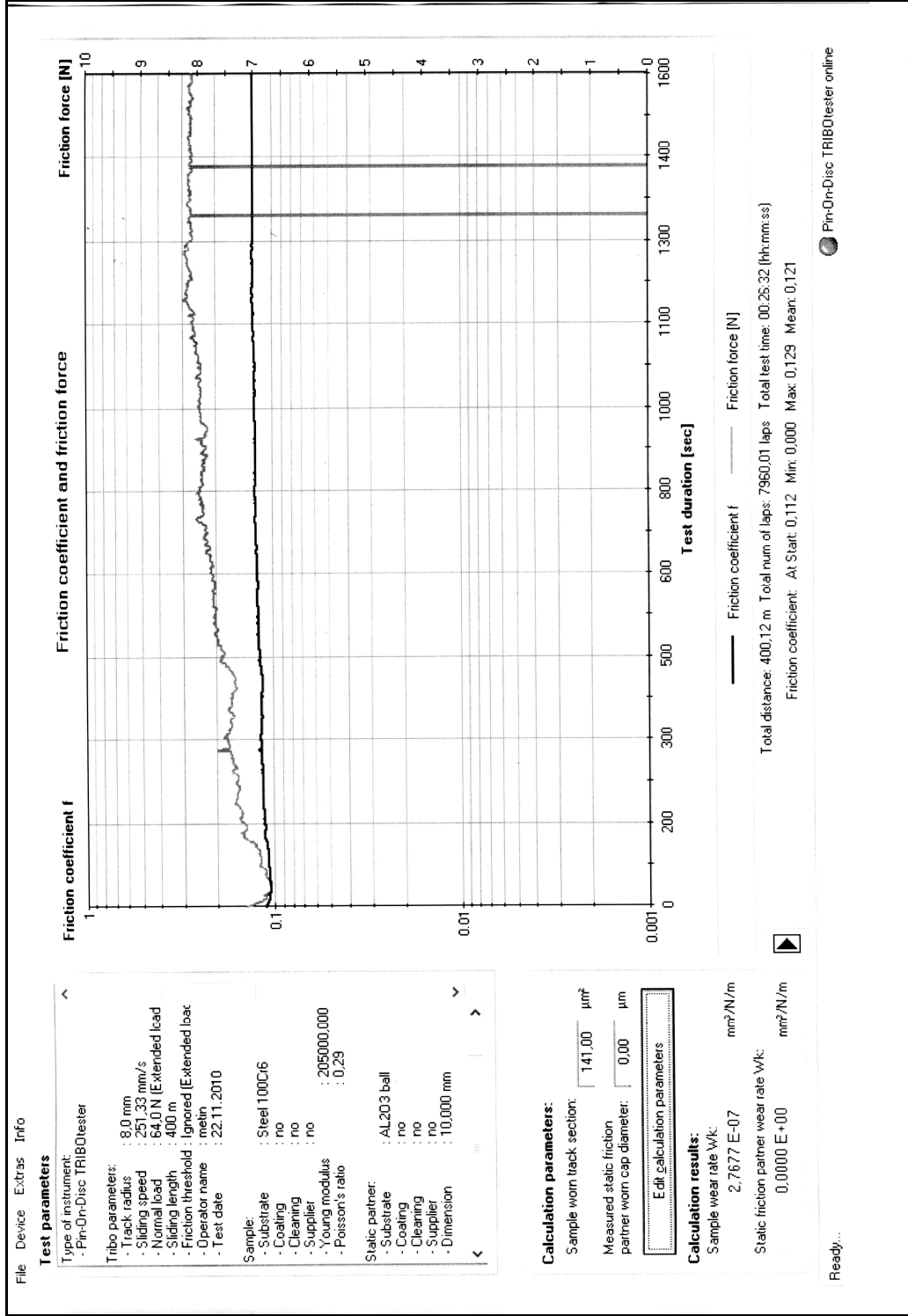
Şekil C.20 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 200 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



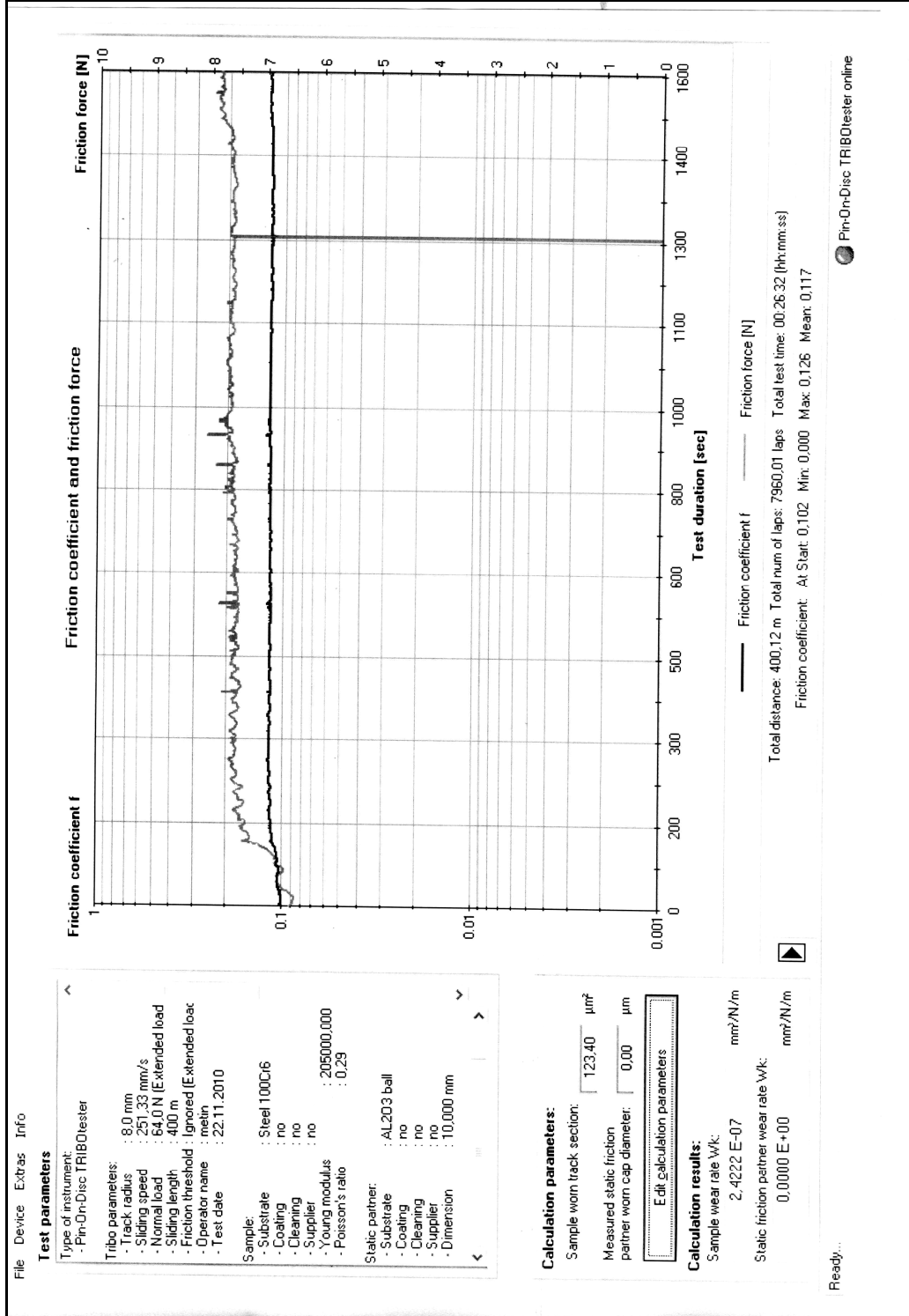
Şekil C.21 Yağlı ortamda ısı işlem görmeyen numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



Şekil C.22 Yağlı ortamda ESD = 0.4 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



Şekil C.23 Yağlı ortamda ESD = 0.65 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.



Şekil C.24 Yağlı ortamda ESD = 0.8 mm olan numunenin 64 N yük ve 400 m kayma mesafesindeki sürtünme grafiği.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Metin KAYABAŞI 1975'de Zonguldak'ta; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Kırşehir Mehmet Akif Ersoy Lisesi'nden mezun olduktan sonra 1993 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2000 yılında mezun olduktan sonra 2002-2005 yılları arasında Yükseliş Asansör firmasında proje ve kalite yönetim şefi olarak çalıştı; 2005-2006 yılları arasında TKİ Yeniköy Linyit İşletme Müdürlüğünde makine mühendisi olarak çalıştı; 2006 yılında TTK Makine ve İkmal Daire Başkanlığında makine mühendisi olarak göreve başladı; halen 2008 yılında girdiği ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

## **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: TTK Makine İkmal Daire Başkanlığı  
Muayene ve Tesellüm İşleri Şube Müdürlüğü  
Merkez ZONGULDAK

Tel: (372) 259 4757

E-posta: metinkayaba@yahoo.com

---

Metin KAYABAŞI