

**BOR YAYINIMIYLA YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ ÇELİKLERİN  
AŞINMAYA KARŞI DAYANIMLARININ ve PULLUK UÇ DEMİRLERİNDE  
UYGULAMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI**

136652

Ümit ER

Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

136652

Danışman: Prof. Dr. Bilal PAR

Mart-2003

Ümit ER'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Bor Yayınıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliklerin Aşınmaya Karşı Dayanımlarının ve Pulluk Uç Demirlerinde Uygulama Olanaklarının Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

16.5.2003

Üye: Prof. Dr. Soner ALANYALI

Üye: Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Üye: Doç. Dr. Abdullah ÖZSOY

Üye: Doç. Dr. Engin ÇAKIR

Üye: Prof. Dr. Bilal PAR (Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsünün Yönetim Kurulu'nun.....3..6..2003.....  
gün ve ...2003-9/1..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. M. Selami KILIÇKAYA

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Tarımsal mekanizasyonda toprak işleyen uç demirlerindeki aşınma, geri kazanılamayan malzeme kaybına ve maliyetlerin artmasına neden olduğundan önemli bir sorundur. Aşınmanın azaltılması için, kullanılan malzemenin yeterince sert ve tok aynı zamanda kırılğan olmaması istenir. Genellikle malzeme sertliği arttıkça aşınma dayanımı da artar. Ancak bu, kesin bir kural olmayıp etkili diğer faktörlerin yarattığı şartlara göre değişebilmektedir. Tarlada çalışan bir uç demirine gelen direnç kuvvetleri sabit olmayıp kısa zaman aralıklarında bazı önemli değişiklikler göstermektedirler. Bu ani yüklenmeler darbe niteliğinde olduğundan, laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçların tarla denemeleriyle de karşılaştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Eskişehir ili ve yöresinde pulluk uç demiri imalatında sıklıkla kullanılan Erdemir 3990 çeliği ve buna alternatif olarak beş farklı sade karbon çeliğinden (AISI 1008, 1030, 1040, 1045, 1050) numuneler, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan borlama yöntemiyle sertleştirilmiştir. Borlanmış ve işlemsiz numuneler (Erdemir 3990 ısıtılmış de dahil) laboratuvarında Alüminyum Oksit'li ( $Al_2O_3$ ) ve Silisyum Karbür'lü (SiC) zımpara kağıtlarıyla aşındırılarak aşınma dayanımları açısından karşılaştırılmış, tüm numunelerin yüzey sertlikleri ve tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Belirlenen optimum sıcaklıkta ( $950^{\circ}C$ ) yapılan borlama işlemi sonunda, tüm malzemeler içinde  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında en az aşınan 6 saat borlanmış Erdemir 3990, ısıtılmış Erdemir 3990'a göre 6.31 kat daha az aşınırken, SiC aşındırıcı karşısında ise 2.4 kat daha çok aşınmıştır. Aşındırıcı kağıtlar karşısında en az aşınmayı sergilemiş olan borlanmış ve ısıtılmış Erdemir 3990 malzemesinden imal edilen pulluk uç demirleriyle, laboratuvar sonuçlarını karşılaştırmak için tarla denemeleri yapılmıştır. Tarla denemeleri sonunda bor yayınıyla yüzeyi sertleştirilmiş pulluk uç demirlerinin ısıtılmış işlemliye göre sonbaharda ortalama 1.002, ilkbaharda ortalama 1.064 kat iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Abrazif aşınma, pulluk uç demirleri, borlama

## SUMMARY

The wear problem of materials used in agricultural mechanization's soil-engaging components is the main concern because of unrecycled material loss and increased cost. In order to reduce wear, materials used in these mechanisms should be hard and tough enough yet not brittle. In general, if the hardness of the material increases, wear resistance gets better. But this rule is not definite and it could be changed with other effective factors. Resistance force do not remain constant under field soil working conditions, do show some important variations in short period of time. Since these unexpected forces are impact forces, the results obtained in laboratory conditions should be tested in fields.

This investigation deals with ploughshare material using Erdemir 3990 steel (19Mn6) which is popularly used in Eskişehir region and alternatively five different plain carbon steels (AISI 1008, 1030, 1040, 1045, 1050) specimens were hardened by boriding which is the one of the thermochemical surface hardening processes. Borided and untreated specimens (in Erdemir 3990 steel also heat-treated) have been compared experimentally in laboratory conditions with two different abrasive paper which are Aluminium Oxide ( $Al_2O_3$ ) and Silicon Carbide (SiC) from a point of view of abrasive endurance. All specimens surface hardness and layer thickness have also been measured. Wear test results of boriding at defined optimum temperature ( $950^\circ C$ ) have been investigated. This investigation showed that Erdemir 3990 borided by 6 hrs has been worn 6.31 times less than heat treated one against  $Al_2O_3$  abrasive paper. But in case of SiC abrasive paper usage, heat treated Erdemir 3990 has been worn 2.4 times less than borided one. Due to different least weight loss results against abrasive papers, borided and heat-treated Erdemir 3990 steel ploughshares were produced and investigated in fields and then field test results were compared laboratory results. At the end of the field tests, borided ploughshares have been worn average of 1.002 times less in autumn season and average of 1.064 times less in spring season than heat treated ploughshares.

**Keywords:** Abrasive wear, ploughshare, boriding

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında yapıcı uyarı ve desteklerini gördüğüm sayın hocam Prof. Dr. Bilal Par'a tüm değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında ihtiyaç duyduğum tüm konularda desteklerini esirgemeyen Turan Tarım Makinaları A.Ş.'nin sahibi sayın Nejdet Turan'a, Vezneli A.Ş.'nin sahipleri sayın Hasan Vezneli ve Salih Vezneli'ye ve Asil Çelik fabrikası yetkililerine, göstermiş oldukları yakın ilgiden ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Tarla denemelerinin gerçekleşmesini sağlayan, Ziraat Fakültesi Dekanı sayın hocam Prof. Dr. Yaşar Pancar'a ve tarla düzenlemelerini sağlayan Ziraat Müh. Kenan Sönmez'e,

Deneme tarlalarını çalışmalarına açan, Eskişehir Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsünden sayın Dr. Cemal Çekiç ve Ziraat Müh. Fikret Köse'ye,

Toprak numunelerinin alınmasını ve incelenmesini sağlayan, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Eskişehir Araştırma Enstitüsü Müdür Yardımcısı sayın Dr. Karani Öğretir'e,

Bölümümüz Öğretim Elemanlarından sayın hocam Yrd. Doç. Dr. İlker Gürkan ve Yrd. Doç. Dr. Osman N. Çelik'e, arkadaşlarım Dr. Mesut Tekkalmaz, Arş. Grv. Bedri Baksan ve Arş. Grv. İbrahim Çelikyürek'e ve aileme, çalışmalarım süresince göstermiş oldukları ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. AŞINMA ve AŞINMANIN ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. Aşınma Tipleri.....	6
2.1.1. Adhezif aşınma.....	7
2.1.2. Korozif aşınma.....	9
2.1.3. Yorulma aşınması.....	10
2.1.4. Abrazif aşınma.....	10
3. KAYNAKÇA ÖZETİ ve TARİHÇESİ.....	15
3.1. Genel Anlamda Abrazif Aşınmayla İlgili Önceki Çalışmalar.....	15
3.1.1. Abrazif aşınma deney düzenekleriyle ilgili önceki çalışmalar...	18
3.2. Toprak İşleyen Uçlardaki Aşınmalarla İlgili Önceki Çalışmalar.....	19
3.2.1. Borlanmış çeliklerle toprak işleyen uç demirlerinde yapılmış önceki çalışmalar.....	26
3.3. Borlamayla İlgili Önceki Çalışmalar.....	30
4. TOPRAK İŞLEME ve TOPRAĞIN AŞINDIRMA ÖZELLİĞİ.....	38
4.1. Toprak İşlemenin Amacı.....	38
4.2. Toprağın Aşındırıcılığı.....	40
4.3. Toprak İşleyen Uçların Aşınmasına Etki Eden Faktörler.....	42
5. BOR YAYINIMIYLA YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMİ.....	44
5.1. Borlama ve Borlama Yöntemleri.....	45
5.1.1. Katı ortam borlaması.....	46
5.1.2. Sıvı ortam borlaması.....	47
5.1.3. Gaz ortam borlaması.....	48
5.1.4. Plazma ortam borlaması.....	49
5.2. Borlu Tabakaların Genel Özellikleri.....	50

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
6. LABORATUVAR DENEYLERİ.....	55
6.1. Materyal.....	55
6.2. Yöntem.....	57
6.3. Laboratuvar Deneş Sonuçları.....	59
6.4. Laboratuvar Deneş Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	86
7. TARLA DENEMELERİ.....	92
7.1. Materyal.....	92
7.2. Yöntem.....	94
7.3. Tarla Denemelerinin Sonuçları.....	94
7.4. Tarla Deneş Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	95
8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	96
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	99
EK - A. X-Işınları Analizlerinin Sonuçları.....	108
EK - B. Mikro Yapı Fotoğrafları.....	117
EK - C. Varyans Analizi Sonuçları.....	121
EK - D. Toprak Bünye Analiz Sonuçları.....	123
ÖZGEÇMİŞ	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Yüzeyleler arasındaki bağlantıların izafi kayma hareketi ile ayrılması.....	8
2.2.	İki-cisimli abrazif, üç-cisimli abrazif ve erozif aşınmalar arasındaki farklılıkların şematik gösterimi.....	11
3.1.	Çeliklerin yapısal durumunun abrazif aşınma direnci üzerindeki etkisinin şematik gösterimi.....	15
5.1.	Testere dişli tip ve daha düzgün arayüzey yayılım şekilleri.....	51
6.1.	Plint TE53 aşınma test cihazı.....	56
6.2.	Precisa 125A hassas terazi.....	56
6.3.	Olympus PMG3 optik mikroskop.....	57
6.4.	Shimadzu HMV-2000 mikrosertlik ölçüm cihazı.....	57
6.5.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	60
6.6.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	61
6.7.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	62
6.8.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	63
6.9.	SiC aşındırıcıda 900°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	64
6.10.	SiC aşındırıcıda 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	65
6.11.	SiC aşındırıcıda 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri.....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
6.12.	SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	67
6.13.	Erdemir 3990 (19Mn6) malzemesinin tüm işlem şartlarının Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.....	68
6.14.	Erdemir 3990 (19Mn6) malzemesinin tüm işlem şartlarının SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları.....	68
6.15.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma eğrileri.....	72
6.16.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	73
6.17.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	74
6.18.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	75
6.19.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	76
6.20.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	77
6.21.	SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma eğrileri.....	78
6.22.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	79
6.23.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	80
6.24.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	81
6.25.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	82

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
6.26.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri.....	83
6.27.	Laboratuvarda incelenen tüm malzemelerin Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış ve 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlama şartları için aşınma miktarları.....	84
6.28.	Laboratuvarda incelenen tüm malzemelerin SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış ve 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlama şartları için aşınma miktarları.....	84
7.1.	Toprak neminin tayini için örnek alınışı.....	93
7.2.	Penetrasyon direncinin belirlenmesi.....	93
7.3.	Denemelerde kullanılan pulluk.....	93
7.4.	Precisa 8200 D hassas terazi.....	93
A.1.	900°C-2 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	108
A.2.	900°C-4 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	109
A.3.	900°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	110
A.4.	950°C-2 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	111
A.5.	950°C-4 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	112
A.6.	950°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	113
A.7.	1000°C-2 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	114
A.8.	1000°C-4 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	115

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
A.9.	1000°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri.....	116
B.1.	950°C'de 2, 4, 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) ve AISI 1008 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50).....	117
B.2.	950°C'de 2, 4, 6 saat borlanmış AISI 1030 ve AISI 1040 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50).....	118
B.3.	950°C'de 2, 4, 6 saat borlanmış AISI 1045 ve AISI 1050 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50).....	119
B.4.	Isıl işlemlili Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin mikro yapı fotoğrafı (x25).....	120
C.1.	Birinci analizde ana faktör etkileri grafiği.....	121
C.2.	İkinci analizde ana faktör etkileri grafiği.....	122

## TABLOLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.1. Çeşitli işlemler uygulanmış çelik yüzeylerin mikrosertlik değerleri.....	53
6.1. Deneyleerde kullanılan çeliklerin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimleri.....	56
6.2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	60
6.3. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	60
6.4. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	61
6.5. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	61
6.6. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	62
6.7. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	62
6.8. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlili, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	63
6.9. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlili, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	63
6.10. SiC aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	64

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.11. SiC aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	64
6.12. SiC aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	65
6.13. SiC aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	65
6.14. SiC aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	66
6.15. SiC aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	66
6.16. SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlili, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	67
6.17. SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlili, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	67
6.18. Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin tüm deney şartlarında ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri (HV <sub>0.05</sub> ).....	69
6.19. Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin tüm borlama şartlarında ölçülen borlu tabaka kalınlıklarının ortalamaları (µm) .....	69
6.20. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	72
6.21. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	72

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.22. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	73
6.23. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	73
6.24. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	74
6.25. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	74
6.26. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	75
6.27. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	75
6.28. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	76
6.29. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	76
6.30. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	77
6.31. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	77
6.32. SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	78
6.33. SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	78
6.34. SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	79
6.35. SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	79

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<b><u>Tablo</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
6.36.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	80
6.37.	SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	80
6.38.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	81
6.39.	SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	81
6.40.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	82
6.41.	SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	82
6.42.	SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları.....	83
6.43.	SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları.....	83
6.44.	Sade karbonlu çelik numunelerde ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri (HV <sub>0,05</sub> ).....	85
6.45.	Sade karbonlu çelik numunelerin borlu tabaka kalınlıklarının ortalamaları (µm).....	85
7.1.	Sonbahar tarla denemelerinin sonuçları.....	94
7.2.	İlkbahar tarla denemelerinin sonuçları.....	95
C.1.	Birinci analiz verilerine göre Minitab.13 programı varyans analizi sonuç tablosu.....	121
C.2.	İkinci analiz verilerine göre Minitab.13 programı varyans analizi sonuç tablosu.....	122
D.1.	Sonbahar deneme tarlasının bünye analiz raporu.....	123

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<b><u>Tablo</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
D.2.	İlkbahar deneme tarlasının bünye analiz raporu.....	124.



**SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ****Simge****Açıklama**

<i>V</i>	Aşınan Malzemenin Hacmi [ $\text{mm}^3$ ]
<i>k</i>	Boyutsuz Aşınma Katsayısı
<i>F</i>	Uygulanan Yük [N]
<i>S</i>	Aşınma Mesafesi [mm]
<i>H</i>	Yüzey Sertliği [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
<i>K</i>	Farklı Malzeme ve Aşındırıcılar için Değişiklik Gösteren Katsayı [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ]

**Kısaltma****Açıklama**

AISI	The American Iron and Steel Institute
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
KOSGEB	Küçük ve Orta Ölçekli Sanayi Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı
VSD	Vickers Sertlik Değeri

## 1. GİRİŞ

Mekanik bir işlem olan toprak işleme tarımın en eski uygulaması olarak bilinir. Birincil toprak işleme aletlerinden olan pulluk, toprak işlemenin en temel ve en eski aleti olarak kabul edilir (Özemir ve Kurtay, 1977; Mutaf, 1974). Kulaklı pulluklar, toprağı kesmek, kaldırmak, parçalamak ve devirmek için kullanılan ve keski demiri, uç demiri, kulak, taban demiri, kulak uzantısı gibi aktif ve pasif elemanlardan oluşan bir bütündür (Mutaf, 1974). Aktif eleman olan pulluk uç demirinin görevi de toprağı tarla yüzeyine paralel olarak kesmek ve kısmen kaldırarak pulluk kulağına iletmektir (Keçecioglu ve Ulusoy, 1975). Bir pulluğun en çok aşınmaya maruz kalan organı uç demiridir. Aşınmış bir pulluk uç demiri; tarla toprağına bıraktığı geri kazanılamayacak olan malzeme kaybının yanı sıra değiştirilmesi sırasında doğan işçilik ve zaman kayıplarına, keskin kenarlarının körelmesinden dolayı bozulan iş kalitesi ve yine bu sebepten kaynaklanan, artan çeki direnci ihtiyacına bağlı olarak traktörde artan yakıt sarfiyatı ve güç gereksinimine de sebep olmaktadır. 2001 yılı genel tarım sayımı sonucuna göre ülkemizde 221.562.345 dekar işlenen arazi bulunmaktadır. Bu arazinin %68,77'si de tarla arazisi, %16,91'i nadas arazisi, %11,67'si meyve ve diğer uzun ömürlü bitkilerin kapladığı arazi ve %2,65'i de sebze ve çiçek bahçelerinin kapladığı arazidir (Anonim, 2003). Oldukça geniş işlenen araziye sahip ülkemiz için de, aktif toprak işleme aletlerinin aşınmasından dolayı oluşacak kayıpların ekonomik açıdan büyük bir önem taşıdığı ortadadır.

Toprak işleyen aktif metal uçlarda aşınmadan kaynaklanan ve oldukça büyük miktarlarda olan malzeme kayıpları, araştırmacıları farklı malzeme ve/veya yeni yüzey modifikasyon işlemlerini araştırmaya ve geliştirmeye itmektedir. Ciddi bir abrazif aşındırma özelliğine sahip olan toprak, homojen bir yapıda olmayıp bulundurduğu taş, kök, kaya gibi parçaları ile içinde çalışacak olan malzemeye darbe etkisi de uygulamaktadır. Bu yüzden toprağı batıp çalışacak bir aktif uçtan, aşınmaya karşı dayanıklı olabilmesi için yüksek sertlik, çarpmalara karşı dayanıklı olabilmesi için de yüksek tokluk değerleri sergilemesi istenir. Ancak, tokluk ve sertlik birbirleri ile ters orantılı olan iki özelliktir. Toprak koşullarının dar alanlarda bile farklılıklar göstererek homojen bir yapı sergilememesi, doğa koşullarının zaman ve yere göre değişmesi,

toprak işleyen aktif uçlar için optimum malzeme şartlarının elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Toprak işlemedeki en önemli sorunlardan biri toprak işleyen aletlerin aktif uçlarındaki aşınma problemidir. Toprak işleyen uç demirlerindeki aşınmayı azaltmak için çeşitli ısıtma işlem ve yüzey kaplama teknikleri kullanılmaktadır. Dünyadaki en büyük bor madeni rezervlerine sahip olan ülkemizde yeterince tanınmayan bir yüzey sertleştirme yöntemi olan bor yayınıyla yüzey sertleştirme, uygulandığı malzemelere yüksek sertlik değerleri vermektedir. Yüksek sertlik değerlerine sahip olan borlanmış malzemeler aynı zamanda aşınmaya karşıda oldukça dirençli olmaktadır.

Bu çalışmada, Eskişehir ili ve yöresinde pulluk uç demiri imalatında sıklıkla kullanılan Erdemir 3990 çeliği ve beş farklı karbon oranındaki sade karbonlu çelik numunelere, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan borlama yöntemi uygulanmıştır. Borlanmış numuneler laboratuvarında aşınma deneyleri sonuçlarına göre karşılaştırılmış ve optimum koşullar belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullara göre borlama işlemi yapılan pulluk uç demirleri tarla denemelerine alınmış ve toprak işleme aletlerinde borlama işleminin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

## 2. AŞINMA ve AŞINMANIN ÖZELLİKLERİ

Aşınma, evde kullandığımız en basit aletten, fabrikalardaki en gelişmiş cihazlarda bile oluşan ve istenmeyen bir malzeme sorunudur. Küresel ekonominin getirdiği yeni rekabet kuralları gereği işlem maliyetlerinin azaltılması ihtiyacı aşınmadan kaynaklanan sorunların da en düşük düzeyde tutulmasını mecburi kılmaktadır. Bu yüzden, aşınmaya daha dayanıklı yeni malzeme veya bilinen malzemelere uygulanabilecek yeni yüzey işlem arayışları, problemler çözülünceye kadar devam edecektir.

Bir yüzey başka bir yüzey üzerinde hareket ettiğinde oluşacak olan aşınma, genelde gittikçe artan malzeme kaybı şeklinde, bir yüzeyde veya her iki yüzeyde hasar meydana getirecektir. Pek çok durum için aşınma; hareketli parçalar arasındaki açıklığın artmasına, istenmeyen hareket serbestliğine, hassasiyet kaybına, sıklıkla titreşime, artan mekanik yüklenmeye ve en sonunda daha hızlı aşınmaya ve bazen de yorulma kırılmasına neden olduğundan istenmeyen bir durumdur (Hutchings, 1992).

Sürtünme, yağlama ve aşınma ile ilgili tüm çalışmaları içine alan Triboloji bilimi, kelime olarak ilk kez 1966 yılında, bir İngiliz hükümeti komisyonu tarafından önerilmiştir. Aynı komisyonun raporunda, Tribolojik esasların uygulamaya aktarılması halinde İngiltere endüstrisinde mümkün olabilecek ekonomik kazanımın 1965 yılı fiyatlarına göre yıllık 515 milyon pound civarında olacağı tahmin edilmiştir (Hurricks, 1972; Hutchings, 1992). Bu tutarın içinde sadece tamir ve değiştirme maliyetlerindeki tasarruf ise 230 milyon pounddur. İngiliz endüstrisinin bakım maliyetleri ile ilgili yapılmış olan başka bir çalışmaya göre de sadece malzeme tutarları için doğrudan doğruya yıllık 286 milyon poundluk bir değer tahmin edilmektedir (Hurricks, 1972). Bu tutar, aşınmanın yanında yorulma ve korozyondan kaynaklanan malzemedeeki tahribatında hesaba katılması ile bulunmuştur.

1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zarar, Amerikan gayri safi milli hasılasının %6'sını (178,5 milyar USD) teşkil ettiği görülmüş ve bu yüzden korozyon

ve aşınma konularındaki çalışmalara ağırlık verilmesi araştırma raporunun sonunda önerilmiştir (Karakan *vd*, 2002).

Yu ve Bhole (1990), aşınmadan dolayı Kanada ekonomisinin yıllık 3.9 milyar dolar kaybı olduğunu ve bu tutarın yalnız abrazif aşınmadan kaynaklanan kısmının yılda 2.5 milyar dolar civarında olduğunu bildirmişlerdir.

Almanya'da ise abrazif aşınmadan dolayı oluşan zararın yıllık 5 milyar DM'dan fazla olduğu tespit edilmiştir (Karamış, 1985 ; Sarı ve Kaluç, 1996; Tarhuni, 1996). Bu maliyetlerin endüstriyel alanlara göre dağılımı; linyit ve antrasit madenciliğinde 1.5 milyar DM, metalurji dallarında 2 milyar DM, plastik imalat sanayinde 0.5 milyar DM ve öğütme, ziraat, inşaat iş kollarında ise 1 milyar DM olarak belirlenmiştir.

Sarı ve arkadaşlarının 1997 yılındaki çalışmalarında, OECD araştırma grubunca yapılan bir araştırmada, aşınmadan dolayı meydana gelen ekonomik kaybın A.B.D.'de Gayri Safi Milli Hasıla'nın %2.5'ni, Almanya'da ise %4.5'ni oluşturduğunu belirtmişlerdir (Sarı *vd*, 1997).

Görülüyor ki aşınma, sanayileşmiş ülkeler başta olmak üzere tüm dünya ülkelerini ekonomik açıdan rahatsız eden oldukça ciddi bir teknik sorundur. Aşınmanın tam anlamıyla önlenmesi mümkün görülmesi de olabildiğince azaltılabilmesi ile ekonomik açıdan çok büyük tasarrufların elde edileceği bir gerçektir.

En genel anlamı ile aşınma, mekanik etkenler sonucu yüzeyden arzu edilmeyen bir şekilde malzemenin akışıdır şeklinde tanımlanabilir. Mekanik etkenlerden başka kimyasal ve elektrokimyasal yani korozif etkenler de malzeme akışına neden olabilmektedirler. Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olayının aşınma olarak adlandırılabilmesi için şu gerek ve yeter şartları sağlaması zorunludur (Karamış, 1985);

- 1- Mekanik bir etkinin olması,
- 2- Sürtünmenin olması (izafi hareket),

- 3- Yavaş fakat sürekli olması,
- 4- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5- İstenilmediği halde (isteğimiz dışında) meydana gelmesidir.

Korozif etkenlerden kaynaklanan korozyon veya korozyon yenimi; bu ana şartlardan ilk ikisini sağlamaksızın meydana gelir ve aşınma kavramından ayrı olarak değerlendirilmelidir. Korozyon ürünleri yani korozif etkilerle parça yüzeyinden kopan mikro tanecikler veya yüzey bölgesi değişiklikleri eğer tribolojik sistemin içine dahil oluyorsa bu durum aşınma kavramı içinde düşünülmelidir (Karamış, 1985).

Aşınmayı, aşınmaya yol açan etkenlerin tümünü dikkate alarak incelemek gerekir. Aşınma, tribolojik sistem adı verilen sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır. Aşınma özelliği veya aşınma direnci bu sistemin bir özelliği olup sertlik veya çekme direnci gibi bir malzeme özelliği değildir. Aşınma direnci, tribosistem olarak adlandırılan ana cisim, karşıt cisim ve ara maddeden oluşan ve birbirleri ile karşılıklı etkileşen bu elemanlardaki yük ile hız ve termal şartların birleşik etkisinin bir sonucudur (Uetz ve Föhl, 1978).

Benzer şekilde Hurricks'de 1972 ve 1973 yıllarındaki çalışmalarında aşınma durumunda malzemelerin davranışını; temas şekline, gerilme seviyelerine, ortaya çıkan ısıya ve çevrenin doğasına bağlı olarak tanımlamış ve bunların sonucu olarak aşınmanın bir sistem özelliği olarak incelenmesi gerektiğini belirtmiştir (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973). Bir tribolojik sistemde aşınma olayını gerçekleştiren, etkileyen ve aşınmanın karakterini belirleyen beş başlangıç şartı vardır ve bunlar; -ana cisim, -karşıt cisim, -ara madde, -hareket ve -yük' olarak belirlenmiştir (Mutaf ve Ulusoy, 1977). Eğer ortamda vakum tam anlamıyla sağlanmış ise bu ana unsurların etrafında aşınma başlar ve gelişir. Vakum ortamından söz edemiyorsak çevre faktöründe sisteme dahil olup aşınmayı etkileyeceği unutulmamalıdır.

Ana cisim, aşınma davranışı araştırılan herhangi bir katı cisimdir. Karşıt cisim, aşındıran eleman olup katı, sıvı, gaz fazında veya bunların karışımı halinde olabilir. Karşıt cisimle ana cisim aşınma çifti olarak da adlandırılmaktadırlar. Ara madde,

sürtünen ana ve karşıt cisimler arasında kalan ve katı, sıvı veya gaz veya bunların karışımları şeklinde bulunabilen bir sistem elemanıdır. Aşınma ürünü olarak yüzeyden kopmuş mikro parçacıklar, yağlama maddeleri, kimyasal etkiyle kopmuş mikro parçacıklar ara madde olarak düşünülebilir. Aşınma çiftlerinin birbirlerine göre yaptıkları izafi hareketin cinsi, büyüklüğü, yönü ve süresi aşınmanın miktarına ve cinsine doğrudan etki eder. Hareket; akma, kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, çarpma vb. şekillerde olabilir. Uygulanan yükün de büyüklüğü, uygulanma şekli, doğrultusu ve zamana göre değişimi de aşınma miktarları üzerinde oldukça etkilidir (Bayhan, 1996).

Birbiriyle temas eden iki katı cismin gerçek temas alanı, görünen temas alanından küçüktür bunun sebebi de temas yüzeyleri ne kadar düz işlenirse işlensin yine de yüzeyde kalan pürüzlerdir. İki yüzey arasında ilk temas birbiriyle karşılaşan pürüzler arasında kurulur. Uygulanan yükün artırılması ile daha çok sayıda pürüzün karşılaşması sağlanacak ve zamanla deforme olan pürüzlerden dolayı da temas alanı gittikçe büyüyecektir. Bu alanın artması, uygulanan yük miktarı ile birlikte malzeme özelliğine ve yüzey geometrisine de bağlıdır. Yük; statik, dinamik, titreşimli ve darbeli olabildiği gibi artan veya azalan bir şekilde de etki edebilir (Karamış, 1985).

Bir tribolojik işlem süresince sistemden çıkan faydalı enerji, sisteme verilen giriş enerjisinden küçüktür. Bu aradaki fark ise sürtünme enerjisine eşittir ve sürtünme enerjisi de birkaç alt dala ayrılır. Bu alt dalların başlıkları da, plastik deformasyon için harcanan enerji, küçük parçacıkların yüzeyden ayrılmasına (aşınma parçacıklarına) harcanan kırılma veya yüzey enerjisi, ikincil işlemler için harcanan enerji, mekanik titreşimlere, sese ve termal enerjiye harcanan enerjilerdir (Uetz ve Föhl, 1978).

## 2.1. Aşınma Tipleri

Bahsedilen bu genel özellikler bize aşınmanın niçin bir malzeme özelliği olmadığını ve bir sistem (tribolojik) içinde ele alınması zorunlu bir kavram olduğunu açıklamaktadır. Aşınmayı belirleyici ve gelişmesini etkileyici pek çok unsurun olması, bunların tek tek veya çeşitli kombinasyonlarla birlikte olaya etki edebiliyor olmaları

aşınmanın da çeşitli ana başlıklar altında sınıflandırılmasına neden olmaktadır. Çeşitli araştırmacılara göre aşınmanın sınıflandırılması; izafi hareketin şekline (kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, titreşim aşınması vb.), karşıt cismin fiziksel durumuna ve etki açısına (katı, sıvı tanecikli ve değişik etki açılarında), aşınma mekanizmalarına (adhezyon, abrazyon, yüzey yorulması, tribooksidasyon, ablativ, erozyon, korozyon, kavitasyon vb.), aşınma izinin görünüşüne (pullanma, çizilme, oyulma, kazıma vb.), aşınmanın gerçekleştiği fiziksel mekanizmaya (adhezyon, abrazyon ve oksitlenme) ve aşınma ortamına (yağlı aşınma, kuru aşınma, yüksek sıcaklık metalik aşınma vb.) göre yapılabilmektedir (Karamış, 1985; Bayhan, 1996; Sarı vd, 1997).

Endüstride en sık karşılaşılan ve çeşitli arızalara neden olan aşınma tipleri ve bunlarla karşılaşılma oranları; abrazif aşınma %50, yenme (fretting) aşınması %8, adhezif aşınma %15, kimyasal aşınma %5, erozif aşınma %8 ve diğerleri %14'dür (Misra ve Finnie, 1982).

Görüldüğü gibi en sık karşılaşılan aşınma tipleri abrazif ve adhezif aşınmalardır. Hurricks'de 1972 yılındaki çalışmasında aşınmayı tanımlamada kullanılan terminolojinin anlam karmaşasına yol açabileceğini belirtmiş ve mühendislik uygulamalarında büyük bir çoğunlukla dört ana aşınma tipiyle karşılaşılacağını ifade etmiştir. Bunlar; abrazif aşınma, adhezif aşınma, yorulma aşınması ve korozif aşınmadır (Hurricks, 1972).

### 2.1.1. Adhezif aşınma

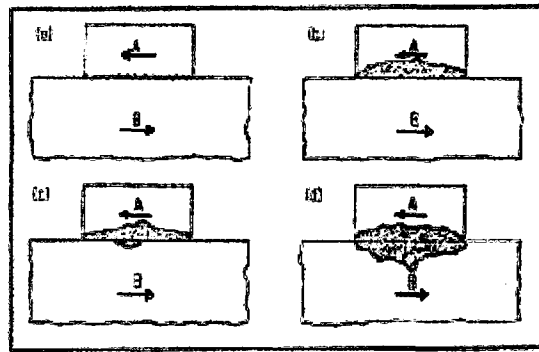
Adhezif aşınma veya adhezyon'da - ki sıklıkla şiddetli aşınma olarak betimlenir - aşınma olayı genellikle birbiriyle sürtünerek çalışan iki metal yüzey arasında başlar ve gelişir (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973). Adhezif aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisi altındaki temas yüzeylerinde oluşan bölgesel kaynak bağlarının kırılması sonucuyla oluşan malzeme kaybıdır (Karamış, 1985; Bayhan, 1996).

Karşılıklı çalışan metal yüzeyleri ne kadar hassas işlenmiş olursa olsun yine de moleküler düzgünlükte değildirler. Cisimlerin üst yüzeylerindeki bu pürüzlerin tepeleri

birbirleriyle temas ettikleri anda moleküler adhezyon sonucu kaynama olayını meydana getirirler (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Bayhan, 1996).

Metal malzemenin kendi ağırlığından veya herhangi bir dış kuvvet etkisiyle çok küçük olan pürüz tepelerine gelecek olan basınç veya gerçek gerilme, geometrik temas yüzeyine göre hesaplanan ortalama gerilmelere göre çok büyük olacaktır (Karamış, 1985; Bayhan, 1996). Bunun sonucunda temas noktalarında malzemenin akma sınırı aşılacak yani bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrayacaklardır (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Karamış, 1985; Bayhan, 1996). Yüzeyde absorbe edilmiş olan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır ve malzemelerin moleküllerinin direkt temas haline geçmelerine imkan verilmiş olunur. Böylelikle bölgesel kaynak bağları meydana gelir (soğuk kaynama) (Karamış, 1985; Bayhan, 1996). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir hatta ergime noktasına kadar çıkabilir ve böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parçacık kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest halde kalabilecekleri gibi metallere birisine bağlanabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı yani aşınma meydana gelmekte, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusu olmaktadır (Karamış, 1985).

Birbirlerine karşı izafi kayma hareketi uygulayan yüzeylerde kaynak bağlarının ayrılma durumları Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Yüzeyler arasındaki bağlantıların izafi kayma hareketi ile ayrılması  
(Sarı vd, 1997)

Bölgesel bağlantıların kayma mukavemeti, bağlantıyı oluşturan malzemelerin kayma mukavemetinden düşük ise temasta bulunan yüzeyler birbirlerinden ara yüzeyde ayrılırlar (Şekil 2.1.a). Bu durum, yüzeylerin adhezyonunu azaltan oksit filmi ile kaplı olmaları durumunda meydana gelmektedir. Fakat, “A” malzemesi bağlantılardan veya “B” malzemesinden daha düşük mukavemete sahipse bağlantıların ayrılması sadece “A” malzemesinde olur (Şekil 2.1.b). Yüksek mukavemetli bölgesel bağlantılarda ise yine “A” malzemesinin düşük mukavemetinden dolayı ayrılmalar baskın olarak “A” malzemesinde meydana gelir (Şekil 2.1.c). Malzemeler aynı veya eşit özelliklerde iseler adhezyondan dolayı yüksek mukavemetli bağlantılar, ara yüzeyin her iki tarafında eşit olarak ayrılırlar (Şekil 2.1.d) (Sarı vd, 1997).

### 2.1.2. Koroziif aşınma

Kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonların etkisiyle metalik malzemelerin yüzeyinden kopan korozyon ürünlerinin mekanik etkenlerle taşınması bir aşınma olayıdır ve bu tip aşınmaya koroziif aşınma denir. Koroziif aşınma, kayma yüzeyleriyle kimyasalların karşılıklı olarak birbirlerini etkileyebildikleri bir ortamla çevrelenmiş olmaları durumunda meydana gelir (Hurricks, 1972). Görülüyor ki koroziif aşınmadan söz edebilmemiz için mekanik ve kimyasal etkileşimin bir arada olması şarttır.

Mekanik etkenlerle taşınmanın olmadığı durumlarda, korozyon veya korozyon yenimi olayı söz konusudur. Özellikle neredeyse tüm tarım alet ve makinaları gerekli koruma önlemlerinin alınıp alınmamasına göre az yada çok bu tip korozyona maruz kalmaktadırlar. Akdoğan ve Eker’in 2000 yılındaki çalışmalarında Önal ve arkadaşlarından aktardıklarına göre, tarım alet ve makinalarında oluşan hasarlar içerisinde korozyonun etkisi %9 ile oldukça önemli bir yer tutmaktadır (Akdoğan ve Eker, 2000). Aynı çalışmada aşınmadan kaynaklanan hasar oranı ise %42.5 olarak bildirilmiştir.

### 2.1.3. Yorulma aşınması

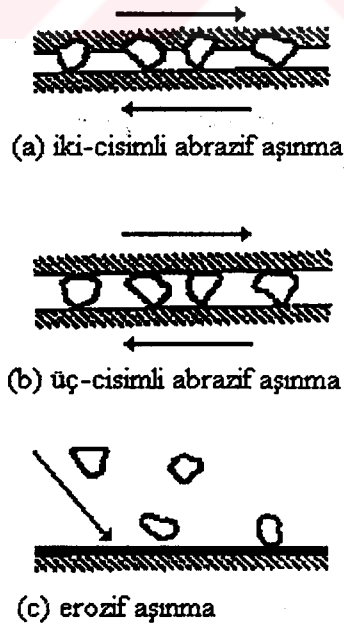
Mühendislik malzemelerinde yüzey yorulması olayı ve ardından parçacıkların koparak aşınmaya neden olması periyodik zorlanmalarda ve zamanla görülür (Mutaf ve Ulusoy, 1977; Karamış, 1985). Malzeme yüzeyinin periyodik bir zorlanmaya maruz kalması sonucunda yüzeyin altında mikro çatlak ve zayıf noktalar oluşur. Önceleri malzeme yüzeyinde herhangi bir değişiklik fark edilmezken belirli bir çalışma süresinin sonunda yüzey altındaki bu kusurlardan dolayı yüzeyden adhezif aşınmada kopan parçacıklardan daha büyük parçacıklar ayrılarak, yüzeye gözenekli bir görünüş (pitting) verirler (Mutaf ve Ulusoy, 1977). Bu aşınma tipi dişlilerde ve yuvarlanma hareketi yapan temas elemanlarında görülür (Hurricks, 1972).

### 2.1.4. Abrazif aşınma

Aşındırıcı sert partiküller ya abrazif aşınmaya ya da erozif aşınmaya neden olurlar. Endüstriyel uygulamalarda en sık karşılaşılan mekanik hasarlara genelde abrazif aşınmalar sebep olmaktadır. Bu tip aşınma; toprak kazıma aletlerinde, madencilik uygulamalarında, minerallerin işlenmesinde, tarım aletlerinde ve diğer pek çok uygulamalarda oluşmaktadır (Misra ve Finnie, 1982). Genel olarak bir metal yüzeyin abrazif aşınması o yüzeyin aşındırıcı sert partiküllerle veya kendisinden daha sert pürüzlü bir karşı metal yüzeyle bir yük etkisi altında ve birbirlerine göre zıt yönlerde yüzey boyunca kayma temasında bulunmaları halinde yüzeyinden malzeme parçacıklarının kaldırılması veya yerdeğiştirilmesi şeklinde tanımlanır (Khrushov, 1974; Vijn, 1975; Hutchings, 1992; Axén ve Zum Gahr, 1992; Venkatesan vd, 1997).

Makine parçalarında çeşitli hasarlara yol açan ve bu yüzden üretimin durması, iş kalitesinin düşmesi, büyük miktarlarda bakım-onarım, parça değiştirme ve işçilik masraflarına neden olan abrazif aşınmayla; aşınma dirençli malzemeler veya kaplamalar kullanarak, dizayn değişikliği yaparak, sisteme istenmeyen sert partiküllerin girmesinin sızdırmazlık elemanları ile önlenmesi ve sistemdeki hava ve yağlayıcıların filtrasyonu ile mücadele etmek mümkündür (Khrushov, 1974).

Abrazif aşınma, iki-cisimli abrazif aşınma ve üç-cisimli abrazif aşınma olarak ikiye ayrılır. İki-cisimli aşınmaya karşıt yüzeydeki sert çıkıntılar veya sabit aşındırıcı partiküller neden olurken üç-cisimli aşınmaya iki kayma yüzeyi arasındaki kayma ve yuvarlanma hareketi yapan serbest sert tanecikler neden olurlar (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973; Misra ve Finnie, 1982; Hutchings, 1992; Venkatesan vd, 1997). Üç-cisimli abrazif aşınmadaki serbest sert tanecikler dış kaynaklı olabildiği gibi (toz, mineral tanecikleri gibi) adhezif aşınma ürünü olan ve sistemde kalan artık aşınma parçacıkları veya parçalanmış oksit parçacıkları gibi iç kaynaklı da olabilirler (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973; Karamış, 1985). Endüstriyel uygulamalarda iki-cisimli abrazif aşınmayla çok daha büyük oranlarda karşılaşılmaktadır (Hurricks, 1973). Üç-cisimli abrazif aşınmada karşılaşılan aşınma oranları genelde, iki-cisimli de karşılaşılanlardan daha düşüktür (Hutchings, 1992). Aşındırıcı sert partiküller bazı durumlarda da erozif aşınmaya neden olurlar. Erozif aşınma, aşındırıcı parçacıkların yüzeye çeşitli açı ve hızlarda çarparak, talaş (filing) veya kazıntı (scraping) tipinde malzeme kaldırmalarıyla olan tip aşınmadır (Misra ve Finnie, 1982). Şekil 2.2.'de sert partiküllerin neden olduğu üç farklı aşınma tipi şematize edilmiştir.



**Şekil 2.2.** (a) iki-cisimli abrazif, (b) üç-cisimli abrazif ve (c) erozif aşınmalar arasındaki farklılıkların şematik gösterimi (Hutchings, 1992)

Misra ve Finnie'nin 1982 yılındaki çalışmalarında, Khrushov ve Babichev'den aktardıkları bilgiye göre iki-cisimli abrazif aşınmada aşındırıcı taneciklerle temas eden metalik yüzeyde sırasıyla şu iki prosesin aşınmaya neden olduğu sonucuna varmışlardır;

- (1) Metal parçacıklar kalkmaksızın, yüzeyin plastik şekil değişimine uğraması
- (2) Yüzeyden mikro talaş formunda parçacıkların ayrılması (Misra ve Finnie, 1982).

Üç-cisimli abrazif aşınma ayrıca kendi içinde üç gruba ayrılabilir: oyucu (gouging), yüksek gerilimli ve düşük gerilimli. Oyucu abrazif aşınma, kaya veya diğer kaba aşındırıcı parçaların malzeme yüzeyinden göreceli olarak daha büyük miktarlarda malzeme kaldırmaları şeklinde olan aşınmadır (Misra ve Finnie, 1982). Eğer uygulanan yük aşındırıcı tanecikleri aşınma işlemi süresince sıkıştırıp ezecek yani ufalayacak derecede büyük ise buna yüksek gerilimli abrazif aşınma, eğer değil ise yani aşındırıcı tanecikler kırılmıyor ise buna da düşük gerilimli abrazif aşınma denir (Misra ve Finnie, 1982; Hutchings, 1992; Venkatesan vd, 1997).

Pek çok kaynakta çeşitli aşınma eşitlikleri verilmektedir. Günümüze kadar her aşınma probleminde kullanılabilecek bir genel bağıntı henüz çıkarılamamıştır. Özel şartlar için türetilmiş olan bağıntılarda ancak o sistem için bir fikir verebilmektedir. Sertlik, aşınmada çok önemli bir belirleyici unsur olsa da bu bir genellemeyi gerektirmemektedir. Aynı sertliğe sahip iki malzemeden birisi daha aşınma dirençli olabilmektedir.

Aşınma konusunda en çok karşılaşılan abrazif aşınmanın en önemli alt başlığı da iki-cisimli abrazif aşınmadır. Aşağıdaki eşitlik (Archard denklemi) basit bir model olsa da bize bu tip aşınmaların tahmini için temel bir fikir verir niteliktedir.

$$V = \frac{kFS}{3H}$$

Bu eşitlikte;

$V$ , aşınan malzemenin hacmi [ $\text{mm}^3$ ]

$k$ , boyutsuz aşınma katsayısı

$F$ , uygulanan yük [N]

$S$ , aşınma mesafesi [mm]

$H$ , yüzey sertliğidir [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ].

Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi genel olarak diyebiliriz ki aşınma miktarı, uygulanan yük ve gidilen yol ile doğru, sertleştirilmiş metal yüzeylerin yüzey sertliği ile de ters orantılıdır (Misra ve Finnie, 1982; Kushwaha ve Shi, 1991; Hutchings, 1992). Pek çok araştırmacı ayrıca basitleştirilmiş aşınma denklemi olan  $V = KFS$  bağıntısını da kullanmaktadır. Bu denklemdeki  $K$  bir sabittir [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ] ve farklı malzeme ve aşındırıcılar için değişiklik göstermektedir (Moore, 1975a; Kushwaha ve Shi, 1991).

Abrazif aşınmada aşınma miktarına etki eden en önemli tribolojik sistem etkenleri şunlardır (Moore, 1974a; Misra ve Finnie, 1982; Karamış, 1985);

#### A- Ana Cisim Malzemesine Bağlı Olan Etkenler;

##### 1- Malzemenin Metalurjik Yapısıyla İlgili Olan Etkenler

- Kimyasal bileşimi
- Mikro yapısı

##### 2- Malzemenin Mekanik Özellikleriyle İlgili Olan Etkenler

- Hacimsel sertliği
- Yüzey sertliği
- Elastisite modülü ve elastiklik sınırı
- Akma ve kırılma özellikleri

##### 3- Malzemeyle İlgili Olan Diğer Etkenler

- Şekli ve boyutları
- Yüzeyin pürüzlülük durumu
- Varsa uygulanan yüzey sertleştirme veya kaplamaların etkisi

**B- Karşıt Cisme Bağlı Olan Etkenler;**

- Aşındırıcı taneciklerin tipi ve relatif sertliği
- Aşındırıcı taneciklerin büyüklüğü ve dağılımı
- Aşındırıcı taneciklerin şekli

**C- Sürtünme Ortamına Bağlı Olan Etkenler;**

- Ortam sıcaklığı
- Nem miktarı
- Yağlama durumu
- Vakum (Artık ürünlerin sistemden uzaklaştırılıp uzaklaştırılmadığı)
- Sürtünmesel ısınmanın etkisi

**D- İşletme Şartlarına Bağlı Olan Etkenler;**

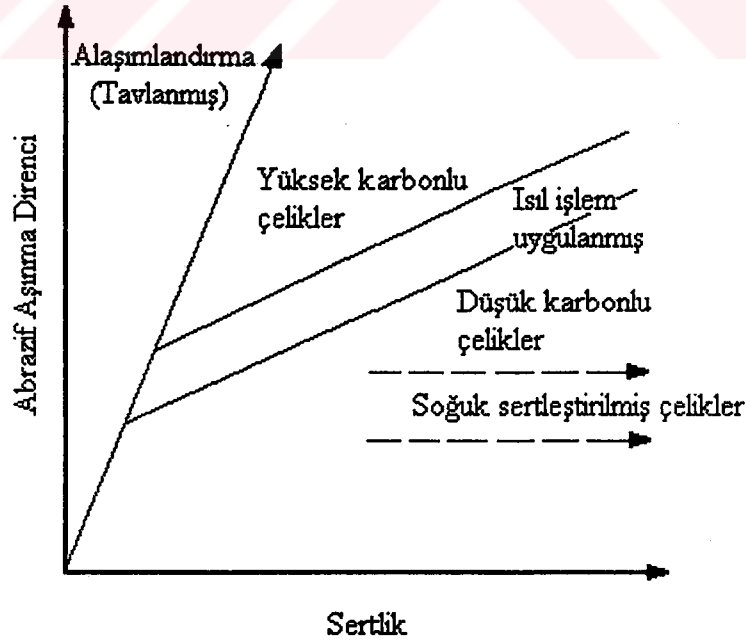
- Uygulanan yük
- Kayma hızı
- Hareketin cinsi
- Toplam aşındırma mesafesinin etkisi

### 3. KAYNAKÇA ÖZETİ ve TARİHÇESİ

#### 3.1. Genel Anlamda Abrazif Aşınmayla İlgili Önceki Çalışmalar

Hurricks (1972) çalışmasında yüzey modifikasyon işlemlerinin metalurjik yapıları ve aşınma dayanımları hakkında yapılmış önceki çalışmaları derlemiştir. Yazar endüstriyel aşınmanın önemine de genişçe değinmiştir. Aşınma tipleri ve aşınmanın kontrolü için uygulanabilecek yüzey kaplama ve modifikasyon işlemleri çalışmada esas olarak ele alınmıştır.

Hurricks (1973), çeliklerin abrazif ve adhezif aşınma dirençlerinin kontrolünde bazı metalurjik faktörler isimli derleme çalışmasında ısı işlemler sonrasında değişen mikroyapıların bu iki önemli aşınma tipi üzerindeki aşınma direnci değişimine etkilerini detaylı bir şekilde ele almıştır. Yazarın Khrushov ve Babichev'den aktardığı Şekil 3.1., çeliklerin yapılarının güçlendirilmesindeki üç ana yöntemin abrazif aşınma direnci ile sertlik artışı arasındaki bağıntıyı göstermektedir.



Şekil 3.1. Çeliklerin yapısal durumunun abrazif aşınma direnci üzerindeki etkisinin şematik gösterimi (Hurricks, 1973)

Şekilden de görüldüğü gibi saf metaller ve tavllanmış çeliklerin aşınma dirençleri ve sertlikleri arasında bir doğru orantı vardır. Isıl işlem uygulanmış karbon çeliklerinin aşınma direnci davranışındaki değişimin, çelikteki karbon miktarına bağlı bir fonksiyonla olduğu düşünülebilir. Soğuk sertleştirilmiş çelik yüzeyler tavllanmış malzemelerden abrazyon aşınmaya karşı daha dirençli değildirler.

Moore (1974b), perlitik ve martenzitik yapıdaki demirtürü (ferritik) malzemelerin abrazyon aşınma dirençleri ve hacimsel sertlikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Perlitik malzemeler için abrazyon aşınma direnci ve hacimsel sertliğin perlit miktarına, martenzitik malzemeler için abrazyon aşınma direnci ve hacimsel sertliğin de karbon miktarının kareköküne bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Yazar, pek çok araştırmaya dayanarak; demirtürü malzemelerin abrazyon aşınma dirençleri, kimyasal bileşimleri ve mikro yapıları ile çok yakından ilişkiliyken çok az sayıdaki demirtürü malzemenin abrazyon aşınma direncinin ise hacimsel sertliklerinin lineer fonksiyonuyla ilişkisi olduğunu ifade etmiştir. Yazar, aynı sertlik değerindeki iki çelikten daha yüksek karbon oranına sahip olanının daha çok aşınma direnci sergileyeceğini ve karbonla karşılaştırınca diğer alaşım elementlerinin aşınma direncine daha az etki ettiğini belirtmiştir.

Khrushov (1974) yılındaki çalışmasında saf metallerin, ısıl işlem görmüş çeliklerin, soğuk şekillendirilerek sertleştirilmiş malzemelerin, aşınma dirençli sert metallerin ve minerallerin sabit aşındırıcı taneciklere karşı dayanımlarını incelemiştir. Abrazyon aşınma direnci ile malzemelerin fiziksel özellikleri arasındaki bağlantılar da kurulmuş ve bunlara aşındırıcı taneciklerin bağlı sertlik ve çarpma zorlamasının etkileri de ele alınmıştır. Sonuç olarak yazarın bulduğu en önemli abrazyon aşınma temel prensipleri şunlardır;

- Eğer sürtünmesel ısınma olmuyorsa aşınmanın şiddeti sürtünme hızına bağlı değildir (düşük hızlarda),
- Aşınmanın şiddeti aşındırıcı taneciklerin boyutlarıyla doğru orantılı olarak yükselir (belli bir büyüklüğe kadar ondan sonra tanecik boyutuyla olan bağlılık azalır),

- Metalin sertliği ( $H_m$ ) ve aşındırıcının sertliği ( $H_a$ ) ile bağı (relatif) aşınma arasında şu bağıntılar vardır,

eğer  $H_a / H_m < 0.7 - 1.0$  ise aşınma yoktur,

eğer  $H_a / H_m > 1.3 - 1.7$  ise aşınma vardır ve aşınmanın hızı, aşındırıcının sertliğine göre değil metalin sertliğine göre şekillenir,

- Aşınma direnci sadece aşındırıcı ile metal sertliği arasındaki bağlantıya bağlı değil aynı zamanda aşındırıcının yapısına, dayanımına, şekline, tanecik boyutlarına ve keskinliğine de bağlıdır,

-  $H_a / H_m < 0.7 - 1.0$  durumunda abrazif aşınma dayanımı maksimumdur veya eğer aşınma varsa da bu farklı tip ve karakterdeki aşınma mekanizmalarının nedeniyledir (oksidasyon, adhezif vb.),

- Isıl işlem görmüş yapı çeliklerinin (normal sertleştirilmiş ve temperlenmiş) bağlı aşınma dirençleri ile yüzey sertlikleri arasında lineer bir bağıntı vardır,

- Tavlanmış tüm metalik malzemelerde, elastisite modülü ile bağlı abrazif aşınma direnci arasında bir orantı katsayısına göre değişen bir ilişki vardır ve bu aynı zamanda saf metaller ve pek çok alaşım için de geçerlidir. Yalnız bu, ısıl işlem görmüş çelikler için geçerli değildir.

- Darbeli abrazif aşınma şartlarında ısıl işlem görmüş çeliklerin bağlı abrazif aşınma direnci; çarpma, darbe enerjisi gibi başka faktörlere bağlıdır.

Vijh (1975), metallerin ve inorganik metal-dışı malzemelerin abrazif aşınma dirençlerini, kendi aralarındaki bağ enerjilerinin büyüklükleri ile tanımlamıştır. Çalışmada, malzemelerin bazı fiziko-kimyasal özellikleriyle abrazif aşınmaları arasındaki korelasyonlar da incelenmiştir.

Mutton ve Watson (1978), bazı saf metallerin ve farklı sertlik değerleri aralığına ve farklı mikroyapılara ısıl işlemle getirdikleri iki yüksek karbon çeliğinin, kontrollü şartlar altında gerçekleştirilen abrazif aşınma deneylerinden bulunan sonuçlarını daha önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Saf metaller için malzemenin sertliği ile aşınma direnci arasında lineer bir ilişki olduğunu diğer araştırmacılar gibi bulduklarını bildirirken ısıl işlem görmüş çeliklerde ise böyle bir lineer ilişkiyi bulamadıklarını belirtmişlerdir.

Habig (1983), sert yüzey tabakalı çeliklerin aşınma, korozyon ve yorulma davranışlarını incelediği çalışmasında kullandığı farklı çeliklerin kimyasal bileşimlerinin, faz yapılarının, sertliklerinin, tabaka kalınlıklarının ve yüzey düzgünlüklerinin bu tip hasarlar üzerinde ne derece etkili olduklarını araştırmıştır. Abrazif ve adhezif aşınmada farklı özelliklerdeki aşındırıcıların, tabakalar üzerindeki etkisini de incelemiştir.

### 3.1.1. Abrazif aşınma deney düzenekleriyle ilgili önceki çalışmalar

Moore (1974b), farklı ısı işlemler sonucu elde ettiği numunelerin abrazif aşınma deneylerini, döner disk üzerine kaplanmış farklı grit sayılarındaki Silisyum karbürü bez aşındırıcılar kullanarak sabit hız ve yük şartları altında gerçekleştirmiştir.

Khruschov (1974), abrazif aşınma laboratuvar test yöntemlerine değindiği çalışmasında, sabit aşındırıcı tanecikler kaplı aşındırıcı bezler üzerinde metal numunelerin sürtülerek aşındırılması yönteminin ilk kez 1910 yılında Rubin tarafından gerçekleştirildiğini belirtmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı, numunenin aldığı sürtünme yolunun tam olarak bilinmesidir. Dezavantajları; sürekli aynı sürtünme yolu takip edildiğinden taneciklerin aşındırma yeteneklerinin gittikçe azalması, aşındırma hızının çok yüksek ve numune çapının çok büyük olmasıdır. Çalışmada, sertliğin yanında malzeme kırılabilirliğinin de ön plana çıktığı darbeli abrazif aşınma durumlarına uygun, yatay bir tambur etrafına sarılmış sabit aşındırıcı bez üzerinde daha küçük çapta numune ile çalışılabilen, daha yavaş dönme hızına sahip ve numunenin aşındırılma işlemi boyunca spiral bir yol izlemesinin sağlandığı test cihazı tanıtılmıştır.

Mutton ve Watson (1978), bir tambur etrafına yapıştırılmış 80 mikronluk Alumina aşındırıcı kağıtlı pim – aşındırıcı test cihazında, farklı yöntemlerle türettikleri numuneleri ve bazı saf metalleri abrazif aşınma dirençleri yönünden incelemiştir. Aşındırma işlemi boyunca helisel bir aşınma yolu takip eden numune sürekli olarak yeni aşındırıcı taneciklerle karşılaşmaktadır.

Misra ve Finnie (1982), derleme çalışmalarında, iki cisimli abrazif aşınmanın laboratuvarında belirlenmesi ile ilgili en çok karşılaşılan test yönteminin aşındırıcı olarak zımpara kağıtlarının kullanıldığı pim – disk düzenlemesi olduğunu, farklı özellikteki aşındırıcı ve malzemelerin fazlalığı yüzünden universal bir abrazif aşınma test cihazının yapılmasının mümkün olamayacağını belirtmişlerdir.

Habig (1983), farklı yöntemlerle sertleştirdiği numuneleri farklı tanecik boyutlu farklı aşındırıcı kağıtlarla aşındırmıştır. İşlemsiz numunelerin tüm aşındırıcı kağıtlar karşısında en çok aşınanlar, Titanyum karbür ve Tungsten karbür kaplı çelik yüzeylerin ise tüm aşındırıcı tipleri karşısında en az aşınanlar olduğu bildirilmiştir. SiC aşındırıcı kağıdın, demir borür tabakalarının aşınmasında artışa neden olduğunu belirtmiştir.

Axén ve Zum Gahr (1992), abrazif aşınma deneylerinde 50 mm çapında ve 4 mm genişliğinde SiC aşındırıcı zımpara kağıtları kaplı tekerlekleri aşındırıcı olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları aşındırıcı kağıtların mesh sayıları 80, 120, 220 ve 800'dür. İki farklı tabaka kalınlığına sahip TiC-çelik kompozit tüm numunelere 10 N'luk sabit yük uygulamışlar ve ağırlık kayıpları cinsinden aşınma davranışlarını incelemişlerdir.

Budinski (1993), uyguladığı yedi farklı difüzyon işlemini kuru kumlu aşındırma cihazında ve silis kumu kaplı film aşındırıcı test cihazında denemiş ve bu test metodlarından elde ettiği hacimsel kayıp miktarlarını birbirleriyle karşılaştırmıştır. Her iki test metodunda da Vanadyum karbür kaplama en iyi abrazif aşınma dayanımını sergilemiştir.

### **3.2. Toprak İşleyen Uçlardaki Aşınmalarla İlgili Önceki Çalışmalar**

Mohsenin ve arkadaşları (1956) çalışmalarında, Gallwitz'in hesaplarına göre her yıl 5.000 tondan fazla çelik ve demirin Almanya'nın zirai topraklarına, pulluk uç demiri aşınması yoluyla karıştığı bilgisini aktarmışlardır. Araştırmacılar aynı çalışmalarında Amerika'da yapılan bir araştırmanın sonuçlarına dayanarak, pullukla sürme maliyetinin %10-20'lik kısmını pulluk uç demirlerinin tamir masraflarından oluştuğunu ve sadece

Michigan'da, toprak aşındırıcılığı çok olduğundan, yılda yaklaşık 1.5 milyon adet pulluk uç demirinin kullanıldığını belirtmişlerdir. Çalışmada, aşım elementlerinin, özellikle de karbonun, malzemelerin aşınma direncine olan etkisini araştırmışlar, en uygun uç demiri malzemesini belirlemeye çalışmışlardır. Hem laboratuvarda hem de tarla şartlarında, yüksek veya düşük karbonlu ve alaşımli veya alaşımsız dökme demir örneklerle deneylerini yürütmüşlerdir. Laboratuvarda aşındırıcı olarak kuru kum kullanmışlardır. Tarla denemelerini 12 uç demirli kültivatör ile gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinin sonucunda, istatistiksel hesaplamalara göre tarla ve laboratuvar deney sonuçlarının oldukça yakın olduğunu bulmuşlardır.

Richardson (1967), ele aldığı metalik malzemelerin aşınmasını laboratuvar ve tarla deneyleri ile incelemiştir. Çakmaktaşı (flint, kristal yapıda sert ve yoğun saf olmayan kuvars) kaplı zımpara kağıtlarıyla yapılan laboratuvar deney sonuçlarının tarla deney sonuçları ile çok yakın olduğunu ve kaba taneli zımpara kağıdının taşlı toprakları, ince taneli zımpara kağıdının da taşsız toprakları daha iyi simüle ettiğini belirtmiştir. İngiltere ve Afrika topraklarında sürdürdüğü deneylerinin neticesinde, aşınmaya en çok taşların neden olduğu sonucuna varmıştır. Malzemenin sertliği, aşındırıcının sertliğinin 0.8 katından daha fazla ise aşınma direncinin belirgin olarak arttığını bildirmiştir.

Keçecioglu ve Ulusoy (1975), tarla denemelerinin neticesinde pulluk uç demirlerinde 150 gr/ha gibi büyük aşınma değerlerine ulaştıklarını belirterek elde ettikleri sonuçların bazı yabancı kaynaklarla da uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, bu rakamların ülkemiz için anlamının her yıl toprağa karışarak kaybolup giden 4.5 milyon kilogram çelik olduğunu bu rakamın deneme sonuçlarına dayanarak indirilebileceğini bildirmişlerdir. Keçecioglu ve Ulusoy, Ege bölgesinde pulluk imal eden firmalardan sağladıkları pulluk uç demirlerinin özelliklerini saptayarak bu özelliklerin uç demirlerinde aranan özelliklerle uygunluğunu incelemişler ve örnekleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Genelde sertlik arttıkça aşınma kayıplarının azaldığını belirtmişlerdir. Yazarlar, teknik yönden karşılaştırmanın kullanma ekonomisi yönünden yeterli olmayacağını bu yüzden ekonomik özelliklerle teknik özelliklerin optimum kombinasyonunun gerekliliğine dikkat çekmişlerdir.

Mutaf ve Ulusoy (1977), toprak işleme tekniği yönünden işleyici organ aşınmasının en önemli sakıncasının aşınma ile özgül çeki direncinin artması ve yapılması istenen işin gereğince yapılamaması olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında, toprak işleme aletlerinin iş organlarında kullanılan dört farklı çeliğe farklı ısıl işlemler uygulamışlar ve bu işlemlerin aşınma direncine olan etkilerini incelemişlerdir. Tırmık ve kùltivatörle tarla, aşındırma kanalı ve aşındırma kabında da laboratuvar deneylerini yürütmüşlerdir. Tırmık denemelerinde ön sıradan arka sıraya gidildikçe aşınmanın azaldığını gözlemişlerdir. Model denemelerden aşındırma kabı, tane iriliği, sertliği ve nem miktarı gibi bazı parametrelerinde değiştirilip incelenmesine imkan sağladığından uygun bir deney yöntemi olarak önerilmiştir.

Balla ve Seckar 1981 yılındaki çalışmalarında toprak işleme şartlarına en uygun abrazif aşınma direncine sahip kesme yüzeyi malzemesini belirlemeye çalışmışlardır. Laboratuvar ve tarlada sürdürdükleri çalışmalar sonunda denedikleri malzemeler içerisinde -en yüksek sertliğe sahip olmayan- düşük alaşımlı ısıl işlemlerle sertleştirilmiş çeliği en uygun malzeme olarak belirlemişlerdir.

Foley ve arkadaşları (1984), aşınma oranında belirgin bir düşüşün ancak iş gören malzemenin sertliğinin aşındırıcıların sertliğinin yaklaşık %80'nini geçmesi halinde sağlanabildiğini bunu yerine getirebilecek en uygun malzemenin de Alumina seramik olduğunu belirtmişlerdir. Alumina seramik başlıklı yaylı ayaklı uçların, bilinen tiplere göre 4.4 - 9.4 kat daha az aşındıkları, sekiz ayrı tarla denemelerin ortalamalarına göre hesaplanmıştır. Derin sürüm aletlerinde alumina uygulaması sonucunda da bilinenlere kıyasla 8.4 katlık daha az bir aşınma elde etmişlerdir. Pim - disk aşınma cihazıyla laboratuvar deneylerini yapmışlar burada aşındırıcı olarak çakmaktaşı ve silisyum karbür kaplı zımpara kağıtlarını kullanmışlardır. Seramik korumalı pulluk uç demirlerinde yürüttükleri tarla denemeleri sonucunda mevcut uç demirlerine göre geniş disk alumina seramik koruyucularla aşınmanın 1.1 - 3.6 kat azaldığını belirlemişlerdir.

Karamış (1985), keskinliğini yitirip körleşen uç demirinin toprağı kesmeyip sadece öteleyeceğinden pulluk tabanı oluşumunu hızlandıracağını bunun sonucunda sıkışan toprakta bitki yetiştirilmesi yönünden pek çok olumsuzlukla karşılaşılacağını böylece

verimin azalabileceğini ve anız bozma işlemi sırasında pulluğun keskin kenarlarının aşınarak 2 mm incelmesinin çeki direncini %15-24 oranında arttırdığını önceki bazı çalışmalara atfen belirtmiştir. Ulusoy'un 1977 yılında yapmış olduğu araştırmanın sonunda; pulluk uç demirlerinde 150 gr/ha, kültivatör uç demirlerinde 90 gr/ha, tırmık dişlerinde 50 gr/ha ve diskaro disklerinde 135 gr/ha'lık ortalama aşınma değerlerini bulunduğunu vurgulamıştır. Araştırmacı tarafından bulunan bu aşınma değerleri literatürde organ sayıları belirtilen; 3 soklu pulluk, 9'lu kültivatör, 80 dişli tırmık ve 28 diskli diskaro için bir dekar alanın işlenmesinde tespit edilmiş toplam aşınma sınır değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Karamiş, pulluk uç demiri yapımında kullanılan çeliklerin; malzeme, toprak ve işletme şartlarına bağlı değişkenlere göre aşınma davranışlarını laboratuvar ortamında incelemiştir. Aşındırıcı olarak farklı tane boyutlu dere kumlarıyla üç farklı tarla toprağını kullanmıştır. Deneyle sonunda; hız, çalışma derinliği, basınç, yüzey pürüzlülüğü ve aşındırıcı tane büyüklüğü ile aşınmanın arttığını, nem miktarındaki değişikliklerin aşınma miktarlarında değişikliğe sebep olduğunu belirtmiştir. En uygun malzeme olarak, tabaka kalınlığının fazla olması koşuluyla endüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş veya kaynakla kaplanmış orta karbonlu çelikleri bulmuştur. Yazar ayrıca toprakta çalışan aletlerde aşınmanın özellikle abrazif aşınma mekanizması ile olduğunu nadiren de adhezif ve kohezif aşınma tiplerine rastlandığını belirtmiştir. Abrazif aşınma mekanizmasının da bazen iki cisimli bazen de üç cisimli olarak iş gören organlara etkidiğini belirtmiştir. Nemli topraklarda toprak kütlesi içine gömülmüş taşların üç cisimli abrazif aşındırma etkisi yarattığını açıklamıştır.

Kızılelma (1987), pulluğun en önemli aktif parçası olan üç demirinde tarlada çalışma koşullarında oluşan, eğilmeden kaynaklanan gerilme değerlerini, üç elemanlı dikdörtgen şekilli strain gage'lerin kullanıldığı deneysel yöntemle belirlemeye çalışmıştır.

Foley ve Reznicek (1988), mühendislik seramiklerinden alumina'nın (aluminyum oksit) ok sayıda tarla denemeleriyle yapılan incelemeler sonunda özellikle tırmık   demiri, dipkazan   demiri ve pulluk tesviye kürekleri gibi tarım aletlerinde oldukça iyi aşınma direnci sergilediklerini belirtmişlerdir. Aynı işleri gören metal uçlara karşın bu

uçların 3 – 10 kat daha az aşınma oranı gösterdikleri bildirilmiş fakat bu tip malzemelerin yüksek darbe risklerinin olduğu uygulamalara uygun olmadığı belirtilmiştir. Bu yüzden farklı seramik malzemelerle çalışmaların devam ettirilmesi önerilmiştir.

Komaç ve arkadaşları (1988), seçilen dört farklı kulaklı pulluk uç demiri malzemesine ısıtma işlemi uygulayarak iç yapı değişimlerini, mekanik özelliklerdeki değişimleri ve laboratuvarda döner tablalı aşınma test cihazındaki aşınma kayıplarını belirlemişlerdir.

Kushwaha ve arkadaşları (1990), Kanada Ulusal Araştırma Konseyinin 1986 yılında hazırladığı Kanada da Triboloji stratejileri isimli çalışmada, tarım sektöründe, sürtünmeden kaynaklanan yıllık toplam kayıpların yaklaşık 320 milyon dolar ve aşınmadan kaynaklanan yıllık toplam kayıplarında yaklaşık 940 milyon dolar olduğu ve gerekli önlemlerin alınması ile tarım sektöründeki bu rakamların toplam yıllık 337 milyon dolara indirilebileceğinin belirtildiğini ifade etmişlerdir. Laboratuvar ortamında, metalik cam kaplı kùltivatör kaz ayaklarındaki toprak kuvvetini, bilinen tiplerdeki kaz ayaklarına gelen kuvvetlerle karşılaştırmışlardır.

Par ve Komaç (1990), değişik darbe enerjileri yüklenerek yüzeyi sertleştirilmiş östenitik mangan çeliğinin aşınma direncini laboratuvarda incelemişlerdir. Aşınma deney seti olarak kullandıkları kuru kum/teflon tekerlek test cihazında yüzeye gelen yükleri ve devir hızlarını değiştirerek optimum çalışma şartlarını da belirlemeye çalışmışlardır.

Yaldız (1990), pulluk uç demiri imalatında kullanılan üç farklı çelik malzemeyi materyal olarak seçmiş ve bunlara özelliklerine en uygun ısıtma işlemleri uygulayarak tarlada denemiştir. Denediği uç demirlerinde sertliğin artışı ile aşınmanın azaldığını gözlemlemiştir.

Yu ve Bhole 1990 yılındaki çalışmalarında, toprak işleme aletlerinin düşük gerilmeli abrazif aşınmaya maruz kaldıklarını ve genelde sade karbon veya az alaşımlı

çeliklerden yapıldıklarını belirtmişlerdir. Bir tribolojik sistem içinde düşünüldüğünde, malzemedeki kaynaklanan özellikler kadar toprağın fiziksel yapısının, yoğunluğunun, neminin, içindeki taş ve kaya miktarının ve toprakla uç arasındaki hızın ve darbe açısının da oldukça önemli olduğunu vurgulamışlardır. Geliştirdikleri prototip laboratuvar test cihazının, toprakla iş organı arasındaki aşınmayı bu amaç için kullanılan diğer tip aşınma cihazlarından daha iyi canlandırabileceğini belirtmişlerdir. Farklı çelik malzemeleri kullanarak bu cihazla yaptıkları deneyler sonucunda, çalışma derinliği, toprağın nemi ve çarpma açısı arttıkça aşınmanın arttığını bildirmişlerdir.

Kushwaha ve Shi, (1991), tasarladıkları merkezkaç prensibine göre çalışan aşınma test cihazında yedi farklı toprak işleyici uç malzemesini denemişlerdir. Bu cihazda karşıt madde olarak kum ve kuru toprağı kullanmışlardır. Aşınma oranını kum için topraktan daha çok bulmuşlardır. Malzemenin sertliği arttıkça aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir.

Kushwaha ve Hua (1992), geliştirdikleri toprak aşınması test cihazında geleneksel kültivatör uç demirleri ile Tungsten karbür tozları ile üç farklı işlem uygulanmış uç demirlerinin aşınmalarını incelemişlerdir. Tüm aşınma oranları incelendiğinde yüzey işlemleri görmüş örnekler geleneksel uç demirine göre daha az aşınmışlardır. Bu tip yüzey işlemleri uygulamasının bir avantajı da uçların kendi kendilerini bileme özelliğine sahip olmalarıdır. Denemelerinin sonunda, aşınma oranının kayma mesafesi ile doğru orantılı olduğunu ve sertlik arttıkça aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir.

Kufel ve Wierzcholski (1993), pulluk gövdesinin çatıya rijit ve elastik bağlanmaları durumlarında uç demirlerindeki aşınmayı tarla şartlarında incelemişlerdir. Elastik asılmanın, rijit asılıma göre daha az abrazif aşınmaya neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Çetinkaya (1994), TSE tarafından pulluk uç demiri yapımına önerilen sade karbonlu çeliklere farklı ısı işlemleri uygulanmış ve uyguladığı ısı işlemlerinin aşınma direncine etkisini araştırmıştır. Tarla ve kum havuzu deneyleri sonucunda en yumuşak ve en sert malzemeler en fazla aşınırken orta sertlikteki malzeme en az aşınmayı

göstermiştir. Denemeleri hızlandırdığı ve maliyetleri düşürdüğü için kum havuzunun diğer toprak işleyici uçların sertlik – aşınma deneylerinde de kullanımının uygun olacağını bildirmiştir.

Polat (1994), beş farklı kültivatör uç demiri malzemesini ele almış ve bunların bir kısmını doğrudan bir kısmını da ısıl işlem uyguladıktan sonra yaz dönemi kuru tarla şartlarında denemeye almıştır. Her bir ucu 10 km kullanımdan sonra tartarak ağırlık kayıpları cinsinden aşınmayı tanımlamıştır. Sertlik arttıkça, malzemelerin içinde bulunan mangan ve karbon oranı arttıkça aşınmanın azaldığını belirtmiştir.

Göktürk (1995), kültivatör uç demiri imalatında sıklıkla kullanılan 60SiMn5 çeliğine çeşitli ısıl işlemler uygulamış ve laboratuvarda yürüttüğü denemeleri sonucunda normalizasyon + nitrürleme uyguladığı örneklerin en iyi sonucu verdiğini belirtmiştir.

Bayhan (1996), Trakya bölgesinde bulunan ve çizel üreten beş firmanın uç demirleri ile yaylı kültivatör + döner tırmık kombinasyonu üreten üç firmanın uç demirlerinin aşınmalarını ve ayrıca aşınma üzerinde etkili olan faktörlerden ısıl işlem, toprak nemi, toprak penetrasyon direnci, uç demiri bileme şekli ve toprak çeşitlerinin aşınmaya etkilerini araştırmıştır. Laboratuvar ve tarla denemeleri arasında birbirine paralel sonuçlar bulmuştur. Sonuç olarak uç demirinin sertliği ve kimyasal bileşimindeki karbon ve mangan oranı arttıkça aşınma miktarının azaldığı belirtilmiştir.

Bayhan'ın (1996) aktardığına göre Quick, 1989 yılındaki çalışmasında çizel uç demirlerindeki aşınmayı azaltmak için kaynakla sertleştirme, tungsten karbür ve seramik kaplama yöntemlerini karşılaştırmıştır. Laboratuvarda iki ayrı deney düzeneğinde yaptığı deneyler sonunda sertleştirilen malzemelerde aşınma direncinin yükseldiğini ve en yüksek aşınma direncinin seramik kaplanmış örneklerde olduğunu gözlemlemiştir. Seramik kaplamanın aşırı pahalı olması nedeniyle toprak işleyen uçlara tungsten karbür ile sertleştirmeyi önermiştir.

Bayhan'ın (1996) aktardığına göre Riley ve arkadaşları (1990), iki farklı bölgede dokuz ayrı toprak grubunda, kurak ve nemli toprak şartlarının, uç demirlerinin çeki kuvveti ihtiyacına ve aşınma oranlarına etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda, çeki kuvvetinin aşınma üzerinde etkisinin olmadığını fakat düşey yöndeki kuvvetlerin etkisinin olabileceğini saptamışlardır. Kuru topraktaki aşınma oranının nemli toprağa göre daha fazla olduğunu ve aşınma oranı üzerinde toprağın tipi, taşların geometrisi ve miktarı, toprak sertliğinin etkisinin olduğunu da gözlemlemişlerdir.

Çelik (1996), ülkemizde kullanım alanı oldukça az olan ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirleri ele aldığı çalışmasında bu malzemelerin aynı yapıya sahip çelik malzemelere eşdeğer mukavemet özellikleri verebilen malzemeler olduğunu belirtmiştir. Çalışmasının sonunda öneri olarak tarımın ülkemizde oldukça önemli olduğunu ve bu tip malzemelerin pulluk, kazıcı, tırmık gibi yüksek aşınma direnci gerektiren toprak işleyici uçlarda başarıyla kullanılmasının mümkün olabileceğini vurgulamıştır.

Owskiak (1999), yaylı ayaklı kùltivatör uçlarında oluşan aşınmayı Polonya'nın güneyinde kumlu ve az killi tarla topraklarında incelemiştir. Kùltivatörün birinci sırasındaki uçların üçüncü sıradakilere göre %26-100 daha fazla aşındıklarını ve kumlu topraklarda aşınmanın az killi topraklara göre %40-100 daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Çalışmada ayrıca traktör teker izinden giden uçlarda teker izinin dışında kalanlara göre de %17-40 daha fazla aşınma tespit edilmiştir. Bununda sebebi, traktörün ağırlığından dolayı artan toprak direnci olarak belirtilmiştir.

### **3.2.1. Borlanmış çeliklerle toprak işleyen uç demirlerinde yapılmış önceki çalışmalar**

Moore (1975b), seçtiği malzemelere 11 farklı yüzey modifikasyon işlemini değişik koşullarda uygulamış ve böylece elde ettiği 35 ayrı numuneyi hem laboratuvar hem de tarlada denemiştir. Yüzey yayınım işlemleri olarak karburizasyon, nitrürasyon ve iki ayrı şartta borlama uygulanmıştır. Laboratuvar denemeleri iki ayrı grit sayısına sahip (40 ve 180 grit) döner diskli abrazif aşınma test cihazında çakmaktaşı kaplı aşındırıcı

kağıtlarla yapılmıştır. Dönme hızı 0.56 dev/sn'dir. Aşındırma mesafesi 5.25 m'dir ve numunelerin 3 tekrardan sonra ortalama ağırlık kayıpları cinsinden hacimsel aşınmaları bulunmuştur. Seçilen bir kontrol malzemesine göre de aşınma direnci tanımlanmış ve karşılaştırmalar aşınma dirençleri üzerinden yapılmıştır. Yalnız yüzey yayılım işlemi uygulanmış örneklerde aşınma direnci; kontrol malzemesinin ağırlık kaybının, test malzemesinin ağırlık kaybına bölünmesi ile hesaplanmıştır. 180 gritlik aşındırıcılarla yürütülen deneylerde, tüm yöntemlerle modifiye edilen örneklerde farklı oranlarda aşınma tespit edilirken 10.4 kodlu borlanmış örneklerde aşınma ölçülemedi. 40 gritlik aşınmalar sonunda da ikinci en iyi aşınma direncini 10.4 kodlu borlanmış örnekler vermiştir. Diğer borlanmış örnek 10.3, 180 ve 40 gritlik aşındırıcı kağıtlar karşısında, tüm numuneler içinde en az aşınan sırasıyla altıncı ve üçüncü örnek olmuştur. Tarla deneyleri taşlı bir tarlada gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneye ortalama 200 mm derinlik, 1.79 m/sn hız ve toplam 200 m sürüm uygulanmıştır. Her 50 m de bir numuneler 90° döndürülmüşlerdir. Üç sürüm sonucundaki ağırlık kayıplarının ortalaması alınarak hacimsel aşınma hesaplanmıştır. Toprağın nemi, yoğunluğu, toprak kohezyonu ve penetrasyon direnci ölçülmüştür. Ayrıca yüzey yayılım işlemi uygulanarak sertleştirilen numuneler diğerlerinden farklı olarak tarlada ikinci bir 200 m lik sürümle bir kez daha aşındırılmışlardır. 200 m'lik tarla sürümü sonunda en iyi aşınma direncini 10.4 kodlu örnekler, kontrol malzemesine göre 7.29 kat ile sergilemişlerdir. Diğer borlanmış örnekler ise (10.3) tarla sürümü sırasında taşların neden olduğu çarpmalardan çok etkilenmiş ve büyük oranlarda malzeme kaybı bu örneklerde gözlenmiştir. İkinci grup borlanmış örneklerin 200 m sonundaki aşınma dirençleri 0.563 dür ki bu sonuç incelenen tüm örnekler içindeki en kötü üçüncü sonuçtur. Sadece yüzey yayılım işlemi uygulanmış örneklerde yapılan ikinci 200 m'lik sürüm sonunda 10.4 kodlu borlu örnekler bu grup içinde en iyi, 10.3 kodlu borlu örneklerde en kötü aşınma direncini sergilemişlerdir. Yazar araştırmasında, genelde tarla test sonuçlarının laboratuvarında yapılan 40 – 180 gritlik aşındırıcılarla yapılan deneylerle aynı sonuçları verdiğini, çok kırılğan malzemeler, aşındırıcıya göre sertliği çok az olan malzemeler ve büyük karbürler içeren malzemelerde aynı sonuçları vermediğini bildirmiştir. Yazara göre; 10.4 kod numaralı borlanmış düşük alaşımlı çeliğin, 10.3 kod numaralı borlanmış sade karbonlu çeliğe göre daha iyi sonuç

vermesinin nedeni, daha tok temperlenmiş martenzitik çekirdek yapıya sahip olması ve bu nedenle darbelere karşı direncinin daha yüksek olmasıdır.

Biddulph (1977), Moore'un 1975(b) yılındaki çalışmasının sonuçlarını ekonomiklik açısından değerlendirmiş ve sonuç olarak borlanmış düşük alaşımlı 10.4 kod numaralı çeliğin tarla şartları için ekonomiklik açısından en optimum çelik olduğu sonucuna varmıştır.

Quirke ve arkadaşları (1988), Güney Afrika tarım endüstrisinin, topraklarının hızlı aşındırma özelliğinden dolayı, yıllık 30 milyon Rand gibi büyük bir harcama ile karşı karşıya kaldığının tahmin edildiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında; orta karbonlu, yüksek karbonlu, paslanmaz ve bor katkılı çeliklere ısıtma işlemi uygulanarak bağıl abrazif aşınma dirençlerini tanımlamışlar, laboratuvar ve tarlada yaptıkları denemelerle bu çelikleri aşınmaları yönünden karşılaştırmışlardır. Aşındırıcı olarak alumina parçacıklarının yapışık olduğu bir kayış kullanılmıştır. İki farklı grit sayısında (40 – 80) ve iki farklı basınç altında (789.8 – 1421 kPa) laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Aşındırıcı olarak alumina'nın tercih edilmesinin nedeni, 1800 VSD sertliği ile kuvars ( $\approx 800 - 1200$  VSD) parçacık ağırlıklı topraklara en yakın aşındırıcı olmasıdır. Güney Afrika'nın aşındırıcı özelliği ön plana çıkan topraklarında mart ayında yürütülen tarla denemelerinde araştırmacılar 1.94 m/sn sabit traktör hızında çalışmışlardır. Laboratuvar ve tarla deney sonuçları incelendiğinde, laboratuvar denemeye alınan on farklı örnek içinde su verilmiş borlu çelik örnek, hem 40 hem de 80 gritlik denemelerde, su verilip 200°C'de temperlenmiş yüksek karbonlu (0.96 C) çelik örnekten sonra ikinci en iyi bağıl aşınma direncini ve ikinci en yüksek sertlik değerini veren örnek olmuştur. Tarla denemelerinde borlu çelik bağıl aşınma direncinde dördüncü sırada yer almıştır. Yazarlar borlu çelik hakkında dikkat çekici bir durum olduğunu, düşük karbon oranına rağmen oldukça iyi bağıl aşınma direnci elde ettiklerini ve sergilediği sert ama tok yapının, toprağın doğal aşındırıcılığına karşı oldukça iyi direndiğini belirtmişlerdir.

Tian ve arkadaşları (1989), Çin'de her yıl 2 milyon adet pulluk uç demirine ihtiyaç

olduğunu belirterek pulluk uç demirleri konusunda hem kendi ülkelerinde hem de diğer ülkelerde bu konuyla ilgili yapılacak çalışmaların önemine değinmişlerdir. Tian ve arkadaşları çalışmalarında, borla yüzeyi sertleştirilmiş pulluk uç demirlerinde borlu tabakaların abrazif aşınma davranışını incelemişlerdir. Borlu tabakalar ve borlama işlemi hakkında pek çok çalışma olduğunu fakat toprak işleyici uçlarda özellikle pulluk uç demirlerinde bu yöntemin uygulanabilirliği ve aşınma davranışları hakkında çok az sayıda çalışma olduğunu belirtmişlerdir. Laboratuvar ve tarla denemelerinde aynı çelik malzemenin ısıtma işlemi uygulanmış ve üç farklı tabaka kalınlığına getirilmiş borlu örneklerini incelemişlerdir. Laboratuvar ortamında kuvars kumunu aşındırıcı olarak kullanmışlar ve her numuneye 4100 m aşınma işlemi uygulamışlardır. Borlanmış örneklerde ortalama 1460 VSD sertlik değeri elde etmişlerdir. Bu sertlik aşındırıcı olarak kullandıkları kumun sertliğinden yaklaşık 1.3 – 1.4 kat daha fazla olduğundan sonuç olarak çok yüksek aşınma direnci elde ettiklerini bildirmişlerdir. Borlama işlemi uygulanmış numunelerde işlem uygulanmamışlara göre laboratuvar ortamında yaklaşık 9 kat, tarlada ise 3.17 kat daha fazla aşınma direnci değerleri ölçmüşlerdir. Ele aldıkları manganlı çelikte (65Mn) 160 mikron borlu tabaka kalınlığının 90 ve 200 mikronluk tabaka kalınlıklarındaki örneklerle nazaran daha iyi aşınma direnci gösterdiğini belirterek borlama yöntemini abrazif aşınım etkisindeki ziraat aletlerinde kullanılmasını önermişlerdir.

Tarhuni (1996), kùltivatör uç demirlerinde aşınmanın azaltılabilmesini sağlayacak yöntemleri araştırmıştır. Deney materyali olarak seçtiği orta karbonlu çeliğe, borlamanın dahil olduğu üç farklı ısıtma işlemi ve dört farklı yüzey kaplama yöntemini uygulamış ve tarlada denemiştir. Tarla deneylerinde çalışma hızı 1 – 1.5 m/sn, iş derinliği 7 – 10 cm olup her bir uç 12.5 km lik sürüm yapmıştır. Tarla deneylerinin yapıldığı alan 3 ayrı parselde toplam 360 dekar'dır. İndüksiyon, nitrürasyon ve borlama ısıtma işlemleri içinde indüksiyonla yüzey sertleştirme standart örneklerle göre aşınma direnci yönünden 1.4 kat, kullanma ömrü yönünden de 2 katlık bir üstünlük göstermiştir. Borlanmış örnekler ile standart örnekler aşınma direnci yönünden aynı, kullanma ömrü yönünden borlanmış örnekler standart örneklerle göre 1.3 kat daha iyi bulunmuşlardır. Yüzey kaplama yöntemlerinden alüminyum oksit seramik kaplama aşınma direnci yönünden standart örneklerle göre 2.3 kat, kullanma ömrü yönünden de

2.5 katlık bir üstünlük sergilemiştir. Borlama işlemi, pasta borlayıcılarla kutu içinde 950°C sıcaklıkta 4 saat süreyle uygulanmıştır. Kazayaklarında 50 mikron derinliğinde bor tabakası elde edildiği bildirilmiştir. Tüm numuneler içinde en yüksek sertlik alumina kaplanmış örneklerde 840 VSD, en düşük sertlik 358 VSD değeriyle borlanmış örneklerde ölçülmüştür. Genel olarak sertliğin artmasıyla aşınmanın azaldığı ve ön sıradaki uç demirlerinde orta ve arka sıralardakilere oranla daha çok aşınmanın olduğu tespit edilmiştir.

### 3.3. Borlamayla İlgili Önceki Çalışmalar

İlk kez 1895 yılında Moissan, metal yüzeyler üzerine bor yayını işlemi gerçekleştirmiştir (Matuschka, 1980; Özsoy, 1991; Hunger ve Trute, 1994). Bu tarihten sonra konuyla ilgili detaylı araştırmalar hep süregelmiştir. Günümüzde borlama, çok sert ve aşınma dirençli yüzey tabakalarının geliştirilmesi ile ilgili çalışmaların odak noktalarından birisi olmaya devam etmektedir.

Fiedler ve Sieraski (1971), borlanmış ve borlanmamış, boru yapımında kullanılan konik milleri (merdaneleri) karşılaştırmışlar ve sonuçta borlamanın az alaşımlı çelikleri, yüksek alaşımlı çeliklerin kalitesine getirdiğini belirtmişlerdir. Borlama metodu olarak elektroliz sıvı ortam borlamasını uygulamışlardır. Demir borürlerin oluşumu sırasında bor atomlarının demir atomlarından daha hızlı yayındığı için poroziteye neden olabildiklerini bunun önlenmesi için de düşük sıcaklıklarda borlamayı önermişlerdir. Araştırmacılar, kaplama kalınlığı artan düşük karbonlu çeliklerde borlama sonrası ısıl işlem gerekliliğini vurgulamışlardır.

Mal ve Tarkan (1973), çalışmalarında, yeni bir difüzyon tekniği olan borlamayı tanıtmışlar, borun atom çapının demir, kobalt veya nikelin atom çapına göre %25 daha küçük olduğunu ve bu yüzden bu metaller içinde çözünebildiklerini belirtmişlerdir.

Permyakov ve arkadaşları (1974), bazı takım çeliklerine ticari bor karbür kullanarak borlama yapmışlar ve aynı çeliklerin sadece su verilmiş hallerine göre en az

2 – 3 kat daha iyi abrazif aşınma direncinin sağlandığını ispatlamışlardır. Borlanmış karbon ve az alaşımlı çeliklerin neredeyse aynı aşınmayı sergilediklerini belirtmişlerdir.

Eyre (1975), borlamanın, incelemiş olduğu iki farklı çelikte ve gri dökme demirde adhezif aşınmayı azaltıcı etkisi olduğunu belirtmiştir. İncelediği diğer yüzey yayılım işlemlerine göre borlamanın daha üstün olduğunu ve borlu tabakaların ömrünün uygulanan yüklerle ters orantılı olduğunu vurgulamıştır.

Biddulph (1977), derleme çalışmasında, kayma aşınması, abrazif aşınma ve korozyif aşınma açısından borlamanın uygulandığı malzemelere kattıklarını yorumlayarak borlamanın üstün yönlerini vurgulamıştır.

Singhal (1977), toz karışımlarla kutu borlama tekniğini ve genel anlamda borlamayla elde edilen borür tabakaların özelliklerini ele aldığı çalışmasında demir bazlı metallerde bor kaplamanın, ulaşılan aşırı yüksek sertlik nedeniyle aşınmaya ve erozyon hasarlara karşı oldukça iyi direnç gösterdiğini belirtmiştir.

Bel'skii ve arkadaşları (1980), çalışmalarında bir traktör fabrikasındaki büyük kalıpların yüzeyinin pasta borlama yöntemi ile sertleştirilmesini incelemişlerdir. Bazı durumlarda servis ömründe iki katlık iyileşmenin sağlandığını ve kısmi borlama uygulanmış kısımlarda dekarburizasyon ve oksidasyon görülmediğini belirterek bununla yıllık 52 000 Ruble değerinde kazanç yarattığını bildirmişlerdir.

Habig ve Fischer (1981), alaşımlı çeliklerdeki borlu tabakaların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı bor atomu içeren toz karışımlar kullanarak 900°C de, alaşımlı çeliklerde borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Abrazif, adhezif ve tribooksidatif aşınma ve yüzey yorulmasını inceleyerek, hasarlar karşısında ele aldıkları çeliklerdeki alaşım elementlerinin etkilerini de araştırmışlardır. Vanadyum karbürün abrazif aşınmanın azalımında çok etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Shadrichev ve Rumyantsev (1982), 45 çeliğinden yapılmış numuneler üzerinde iki fazlı borür tabakasının aşınma kinetiğini incelemişler ve çelik parçaların aşınma

dirençlerini arttırmada en etkili yöntemlerden birinin borlama olduğunu ileri sürmüşlerdir. FeB tabakasında ortalama 1840 VSD, Fe<sub>2</sub>B tabakasında ise ortalama 1220 VSD sertlik değerlerini elde etmişlerdir. Daha sert olan FeB tabakasında, FeB'den daha az sert olan Fe<sub>2</sub>B tabakasındaki kadar aşınma ölçmüşlerdir. Relatif aşınma direncinin sadece sertliğe bağlı olmadığını kırılgenlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklere de bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Berzina ve arkadaşları (1984), 850° C'de 1 saat normal sını ortam banyosunda borladıkları örneklere borlama sonrasında farklı ısıl işlemler uygulamışlar ve bu işlemlerin geçiş bölgesinin kalınlığı üzerindeki etkilerini ve diğer mekanik özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir.

Bozkurt (1984), ülkemiz şartlarına en uygun borlama banyosunun bileşimini bulmayı amaçlamıştır. Çalışmasında ele aldığı numunelerin borlu tabakalarındaki mikro yapı değişimleri, sertlik ölçümleri, x-ışınları analizi, ot radyografik etüd ve kalınlık değerleri sonuçlarını vermiştir. AISI 1042 çeliğinden numuneler üzerinde borlama işlemi, 940° C sıcaklıklı farklı banyolarda 5 saat süreyle yapılmıştır. Boraks'a ilave edilen Ferro silis'in %25'i, kalsine borik asidin de %18'i geçmemesini önermiştir.

Frantsuzova ve arkadaşları (1984), termal çevrimli işleme yapı çeliklerinin darbe dayanımının artırılabilirliğini vurgulayarak bu yöntemi özellikle traktör ve ziraat makinaları parçalarında önermişlerdir. Termal çevrimli borlamanında izotermal borlamaya göre darbe dayanımında 1.5 – 2.3 katlık bir iyileşmeye neden olacağını bildirmişlerdir.

Subrahmanyam ve Gopinath (1984), yağlamasız kuru sürtünme şartları altında pim – disk aşınma cihazıyla tek ve çift fazlı borlu tabakaların aşınma denemelerini gerçekleştirmişlerdir. Sade karbonlu çelikte elde ettikleri FeB, Fe<sub>2</sub>B ve FeB+Fe<sub>2</sub>B borlu tabakalarının her birinin ve aynı çeliğin işlemsiz halinin aşınma davranışlarını incelemiş ve sonuç olarak tek FeB ve tek Fe<sub>2</sub>B tabakalarının diğerine (FeB+Fe<sub>2</sub>B) nazaran aşınma açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Evtifeev ve Sin'kovskii (1985), borla birlikte silis ve sülfür'ün aynı anda yüzeye yayındırılmasıyla sadece bor yayınına kıyasla aşınma ve sürtünme direnci açısından 1.6 – 2.1 kat iyileşme sağlandığını saptamışlardır.

Rus ve arkadaşları (1985), 304 çeliğini iki farklı toz borlama karışımıyla 815° ve 900° C sıcaklıklarda 6 – 12 saat arası sürelerde borlamışlar ve elde ettikleri tabaka yapılarını incelemişlerdir.

Vasil'eva ve arkadaşları (1985), üç farklı paslanmaz çelikte borlama işleminin aşınma direncinde ne gibi değişikliklere neden olacağını incelemişlerdir. 800° - 1000°C sıcaklık aralığında 2, 6 ve 10 saat sürelerde borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Artan işlem süresinin borlu tabakanın kalınlığının artışına neden olduğunu belirtmişlerdir. Artan karbon miktarının borlu tabakanın kalınlığının azalmasına sebep olduğunu da vurgulamışlardır.

Badini ve arkadaşları (1987), karbon, krom ve nikelin borlu tabakaların sertliğine olan etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, krom ve karbon miktarı arttıkça sertlik artmakta buna karşı nikelin ilavesinin sertliği az fakat sistematik bir şekilde düşürdüğü sonucuna varmışlardır.

Fichtl ve arkadaşları (1987), Ekabor tozlarıyla yapılacak işlemin temel prensiplerini ve borlamayla ilgili genel bilgileri vererek, borlu tabakaların bazı özelliklerini, uygulama örnekleri ile beraber tanıtmışlardır.

Tsipas ve Rus (1987), dört farklı çelik türünde iki farklı toz borlama karışımını kullanarak borlama yapmışlardır. Numunelere, 815° ve 900° C sıcaklıklarda 6, 8 ve 12 saat borlama işlemi uygulamışlar ve sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

Wang ve Hutchings (1988), aşındırıcı sertliği ve büyüklüğünün, düşük alaşımli borlanmış çeliklerin iki cisimli abrazif aşınma mekanizmalarına olan etkilerini incelemişlerdir. Borlu çeliklerin; Alüminyum Oksitli aşındırıcılara, Silisyum Karbürlü aşındırıcılardan daha çok dayandıklarını, aynı çeliğin ısıtma işlemi (su verilip

temperlenmiş) uygulanmış halinde ise bunun tam tersinin söz konusu olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma dirençleri arasındaki farkın, aşındırıcı parçacık büyüklüğü ve/veya uygulanan yükün artmasıyla açıldığını da bildirmişlerdir.

Bindal (1991), 940° C’da değişik sürelerde normal sıvı ortam borlaması uyguladığı üç ticari karbon çeliğinde (AISI 1020, 1040, 1050) ve özel hazırladığı altı farklı az alaşımlı çelikte oluşan fiziksel ve kimyasal parametrelerdeki bazı değişimleri incelemiştir. Borlama süresiyle borür tabakası kalınlığının azalan bir hızla artmakta olduğunu bildirmiştir.

Özsoy (1991), Ç 1045 çeliğinden hazırladığı numunelerde 900° C sabit sıcaklıkta ve termal çevrimli şartlarda belirlediği sıvı banyo bileşimiyle borlama işlemini uygulamıştır. Sabit sıcaklık ve termal çevrim şartlarında borlanan örneklerin metalografik incelemesi, mikrosertlik, x ışınları ve aşınma deneyleri yapılmış ve ayrıca geçiş zonu incelenmiştir. Termal çevrimli borlamanın sabit sıcaklıkta borlamaya göre daha uniform kalınlıkta daha az poroziteli bir yapı sergilediği ve borür tabakanın gevrekliğinin azaldığı bunun da aşınma gibi mekanik özellikleri iyileştirdiğini belirlemiştir.

Nair (1996), üç farklı çeliğin yüzeyine yaklaşık 2 mm kalınlığında pasta borlayıcı sürerek, farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemini uygulamıştır. Ele aldığı örneklerde testere dişi görünümüne sahip Fe<sub>2</sub>B fazlı tabakayı elde etmiştir. Alaşımlı çelikte geçiş bölgesi belirlenmiş, alaşımsız çelikte geçiş bölgesine rastlanamamıştır. 30 – 60 µm arası tabaka kalınlığı ve 700 – 1750 VSD mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

Soydan (1996), değişik çelik malzemelere toz borlayıcılar kullanarak beş farklı sıcaklık ve dört farklı sürede borlama işlemi uygulamıştır. Borür tabakaların kuru kayma halinde laboratuvar şartlarında sürtünme, adhezif ve abrazif aşınma davranışlarını incelemiştir. Gaz nitürleme ve karbürleme uygulanmış numunelerle borlu numuneleri sürtünme ve aşınma davranışları açısından karşılaştırmıştır. Üç farklı yöntemle sertleştirilmiş numunelerin tümünün yüzeylerinin sürtünme katsayıları arasında önemli bir fark olmadığı fakat aşınma oranları arasında önemli farklar

olduğunu belirtmiştir. Metal – metal sürtünmede sertlik – aşınma dayanımı arasında doğrudan bir ilişkinin bulunmadığı buna karşı 1200 gritlik SiC zımpara kağıtlarıyla yapılan testlerde sertlik – abrazif aşınma dayanımı arasında orantılı bir değişim olduğu tespit edilmiştir.

Ivanov ve Sokolov (1998), endüstride geniş kullanıma sahip düşük karbonlu martensitik çeliklerin yüzeyine bor ve krom yayınının optimum şartlarını araştırmışlar ve böylece mümkün olduğunca sert ama daha az kırılabilir yüzeyler elde etmeye çalışmışlardır. Sonuçta, krom oksitlerin tek fazlı bor tabakalarının oluşumunda etkili olduğu ve düşük karbonlu martensitik çelik yüzeylerde yüksek sertlik ve azalan kırılabilirliğe sahip tabakaların elde edildiğini belirtmişlerdir.

Grachev ve arkadaşları (1999), borlamanın en büyük dezavantajlarından olarak bilinen uzun işlem süresi ve difüzyon tabakasının yetersiz plastisitesini gidermek için akışkan yatak içinde borlamayı ve/veya borlamayla aynı anda kromlamayı (borochromizing) önermişlerdir. Bu yöntemle, korozyon ve aşınma dayanımında iyileşme sağladıklarını açıklamışlardır.

Rie (1999), plazma difüzyon işlemlerini ve plazma borlamayı tanıtarak bu konuyla ilgili son gelişmeleri değerlendirmiştir. Plazma borlamanın, sık kullanılan toz borlayıcılarla yapılan kutu borlamaya göre daha çevre dostu ve kontrollü bir işlem olduğunu vurgulamıştır.

Şen ve Bindal (1999), AISI 5140 çeliğinde iki farklı sıcaklıkta ve 2 – 8 saat arası değişen sürelerde normal sıvı ortamda yapılan borlamanın sonunda oluşan borür tabakalarının bazı özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, yüzeydeki borür tabaka kalınlığının ve FeB borür oluşumunun borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir.

Zagulyaeva ve arkadaşları (1999), borlamanın, üç farklı alaşımlı çelik ve gri dökme demirin malzeme yapılarına ve termal erozyon dayanımlarına olan etkisini

incelemişlerdir. İnceledikleri çeliklerde termal erozyona karşı direncin arttığını dökme demir de ise herhangi bir değişimin gözlenmediğini bildirmişlerdir.

Küper ve arkadaşları (2000), üç farklı çeliğe plazma yardımlı ve yardımsız gaz borlama tekniklerini kullanarak borlama işlemi yapmışlardır.  $Al_2O_3$  aşındırıcı top kullanılarak yapılan aşınma deney sonuçları verilmiş ve tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. İşlemsiz numunelere göre işlem uygulanmış numunelerde %80 oranında, birim alan başına aşınma oranında iyileşme tespit etmişlerdir.

Meriç ve arkadaşları (2000), katı ortam borlamasında kullanılan tozların parçacık büyüklüklerinin borlu tabaka yapısına olan etkilerini incelemişlerdir. Sıcak şekillendirilmiş AISI 1020, 1030, 1040 ve 1050 yapı çelikleri ana malzeme olarak seçilmiştir. Ekabor HM tozlarıyla  $900^\circ C$ 'de 2 –5 saat arası sürelerde borlama yapılmıştır. Malzemelerde; mikroyapı, mikrosertlik ve tabaka kalınlıkları saptanmıştır. Küçük boyutlu toz parçacıklarla yapılan borlamada tabaka kalınlıklarının arttığı belirlenmiş, malzemenin karbon oranının artmasının mikrosertlik değerlerini arttırdığı gözlenmiştir.

Selçuk ve arkadaşları (2000), ağır yük altında çalışan ve aşınma direnci gerektiren makine parçalarında kullanılan AISI 5115 çeliğinin yerine, borlanmış AISI 1020 çeliğini önermişlerdir. Hazırladıkları numuneleri borlama ve karburizasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda, sertlik, sürtünme ve adhezif aşınma direnci açısından borlanmış düşük karbonlu çeliklerin, hafif yüklü kuru kaymalı çalışma şartları altında karburize edilmiş alaşımli çeliklerin yerine kullanılacaklarının anlaşıldığını belirtmişlerdir.

Gopalakrishnan ve arkadaşları (2001), pahalı borlama kimyasallarına karşı, düşük fiyat ve kolay uygulanabilirliğe sahip bor atomu kaynağı ferrobör gibi kimyasalları önermişlerdir. Ferrobör kullanarak gerçekleştirdikleri deneylerinin sonunda elde ettikleri borlu tabakalara lazer yüzey modifikasyon işlemi de uygulamışlardır. Lazer işlemi sonunda çelik yüzeyin sertliğinde düşme olmasına rağmen sünekliğin ve tokluğun arttığına dikkat çekmişlerdir.

Şen ve arkadaşları (2001), borlama uygulanmış düşük alaşımlı takım çeliklerinin, tabaka kalınlığı, sertlik ve kırılma tokluğu değerlerinde oluşan değişimleri incelemişlerdir. İki fazlı yapı elde edilmiş ve geçiş bölgesi gözlenmiştir. Uzun borlama sürelerinde daha kalın tabakaların elde edildiği buna karşı kırılma tokluğu değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Jain ve Sundararajan (2002), borlamanın oldukça etkili bir yöntem olduğunu fakat toz borlayıcıların pahalılığından kaynaklanan yüksek işlem maliyetinin uygulamaları kısıtladığını belirterek, borlanması istenen parçanın etrafında olması gereken optimum toz kalınlığını belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, 2 – 25 mm arasındaki toz kalınlıklarında optimum özelliklerin 10 mm de elde edildiğini belirtmişlerdir.

Özbek ve Bindal (2002), borlanmış sade karbonlu takım çeliği olan W4 çeliğinin bazı mekanik özelliklerini belirlemek için gerekli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Ekabor tozlarıyla çeşitli sıcaklık ve sürelerde yürütülen deneyler sonunda, tabaka kalınlığının 8 – 386 µm ve ölçülen sertliklerinde 1407 – 2093 VSD aralığında değiştiğini bildirmişlerdir. Artan borlama süresi ve sıcaklığının tabaka kalınlığını arttırıcı bir etkisi olduğunu açıklamışlardır. W4 çeliği için, 4 saati geçen işlem sürelerinde – tüm sıcaklık değerleri için – iki fazlı tabaka elde edildiğini, 4 saat ve daha kısa süren işlem sürelerinde ise tek Fe<sub>2</sub>B fazı elde edildiğini belirtmişlerdir.

## 4. TOPRAK İŞLEME ve TOPRAĞIN AŞINDIRMA ÖZELLİĞİ

### 4.1. Toprak İşlemenin Amacı

Doğada bulunan toprakların yapıları, buldukları bölgelere göre değişim gösterse de her tür toprakta bitkiler yetişebilmektedir. Ancak toprağın doğal hali, kültür bitkilerinden beklenen miktarda ürün elde edilmesi için yeterli değildir. Kültür bitkilerinin yaşayabilmeleri ve yeterli gelişmeleri için toprağın yumuşak, su alma ve su tutma kapasitesinin yüksek olması ve içinde yeter miktarda bitki besin elementlerinin bulunması gerekmektedir (Mutaf, 1974). Toprağı canlı duruma getirmek ve bu durumu da, üzerindeki bitkilerin olgunlaşma devrelerine kadar sürdürmek, yani toprağı canlı ve verimli tutmak, toprağın işlenmesiyle mümkündür. Toprağın besin maddeleri stoğu mineral ve organik gübrelere zenginleştirilebilirse de asıl amaç, toprağın doğal zenginliklerinden maksimum derecede faydalanmak olmalıdır. Toprağın istenen özelliklerini geliştirmek, istenmeyen özelliklerini ise ortadan kaldırmak amacıyla uygulanması gereken toprak işleme yöntemi, iklim, toprak koşulları ve bitki çeşidine göre çok değişik olabilir. Toprağı işlerken daima elverişli özelliklerini kuvvetlendirmek, kötü etkilerini azaltmak, yani toprağı ıslah etmek için çalışılır (Par, 1995).

Toprak işlemenin ödevlerinden birincisi, toprağı kabartmaktır. Böylece, köklerin rahatça gelişmesi için homojen bir yapının sağlanması ve toprağın su tutma kabiliyetinin artırılması sağlanmış olur. Toprak işlemenin iki görevi daha vardır bunlar; toprağı karıştırmak ve devirmektir.

Özet olarak, toprak işlemenin amaç ve ödevi; toprağı mümkün olduğu kadar toz haline getirilmeden ufalamak, aynı zamanda yabancı otları yok etmek, toprağın su alma ve tutma kapasitesini yükseltmek, kabarmasını, havalanmasını ve böylece her türlü kalıntı organik maddelerin çürümesini sağlayarak, toprağı daha verimli kılacak ve kültür bitkilerinin gelişmesini sağlayacak, fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar için gerekli ortamı hazırlamaktır (Mutaf, 1974; Sungur, 1974).

Toprak işleme aletleriyle işlenen her toprakta aşağıda belirtilen genel amaçların ve fonksiyonların yerine getirilmesi arzu edilir (Par, 1995);

1. İyi bir tohum yatağının hazırlanması,
2. Yabancı ot kontrolü,
3. Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısını düzeltmek,
4. Toprak yüzeyindeki bitki artıkları, anız ve ahır gübresinin gömülmesi,
5. Toprağın sulamaya hazırlanması,
6. Hastalık ve zararlılarla savaşmak,
7. Toprağı gevşeterek köklerin derine inmesini sağlamak,
8. Toprağı tava getirmek,
9. Topraktaki organik madde miktarını artırmak, buharlaşma ve su kaybını önlemek,
10. Erozyonu kontrol etmek.

Toprak işlemede kullanılan aletlerin incelenmesinde, toprağın şeritler halinde kesilip devrilmesi, toprağın devrilmeden kabartılması, toprağın karıştırılarak işlenmesi ve toprağın bastırılması gibi toprak işleme yöntemleri esas alınmış ve bu yöntemlere göre toprak işleme aletleri sınıflandırılmıştır (Mutaf, 1974). Bunlar;

- 1) Toprağı şeritler halinde kesip deviren, aynı zamanda az çok kabarmasını da sağlayan pulluklar,
- 2) Toprağı devirmeden kabartan çeşitli kültivatörler ve tırmıklar,
- 3) Toprağı karıştırarak işleyen toprak frezeleri,
- 4) Toprağı bastıran merdanelerdir.

En önemli toprak işleme aleti olarak kabul edilen kulaklı pulluk toprak işleminin temel aletidir ve bütün tarım aletlerinin en eskilerinden birisi olarak bilinir (Özemir ve Kurtay, 1977). Pulluklar, bitkisel toprak tabakasını kabartarak kısmen ya da tamamen

devirerek işleyen aletlerdir. Günümüzde pulluklar, kulaklı ve diskli pulluklar ana başlıkları altında iki ana gruba ayrılırlar. Tipi ve büyüklüğü ne olursa olsun, herhangi bir kulaklı pulluğun parçaları aktif ve pasif olmak üzere iki ayrı grupta toplanır. Aktif parçalar; keski demiri, uç demiri, kulak ve bazı pulluklar için de ön gövdecik veya köşekesen'dir. Pasif parçalar da; ok, payanda gibi parçalardır. Kulaklı pullukların aktif parçaları, toprağın kesilmesini, kaldırılmasını ve parçalanarak bölünmesini sağlarlar. Pasif parçalar ise pulluğun dik durması, sevk ve idaresi, ayarlanması ve parçaların birbirine bağlanmasını sağlarlar. Uç demirinin görevi, toprak şeridini alttan yatay olarak kesmek ve onu kulağa doğru yükseltmektir. Uç demirinin yaptığı bu işlere, pulluğun gerek duyduğu toplam çeki kuvvetinin yarısı harcanmaktadır. Uç demiri, pulluğun aktif yüzeyinin bir parçası olup en fazla zorlanan ve aşınan elemanıdır. Uç demirleri; trapez biçimli, burunlu ve kamalı olmak üzere üç tiptir. İyi bir pulluk uç demirinden, sağlam olması (şekil değiştirmemesi, aşınmaya karşı dayanıklı, yani yeter derecede sert ve daima keskin olması) ve keskin kenarı aşındıktan sonra da yenilenmesinin mümkün ve kolay olması beklenir. Pulluk uç demirleri üç katlı çelikten, semantasyon işlemine tabi tutulmuş karbon çeliğinden, bazı durumlar için de beyaz dökme demirden imal edilebilirler (Mutaf, 1974).

#### 4.2. Toprağın Aşındırıcılığı

Teknik anlamda toprak, sıkıştırılabilir (gevşek) veya sıkıştırılmaz (ağır) durumda olabilen, içinde katı taneler (taş, organik kalıntılar v.d.) ve değişik oranlarda su ve havanın doldurduğu boşluklardan oluşan karmaşık bir malzemedir. İlk defa Coulomb, toprağın mekanik özelliklerini tarif etmeye çalışmış ve bu amaçla toprağı, katı, kırılğan ve sürtünmeli bir tür malzeme olarak kabul etmiştir (Karamış, 1985). Richardson (1967), toprak işleyen metalik malzemelerin aşınmaları ile ilgili çalışmasında, aşınmanın çok büyük miktarının kuvars ve çakmaktaşı formundaki taşlardan kaynaklandığını bildirmiştir. Moore (1975a), Richardson'un yaptığı tarla denemelerinin sonunda; toprağı kesen kenarların hacimsel aşınmasının, hacimsel aşınmanın basite indirgenmiş formülü olan,

$$V = KFS$$

( $V$ , aşınan malzemenin hacmi [ $\text{mm}^3$ ];  $K$ , sabit [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ];  $F$ , aşınma yüzeyine uygulanan yük [ $\text{N}$ ];  $S$ , aşınma mesafesi [ $\text{mm}$ ]) bağıntısına uyduğunu bildirdiğini ve ağır toprakta çalışan yumuşak çelik ve bakır kesici kenarlar için birim kayma mesafesi başına  $V$  hacimsel aşınma miktarının, toprağın kohezif (taneciklerin birbirini tutma) direncinin ( $c$ ) ve toprağın küçük bir hacimsel parçasındaki ( $p_v$ ) taş çaplarının ( $d$ ) toplamı ile orantılı olduğu bilgisini, toprağın neden olduğu abrazyon aşınmada taşların çok önemli rol oynadıklarını ve taşlı topraklarda aşınma oranını daha yüksek bulduğunu aktarmıştır. Moore, çalışmasının sonunda, topraktan kaynaklanan abrazyon aşınmanın her birinin ayrı önemi olan çeşitli faktörlerin kompleks bir bileşimi olduğunu ve toprağın bulundurduğu taş miktarıyla penetrasyon direncinin toprak işleme uçlarının hacimsel aşınmalarıyla çok yakından ilgili olduğunu vurgulamıştır (Moore, 1975a). Foley ve arkadaşları da 1984 yılındaki araştırmalarında, toprak aşındırıcılığının, toprağın içinde bulunan aşındırıcıların tipleri ve taşların boyut ve sertlikleri ve toprağın direnci ile ilgili olduğunu bildirmişlerdir.

Toprağın aşındırma kabiliyeti, onun fiziksel yapısı ile de ilgilidir. Toprak taneciklerinin birbirini tutma kuvveti (kohezyon) ve aletlere yapışıp yapışmama özelliği (adhezyon), toprağın fiziksel yapısına bağlı özelliklerdir. Kohezyon kuvvetinin fazlalığı toprağın gereği gibi parçalanmasını zorlaştırır. Adhezyon kuvveti ise toprağın aletlere yapışmasına neden olur. Bir toprakta adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin artması, o toprağın parçalanma kabiliyetini azaltır. Nem azaldıkça toprağın kohezyon kuvveti, nem arttıkça da adhezyon kuvveti artar (Mutaf, 1974). Toprak işleme aletlerinin kullanımı sırasında, iş organıyla toprak arasında bir sürtünme söz konusudur ve bu sürtünme toprağın fiziksel yapısından kaynaklanan dirence sıkı sıkıya bağlıdır (Karamış, 1985). Eğer toprak gevşek ise yani toprak direnci az ise, toprak tanecikleri arasındaki kohezyon kuvveti zayıf demektir. Ağır yani toprak direnci fazla olan topraklarda ise kohezyon kuvveti fazla olduğundan toprağın içinde çalışacak aktif organa karşı göstereceği dirençte fazla olacaktır (Karamış, 1985).

### 4.3. Toprak İşleyen Uçların Aşınmasına Etki Eden Faktörler

Toprak işleyen bir ucun aşınmasına etki eden faktörler şöyle özetlenebilir:

#### A) Uç demirinden kaynaklanan faktörler;

- Uç demiri malzemesinin etkisi: (Sertlik, tokluk, mikro yapı, kimyasal bileşim vb. lerinin etkisi)
- Uç demiri malzemesine uygulanan ısıl işlem veya yüzey kaplama yöntemlerinin etkisi: (Yüzey yayınım işlemlerinin, yüzey sertleştirme yöntemlerinin, seramik kaplama vb. gibi kaplama işlemlerinin etkisi)
- Uç demirinin şeklinin ve kesit alanının etkisi: (Trapez ve üçgen kesitli uçlarda daha az, dikdörtgen kesitli uçlarda daha çok aşınma. Kesit alanı arttıkça aşınmanın artması) (Karamış, 1985)
- Uç demirinin alet üzerinde bulunduğu yerin önemi: (Ön sıradan arka sıraya gidildikçe aşınmanın azalması)

#### B) Topraktan kaynaklanan faktörler;

- Toprak cinsinin etkisi: (Killi, kumlu, taşlı vb. özelliklerde olmasının etkisi)
- Toprağın fiziksel yapısının etkisi: (Toprak taneciklerinin birbirini tutma kuvveti (kohezyon) ve aletlere yapışıp yapışmama özelliği (adhezyon), toprağın fiziksel yapısına bağlı özelliklerdir ve toprağın kolay parçalanabilmesi üzerinde çok etkilidirler) (Mutaf, 1974)
- Toprağın içinde bulunan taş, kaya, kök gibi sert cisimlerin etkisi: (Özellikle taşların; cinsi, miktarı, şekli, boyutları ve sertliğinin etkileri)
- Toprağın nem miktarının etkisi: (Toprağın nemi arttıkça, ufak serbest taşların toprak kütlesi içine gömülüp aşınma mekanizmasını iki cisimliden üç cisimliye çevirmesi (Karamış, 1985) veya çok su içeren toprağın ağırlaşarak daha çok abrazif aşınma kayıplarına neden olması (Yu ve Bhole, 1990))

- Toprağın penetrasyon direnci: (Toprağın içine batmaya çalışan herhangi bir cisme karşı gösterdiği direnç, toprak sertliği veya toprak mukavemeti) (Tarhuni, 1996)
- Toprak asiditesinin önemi: (Toprağın pH değerinin etkisi) (Balla ve Seckar, 1981)

C) İşletme şartlarından kaynaklanan faktörler;

- Çalışma hızının etkisi
- İş derinliğinin etkisi
- İşlem süresi veya toplam aşınma mesafesinin etkisi
- Sürüm şeklinin etkisi
- Traktörün çeki kuvvetinin etkisi: (Sürümün başlayabilmesi için, toprağın kohezyon ve adhezyon direncinin yenilmesi zorunludur. Çeki kuvvetini arttıran toprak direnci aşınmayı da arttıracaktır çünkü çeki kuvvetinin artmasıyla iş organına gelen basınç daha fazla olacak ve hıza da bağlı olarak aşınma miktarı artacaktır) (Karamış, 1985)
- Uç demirinin çatıya asılış şeklinin uç demiri aşınması üzerindeki etkisi: (Elastik ve rijit asılışın etkisi) (Kufel ve Wierzcholski, 1993)

D) Çalışma ortamının dolaylı etkileri;

- Havanın neminden dolayı uç demirinde oluşan korozif yıpranmanın olumsuz etkileri
- Hava sıcaklığı ve basıncının traktörün çeki kuvvetine etki etmesi
- Toprak cinsi ve arazinin eğiminin traktörün çeki kuvvetine etki etmesi (Karamış, 1985)
- Toprak işlemede kullanılan aletin toplam ağırlığı ve üzerindeki uç demiri sayısının traktörün çeki kuvvetine ve bir uç demirine gelen basınca etki etmesi (Karamış, 1985)

## 5. BOR YAYINIMIYLA YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMİ

Bor elementi, periyodik tabloda “B” simgesiyle gösterilen ve atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, yoğunluğu  $2.84 \text{ gr/cm}^3$  ve ergime noktası  $2200^\circ\text{C}$  olan, metal ametal arası özelliklere sahip bir yarıiletkenidir. Doğada bor elementi tek başına bulunmamakta oksijenle oluşturduğu ve borat denilen bileşimler halinde bulunmaktadır. Saptanabilmiş 230 değişik borat vardır fakat bunlardan pek azı ticari açıdan işlenmeye değerdir. Boraks, kernit, üleksit, probertit, kolemanit, pandemit, hidroborasit ve sassolit isimli boratlar çıkarılmaya ve işlenmeye gerek duyulanlardır (Anonim, 2002). Gelişmiş ülkeler işlenmeye değer bulunan bu boratlardan yüzün üzerinde bor bileşiği elde ederek çeşitli endüstri dallarında kullanılmaktadırlar. Bu ürünlerin en önemlileri; saf bor, bor trioksit, bor karbür, bor nitrür, diboron ve ferrobordur ve genellikle Amerika Birleşik Devletleri (%30) ve Avrupa Birliği, Japonya, Rusya (%64) tarafından kullanılmaktadırlar (Bozkurt, 1984). Ham veya işlenmiş halde olsun bor türevi tüm ürünler pek çok endüstri dalı için çok büyük önem arz etmektedirler. Cam, seramik, tekstil, deri, kozmetik, deterjan, ilaç sanayilerinde olduğu gibi jet roket yakıtından nükleer reaktörlerde koruma ve kontrol amaçlı kullanımlara ve ayrıca otomobillerde alternatif temiz yakıt olarak kullanımlara kadar daha pek çok alanda bor türevi ürünlerin varlığını görmekteyiz. Kullanım sahalarından biri olan çelik endüstrisinde bor ürünleri; çelik üretiminde curuf yapıcı, alaşım elementi, yüzey sertleştirici ve çelik tel çekme işlemlerinde yağlayıcı ve korozyon önleyici tabaka olarak kullanılmaktadır (Bozkurt, 1984; Rus vd, 1985; Özsoy, 1991). Ayrıca demir dışı metaller için temizleyici madde ve yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeyi engelleyici madde olarak da kullanımları vardır.

Dünya üzerinde bilinen 1.21 milyar ton borat rezervinin 644 milyon ton ile %63'ü ülkemizde bulunmaktadır (Anonim, 2001a). Buna karşı dünya borat üretiminin %70'ini Amerika Birleşik Devletleri, %18'ini Türkiye ve %12'sini de diğer ülkeler sağlamaktadır (Bozkurt, 1984). Türkiye, dünya borat rezervinin en büyük kısmına sahip olmasına rağmen bu konuyla ilgili dünya ticaretinden ancak %19'luk bir pay almaktadır (Anonim, 2001a).

### 5.1. Borlama ve Borlama Yöntemleri

Borlama, metal iş parçası yüzeyine bor atomlarının yayındırılarak sert borür tabakalarının oluşmasının sağlandığı bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir (Hutchings, 1992; Hunger ve Trute, 1994; Karakan vd, 2002). Borlama işlemi, ana malzemeye bağlı olsa da genellikle 800° – 1050° C sıcaklıklar ve 1 – 8 saat arası değişen sürelerde uygulanır (Fichtl vd, 1987; Hutchings, 1992). Borlama, alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir. Borlama yüzey sertleştirme işlemi; katı, sıvı, gaz ve plazma ortamlarda yapılabilir (Karakan vd, 2002). Borlama işleminde, bor atomları ısı enerjisi yardımıyla iş parçası yüzeyine yayındırılır ve burada esas malzeme atomlarıyla birlikte uygun borürleri oluştururlar. Eğer demir bazlı malzemeler borlanıyorsa, demir borürler elde edilir (Fichtl vd, 1987). Borlama işlemi, yüksek sıcaklık etkisi altında, bor atomu kaynağı ile malzeme yüzeyi arasında oluşan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. İşlem, sabit sıcaklıkta (isothermal) veya termal çevrimli (thermocycling) olarak uygulanabilmektedir (Özsoy, 1991).

Tüm yüzey modifikasyon işlemlerinde olduğu gibi borlamada da işlem öncesi yapılması gereken bazı ön hazırlıklar söz konusudur. İşlemden önce iş parçasının üzerinde -varsa- bulunan yağ film tabakasının ve kesme sıvılarının tam anlamıyla temizlenmesi gerekmektedir. İşlem yüzeyinde paslanma varsa tel ile fırçalayarak parçanın temizlenmesi zorunludur. Parça yüzeyinin düzgünlüğünün borlama kalitesine etkisi olduğundan mümkün olduğunca düzgün yüzeye getirilerek parçalar işleme tabi tutulmalıdır. Borlama sonucu, parçaların boyutlarında, elde edilen bor tabakası kalınlığının %20-30'u oranında bir büyüme olduğundan, borlanacak işlem parçasının bu durum göz önünde bulundurularak ilk ölçülendirilmesi gerekmektedir (Hunger ve Trute, 1994).

Tüm borlama yöntemlerinin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Günümüz endüstrisinde en çok kabul görmüş ve kendine daha geniş uygulama alanı bulmuş olan yöntem ise katı ortamda borlama yöntemi olmuştur.

### 5.1.1. Katı ortam borlaması

Katı ortamda toz bor vericilerle yapılan borlama yani kutu borlama, kutu karburizasyona benzer (Özsoy, 1991; Hutchings, 1992). Borlanan malzemeye ve elde edilmek istenen bor tabakası kalınlığına bağlı olarak genellikle 800° - 1050°C sıcaklık aralığında, bir saat ve daha uzun sürelerde işlem gerçekleştirilir (Hunger ve Trute, 1994). Toz bor verici karışımlar; bor verici bileşikler (Bor karbür, saf bor, vb.), alkali metaller, aktivatörler ve SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi dolgu maddeleri veya reaktif olmayan bileşiklerin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilir (Özsoy, 1991). Buradaki karışım oranları ve tozların tanecik büyüklüğü işlem uygulanacak malzemeye göre değişmektedir.

Borlama toz karışımları, işlem uygulanacak malzemenin şekline uygun imal edilmiş ısıl dirençli çelik kutularda, parçanın etrafını en az 10 mm kalınlıkta kaplayacak biçimde doldurulur. Kutunun üstü sızdırmaz bir kapakla kapatılıp işlem normal atmosferde yapılabildiği gibi, kutu veya fırının içinin koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda da yapılabilir. İşlem sonu fırından çıkartılan kutuların soğutulması hızlı (kutunun üzerine su dökülerek soğutulması) veya yavaş (fırın dışında veya içinde kutunun bekletilmesi) olarak sağlanabilir. Borlanmış parçaların üzerindeki karışım kalıntıları tel fırça yardımıyla kolayca kaldırılabilir. Toz karışımlarla kısmi borlama da yapılabilir (Matuschka, 1980).

Bu yöntemin avantajları; işlem basitliği, oldukça düzgün yüzeylerin elde edilmesi, gerekli ekipmanların kolay bulunabilmeleri ve ucuz olmaları, toz bileşimin kolayca değiştirilebilir olması ve işlem sonu parça yüzeyinin kolay temizlenebilmesidir (Özsoy, 1991; Meriç vd, 2000). Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasının nedeni avantajlarının diğer borlama yöntemlerinin avantajlarına göre daha çok olmasıdır. Dezavantajları ise; sadece küçük parçalara uygulanabilir olması, işlem parametrelerinin

kontrol yeteneğinin kötü olması, otomasyonun mümkün olmaması ve atık ürünlerinin çevreye zararlı olmasıdır (Karakan, 2002).

Katı ortamda toz bor verici karışımlardan başka pasta borlama bileşikleriyle de borlama yapılabilmektedir. Bu durumda cam suyu ve gliserin gibi maddeler bağlayıcı olarak kullanılır (Özsoy, 1991). Kısmi borlama uygulamalarına pasta borlayıcılar daha uygundur. İş parçasının borlanacak bölgelerine pasta bir veya daha çok kez sürülebilir. İşlem öncesi pasta sürülmüş kısmın tam olarak kurutulması gereklidir. Pasta borlamada koruyucu gaz atmosferi olması zorunludur. İşlem sonunda kalıntılar kolaylıkla temizlenebilir (Hunger ve Trute, 1994).

#### 5.1.2. Sıvı ortam borlaması

Sıvı fazdaki bor vericilerle borlamada işlem anında elektrik akımı uygulanıyorsa elektrolitik borlama eğer elektrik akımı uygulanmıyorsa normal sıvı ortam borlaması söz konusudur. Normal sıvı ortam borlamasında işlem sıcaklığı 800° - 1000° C ve işlem süresi de 2 – 6 saat aralığında değişebilmektedir (Bozkurt, 1984; Özsoy, 1991). Normal sıvı ortam borlayıcı karışımlarının en çok kullanılan bor vericisi boraktır. İşlem süresince banyo karışımının akışkanlığının iyi olması istenir ve bu yüzden sıvı ortam borlayıcı karışımlarına NaCl, NaF veya B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi aktivatörler ilave edilir. Yine işlem boyunca, ergimiş banyo bileşiklerinin homojen dağılımının da süreklilik arz etmesi istenir bu da reaktif olmayan bir çubukla banyo karışımının elle veya mekanik olarak ara sıra karıştırılması ile sağlanabilir. Normal sıvı ortam borlamasında kullanılan banyonun özgül hacmi (birim numune yüzeyi başına hacim) en azından 10 – 20 cm<sup>3</sup> olmalıdır (Özsoy, 1991).

Normal sıvı ortam borlamasında da ısı dirençli çelik kutular kullanılmaktadır. İşlem, normal atmosfer şartlarında yapılır, koruyucu gaz atmosferine ihtiyaç duyulmaz. Kullanılan cihazlar ve donanımları basittir ve bunların kullanımları uzmanlık gerektirmez. Boraks ve banyo karışımında kullanılan kimyasallar diğer borlama yöntemlerinde kullanılanlara göre hem çok ucuzdurlar hem de çok kolay bulunabilirler. Normal sıvı ortam borlamasının dezavantajları; termal şok ile büyük boyutlu ve

karmaşık şekilli parçalara işlemin uygulanması ve işlem sonunda parça yüzeyinden banyo karışım kalıntılarının temizlenmesinin çok zor olmasıdır (Bozkurt, 1984). Bu yöntemde ayrıca, zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevresel kirlilik dezavantajları da mevcuttur (Karakan *vd*, 2002).

Elektrolitik borlama; lityum, sodyum, potasyum ve bor florürlerini içeren ergimiş tuz banyosundaki bor atomlarının metal iş parçası yüzeyinde elektrolitik olarak biriktirilmesi esasına dayanır. Uygun sıcaklık aralığı 800° - 900° C'dir ve işlem 15 dakikadan 5 saatin üzerindeki süreler kadar devam ettirilebilir. İş parçası katot, grafit bir elektrod da anot görevini üstlenir. Banyo argon veya azot ve hidrojen gazı karışımlarıyla korunmalıdır (Fiedler ve Sieraski, 1971; Bozkurt, 1984). Direkt akım anotdan katota geçerken, florür tuzlarındaki bor atomları çözünüp katota yani kaplanacak parçanın bulunduğu yere taşınır (Singhal, 1977). Akım yoğunluğu 0.5 – 2.5 A/dm<sup>2</sup> dir ve genel olarak düşük alaşımlı çeliklerde yüksek akım yoğunluğuyla ince yayılım tabakaları elde edilirken, yüksek alaşımlı çeliklerde veya daha kalın tabakaların istendiği durumlarda daha düşük akım yoğunluğu ve daha uzun süreler uygulanır (Özsoy, 1991).

Elektrolitik borlamada bor vericiler olarak boraks ve borik asit kullanılır. Bu tip borlamanın, normal sıvı ortam borlamasının dezavantajlarına ilaveten dezavantajları; tesisatın pahalı olması ve karmaşık şekilli parçalarda homojen kalınlıkta tabakanın elde edilememesi problemi olmasıdır (Bozkurt, 1984).

Her iki sıvı ortam borlama yöntemi, sıvı ortamdaki kimyasal reaksiyonların daha hızlı olmasından kaynaklanan yüksek aktivite nedeniyle kendilerine kullanım alanı bulmuşlardır (Özsoy, 1991).

### 5.1.3. Gaz ortam borlaması

Bor hidritlerin termal parçalanması sonucu elde edilen buharla yapılan borlama işlemidir (Karakan *vd*, 2002). İşlemden kullanılan gaz fazdaki bor vericilerden di-

boran'ın hidrojen ile beraber uygulanması oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Bozkurt, 1984).

Gaz borlayıcıların en önemli üstünlüğü, gaz sirkülasyonunun sonucu olarak daha uniform bir bor dağılımının sağlanabiliyor olmasıdır. Prensipte olarak bu yöntemde bor potansiyeli ayarlanabildiğinden tek fazlı tabakaların elde edilmesi mümkündür (Özsoy, 1991). İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde edilmek istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir (Karakan *vd*, 2002). Bu yöntemin dezavantajları; gerekli tesisatın çok karmaşık ve pahalı olması, kullanılan gazların çok pahalı olması, korozif etkilerinin bulunması ve kullanılan gazlardan dolayı ortamın zehirliliği ve patlama tehlikesinin çok yüksek olmasıdır (Bozkurt, 1984; Özsoy, 1991; Karakan *vd*, 2002).

#### 5.1.4. Plazma ortam borlaması

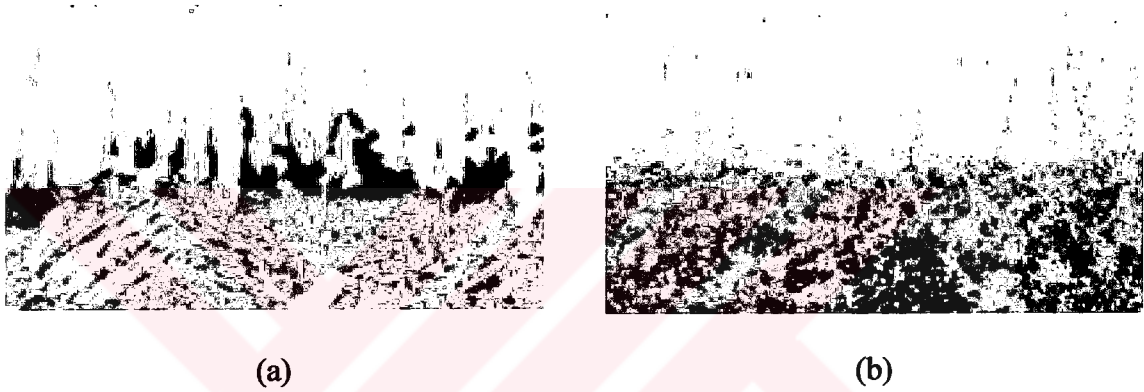
Bilinen klasik borlama yöntemlerinin çevre kirliliği, zehirli ve patlayıcı özellikte olmaları gibi sorunlarının çok olmasından dolayı plazma borlama gibi daha ileri borlama yöntemleri geliştirilmektedir (Yoon *vd*, 1999). Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan, Ar, H<sub>2</sub> gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl<sub>3</sub>, B(OCH<sub>3</sub>) (trimetilborat) kullanarak, 800° - 1000° C sıcaklık aralığında, yaklaşık 10<sup>-2</sup> Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içinde yapılan tip borlama, plazma borlamadır (Hunger ve Löbig, 1997; Karakan *vd*, 2002). Mikroyapı ve borür tabakanın büyümesi; işlem sıcaklığı, gaz karışım oranlarının ayarlanması, malzeme bileşimi, işlem basınç değişim oranlarının kontrolü ve uygulanan akım yoğunluğunun ayarlanmasıyla kontrol edilebilmektedir. Plazma borlamanın en önemli avantajları; klasik borlama yöntemlerinde tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken bu yöntemde kontrolün mümkün olması, karmaşık parçalara ve büyük boyutlu parçalara daha kolay uygulanabilmesi, daha düşük işlem sıcaklığı ve süresinin yeterli olması ve işlem sonu daha düşük distorsiyon değerleri ile daha az poroziteye neden olmasıdır (Rie, 1999; Karakan *vd*, 2002).

## 5.2. Borlu Tabakaların Genel Özellikleri

Borlu tabaka veya tabakaların özelliklerini; malzeme bileşimi, borlama ortamındaki bor atomlarının kimyasal aktiviteleri, borlama işlem sıcaklığı ve süresi, ilave ısıl işlemler ve seçilen borlama yöntemi etkiler (Tsipas ve Rus, 1987). Eğer demir bazlı veya çelik bir malzeme borlanıyorsa, iki fazlı ( $FeB+Fe_2B$ ) veya tek fazlı ( $FeB$  veya  $Fe_2B$ ) demir borür tabakaları malzeme yüzeyinde elde edilir (Subrahmanyam ve Gopinath, 1984). Demir borür tabaka yapıları incelendiğinde, iki fazlı demir borür tabakalarına karşı tek  $Fe_2B$  fazına sahip testere dişi görünümündeki tabakalar, endüstriyel uygulamalarda daha düşük kırılma gösterdiğinden tercih edilir (Biddulph, 1977; Rus *vd*, 1985; Hutchings, 1992). İki fazlı demir borürler, ortamda aşırı bor atomu varsa veya malzeme yüksek alaşımlı bir malzeme ise meydana gelmektedir. Yüzeyin en üst kısmında borca zengin  $FeB$  fazı onun hemen altında da  $Fe_2B$  fazı, iki fazlı demir borür yapısını oluşturur. Termal uzama katsayıları farklı olduğundan bu iki fazın aynı anda bulunması istenmez. Borür tabakası ile esas malzeme çekirdek bölgesi arasında geçiş bölgesi (zonu) yer almaktadır. Bu bölgenin kalınlığı borür tabaka kalınlığının yaklaşık 10 – 15 katıdır (Bozkurt, 1984; Özsoy, 1991).

Demir borürler, çok yüksek sertlik değerleri gibi seramik malzemelere has özellikleri ve ısı ve elektrik iletkenliği gibi metalsel özellikleri bir arada bulundurabilen ilginç bileşiklerdir (Palomborini ve Carbucchio, 1987). Karburizasyon, nitrürasyon gibi bilinen termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, borlama sonucunda, çok daha sert (>1500 VSD), aşınmaya karşı daha dirençli, sürtünme katsayısı düşük, erozyon, korozyon ve oksidasyon direnci mükemmel sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Mal ve Tarkan, 1973; Biddulph, 1977; Rus *vd*, 1985; Wang ve Hutchings, 1988; Çapan ve Alnıpak, 2000; Gopalakrishnan, 2001). Ana malzeme ile borür tabaka arayüzeyinde morfolojik incelemeler yapıldığında iki farklı tip yapı gözlenir. Birincisi, sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde görülen testere dişi tipindeki girintili – çıkıntılı arayüzey formu ikincisi de, yüksek karbonlu ve yüksek alaşımlı çeliklerde gözlenen daha düz formdaki arayüzey tipidir. Testere dişi tip veya dişi tip yapı göreceli olarak daha düzgün olan arayüzeye göre mekanik özellikler

açısından daha iyi sonuçlar sergiler. Bunun da sebebi, testere dişi şeklindeki sınır yapının borür tabakanın ana malzemeye çok daha iyi tutunmasını sağlamasıdır (Eyre, 1975; Hunger ve Trute, 1994). Ayrıca testere dişi şeklinde tutunma, sınırdaki kalıntı gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar (Bozkurt, 1984). Şekil 5.1. (a)'da sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin borlanması sonucu görülen testere dişi tipindeki yayınım şekli, Şekil 5.1. (b)'de ise yüksek karbonlu ve yüksek alaşımlı çeliklerin borlanması sonucu görülen daha düz görünümdeki yayınım şekli görülmektedir.



**Şekil 5.1.** Testere dişli tip ve daha düzgün arayüzey yayınım şekilleri (Anonim, 2001b)

Alaşım elementleri tabaka geometrisinde değişikliğe neden oldukları gibi tabaka kalınlığını azaltıcı bir etki de sergilerler. Çelikteki alaşım miktarı arttıkça bor yayını güçleşmektedir (Fichtl *vd*, 1987). Borlu tabaka kalınlığı, malzemeye ve işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak 20 – 300  $\mu\text{m}$  arasında değişir (Hunger ve Trute, 1994). Aslında teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Tabaka kalınlığını sınırlayan, ekonomik olarak mantıklı işlem sürelerinin uygulanması zorunluluğu ve kırılabilirlik faktörüdür. Çünkü borlanmış tabakanın kırılabilirliği, kalınlığı arttıkça artmaktadır. Bu yüzden özellikle iki fazlı tabakalarda kalınlığın çok fazla olmamasına dikkat edilmelidir (Fichtl *vd*, 1987). Borlama sıcaklığının artması ise tabaka kalınlığını arttırmakta fakat beraberinde porozite miktarını da arttırarak tabakanın gevrek olmasına neden olmaktadır (Bozkurt, 1984). Borlama süresi arttıkça, testere dişi şeklindeki borür tabakalarının maksimum ve minimum kalınlıkları arasındaki fark da artmaktadır (Özsoy, 1991).

Kullanım yeri ve amacına göre işlem uygulanacak malzeme türü ve gerekli tabaka kalınlığı önceden belirlenmelidir. Pratikte, abrazyon aşınmanın azaltılmasına yönelik uygulamalar için 125 µm den kalın tabakalar, adhezyon aşınmanın azaltılmasına yönelik uygulamalar için de 25 µm den daha kalın tabaka kalınlıkları tavsiye edilmektedir (Anonim, 2001b). Kırılma yönünden alaşımlı çeliklerde en fazla 100 µm, alaşımsız çeliklerde 150 – 200 µm hatta darbesiz aşınma uygulamaları için yine alaşımsız çeliklerde su vermeme koşulu ile 400 µm lik kalınlığa müsaade edilmektedir (Bozkurt, 1984). Genel olarak tek fazlı borür tabakası, çift fazlı tabakalara göre aşınma direnci açısından daha iyi sonuçlar verse de bu tabakaların aşınma davranışları çok kolay anlaşılır ve açık değildir (Biddulph, 1977; Shadrichev ve Rumyantsev, 1982).

Oldukça yüksek sertliklerinden dolayı, borlu yüzeyler abrazyon, adhezyon ve erozyon aşınmalarına karşı mükemmel direnç gösterirler (Singhal, 1977). Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, karburizasyonla sertleştirilmiş tabakanın sertliğinin azalmasına böylece de aşınmaya müsait hale gelmesine neden olurken borlu tabakalarda böyle bir sorun yaşanmaz. Çünkü, bor yayılımı ile ulaşılan 1400 – 2000 VSD'lik yüksek sertlik değerleri ve yapı formu, 900° - 1000° C'ler de bile kaybolmamaktadır ve bu özellik yüzey yayılım işlemleri içinde sadece borlamaya ait bir özelliktir (Eyre, 1975; Evtifeev ve Sin'kovskii, 1985). Ayrıca borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit film tabakası oluşmakta ve bu oksit film tabakası yüzeyde katı yağlayıcı vazifesi görerek sürtünmeli aşınma sırasında metal – metal temasını geciktirerek sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını da engellemektedir (Nair vd, 2000). Bu özelliğinden dolayı borlanmış yüzeylerin kullanıldığı uygulamalarda ya çok az yağlayıcı kullanılmakta ya da hiç yağlayıcı kullanılmamaktadır (Hunger ve Trute, 1994).

Abrazyon aşınma dayanımı için genel olarak yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı istenir (Biddulph, 1977; Vasil'eva vd, 1985). Borlu tabakalarda bu iki özellikte sağlanmaktadır. Borlamayla Wolfram karbür'ün sertliğine eşdeğer bir sertlik ve teflon'unkine (PTFE) yakın sürtünme katsayıları elde edilir (Özsoy, 1991). Relatif aşınma direnci yalnız sertliğe bağlı değil aynı zamanda gevreklik gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklere de bağlıdır (Shadrichev ve Rumyantsev, 1982). Bu yüzden borlu

tabakaların aşınma davranışlarının, kullanılacakları düşünülen yerlerde incelenmesi ve ön denemelere göre karar verilmesi, çok sert fakat aynı zamanda kırılğan olan bu tip yapılar için önemlidir. Abrazif aşınmanın azaltılması için borlanmış malzemelerin başarıyla kullanıldığı uygulama örnekleri arasında; pnömatik taşıma sistemleri, plastik enjeksiyon makine parçaları, haddeleme elemanları, pompalar, valfler vb. örnekler bulunmaktadır (Nair vd, 2000).

Demir grubu malzemelerin borlanması, atmosferik korozyona karşı az fakat bazı asidik ortamlara – özellikle hidroklorik asit'e – ve sıvı metallere karşı büyük dayanıklılık kazandırır (Biddulph, 1977).

Borlama sonucu elde edilen en büyük kazanç sertliktir. Farklı işlemler sonucunda sertleştirilmiş çelik yüzeylerin mikrosertlik değerleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Çeşitli işlemler uygulanmış çelik yüzeylerin mikrosertlik değerleri (Singhal, 1977)

Yüzey Durumu	Vickers Mikrosertlik Değeri (VSD)
Nitrürasyon uygulanmış yüzey	610 - 940
Karbonitrürasyon uygulanmış yüzey	700 - 820
Gaz karburizasyon uygulanmış yüzey	700 - 820
Sert krom kaplanmış yüzey	950 - 1110
Borür tabakası kaplı yüzey (FeB fazında)	1600 - 2000

Borlu tabakalar, yüksek sertlik değerlerini, uygulanan ilave ısı işlemler sonucunda da sürdürmeye devam ettirmektedirler. Yüksek sıcaklık etkisi altında özelliklerini ve yüksek sertlik değerlerinin kaybetmemesi de borlu tabakaları yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda diğer termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemlerine göre rakipsiz kılmaktadır.

Borlama ile karbon çeliklerinde 1800 – 2000 VSD, alaşımlı çeliklerde 2500 – 2800 VSD ve yüksek hız çeliklerinde 2800 – 3300 VSD'lik yüzey sertlikleri elde edilebilir. Ticari çeliklerde elde edilebilen 1800 – 2000 VSD'lik sertlik değerleri, yaklaşık olarak korundumun ( $Al_2O_3$ ) sertlik değerine eşittir (Özsoy, 1991). Elde edilen tabakanın tek veya çift fazlı olması elde edilen sertlik değerlerinin farklı olmasına neden olur. FeB fazı,  $Fe_2B$  fazına göre daha sert ve gevreklerdir (Eyre, 1975). Tablo 4.1. 'de verilen 1600 – 2000 VSD'lik sertlik değerleri, dış FeB tabakasının 10 gr yük altında bulunmuş değerleridir ve aynı çalışmada araştırmacı, içte bulunan  $Fe_2B$  fazının sertliğini ise 800 – 1200 VSD olarak ölçmüştür (Singhal, 1977).

Borür tabakaların sertlik ölçümleri genellikle 50 ve 100 gr'lık yükler kullanılarak Vickers ve Knoop uçlarıyla, mikrosertlik yöntemiyle yapılmaktadır. Vickers ve Knoop uçlarıyla yapılan ölçümlerde çok yüksek yükler, tabakada çok yüksek oranda çatlama veya dökülmeye neden olduğundan uygulanmaz. Brinell ve Rockwell sertlik ölçüm yöntemleri ise borlu tabakayı yok ettiği ve aynı zamanda ana malzeme yapısını da deforme ettiği için bu tip tabakaların sertliğini ölçmeye uygun yöntemler değildirler (Fichtl vd, 1987).

## 6. LABORATUVAR DENEYLERİ

### 6.1. Materyal

Laboratuvar çalışmalarında, Eskişehir ve yöresinde pulluk uç demiri imalatında sıklıkla kullanılan Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinden hazırlanan numunelere 900°, 950° ve 1000° C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanmış, ısıl işlem görmüş (920°C 1 saat karburizasyon) ve işlem görmemiş Erdemir 3990 numunelerin aşınma dayanımlarında oluşan değişimler  $Al_2O_3$  ve SiC aşındırıcılar karşısında laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmiştir. Optimum borlama sıcaklığına, Erdemir 3990 çeliğinin aşınma, yüzey sertliği ve tabaka kalınlıkları sonuçlarına göre karar verilmiş ve optimum borlama sıcaklığı olarak belirlenen 950°C sıcaklık şartında yine aynı sürelerde borlanmış sade karbonlu AISI 1008, 1030, 1040, 1045 ve 1050 çeliklerinin Erdemir 3990 çeliğine alternatif olup olamayacakları laboratuvar ortamında araştırılmıştır.

Laboratuvarda denemeye alınan çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 6.1.'de verilmiştir. AISI 1030, 1040, 1050 ve Erdemir 3990 çeliklerinin kimyasal analizleri Eskişehir KOSGEB laboratuvarlarında, AISI 1008 çeliğinin kimyasal analizi Bursa Asil çelik fabrikasında ve AISI 1045 çeliğinin kimyasal analizi de Eskişehir Süsler firmasında, spektral analiz cihazlarıyla tespit edilmiştir. İncelemeye alınan tüm sade karbonlu çelikler Asil çelik fabrikasından, Erdemir 3990 çeliği de Turan Tarım Makinaları firmasından temin edilmiştir.

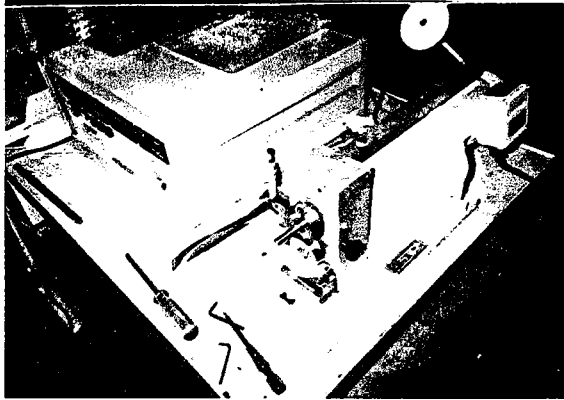
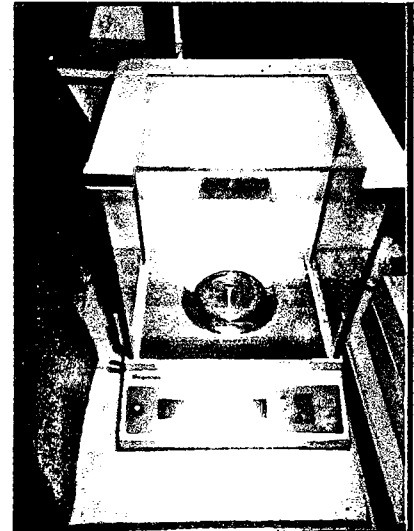
Aşınma test cihazının şekil ve boyutlarına uygun olarak deney numuneleri (her bir şarttan 3'er tane) hazırlanmıştır. Denemeye alınan tüm çelikler sıcak hadde mamulü olduğundan numunelere normalizasyon işlemi uygulanmamıştır. Numunelerin birer yüzüne kod numaraları elektrikli titreşimli kalem yardımıyla yazılmıştır. Yüzey sertleştirme işlemlerinden bir gün önce gerekli kod numaralı numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 800 ve 1200 meshlik SiC'lü sulu zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Zımparalama sonrası numuneler alkolle temizlenip kurulanmışlardır.

**Tablo 6.1.** Deneylerde kullanılan çeliklerin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimleri

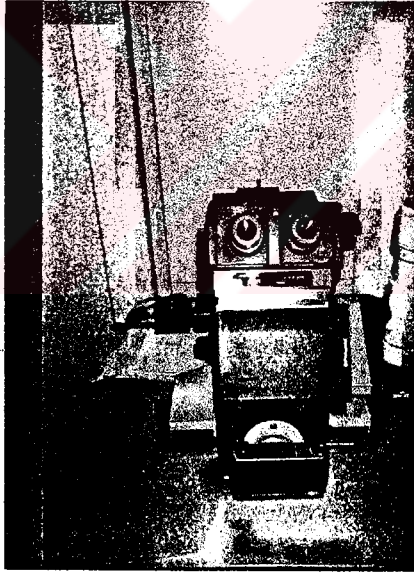
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Sn	Cu
19Mn6	0.172	0.314	1.580	0.010	0.006	0.032	0.001	0.039	0.070	0.003	0.024
AISI 1008	0.080	0.220	0.430	0.014	0.010	0.130	0.020	0.110	0.033	0.014	0.200
AISI 1030	0.308	0.222	0.747	0.013	0.017	0.250	0.050	0.288	0.014	0.008	0.252
AISI 1040	0.419	0.247	0.692	0.010	0.010	0.161	0.042	0.172	0.020	0.010	0.215
AISI 1045	0.483	0.372	0.738	0.016	0.028	0.237	0.056	0.081	0.024	0.003	0.141
AISI 1050	0.492	0.221	0.718	0.011	0.010	0.149	0.054	0.125	0.021	0.012	0.261

Aşınma deneylerinde Plint TE53 marka aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma cihazının fotoğrafı Şekil 6.1.'de verilmiştir. Aşındırıcı karşıt cisim olarak Alüminyum oksitli ( $Al_2O_3$ ) ve Silisyum Karbürlü (SiC) 500 gritlik zımpara kağıtları kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift tarafı yapışkan bant kullanılarak zımpara kağıtlarıyla kaplanmış ve her numune için yeni bir zımpara kağıdı kullanılmıştır.

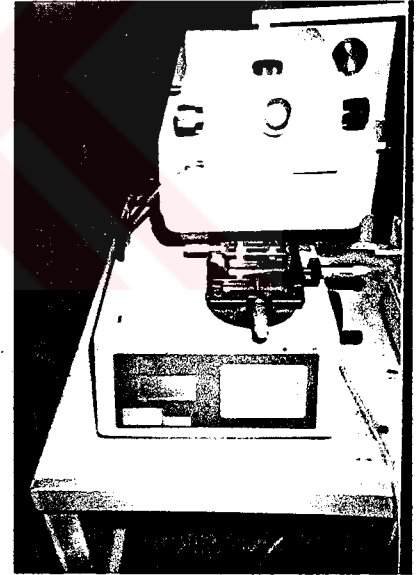
Aşındırma işleminden sonra numunelerin ağırlıklarında olan değişimlerin ölçümü Precisa 125A markalı  $10^{-4}$  gr hassasiyetli terazi ile yapılmıştır (Şekil 6.2.).

**Şekil 6.1.** Plint TE53 aşınma test cihazı**Şekil 6.2.** Precisa 125A hassas terazi

Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra aşındırılan numuneler, sertleştirilmiş örneklerle uygun kesme diski kullanılarak düşük kesme hızında kesilmiş ve Struers marka Labopress-3 model sıcak kalıplama cihazıyla kalıba alınmıştır. Metalografik yöntemlere uygun olarak zımparalanıp parlatılan numuneler %2'lik nitelle dağlandıktan sonra borür tabakaların mikro yapı fotoğrafları çekimi x50 büyütmede, ısıl işlemli tabakanın mikro yapı fotoğrafı çekimi de x25 büyütmede gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı fotoğraflarının çekiminde Olympus PMG3 marka optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 6.3.). Borlu tabakaların kalınlıklarının ölçümü optik mikroskoba monte edilebilen cihazın kendi optik mikrometresi yardımıyla ölçülmüştür. Yüzey sertlikleri ölçümü Shimadzu HMV-2000 mikrosertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4.). Yüzey sertliklerinin ölçümünde 50 gr yük, 20 sn süre ile uygulanmıştır. X- ışınları analizi Anadolu Üniversitesi laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 6.3. Olympus PMG3 optik mikroskop



Şekil 6.4. Shimadzu HMV-2000 mikrosertlik ölçüm cihazı

## 6.2. Yöntem

Borlama işlemi Manisa Salihli'de bulunan Vezneli A.Ş.'de, tuz banyosunda karburizasyon yüzey sertleştirme işlemi de (ısıl işlem) Eskişehir Turan Tarım

Makinaları A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi Ekabor®2 toz karışımıyla ısı dirençli çelik kutular içerisinde 900°, 950°, 1000°C sıcaklık ve 2, 4, 6 saat işlem sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Çelik kutunun altına 10 mm toz borlayıcı serilmiş ve numuneler bu tozun üzerine aralarında 10'ar mm boşluk kalacak şekilde dizilmişlerdir. Numuneler arasındaki boşluk 6 mm kalınlığında EKabor®2 toz karışımıyla, geri kalan kısım ise borlama işlemi süresince oksijenin olumsuz etkilerini önlemek için deoksidant EKrit® tozu ile tamamen doldurulmuştur. Kutunun kapağı kapatılıp üzerine ağırlık konarak önceden istenen borlama işlem sıcaklığına getirilmiş fırına yerleştirilmiştir. Gerekli süre beklenildikten sonra kutu fırından çıkartılmış ve üzerine su dökülerek soğutulmuştur. Soğuyan kutunun içinden numuneler çıkartılıp temizlenerek incelemelere hazır hale getirilmişlerdir. Erdemir 3990 çeliğine tuz banyosunda karburizasyon yüzey sertleştirme işlemi 920°C'de 1 saat süre ile uygulanmış ve numuneler suda soğutulmuştur.

Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kağıdı kaplı disk ile numune yüzeyi arasındaki temas, 42 N sabit yük ile sağlanmıştır. 42 N yük aşınma test cihazının minimum yüküdür. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızı 100 devir/dakika seçilmiş ve aşınmayla oluşan ağırlık kayıpları 250, 500, 1000, 1500, 2000 ve 2500 tur sonunda ölçülmüştür. Aşındırılacak numunelerin yüzeyleri deney öncesinde alkol ile silinmiştir. Aşındırılan tüm numuneler cımbız kullanılarak numune tutucudan alınmış ve yüzeyleri silinmeden tartılmıştır. Aşınma deneyleri 3'er kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Her numunenin ilk ağırlıkları birbirinden farklı olduğundan aynı cins malzeme türü içinde karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için ağırlık kayıpları, ilk ağırlığa göre her tur sonundaki yüzde ağırlık kaybı cinsinden tanımlanmıştır. Rakamların daha kolay anlaşılabilir olması için değerler  $10^3$  ile çarpılarak büyütülmüş ve aşınma eğrileri de bu değerlere göre oluşturulmuştur.

Borür tabakaların yüzey sertlik değerleri, aşındırılmamış bölgede görülen borlu tabaka alanlarının ortasından yapılan 10'ar ölçümle belirlenmiştir. Borür tabakaların kalınlıkları, net görülen uzun 10 adet dişin uzunluklarının ortalaması alınarak tek bir değer cinsinden belirlenmiştir.

### 6.3. Laboratuvar Deney Sonuçları

2, 4, 6 saat sürelerle borlanmış Erdemir 3990 çeliğinin Alüminyum Oksitli ( $Al_2O_3$ ) zımpara kağıdıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları  $900^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.2., 6.3. ve Şekil 6.5.'de,  $950^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.4., 6.5. ve Şekil 6.6.'da,  $1000^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.6., 6.7. ve Şekil 6.7.'de verilmiştir.

İşlem uygulanmamış ve ısıl işlem uygulanmış Erdemir 3990 numunelerle  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında yapılan aşınma deneylerinin sonuçları, karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için aynı malzemenin en çok ( $900^\circ C - 2$  saat) ve en az ( $1000^\circ C - 6$  saat) aşınma sergilemiş olan borlu numunelerinin sonuçlarıyla birlikte Tablo 6.8., 6.9. ve Şekil 6.8'de verilmiştir.

2, 4, 6 saat sürelerle borlanmış Erdemir 3990 çeliğinin Silisyum Karbürlü ( $SiC$ ) zımpara kağıdıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları  $900^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.10., 6.11. ve Şekil 6.9.'da,  $950^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.12., 6.13. ve Şekil 6.10.'da,  $1000^\circ C$  sıcaklık için Tablo 6.14., 6.15. ve Şekil 6.11.'de verilmiştir.

İşlem uygulanmamış ve ısıl işlem uygulanmış Erdemir 3990 numunelerle  $SiC$  aşındırıcı karşısında yapılan aşınma deneylerinin sonuçları, karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için aynı malzemenin en çok ( $900^\circ C - 2$  saat) ve en az ( $1000^\circ C - 6$  saat) aşınma sergilemiş olan borlu numunelerinin sonuçlarıyla birlikte Tablo 6.16., 6.17. ve Şekil 6.12'de verilmiştir.

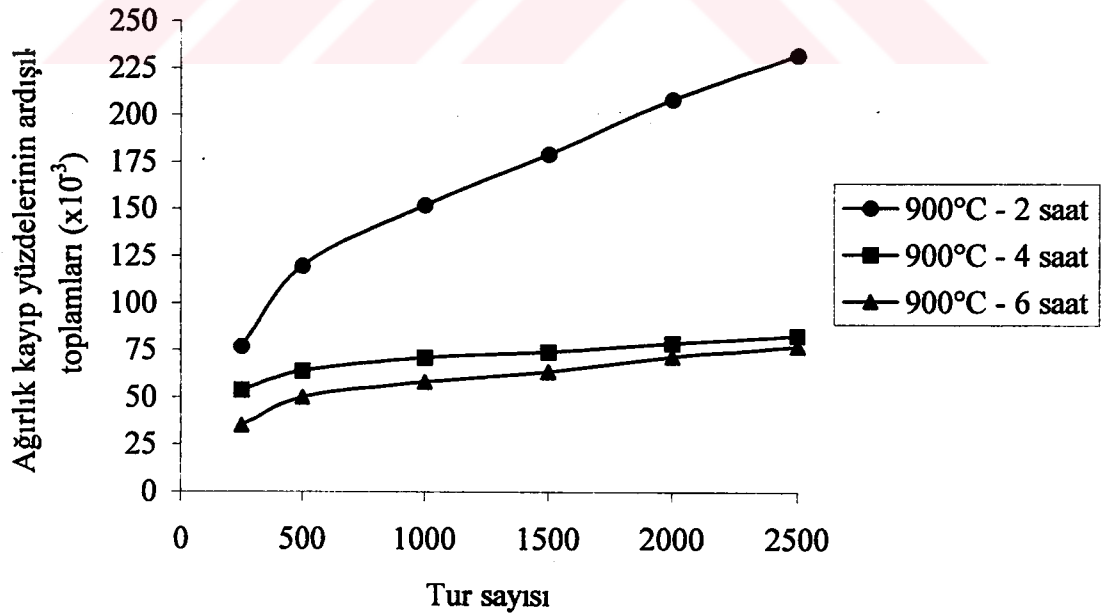
Şekil 6.13.  $Al_2O_3$ , Şekil 6.14.  $SiC$  aşındırıcı karşısında Erdemir 3990 çeliğinin; işlemsiz, ısıl işlemlili ve tüm borlama şartlarındaki numunelerinin aşınma miktarlarını birarada göstermektedir.

**Tablo 6.2.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	12.7806	12.7708	12.7653	12.7612	12.7577	12.7540	12.7510	0.0296
4	12.6834	12.6766	12.6753	12.6744	12.6740	12.6734	12.6729	0.0105
6	12.5837	12.5793	12.5774	12.5764	12.5757	12.5747	12.5740	0.0097

**Tablo 6.3.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	76.67	119.71	151.79	179.17	208.12	231.60
4	53.61	63.86	70.95	74.11	78.84	82.78
6	34.96	50.06	58.01	63.57	71.52	77.08



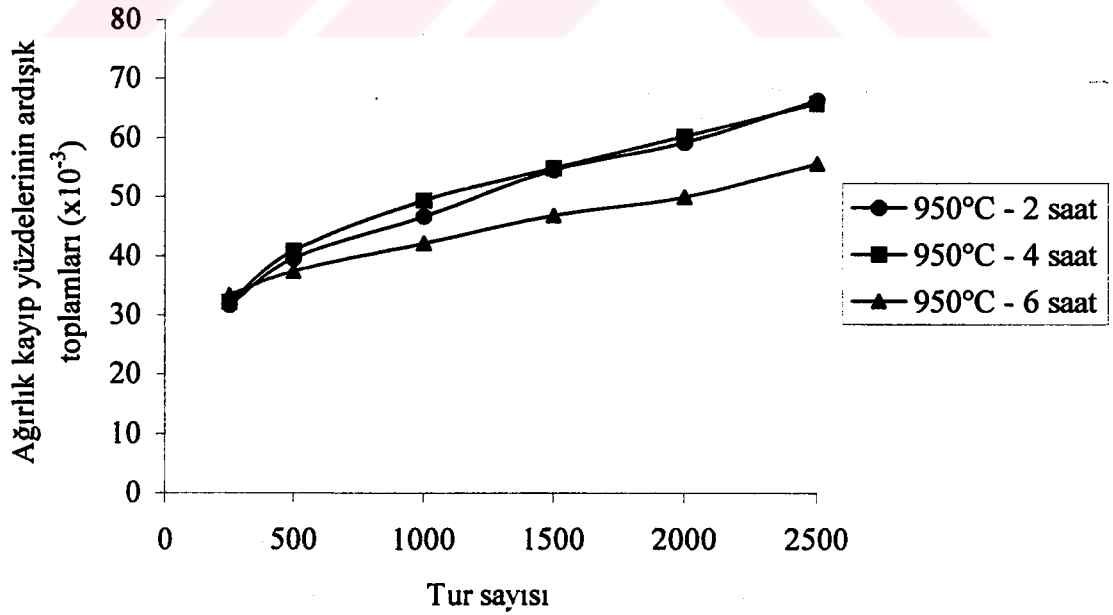
**Şekil 6.5.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 900°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.4.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	12.6570	12.6530	12.6520	12.6511	12.6501	12.6495	12.6486	0.0084
4	12.7575	12.7534	12.7523	12.7512	12.7505	12.7498	12.7491	0.0084
6	12.5889	12.5847	12.5842	12.5836	12.5830	12.5826	12.5819	0.0070

**Tablo 6.5.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kaybı yüzdelерinin ardışık toplamaları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	31.60	39.50	46.61	54.51	59.25	66.36
4	32.13	40.76	49.38	54.86	60.35	65.84
6	33.36	37.33	42.10	46.86	50.04	55.60



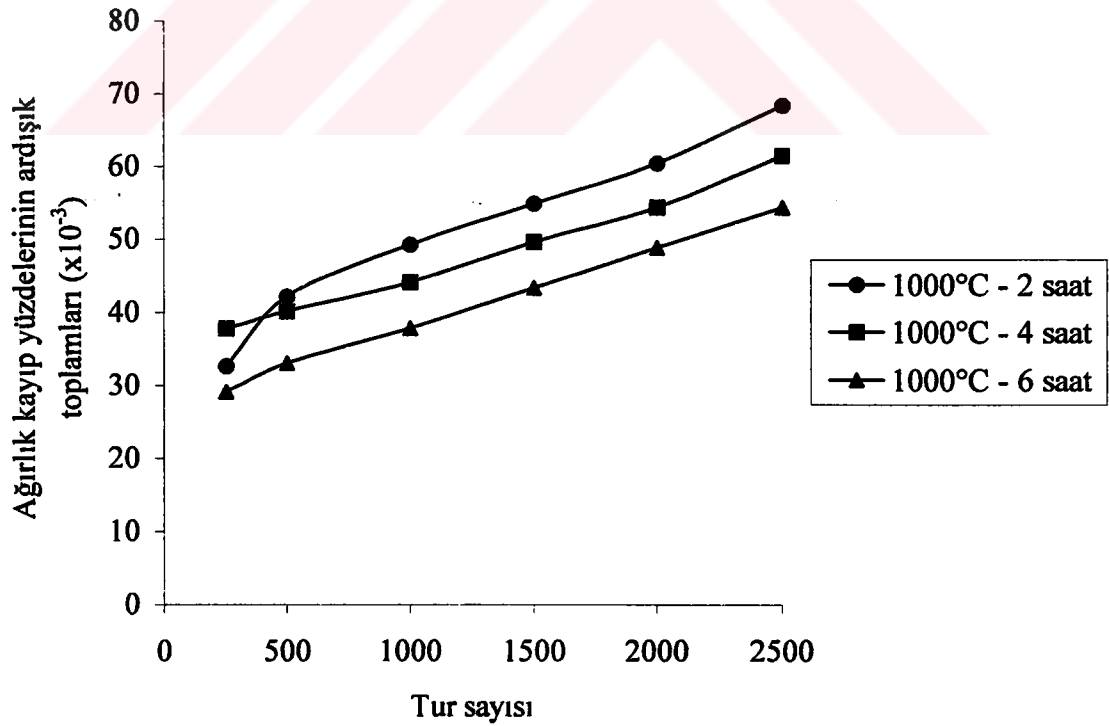
**Şekil 6.6.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.6.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	12.5787	12.5746	12.5734	12.5725	12.5718	12.5711	12.5701	0.0086
4	12.7003	12.6955	12.6952	12.6947	12.6940	12.6934	12.6925	0.0078
6	12.6988	12.6951	12.6946	12.6940	12.6933	12.6926	12.6919	0.0069

**Tablo 6.7.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	32.59	42.13	49.28	54.85	60.41	68.36
4	37.79	40.15	44.09	49.60	54.32	61.41
6	29.13	33.07	37.79	43.31	48.82	54.33



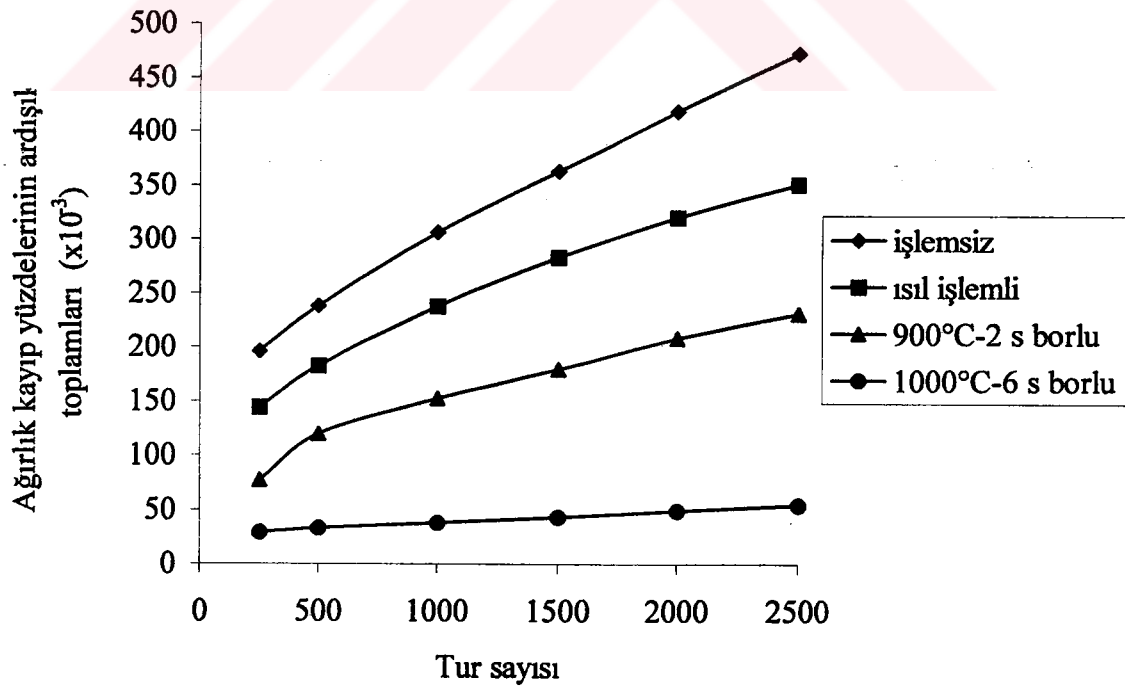
**Şekil 6.7.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.8.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

İşlem durumu	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
İşlemsiz	12.6203	12.5956	12.5903	12.5817	12.5745	12.5675	12.5607	0.0596
Isıl işlemlili	12.6823	12.6641	12.6592	12.6522	12.6464	12.6417	12.6378	0.0445
900°C-2s	12.7806	12.7708	12.7653	12.7612	12.7577	12.7540	12.7510	0.0296
1000°C-6s	12.6988	12.6951	12.6946	12.6940	12.6933	12.6926	12.6919	0.0069

**Tablo 6.9.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin ağırlık kaybı yüzdelerinin ardışık toplamaları

İşlem durumu	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
İşlemsiz	195.71	237.71	305.85	362.90	418.37	472.25
Isıl işlemlili	143.50	182.14	237.33	283.07	320.13	350.88
900°C-2s borlu	76.67	119.71	151.79	179.17	208.12	231.60
1000°C-6s borlu	29.13	33.07	37.79	43.31	48.82	54.33



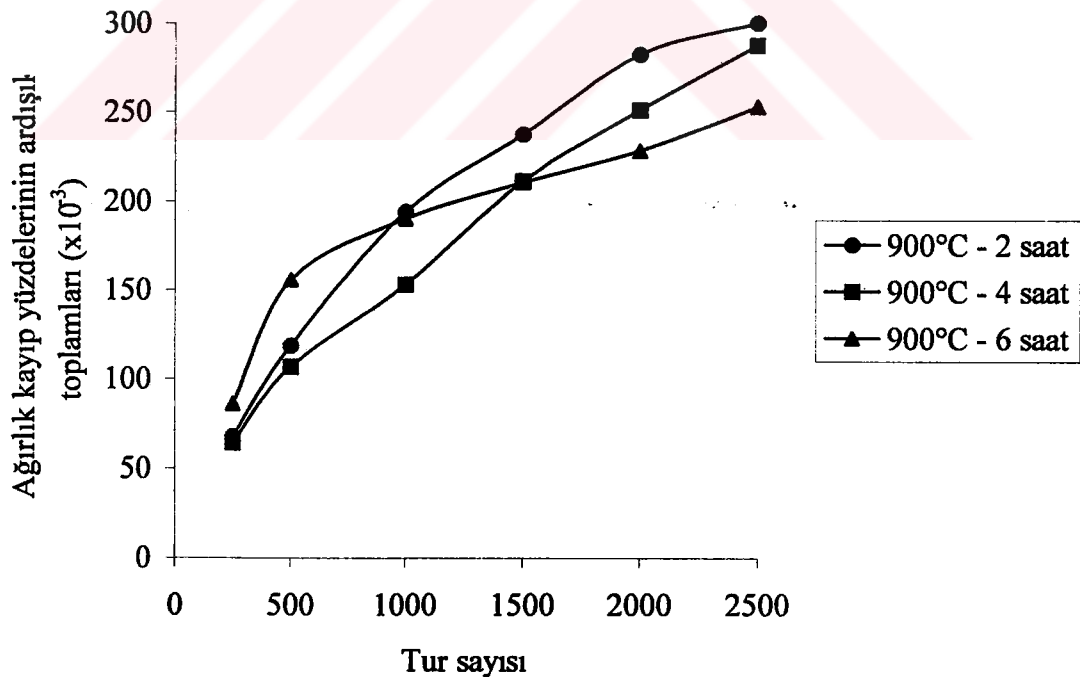
**Şekil 6.8.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.10.** SiC aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	13.1398	13.1309	13.1240	13.1143	13.1086	13.1027	13.1004	0.0394
4	13.1107	13.1023	13.0970	13.0906	13.0830	13.0777	13.0730	0.0377
6	12.5226	12.5118	12.5030	12.4988	12.4962	12.4940	12.4909	0.0317

**Tablo 6.11.** SiC aşındırıcıda 900°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kaybı yüzdelерinin ardışık toplamları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	67.73	118.72	194.06	237.45	282.34	299.85
4	64.07	106.78	153.30	211.28	251.70	287.55
6	86.24	155.71	190.05	210.82	228.38	253.14



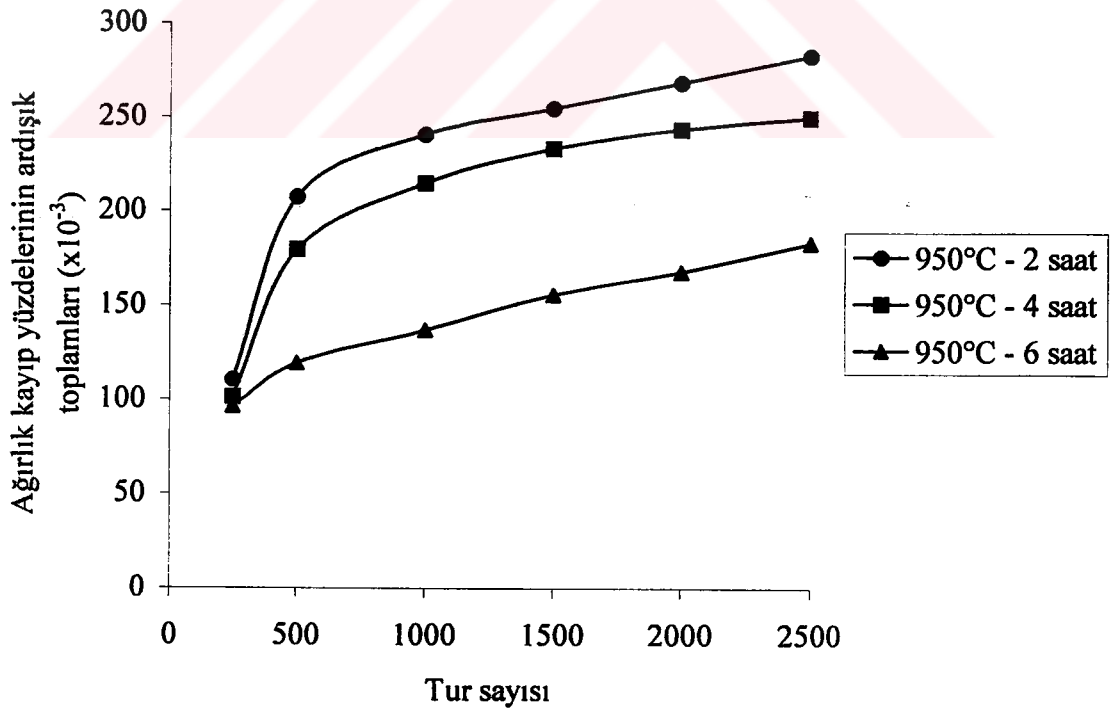
**Şekil 6.9.** SiC aşındırıcıda 900°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.12.** SiC aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	12.6691	12.6551	12.6430	12.6386	12.6368	12.6351	12.6333	0.0358
4	12.7320	12.7191	12.7090	12.7046	12.7023	12.7010	12.7002	0.0318
6	12.9880	12.9755	12.9730	12.9702	12.9678	12.9662	12.9642	0.0238

**Tablo 6.13.** SiC aşındırıcıda 950°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kaybı yüzdelerinin ardışık toplamaları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	110.51	207.59	240.74	254.95	268.36	282.58
4	101.32	179.86	215.20	233.27	243.48	249.76
6	96.24	119.34	137.04	155.53	167.84	183.25



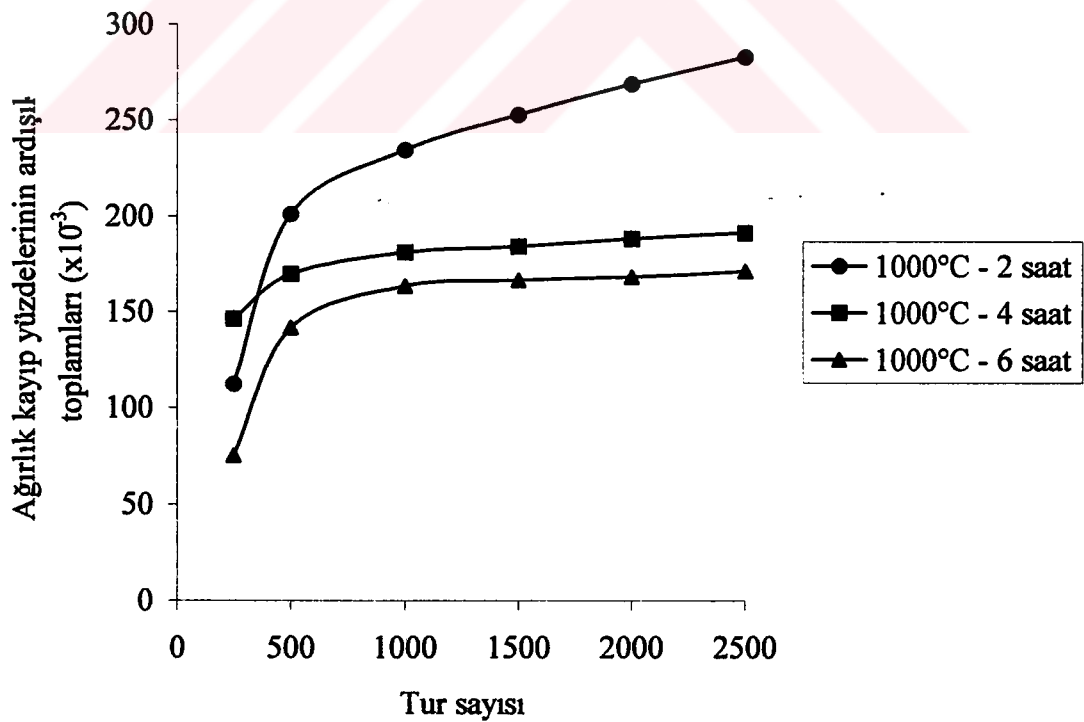
**Şekil 6.10.** SiC aşındırıcıda 950°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.14.** SiC aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

Borlama Süresi (s)	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
2	12.6375	12.6233	12.6120	12.6079	12.6056	12.6036	12.6018	0.0357
4	12.7231	12.7045	12.7020	12.7001	12.6997	12.6992	12.6988	0.0243
6	12.6262	12.6167	12.6080	12.6056	12.6052	12.6050	12.6046	0.0216

**Tablo 6.15.** SiC aşındırıcıda 1000°C sıcaklıkta borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

Borlama Süresi (s)	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
2	112.36	200.98	234.22	252.42	268.24	282.49
4	146.19	169.76	180.77	183.92	187.84	190.99
6	75.24	141.76	163.15	166.32	167.90	171.07



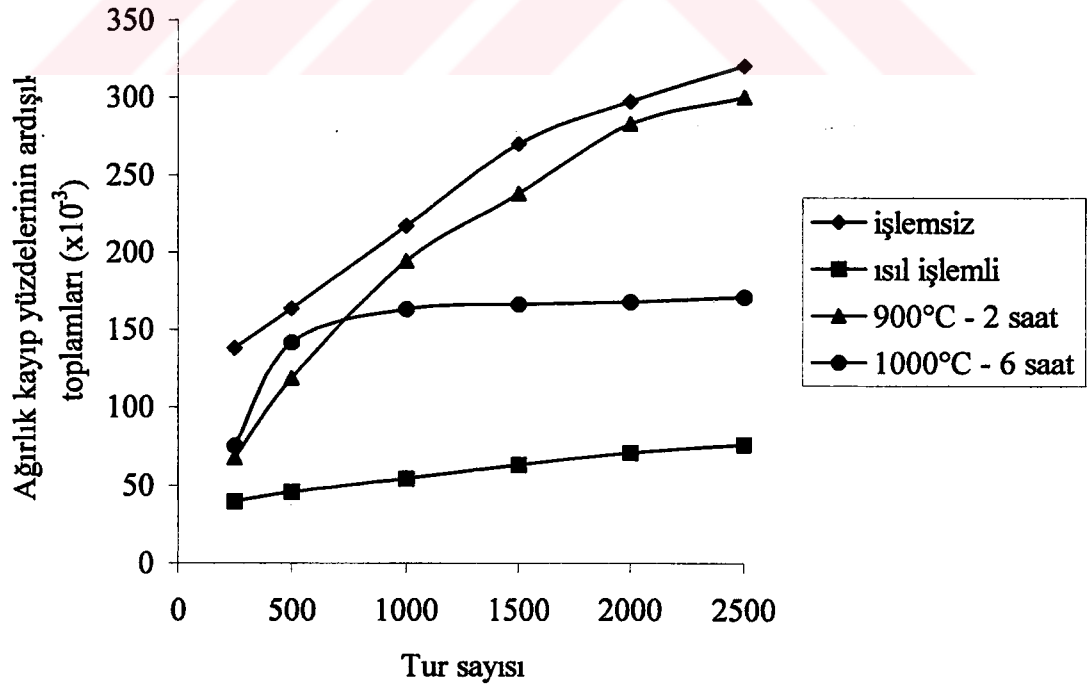
**Şekil 6.11.** SiC aşındırıcıda 1000°C'de 2, 4 ve 6 saat borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.16.** SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

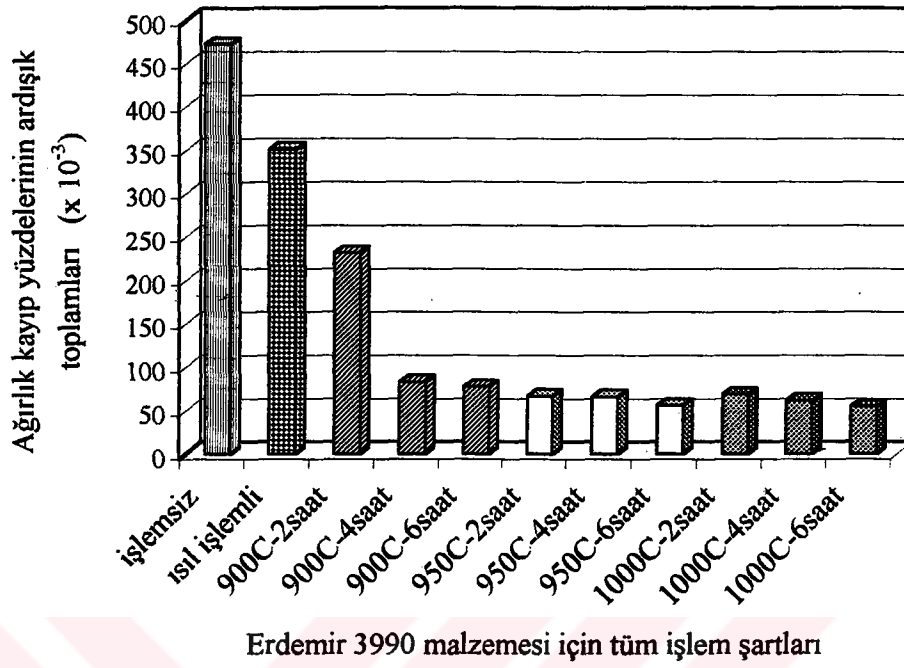
İşlem durumu	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
İşlemsiz	12.9060	12.8882	12.8850	12.8780	12.8712	12.8677	12.8647	0.0413
Isıtılmış	12.8564	12.8513	12.8510	12.8494	12.8483	12.8473	12.8466	0.0098
900°C-2s	13.1398	13.1309	13.1240	13.1143	13.1086	13.1027	13.1004	0.0394
1000°C-6s	12.6262	12.6167	12.6080	12.6056	12.6052	12.6050	12.6046	0.0216

**Tablo 6.17.** SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 numunelerin ağırlık kaybı yüzdelерinin ardışık toplamları

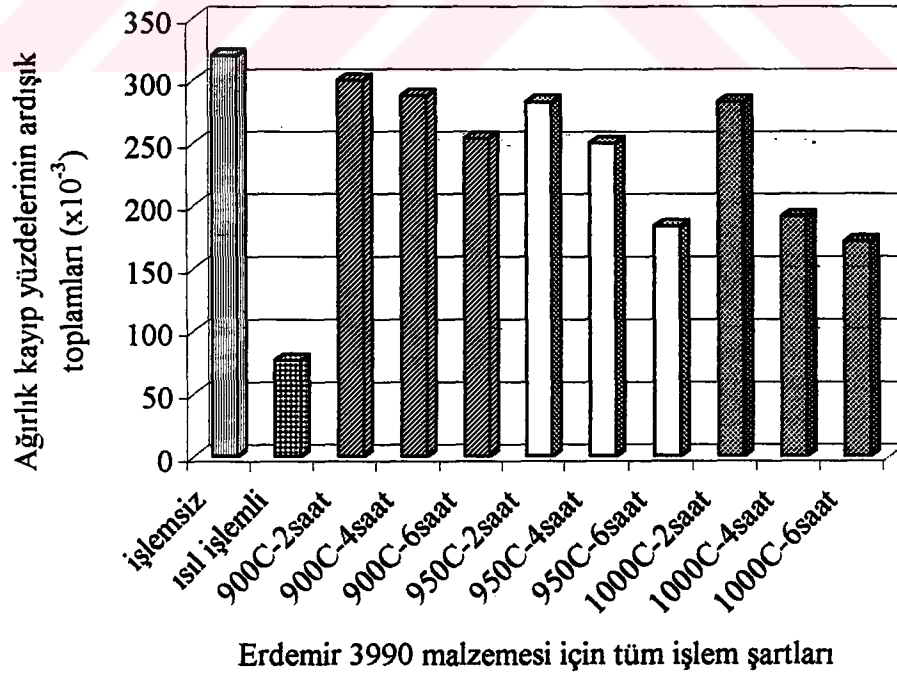
İşlem durumu	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
İşlemsiz	137.92	163.48	216.95	269.64	296.76	320.01
Isıtılmış	39.66	45.89	54.44	63.00	70.78	76.22
900°C-2s borlu	67.73	118.72	194.06	237.45	282.34	299.85
1000°C-6s borlu	75.24	141.76	163.15	166.32	167.90	171.07



**Şekil 6.12.** SiC aşındırıcıda işlemsiz, ısıtılmış, 900°C-2 saat ve 1000°C-6 saat borlu Erdemir 3990 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri



Şekil 6.13. Erdemir 3990 (19Mn6) malzemesinin tüm işlem şartlarının  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları



Şekil 6.14. Erdemir 3990 (19Mn6) malzemesinin tüm işlem şartlarının SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma miktarları

Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin tüm deney şartlarına sahip numunelerinde ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri Tablo 6.18.'de, borlama işlemi uygulanmış numunelerinde bulunan ortalama borlu tabaka kalınlık değerleri Tablo 6.19.'da verilmiştir. Isıl işlem uygulanmış Erdemir 3990 malzemesinde yaklaşık 340  $\mu\text{m}$  tabaka kalınlığı ölçülmüştür.

**Tablo 6.18.** Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin tüm deney şartlarında ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri (VSD<sub>0.05</sub>)

	Borlama şartları										
	işlemsiz	Isıl işlemli	900°C 2 saat	900°C 4 saat	900°C 6 saat	950°C 2 saat	950°C 4 saat	950°C 6 saat	1000°C 2 saat	1000°C 4 saat	1000°C 6 saat
Min.	140	633	1049	1314	1224	1268	1378	1314	1395	1485	1563
Max. (VSD <sub>0.05</sub> )	168	794	1268	1448	1648	1892	1670	1892	1839	1788	1626

**Tablo 6.19.** Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin tüm borlama şartlarında ölçülen borlu tabaka kalınlıklarının ortalamaları ( $\mu\text{m}$ )

Borlama şartlarında bulunan ortalama tabaka kalınlıkları ( $\mu\text{m}$ )								
900°C 2 saat	900°C 4 saat	900°C 6 saat	950°C 2 saat	950°C 4 saat	950°C 6 saat	1000°C 2 saat	1000°C 4 saat	1000°C 6 saat
26.25	84.77	88.51	75.40	87.90	122.86	77.65	117.93	126.01

Anadolu Üniversitesi laboratuvarlarında, Erdemir 3990 çeliğinin tüm borlama şartları için x-ışınları analizi yapılmış ve tüm borlama şartlarında yalnızca Fe<sub>2</sub>B tabakası belirlenmiştir (Ek-A).

Borlanmış Erdemir 3990 çeliğinin Alüminyum Oksitli ve Silisyum Karbürlü zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde her iki aşındırıcı karşısında da en az aşınmanın 1000°C 6 saat, en çok aşınmanın da 900°C 2 saat işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu malzemede en az aşınmaların bulunduğu 1000°C 6 saat borlanmış örnekler; Alüminyum Oksitli aşındırıcı

karşısında işlemsiz örneklere göre 8.69 kat, ısıtma işlemi uygulanmış örneklere göre de 6.45 kat daha az aşınırken Silisyum Karbürlü aşındırıcı karşısında işlemsiz örneklere göre 1.87 kat daha az, ısıtma işlemi uygulanmış örneklere göre ise 2.24 kat daha çok aşınmışlardır. En çok aşınmanın tespit edildiği 900°C 2 saat borlanmış örnekler; Alüminyum Oksitli aşındırıcı karşısında işlemsiz durumdaki örneklere göre 2.03 kat, ısıtma işlemi uygulanmış örneklere göre de 1.51 kat daha az aşınırken Silisyum Karbürlü aşındırıcı karşısında işlemsiz örneklere göre 1.06 kat daha az, ısıtma işlemi uygulanmış örneklere göre ise 3.93 kat daha çok aşınma sergilemişlerdir. 2500 tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri incelendiğinde, Alüminyum Oksitli aşındırıcı karşısında 950°C 6 saat borlanmış örneklerin  $55.60 \times 10^{-3}$ , 1000°C 6 saat borlanmış örneklerin ise  $54.33 \times 10^{-3}$  olarak yaklaşık aynı değerleri verdiği görülmektedir. Silisyum Karbürlü aşındırıcı karşısında 2500 tur sonunda 950°C 6 saat borlanmış örneklerin  $183.25 \times 10^{-3}$ , 1000°C 6 saat borlanmış örneklerin de  $171.07 \times 10^{-3}$  değeriyle yine yaklaşık aynı ağırlık kaybı yüzde değerlerini verdiği belirlenmiştir. Erdemir 3990 malzemeyle yapılan ön deneyler (Alüminyum Oksitli ve Silisyum Karbürlü aşındırıcılar karşısında abrazyon aşınma, yüzey sertlik ve tabaka kalınlık ölçümleri) sonunda 950°C borlama işlem sıcaklığı, istenen özelliklere sahip boru tabakalarının elde edilebilmesi ve 1000°C işlem sıcaklığındaki ağırlık kaybı yüzdeleri ile birbirine çok yakın sonuçlar bulunmasından dolayı optimum sıcaklık değeri olarak belirlenmiştir. Seçilen bazı sade karbonlu çelikler, belirlenen optimum sıcaklık şartında, aynı sürelerde borlanmış ve Erdemir 3990 çeliğine alternatif olabilme olanakları araştırılmıştır.

Sade karbonlu çeliklerin işlemsiz hallerinin Alüminyum Oksitli zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazyon aşınma deneylerinin sonuçları Tablo 6.20., 6.21. ve Şekil 6.15.'de verilmiştir. 950°C'de 2, 4, 6 saat sürelerde borlama işlemi uygulanmış sade karbonlu çeliklerin Alüminyum Oksitli zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazyon aşınma deney sonuçları; AISI 1008 malzemesi için Tablo 6.22., 6.23. ve Şekil 6.16.'da, AISI 1030 malzemesi için Tablo 6.24., 6.25. ve Şekil 6.17.'de, AISI 1040 malzemesi için Tablo 6.26., 6.27. ve Şekil 6.18.'de, AISI 1045 malzemesi için Tablo 6.28., 6.29. ve Şekil 6.19.'da ve AISI 1050 malzemesi için de Tablo 6.30., 6.31. ve Şekil 6.20.'de verilmiştir.

Silisyum Karbürlü zımpara kağıtları karşısında, seçilen sade karbonlu çeliklerin işlemsiz hallerinin abrazif aşınma deney sonuçları Tablo 6.32., 6.33. ve Şekil 6.21.'de verilmiştir. 950°C'de 2, 4, 6 saat sürelerde borlama işlemi uygulanmış sade karbonlu çeliklerin Silisyum Karbürlü zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları; AISI 1008 malzemesi için Tablo 6.34., 6.35. ve Şekil 6.22.'de, AISI 1030 malzemesi için Tablo 6.36., 6.37. ve Şekil 6.23.'de, AISI 1040 malzemesi için Tablo 6.38., 6.39. ve Şekil 6.24.'de, AISI 1045 malzemesi için Tablo 6.40., 6.41. ve Şekil 6.25.'de ve AISI 1050 malzemesi için de Tablo 6.42., 6.43. ve Şekil 6.26.'da verilmiştir.

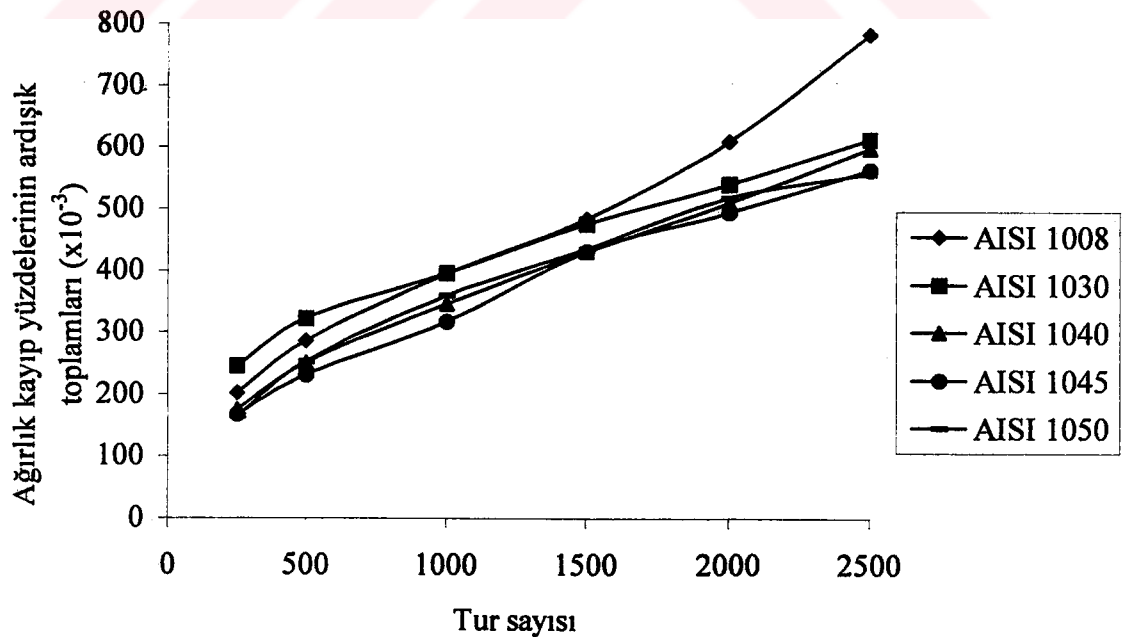
Şekil 6.27.  $Al_2O_3$ , Şekil 6.28. SiC aşındırıcı karşısında tüm malzemelerin işlemsiz (Erdemir 3990 çeliği için ısıtılmış durumda dahil) ve 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat borlanmış numunelerinin, abrazif aşınma deneyleri sonunda elde edilen aşınma miktarlarını birarada göstermektedir.

**Tablo 6.20.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

İŞLEMSİZ MALZEME	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
AISI 1008	13.2494	13.2226	13.2115	13.1971	13.1854	13.1686	13.1457	0.1037
AISI 1030	13.0435	13.0115	13.0015	12.9919	12.9816	12.9730	12.9636	0.0799
AISI 1040	13.1700	13.1470	13.1370	13.1245	13.1133	13.1028	13.0912	0.0788
AISI 1045	12.9456	12.9239	12.9157	12.9046	12.8898	12.8816	12.8727	0.0729
AISI 1050	12.9204	12.8992	12.8878	12.8740	12.8642	12.8534	12.8484	0.0720

**Tablo 6.21.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin ağırlık kaybı yüzdelerinin ardışık toplamları

İŞLEMSİZ MALZEME	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
AISI 1008	202.27	286.05	394.73	483.04	609.83	782.67
AISI 1030	245.33	321.99	395.59	474.56	540.49	612.56
AISI 1040	174.63	250.56	345.48	430.52	510.25	598.32
AISI 1045	167.62	230.96	316.70	431.03	494.37	563.12
AISI 1050	164.08	252.31	359.12	434.97	518.55	557.25



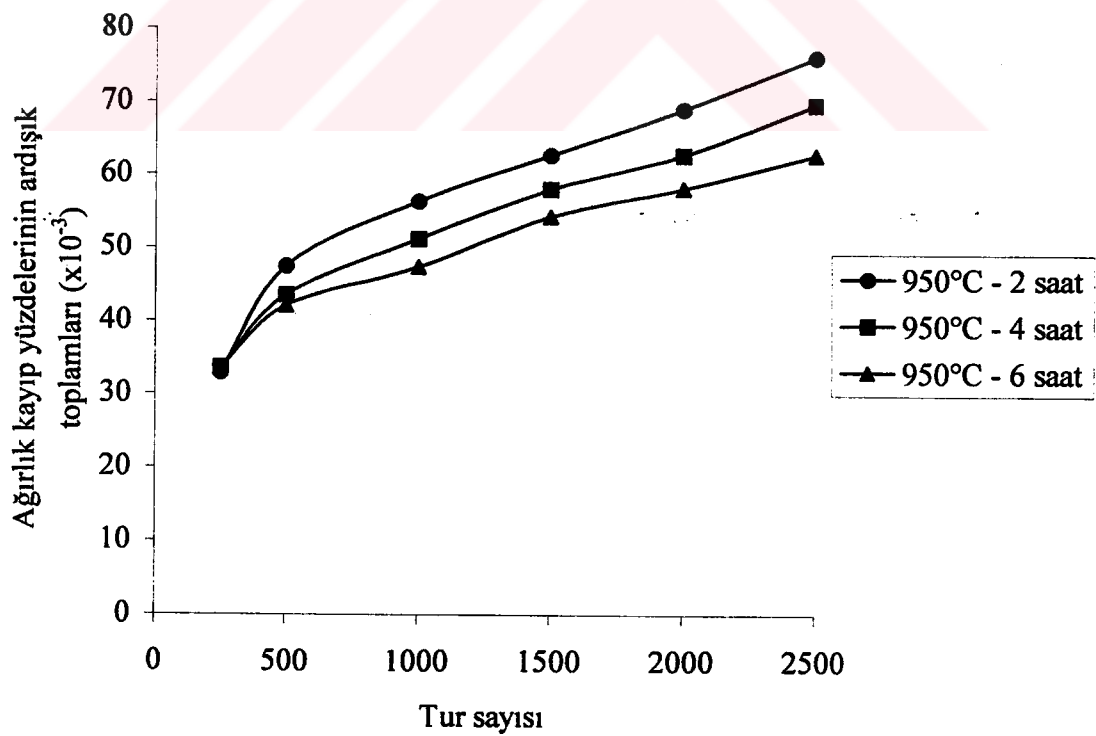
**Şekil 6.15.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.22.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1008	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıpı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.7699	12.7657	12.7638	12.7627	12.7619	12.7611	12.7602	0.0097
950°C-4s	13.0932	13.0888	13.0875	13.0865	13.0856	13.0850	13.0841	0.0091
950°C-6s	13.0880	13.0836	13.0825	13.0818	13.0809	13.0804	13.0798	0.0082

**Tablo 6.23.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelерinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1008	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	32.88	47.76	56.38	62.64	68.91	75.95
950°C-4s	33.60	43.53	51.17	58.04	62.62	69.50
950°C-6s	33.61	42.02	47.37	54.24	58.06	62.65



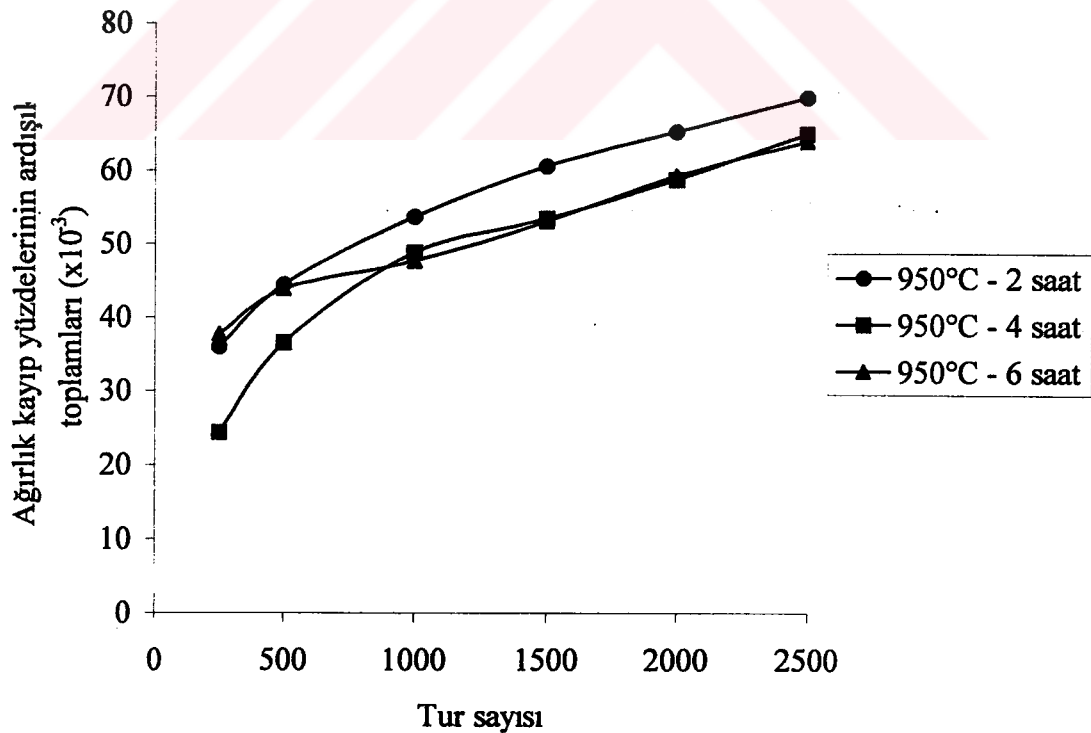
**Şekil 6.16.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.24.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1030	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	13.0347	13.0300	13.0289	13.0277	13.0268	13.0262	13.0256	0.0091
950°C-4s	13.1045	13.1013	13.0997	13.0981	13.0975	13.0968	13.0960	0.0085
950°C-6s	12.9919	12.9870	12.9862	12.9857	12.9850	12.9842	12.9836	0.0083

**Tablo 6.25.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1030	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	36.05	44.49	53.70	60.60	65.21	69.81
950°C-4s	24.41	36.62	48.83	53.41	58.75	64.86
950°C-6s	37.71	43.87	47.72	53.11	59.26	63.88



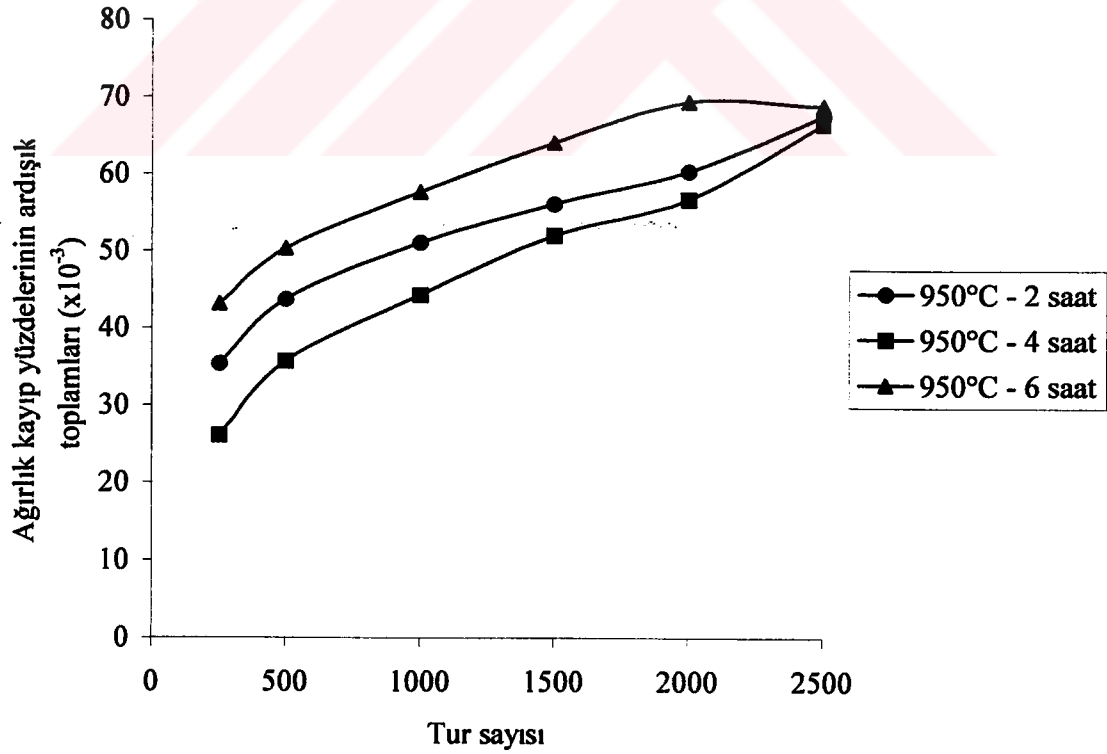
**Şekil 6.17.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.26.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1040	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	13.0652	13.0607	13.0595	13.0583	13.0576	13.0571	13.0564	0.0088
950°C-4s	12.9712	12.9677	12.9664	12.9653	12.9640	12.9633	12.9626	0.0086
950°C-6s	13.2701	13.2646	13.2639	13.2634	13.2624	13.2616	13.2610	0.0091

**Tablo 6.27.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1040	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	34.44	43.62	52.81	58.16	61.99	67.35
950°C-4s	26.98	37.00	45.48	55.50	60.90	66.30
950°C-6s	41.44	46.72	50.48	58.02	64.05	68.57



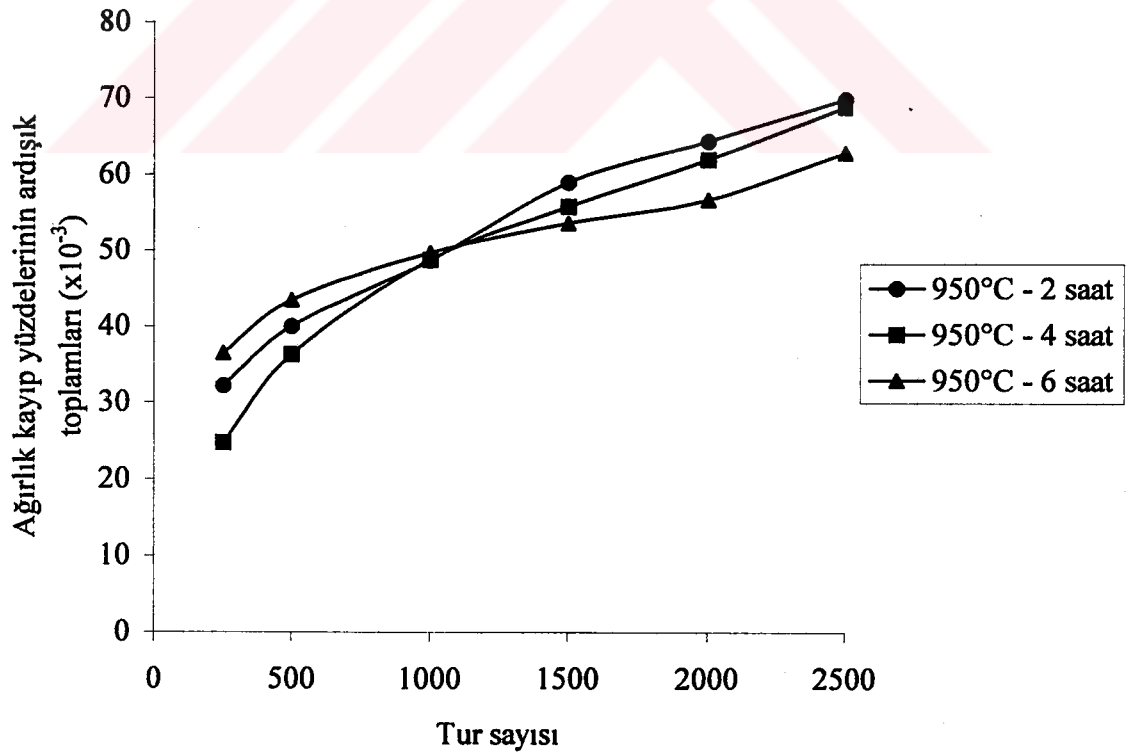
**Şekil 6.18.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.28.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1045	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.7423	12.7382	12.7372	12.7361	12.7348	12.7341	12.7334	0.0089
950°C-4s	12.9280	12.9248	12.9233	12.9217	12.9208	12.9200	12.9191	0.0089
950°C-6s	12.8909	12.8862	12.8853	12.8845	12.8840	12.8836	12.8828	0.0081

**Tablo 6.29.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1045	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	32.17	40.02	48.65	58.85	64.35	69.84
950°C-4s	24.75	36.35	48.73	55.69	61.88	68.84
950°C-6s	36.45	43.44	49.64	53.52	56.62	62.83



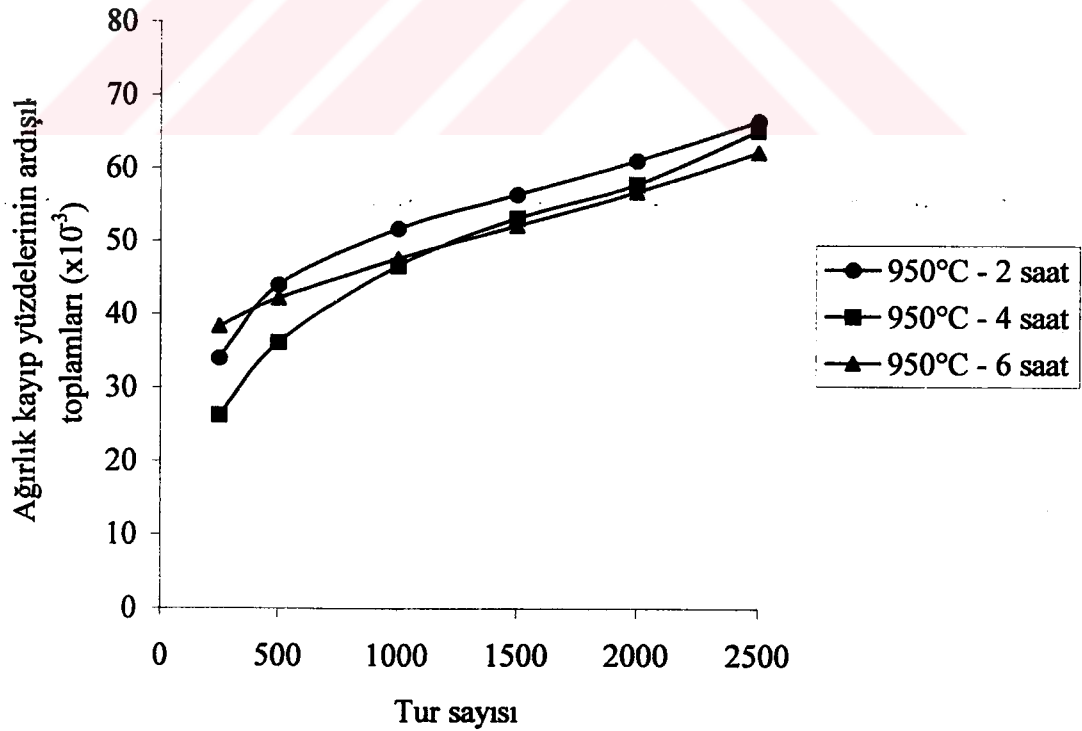
**Şekil 6.19.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.30.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1050	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.9569	12.9525	12.9512	12.9502	12.9496	12.9490	12.9483	0.0086
950°C-4s	12.9791	12.9757	12.9744	12.9730	12.9722	12.9716	12.9706	0.0085
950°C-6s	13.0413	13.0363	13.0358	13.0351	13.0345	13.0339	13.0332	0.0081

**Tablo 6.31.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelерinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1050	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri (x 10 <sup>-3</sup> )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	33.95	43.99	51.70	56.34	60.97	66.37
950°C-4s	26.19	36.20	46.58	53.14	57.75	65.07
950°C-6s	38.33	42.17	47.54	52.14	56.74	62.11



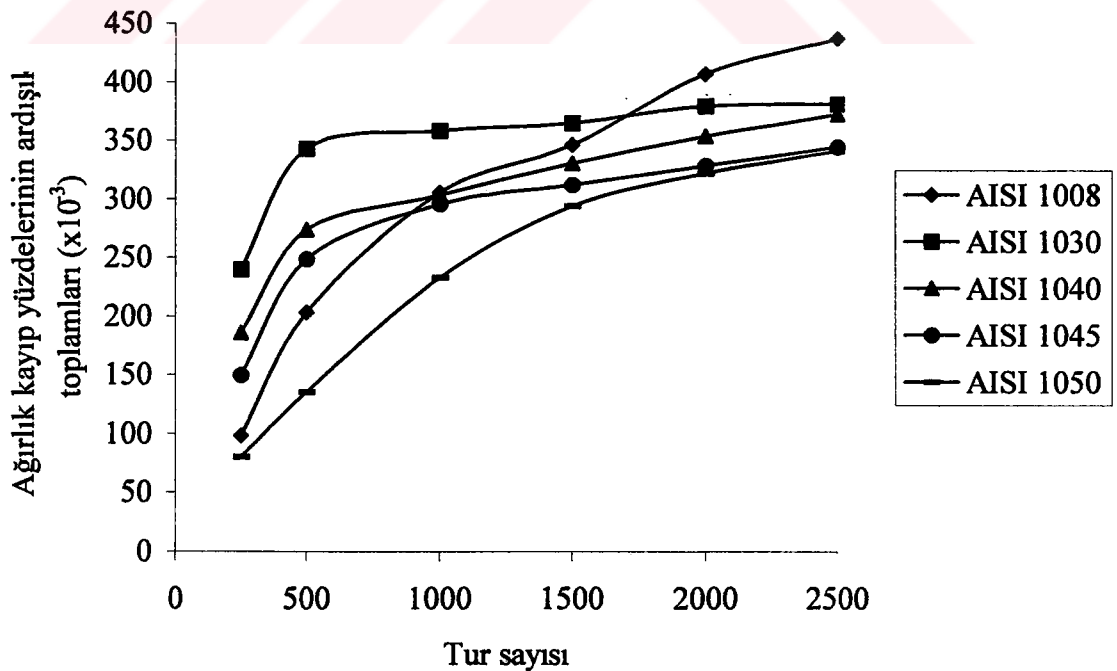
**Şekil 6.20.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.32.** SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

İŞLEMSİZ MALZEME	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
AISI 1008	13.3505	13.3374	13.3230	13.3097	13.3042	13.2962	13.2922	0.0583
AISI 1030	12.6764	12.6460	12.6330	12.6309	12.6301	12.6283	12.6281	0.0483
AISI 1040	12.3799	12.3569	12.3460	12.3423	12.3389	12.3361	12.3338	0.0461
AISI 1045	12.7085	12.6895	12.6770	12.6709	12.6688	12.6667	12.6647	0.0438
AISI 1050	12.6051	12.5950	12.5880	12.5757	12.5680	12.5645	12.5621	0.0430

**Tablo 6.33.** SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin ağırlık kaybı yüzdelerinin ardışık toplamları

İŞLEMSİZ MALZEME	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kaybı yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
AISI 1008	98.12	202.98	305.60	346.80	406.72	436.69
AISI 1030	239.82	343.15	358.93	365.25	379.44	381.02
AISI 1040	185.79	273.83	303.71	331.18	353.79	372.38
AISI 1045	149.51	248.65	295.86	312.39	328.91	344.65
AISI 1050	80.12	135.65	233.23	294.33	322.09	341.13



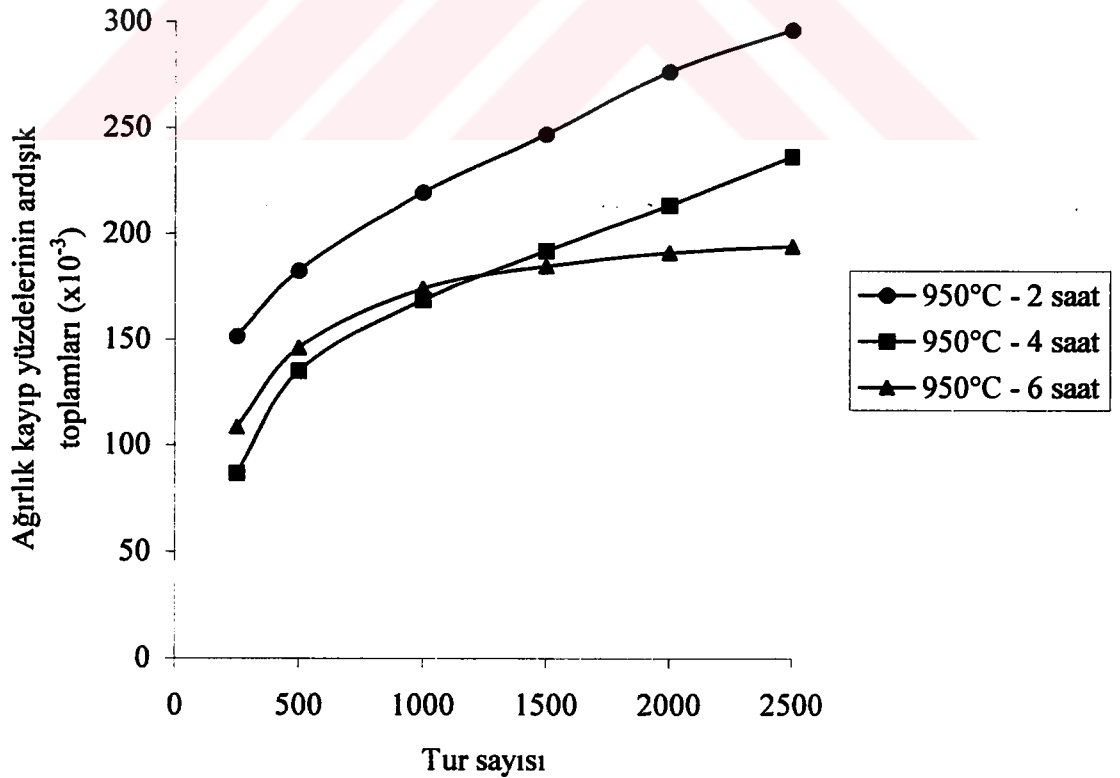
**Şekil 6.21.** SiC aşındırıcıda sade karbonlu tüm çeliklerin işlem uygulanmamış numunelerinin aşınma eğrileri

**Tablo 6.34.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1008	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.8193	12.7999	12.7960	12.7912	12.7877	12.7839	12.7814	0.0379
950°C-4s	12.5736	12.5627	12.5570	12.5524	12.5495	12.5468	12.5439	0.0297
950°C-6s	13.1594	13.1451	13.1400	13.1365	13.1351	13.1343	13.1339	0.0255

**Tablo 6.35.** SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları

BORLAMA AISI 1008	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	151.33	182.53	219.20	246.50	276.14	295.65
950°C-4s	86.69	135.20	168.60	191.67	213.14	236.21
950°C-6s	108.67	145.90	174.02	184.66	190.73	193.78



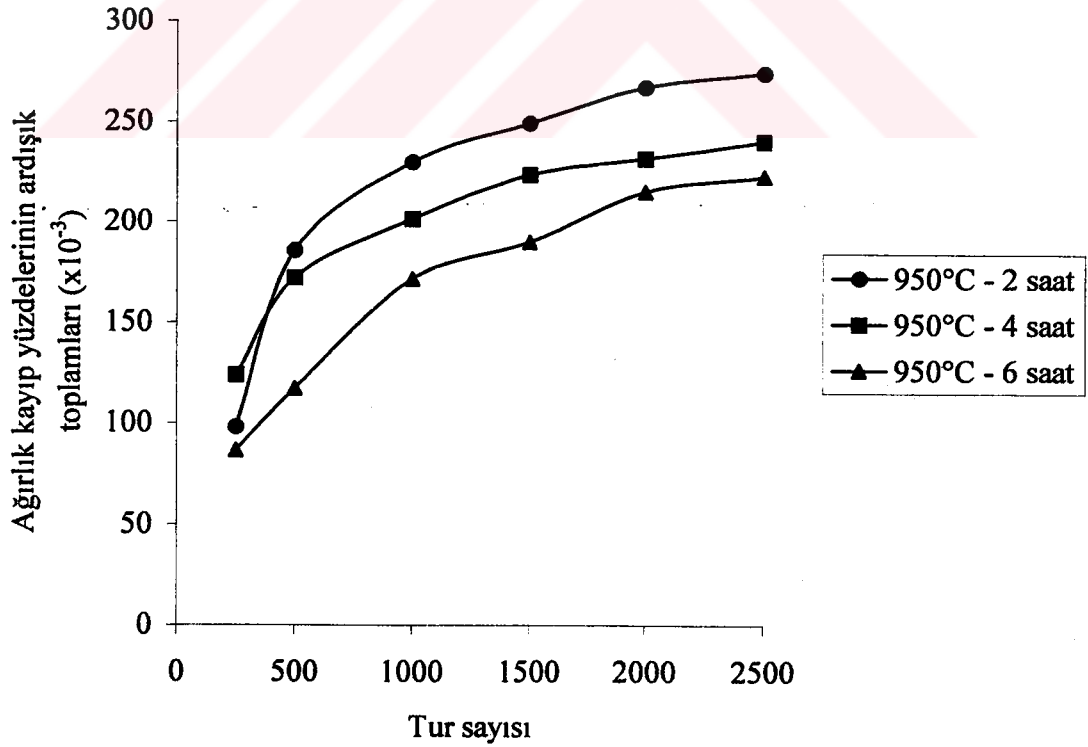
**Şekil 6.22.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1008 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.36.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1030	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.9309	12.9182	12.9070	12.9012	12.8987	12.8964	12.8955	0.0354
950°C-4s	12.6764	12.6607	12.6550	12.6509	12.6481	12.6471	12.6460	0.0304
950°C-6s	12.9600	12.9488	12.9450	12.9378	12.9354	12.9322	12.9312	0.0288

**Tablo 6.37.** SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamları

BORLAMA AISI 1030	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	98.21	185.60	229.68	249.02	266.80	273.76
950°C-4s	123.85	171.97	201.16	223.25	231.13	239.82
950°C-6s	86.42	117.28	171.29	189.81	214.50	222.22



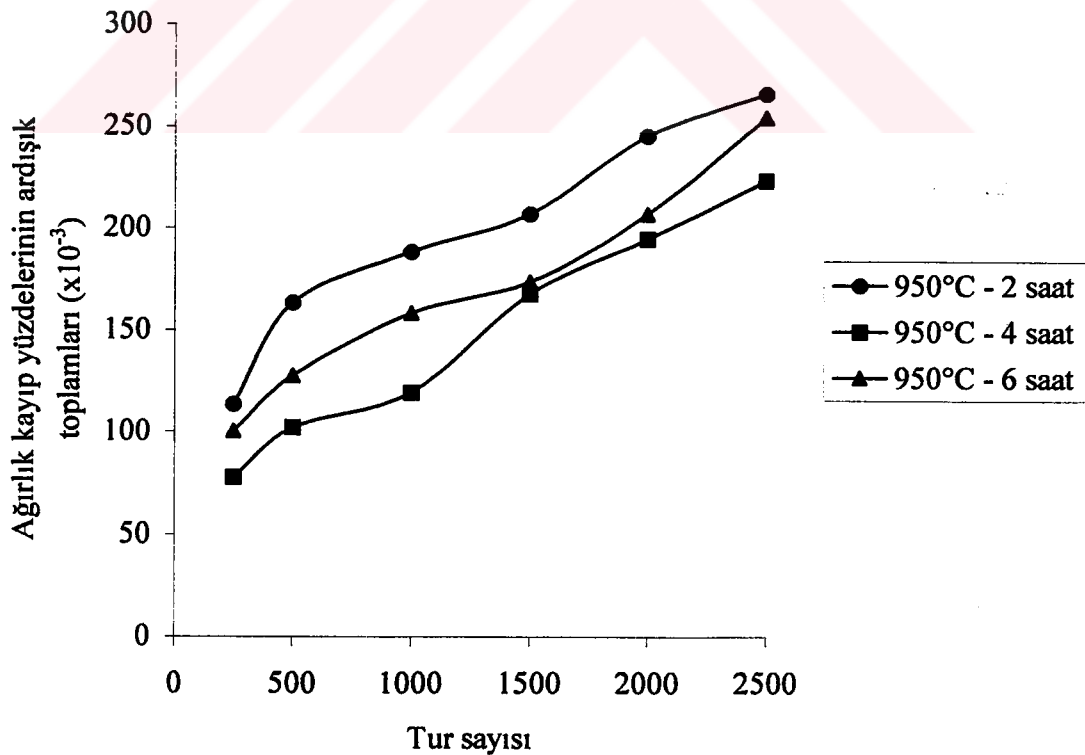
**Şekil 6.23.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1030 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.38.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
950°C-2s	13.0505	13.0357	13.0290	13.0259	13.0235	13.0185	13.0158	0.0347
950°C-4s	12.9937	12.9836	12.9800	12.9782	12.9719	12.9684	12.9647	0.0290
950°C-6s	12.9451	12.9321	12.9290	12.9246	12.9226	12.9183	12.9122	0.0329

**Tablo 6.39.** SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1040	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	113.41	163.21	188.49	206.89	245.20	265.89
950°C-4s	77.73	102.35	119.28	167.77	194.71	223.19
950°C-6s	100.42	127.46	158.36	173.81	207.02	254.15



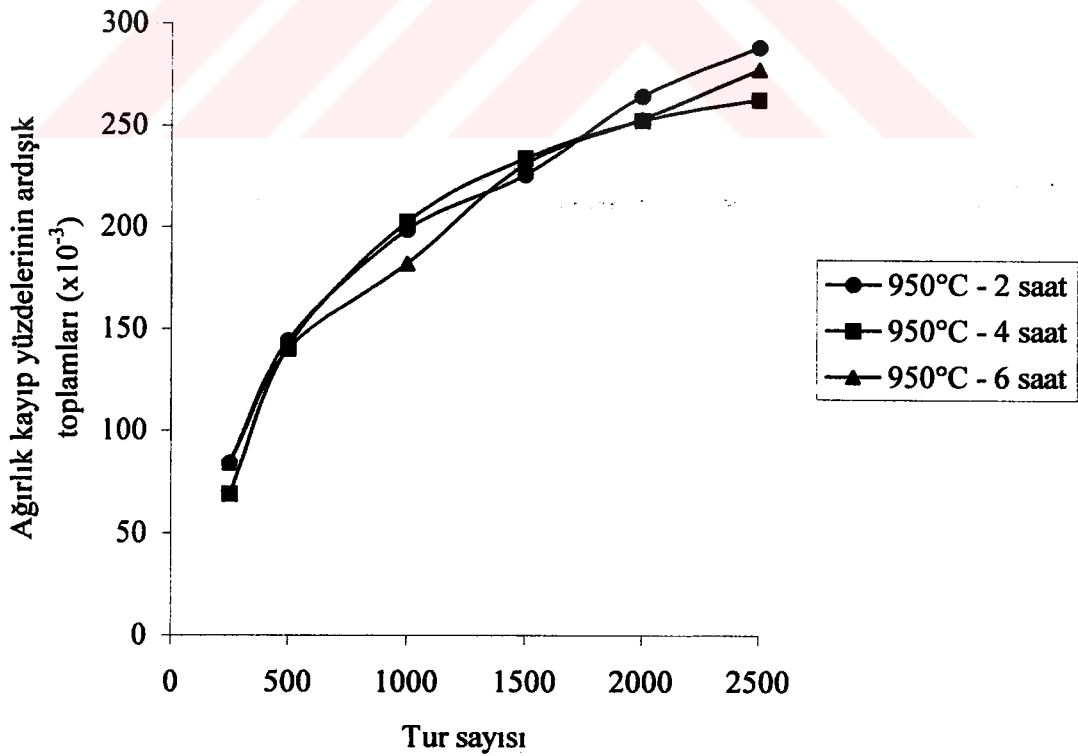
**Şekil 6.24.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1040 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.40.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

BORLAMA AISI 1045	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kaybı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.9545	12.9436	12.9360	12.9288	12.9253	12.9203	12.9172	0.0373
950°C-4s	12.8910	12.8821	12.8730	12.8649	12.8609	12.8585	12.8572	0.0338
950°C-6s	12.8675	12.8567	12.8500	12.8441	12.8378	12.8350	12.8319	0.0356

**Tablo 6.41.** SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

BORLAMA AISI 1045	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	84.14	144.35	198.38	225.40	264.00	287.93
950°C-4s	69.04	141.18	202.46	233.50	252.11	262.20
950°C-6s	83.93	139.88	181.85	230.81	252.57	276.67



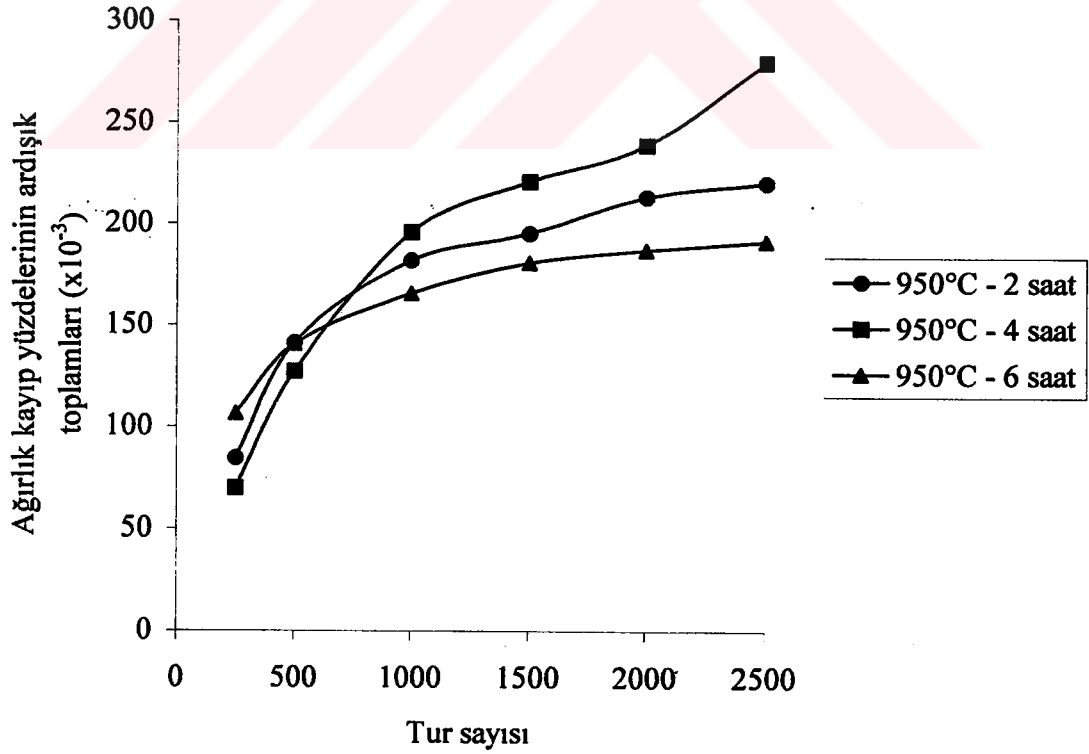
**Şekil 6.25.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1045 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri

**Tablo 6.42.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin aşınma deneyleri süresince ölçülen ağırlıkları

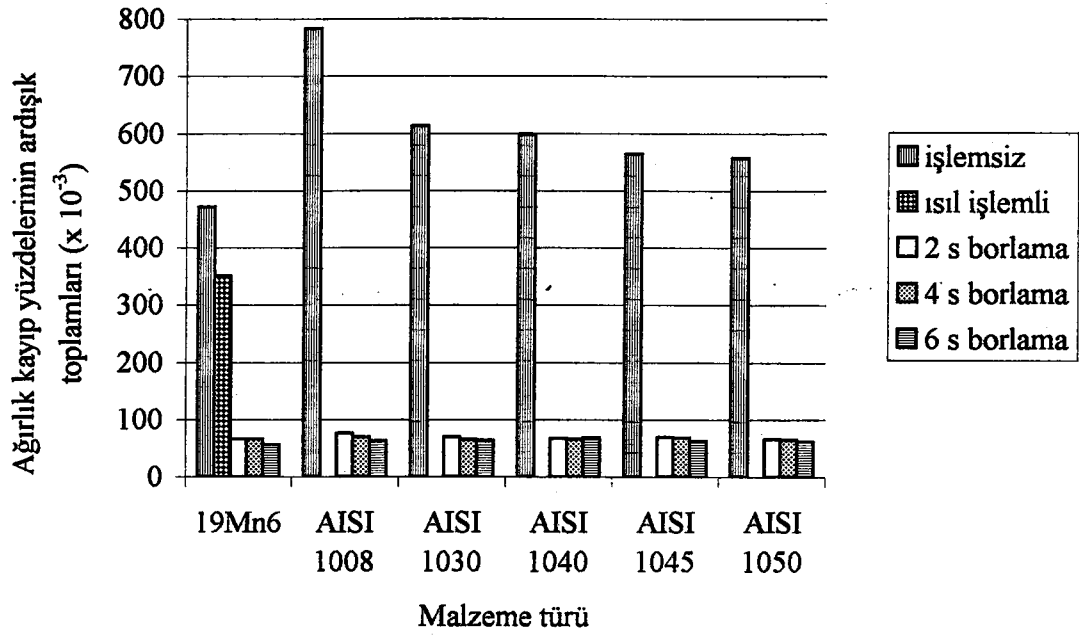
BORLAMA AISI 1050	Ortalama İlk ağırlık (gr)	250 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	1500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2000 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	2500 tur sonu ortalama ağırlık (gr)	Toplam ağırlık kayıbı ortalaması (gr)
950°C-2s	12.8678	12.8569	12.8500	12.8444	12.8427	12.8404	12.8395	0.0283
950°C-4s	12.8851	12.8761	12.8690	12.8599	12.8567	12.8544	12.8491	0.0360
950°C-6s	13.1239	13.1099	13.1050	13.1022	13.1002	13.0994	13.0988	0.0251

**Tablo 6.43.** SiC aşındırıcıda 950°C 2,4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 numunelerin ağırlık kayıp yüzdelerinin ardışık toplamaları

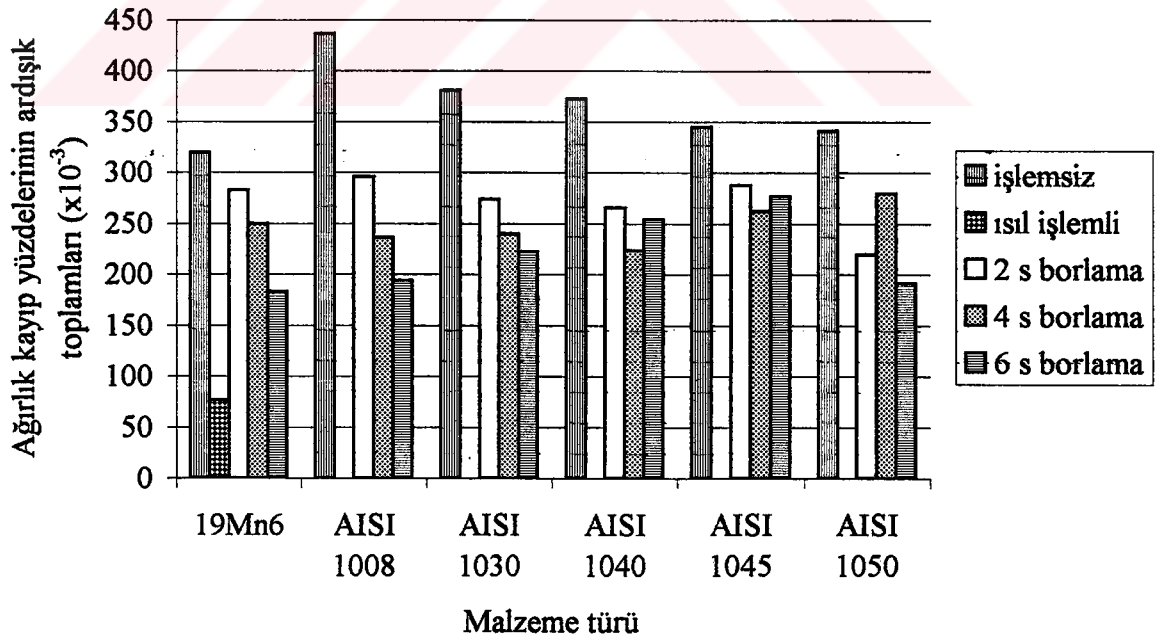
BORLAMA AISI 1050	İlk ağırlığa göre her tur sonundaki ağırlık kayıp yüzdeleri ( $\times 10^{-3}$ )					
	250 tur	500 tur	1000 tur	1500 tur	2000 tur	2500 tur
950°C-2s	84.70	141.43	181.84	195.06	212.93	219.93
950°C-4s	69.84	127.27	195.57	220.41	238.26	279.39
950°C-6s	106.68	140.96	165.34	180.59	186.68	191.25



**Şekil 6.26.** SiC aşındırıcıda 950°C 2, 4 ve 6 saat borlanmış AISI 1050 malzemesine ait numunelerin aşınma eğrileri



Şekil 6.27. Laboratuvarıda incelenen tüm malzemelerin  $Al_2O_3$  aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlі ve  $950^\circ C$ 'de 2, 4 ve 6 saat borlama şartları için aşınma miktarları



Şekil 6.28. Laboratuvarıda incelenen tüm malzemelerin  $SiC$  aşındırıcıda işlemsiz, ısıl işlemlі ve  $950^\circ C$ 'de 2, 4 ve 6 saat borlama şartları için aşınma miktarları

Seçilen sade karbonlu çeliklerin işlemsiz ve 950°C'de 2, 4, 6 saat sürelerle borlanmış numunelerinde ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri Tablo 6.44.'de, ortalama borlu tabaka kalınlık değerleri Tablo 6.45.'de verilmiştir.

**Tablo 6.44.** Sade karbonlu çelik numunelerde ölçülen minimum ve maksimum yüzey sertlik değerleri (VSD<sub>0.05</sub>)

İşlem şartları	Malzeme türü				
	AISI 1008	AISI 1030	AISI 1040	AISI 1045	AISI 1050
İşlemsiz	125-135	153-170	165-170	205-225	225-235
Borlama: 950°C-2 saat	1211-1563	1298-1648	1268-1523	1239-1584	1224-1693
Borlama: 950°C-4 saat	1268-1648	1211-1523	1314-1648	1268-1648	1362-1839
Borlama: 950°C-6 saat	1211-1648	1504-1716	1345-1739	1378-1839	1314-1892

**Tablo 6.45.** Sade karbonlu çelik numunelerin borlu tabaka kalınlıklarının ortalamaları (µm)

İşlem şartları	Malzeme türü				
	AISI 1008	AISI 1030	AISI 1040	AISI 1045	AISI 1050
Borlama: 950°C-2 saat	84.10	73.80	70.28	68.80	68.20
Borlama: 950°C-4 saat	95.10	82.30	79.80	78.25	75.15
Borlama: 950°C-6 saat	143.50	118.20	115.60	111.25	108.70

950°C'de 2, 4, 6 saat borlanmış tüm numunelerin borlu tabakalarını (x50 büyütme) ve ısıtılmış numunedeki tabakayı (x25 büyütme) gösteren mikro yapı fotoğrafları Ek-B'de verilmiştir.

#### 6.4. Laboratuvar Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Erdemir 3990 malzemesinden numunelerin Alüminyum Oksit 500 gritlik abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde, işlemsiz numunelerin beklenildiği gibi en çok aşınmayı sergiledikleri görülmüştür. Isıl işlem uygulanmış numuneler, tüm borlanmış örneklerden daha fazla, işlemsiz örneklerden ise 1.34 kat daha az aşınmışlardır. 950°C'de 6 saat borlanmış numunelerde ise aynı malzemenin işlemsiz haline göre 8.49, ısıll işlemli haline göre de 6.31 kat daha az aşınma tespit edilmiştir.

Erdemir 3990 malzemesinden numunelerin Silisyum Karbür 500 gritlik abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde, işlemsiz numunelerin yine beklenildiği gibi en çok aşınmayı sergiledikleri görülmüştür. Isıl işlem uygulanmış numuneler, tüm borlanmış ve işlemsiz örneklerden daha az aşınmışlardır. Isıl işlemli numuneler işlemsiz örneklerden 4.19 kat daha az aşınmışlardır. 950°C'de 6 saat borlanmış numunelerde ise aynı malzemenin işlemsiz haline göre 1.74 kat daha az, ısıll işlemli haline göre de 2.40 kat daha çok aşınma tespit edilmiştir.

Erdemir 3990 çeliğinin işlemsiz, ısıll işlemli ve tüm sıcaklık değerlerinde 2, 4, 6 saat borlanmış hallerinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı karşısındaki abrazif aşınma miktarlarının birarada görüldüğü Şekil 6.13: ele alındığında, tüm borlama şartları için aynı işlem sıcaklığında artan işlem süresinin aşınma miktarlarını azalttığı görülmektedir. 950° ve 1000°C sıcaklıklarda yapılan borlamanın aynı işlem süreleri dikkate alındığında 900°C'ye göre daha iyi değerler verdiği ama bunların da birbirine oldukça yakın değerler olduğu gözlenmiştir.

Erdemir 3990 çeliğinin işlemsiz, ısıll işlemli ve tüm sıcaklık değerlerinde 2, 4, 6 saat borlanmış hallerinin SiC aşındırıcı karşısındaki abrazif aşınma miktarlarının birarada görüldüğü Şekil 6.14. ele alındığında, tüm borlama şartları için aynı işlem sıcaklığında artan işlem süresinin aşınma miktarlarını azalttığı görülmektedir. Bu aşındırıcı karşısında borlanmış tüm örneklerin ısıll işlem uygulanmış örneklerden daha çok, işlemsiz örneklerden ise daha az aşındıkları tespit edilmiştir.

Tablo 6.18. incelendiğinde, borlama sonucu Erdemir 3990 malzemesinde oldukça yüksek yüzey sertliği değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir. Bu malzemeye uygulanan tüm borlama şartları dikkate alındığında ölçülen en düşük yüzey sertliği 1049 VSD (900°C-2s), en yüksek yüzey sertliği de 1892 VSD (950°C-2 ve 6 s)'dir. Aynı malzemenin işlemsiz halinde 140-168 VSD, ısıtılmış halinde de 633-794 VSD ölçülen en düşük ve en yüksek yüzey sertlik değerleridir.

Tablo 6.19. incelendiğinde, artan işlem sıcaklığı ve süresinin tabaka kalınlığını arttırdığı gözlenmiştir. Erdemir 3990 malzemesine uygulanan borlama işlemleri sonucunda en düşük tabaka kalınlığı ortalama 26.25  $\mu\text{m}$  (900°C-2s) ve en yüksek tabaka kalınlığı da ortalama 126.01  $\mu\text{m}$  (1000°C-6s) olarak bulunmuştur.

İşlemsiz sade karbonlu çelik numunelerde, Alüminyum Oksitli zımpara kağıtlarıyla yapılan aşınma deneyleri sonunda borlama işleminin abrazif aşınma dayanımını oldukça arttırdığı gözlenmiştir. İşlemsiz sade karbonlu çeliklerde, 2500 tur sonunda en çok aşınma  $782.67 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle AISI 1008 çeliğinde, en az aşınma da  $557.25 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle AISI 1050 çeliğinde tespit edilmiştir. Tablo 6.21. incelendiğinde diğer çeliklerin işlemsiz hallerinin toplam ağırlık kayıp yüzdelerinin bu aralık içinde artan karbon miktarına göre azalan bir şekilde değiştiği görülmektedir.

Tablo 6.22., 6.23. ve Şekil 6.16. incelendiğinde, AISI 1008 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.21) göre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aşındırıcı karşısında 10.30, 11.26, 12.49 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.24., 6.25. ve Şekil 6.17. ele alındığında, AISI 1030 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.21) göre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aşındırıcı karşısında 8.77, 9.44, 9.58 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.26., 6.27. ve Şekil 6.18. gözönüne alınınca, AISI 1040 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.21) göre  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında 8.88, 9.02, 8.72 kat aşınma dayanımı gösterdiği saptanmıştır.

Tablo 6.28., 6.29. ve Şekil 6.19. incelendiğinde, AISI 1045 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.21) göre  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında 8.06, 8.18, 8.96 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.30., 6.31. ve Şekil 6.20. incelendiğinde, AISI 1050 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.21) göre  $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında 8.39, 8.56, 8.97 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

İşlemsiz sade karbonlu çelik numunelerde, Silisyum Karbürlü zımpara kağıtlarıyla yapılan aşınma deneyleri sonunda borlama işleminin abrazif aşınma dayanımını azda olsa arttırdığı gözlenmiştir. İşlemsiz sade karbonlu çeliklerde, 2500 tur sonunda en çok aşınma  $436.69 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle AISI 1008 çeliğinde, en az aşınma da  $341.13 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle AISI 1050 çeliğinde tespit edilmiştir. Tablo 6.33. incelendiğinde diğer çeliklerin işlemsiz hallerinin toplam ağırlık kayıp yüzdelerinin bu aralık içinde artan karbon miktarına göre azalan bir şekilde değiştiği görülmektedir.

Tablo 6.34., 6.35. ve Şekil 6.22. incelendiğinde, AISI 1008 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.33) göre SiC aşındırıcı karşısında 1.47, 1.84, 2.25 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.36., 6.37. ve Şekil 6.23. ele alındığında, AISI 1030 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.33) göre SiC aşındırıcı karşısında 1.39, 1.58, 1.71 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.38., 6.39. ve Şekil 6.24. gözönüne alınca, AISI 1040 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.33) göre SiC aşındırıcı karşısında 1.40, 1.66, 1.46 kat aşınma dayanımı gösterdiği saptanmıştır.

Tablo 6.40., 6.41. ve Şekil 6.25. incelendiğinde, AISI 1045 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.33) göre SiC aşındırıcı karşısında 1.19, 1.31, 1.24 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 6.42., 6.43. ve Şekil 6.26. incelendiğinde, AISI 1050 çeliğinde; 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonunda, borlanmış numunelerin işlemsiz numunelere (Tablo 6.33) göre SiC aşındırıcı karşısında 1.55, 1.22, 1.78 kat aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 6.27. incelendiğinde, borlamanın uygulandığı malzemeye abrazif aşınma dayanımı yönünden ( $Al_2O_3$  aşındırıcı karşısında) olumlu katkısı açık bir şekilde görülmektedir. 950°C sıcaklıkta borlanmış numuneler içinde en çok aşınmanın AISI 1008 (2 saat) çeliğinde  $75.95 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle, en az aşınmanın da Erdemir 3990 (6 saat) çeliğinde  $55.60 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.28. incelendiğinde, borlamanın uygulandığı malzemeye abrazif aşınma dayanımı yönünden (SiC aşındırıcı karşısında) olumlu katkı sağladığı görülmektedir. 950°C sıcaklıkta borlanmış numuneler içinde en çok aşınmanın AISI 1008 (2 saat) çeliğinde  $295.65 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle, en az aşınmanın da Erdemir 3990 (6 saat) çeliğinde  $183.25 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.44. incelendiğinde, borlama sonucu malzemelerin oldukça yüksek yüzey sertlik değerlerine ulaştığı görülmektedir. 950°C'de borlanmış tüm sade karbonlu çelik numunelerde en düşük 1211 VSD, en yüksek 1892 VSD'lik yüzey sertlik değerleri elde edilmiştir. Sade karbonlu çeliklerin işlemsiz hallerinin yüzey sertlik değerlerinin artan karbon oranıyla arttığı gözlenmiştir.

Tablo 6.45. incelendiğinde, aynı işlem sıcaklığında artan işlem süresinin tabaka kalınlıklarını arttırdığı gözlenmiştir. 950°C’de borlanmış tüm numunelerde her bir işlem süresi için en yüksek tabaka kalınlık ortalamaları en düşük karbonlu malzeme olan AISI 1008’de, en düşük tabaka kalınlık ortalamaları da en yüksek karbonlu malzeme olan AISI 1050’de elde edilmiştir. Sade karbonlu çeliklerin borlu tabaka kalınlık ortalamalarının, malzemelerin artan karbon oranıyla azaldığı belirlenmiştir.

Erdemir 3990 çeliğinin 900°, 950° ve 1000° C sıcaklıklarda 2, 4, 6 saat borlanmış numunelerinin ve seçilen tüm çeliklerin belirlenen optimum borlama sıcaklığında 2, 4, 6 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerinin, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC’lü aşındırıcılar karşısında 2500 turluk aşınma deneyleri sonunda bulunan ağırlık kayıp miktarları arasında anlamlı bir farkın bulunup bulunmadığını ve sistem üzerinde hangi faktörlerin etkilerinin ne derece olduğu Minitab.13 hazır paket programı kullanılarak yapılan varyans analizi ve ana faktör etkileri grafikleri yardımı ile incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonunda, her iki analizde de incelenen tüm ana faktörlerin, ikili ve üçlü etkileşimlerin sistem üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir (Ek-C). Erdemir 3990 malzemesinin farklı sıcaklık, süre ve aşındırıcılar karşısında bulunan ağırlık kayıplarını içeren ilk analizde, aşınma üzerindeki ana faktör etkileri incelendiğinde, aşındırıcı cinsinin en büyük farklara neden olduğundan en etkili faktör olduğu, işlem sıcaklığının da daha az değişime neden olduğundan en az etkili faktör olduğu belirlenmiştir (Tablo C.1. ve Şekil C.1.). Benzer şekilde, farklı malzemelerin değişen işlem sürelerinde iki ayrı aşındırıcı karşısındaki ağırlık kayıplarını içeren ikinci analiz incelendiğinde, sistem üzerinde en çok etkili olan faktörün aşındırıcı tipi olduğu, en az etkili olan faktöründe değişen malzeme cinsinin olduğunu görmekteyiz (Tablo C.2. ve Şekil C.2.). Laboratuvar deney verilerine göre yapılan istatistiksel incelemeler sonunda, abrazif aşınma ağırlık kayıplarının değişiminde en etkili faktörün aşındırıcı tipi olduğu belirlenmiştir.

Seçilen çeliklerin, işlemsiz (Erdemir 3990 malzemesi için ısıtma işlemi de dahil) ve optimum borlama sıcaklığında 2, 4, 6 saat sürelerle borlanmış numunelerinin Alüminyum Oksitli zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın 6 saat süreyle borlanmış Erdemir 3990 çeliğinde  $55.60 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kayıp yüzdesiyle gerçekleştiği tespit edilmiştir. Benzer

şekilde Silisyum Karbürlü zımpara kağıtlarıyla yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde ise en az aşınmanın ısıtılmış ve ısıtılmamış Erdemir 3990 çeliğinde  $76.22 \times 10^{-3}$  toplam ağırlık kaybı yüzdesiyle meydana geldiği belirlenmiştir. Alüminyum Oksitli zımpara kağıdı karşısında en az aşınan 950°C sıcaklıkta 6 saat borlanmış Erdemir 3990 numuneler aynı malzemenin ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelerine göre 6.31 kat daha az aşınmışlardır. Silisyum Karbürlü zımpara kağıdı karşısında en az aşınan ısıtılmış ve ısıtılmamış Erdemir 3990 numuneler de aynı malzemenin 950°C sıcaklıkta 6 saat borlanmış numunelerine göre 2.40 kat daha az aşınmışlardır. Laboratuvar farklı aşındırıcılar karşısında en az aşınmaları sergileyen Erdemir 3990 çeliğinin bu iki halinin tarlada denenmesine böylece hangi aşındırıcının toprağı daha iyi simüle ettiğinin belirlenmesine ve laboratuvar şartlarındaki aşınma kaybı miktarlarıyla tarla şartlarındaki aşınma kaybı miktarlarının karşılaştırılmasına karar verilmiştir.

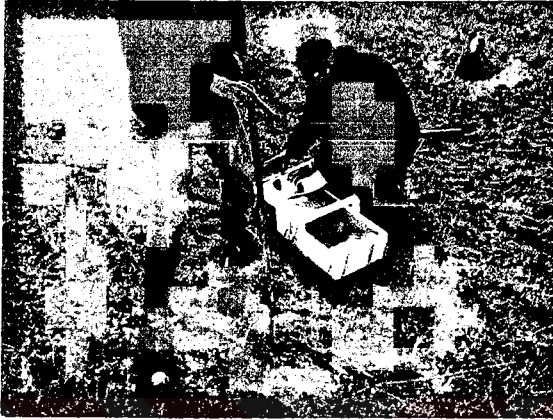
## 7. TARLA DENEMELERİ

### 7.1. Materyal

Tarla denemeleri Sonbahar ve İlbahar denemeleri olarak iki ayrı grupta sürdürülmüştür. Bünye analizi, nem ve penetrasyon dirençleri, tarlaların 5'er farklı yerinden yapılan ölçümlerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Sonbahar tarla denemeleri Osmangazi Üniversitesi Ziraat Fakültesi eğitim ve deneme tarlalarında, ilkbahar denemeleri de Eskişehir Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü tarlalarında gerçekleştirilmiştir. Deneme tarlalarının toprak bünye analizleri (Ek-D) ve nem tayinleri, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Eskişehir Araştırma Enstitüsü laboratuvarlarında belirlenmiştir. Toprak nem tayini, 0-10 ve 10-20 cm arası derinlikler için yapılmıştır (Şekil 7.1.). Toprakların 0-30 cm arasındaki penetrasyon dirençleri, Üniversitemiz İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği laboratuvarından temin edilen penetrometre cihazı kullanılarak saptanmıştır (Şekil 7.2.). Sonbahar denemelerinin gerçekleştirildiği tarlanın penetrasyon direnci  $255 \text{ [N/cm}^2\text{]}$ , ilkbahar denemelerinin gerçekleştirildiği tarlanın penetrasyon direnci de  $245 \text{ [N/cm}^2\text{]}$ 'dir. Sonbahar denemelerinin gerçekleştirildiği tarla 20 dekar büyüklüğünde olup kumlu-killi-tın bünyeli ve 0-10 cm arası ortalama %27.16 ve 10-20 cm arası ortalama %29.59 nem oranına sahiptir. İlbahar deneme tarlası, 20 dekar büyüklüğünde, tınlı, 0-10 cm arası ortalama %30.76 ve 10-20 cm arası ortalama %33.27 nem oranındadır.

Tarla denemelerinde Turan firmasına ait 3 soklu pulluk kullanılmıştır (Şekil 7.3.). Denemelere alınan pulluk uç demirlerinin ağırlık kayıpları, Precisa 8200 D marka  $10^{-1}$  gr hassasiyetli elektronik terazi kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 7.4.).

Hava şartlarından oluşabilecek etkileri en aza indirmek için denemeler iki gün içinde tamamlanmıştır. Denemelerde traktörün ilerleme hızı ortalama 6 km/h, pulluğun iş derinliği de 20 cm olarak seçilmiştir.



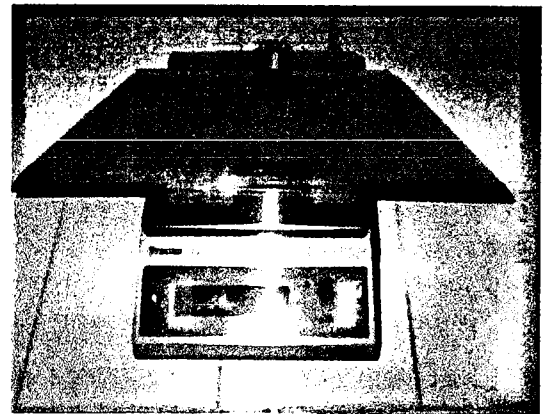
**Şekil 7.1.** Toprak neminin tayini için örnek alınışı



**Şekil 7.2.** Penetrasyon direncinin belirlenmesi



**Şekil 7.3.** Denemelerde kullanılan pulluk



**Şekil 7.4.** Precisa 8200 D hassas terazi

## 7.2. Yöntem

Laboratuvar sonuçlarına göre tarla denemelerine alınan ısıtma işlemi (920°C 1 saat tuz banyosunda karburizasyon) görmüş Erdemir 3990 malzemesinden imal edilmiş pulluk uç demirleri Turan Tarım Makinaları A.Ş.'den temin edilmiştir. Aynı firmadan temin edilen işlemsiz Erdemir 3990 çeliğine 950°C sıcaklıkta 6 saat süreyle toz ortamda borlama işlemide Vezneli A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. Uç demirleri her iki denemede de B-1,2,3 (Borlama) ve T-1,2,3 (Turan) şeklinde numaralandırılmışlardır. Denemeler birer sefer düzenlenmiş, tekrür gerçekleştirilememiştir. Tarlalar iki eşit parçaya ayrılarak sürülmüş böylece uç demirlerinin aynı mesafelerde aşındırılmaları sağlanmıştır. Pulluk uç demirlerinin yüzeyleri iyice temizlendikten sonra tartım gerçekleştirilmiş ve yüzde aşınma miktarları, ilk ağırlık değerinden sürüm sonundaki ağırlık değerinin çıkarılarak ilk ağırlığına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

## 7.3. Tarla Denemelerinin Sonuçları

Sonbahar tarla denemelerinde kullanılan her bir pulluk uç demirinin kod numarası, işlem durumu, pullukdaki yeri, ilk ağırlığı, sürüm sonu ağırlığı, toplam ağırlık kaybı, toplam sürüm alanı ve ilk ağırlığa göre aşınma miktarının yüzdesi Tablo 7.1.'de, benzer şekilde İlkbahar tarla denemelerinin sonuçlarında Tablo 7.2.'de verilmiştir.

**Tablo 7.1. Sonbahar tarla denemelerinin sonuçları**

Kod No:	İşlem Durumu	Pulluk Sıra No:	İlk Ağırlık gr	Son Ağırlık gr	Toplam Ağırlık Kaybı gr	Toplam Sürüm Alanı dekar	Aşınma Miktarı %
B-1	Borlama	1.sok	3488.8	3464.5	24.3	20	0.6965
B-2	Borlama	2.sok	3546.6	3522.8	23.8		0.6710
B-3	Borlama	3.sok	3502.7	3474.5	28.2		0.8050
T-1	Isıl İşlem	1.sok	3430.5	3407.3	23.2		0.6762
T-2	Isıl İşlem	2.sok	3554.9	3530.7	24.2		0.6807
T-3	Isıl İşlem	3.sok	3546.1	3516.9	29.2		0.8234

**Tablo 7.2. İlkbahar tarla denemelerinin sonuçları**

Kod No:	İşlem Durumu	Pulluk Sıra No:	İlk Ağırlık gr	Son Ağırlık gr	Toplam Ağırlık Kaybı gr	Toplam Sürüm Alanı dekar	Aşınma Miktarı %
B-1	Borlama	1.sok	3528.3	3502.5	25.8	20	0.7312
B-2	Borlama	2.sok	3525.1	3503.4	21.7		0.6155
B-3	Borlama	3.sok	3530.2	3503.8	26.4		0.7478
T-1	Isıl İşlem	1.sok	3450.6	3425.3	25.3		0.7332
T-2	Isıl İşlem	2.sok	3488.3	3465.7	22.6		0.6478
T-3	Isıl İşlem	3.sok	3487.7	3458.0	29.7		0.8515

#### 7.4. Tarla Deneme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonbahar ve İlkbahar tarla denemeleri sonunda yüzde aşınma miktarları her bir sıra için birbirlerine göre oranlanarak karşılaştırıldığında; Sonbahar tarla denemeleri sonunda birinci sıradaki ısıl işlemlili uç demiri borlanmış uç demirine göre 1.03 kat iyi çıkarken, ikinci ve üçüncü sıradaki borlanmış uç demirleri ısıl işlemlilere göre ikinci sırada 1.014 üçüncü sırada 1.022 kat iyi sonuç vermiştir. İlkbahar tarla denemelerinde tüm sıralarda borlanmış uç demirlerinin ısıl işlemlili uç demirlerine göre, birinci sırada 1.003, ikinci sırada 1.052, üçüncü sırada ise 1.138 kat iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Tüm sıralardaki yüzde aşınma miktarları ele alındığında borlanmış uç demirleri, ısıl işlemlili uç demirlerine göre Sonbahar denemelerinde 1.002 kat, İlkbahar denemelerinde 1.064 kat iyi sonuç vermiştir.

Sonbahar ve İlkbahar denemelerinde yüzde aşınma miktarlarına göre en fazla aşınma üçüncü sıradaki uç demirlerinde gözlenmiştir. Sonbahar denemelerinde ısıl işlemlili uç demirleri haricinde diğer denemelerde üçüncü sıradaki uç demirlerini sırasıyla birinci ve ikinci sıradaki uç demirleri izlemiştir.

## 8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Borlanmış, ısıtılmış ve işlemsiz Erdemir 3990 çeliği ile seçilen beş farklı sade karbon çeliğinin (AISI 1008, 1030, 1040, 1045, 1050) borlanmış ve işlemsiz numunelerinin laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre belirlenen şartlarda imal edilmiş pulluk uç demirlerinin tarla deneyleri sonunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Erdemir 3990 çeliğiyle yapılan aşınma deneylerinde, borlama işlem sıcaklığının ve süresinin artmasıyla aşınma kayıplarının azaldığı belirlenmiştir. Aynı sıcaklık değerinde artan işlem süresinin aşınma dayanımında daha etkili olduğu gözlenmiştir.
- Laboratuvarda yapılan aşınma deneylerinde, Aluminyum Oksitli aşındırıcıların Silisyum Karbürü aşındırıcılara göre borlanmış çelikleri daha az aşındırdığı tespit edilmiştir. Varyans analizleri ana faktör etkileri grafikleri incelendiğinde aşındırıcılar arasındaki belirgin fark bu bulguyu desteklemektedir.
- Isıl işlem görmüş numuneler, Silisyum Karbürü zımpara kağıtlarıyla yapılan aşınma deneylerinde borlanmış tüm numunelerden daha az aşınırken, Aluminyum Oksitli zımpara kağıtları karşısında borlanmış tüm numunelere göre daha çok aşınmışlardır.
- Aluminyum Oksitli zımpara kağıdının işlemsiz çelikleri Silisyum Karbürü zımpara kağıdına göre daha çok aşındırdığı tespit edilmiştir. İşlemsiz Erdemir 3990 çeliğinin iki aşındırıcı karşısında işlemsiz sade karbonlu çeliklerden daha az aşındığı belirlenmiştir.
- Aluminyum Oksit ve Silisyum Karbürü aşındırıcı kağıtlar karşısında gözlenen farklı aşınma davranışları, Habig'in (1983) ve Wang ve Hutchings'in (1988) çalışmalarıyla benzerlikler sergilemektedir.
- Laboratuvar deneyleri sonunda, Aluminyum Oksitli zımpara kağıdı karşısında en az aşınan 950°C sıcaklıkta 6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin aynı malzemenin ısıtılmış numunelerine göre 6.31 kat, Silisyum Karbürü zımpara

kağıdı karşısında en az aşınmayı sergilemiş olan ısıtılmış Erdemir 3990 numunelerin de aynı malzemenin 950°C sıcaklıkta 6 saat borlanmış numunelerine göre 2.40 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir.

- İşlemsiz sade karbonlu çeliklerin karbon oranı arttıkça yüzey sertlik değerlerinin arttığı ve abrazyon aşınma kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Borlama sonucu çeliklerin işlemsiz hallerine göre oldukça yüksek yüzey sertliği değerleri elde edilmiştir. Sertlikteki bu artış, aşınma dayanımlarını da olumlu yönde etkilemiştir.
- Erdemir 3990 malzemesinde farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan borlama işlemi sonunda, artan sıcaklık ve sürenin yüzey sertlik değerlerinde belirgin farklılıklar göstermediği gözlemlenmiştir.
- Belirlenen optimum borlama sıcaklığında borlanan çeliklerde, artan işlem süresinin ve işlemin uygulandığı malzemedeki karbon oranı artışının ölçülen yüzey sertlik değerleri üzerinde çok etkili olmadığı tespit edilmiştir.
- Erdemir 3990 malzemesinde, borlama işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça bor tabakası kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Optimum sıcaklık değerinde borlanan sade karbonlu çeliklerde de artan işlem süresinin tabaka kalınlığını arttırdığı gözlemlenmiştir. Tüm malzemelerde karbon oranı arttıkça borlama sonucu elde edilen tabaka kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir.
- Optimum borlama sıcaklığında borlanmış tüm numunelerin aşındırıcı kağıtlar karşısında sergiledikleri aşınma kayıpları incelendiğinde, borlu tabaka kalınlığının artmasıyla aşınma dayanımı arasında doğru bir orantı olmadığı belirlenmiştir.
- Ulusoy'un 1977 yılındaki çalışmasında, pulluk uç demirleri için üç soklu pulluğun tüm uç demirlerindeki toplam aşınma miktarı 150 gr/ha olarak belirtilmiştir. Tarla denemeleri sonunda borlanmış ve ısıtılmış üç soklu pulluğun uç demirlerinde elde edilen değerler, Sonbahar denemeleri sonunda

borlanmış pulluk uç demirlerinde 76.3 gr/ha, ısıtılmış demirlerde 76.6 gr/ha, İlkbahar denemeleri sonunda borlanmış pulluk uç demirlerinde 73.9 gr/ha, ısıtılmış demirlerde de 77.6 gr/ha toplam aşınma miktarı olarak bulunmuştur. Hektar başına gr cinsinden toplam aşınma miktarları ele alındığında, borlanmış ve ısıtılmış demir uygulanmış pulluk uç demirlerinin Ulusoy'un bulduğu değerlerle karşılaştırıldığında, yaklaşık olarak %50 oranında az aşınma sergilediği belirlenmiştir. Bunun nedenleri göz önüne alındığında, toprak işleyen aletlerde özellikle uç demirlerinde aşınma miktarlarını azaltmak için kullanılan malzemelerdeki gelişmeler ve bu malzemelerde uygulanan ısıtılmış demir yöntemleri üzerindeki iyileştirme çalışmalarının olumlu etkisi olarak açıklanabilir.

- Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde farklı aşındırıcılar karşısında birbirlerine göre oldukça iyi aşınma dayanımı sergileyen borlanmış ve ısıtılmış demir 3990 malzemesinden imal edilen pulluk uç demirleri tarla şartlarında denendiğinde, borlanmış uç demirlerinin ısıtılmış demirlerle göre sonbahar sürümlerinde ortalama 1.002 kat, ilkbahar sürümlerinde ise 1.064 kat daha az aşındıkları tespit edilmiştir.

Borlama işlemi uygulanmış pulluk uç demirlerinin piyasada bulunan pulluk uç demirlerine göre az da olsa üstünlük sağlamasına rağmen pahalı kimyasallarından, yeni yatırım gerektirmesinden, daha uzun süreyle ve daha yüksek sıcaklıkta işlem gerektirmesinden dolayı günümüz koşullarında pulluk uç demirlerine uygulanabilir bir yüzey sertleştirme yöntemi olmadığına karar verilmiştir.

Borlama, özellikle bor verici kimyasalların ucuzlaması, gelişen teknolojiyle daha düşük işlem sıcaklık ve sürelerinin yeni borlama yöntemleriyle gündeme gelmesi durumunda pulluk uç demirleri ve diğer toprak işleme aletleri işleyici organları için alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemi olarak gelecekte ele alınarak araştırılabilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akdoğan, A. ve B. Eker, 2000, Tarım Makinalarında Korozyonun Etkileri ve Çözüm Yolları, Malzeme 2000, 8. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı, 38-47.
- Anonim, 2001a, Bor Dosyası, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 1-2, 6-25.
- Anonim, 2001b, Boronizing, Bodycote Thermal Processing–Boronizing Datasheet, 2 p.
- Anonim, 2002, Bor, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 35, 414, 38-48.
- Anonim, 2003, 2001 Yılı Genel Tarım Sayımı Geçici Sonuçları, Devlet İstatistik Enstitüsü Web Sayfası.
- Axén, N. and K.-H. Zum Gahr, 1992, Abrasive Wear of TiC-Steel Composite Clad Layers on Tool Steel, Wear, 157, 189-201.
- Badini, C., C. Gianoglio and G. Pradelli, 1987, The Effects of Carbon, Chromium and Nickel on the Hardness of Borided Layers, Surface and Coatings Technology, 30, 157-170.
- Balla, J. and P. Seckar, 1981, The Utilization of a New Method of Evaluating Worn Edge by Systems Approach to Solving the Problem, Poland Eurotrib 81, 3rd Int. Tribology Process in Solid Body Contact Areas, I/A, 17-23.
- Bayhan, Y., 1996, Trakya Bölgesinde İmal Edilen Bazı Toprak İşleme Aletlerinin Uç Demirlerindeki Aşınma ve Aşınmaya Etkili Bazı Etkenlerin Saptanması Üzerinde Bir Araştırma, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 84 s.
- Bel'skii, E.I., M.V. Sitkevich, V.A. Rogov and V.P. Kryukov, 1980, Chemicothermal Treatment of Dies, Metal Science and Heat Treatment (USSR), 22, 5-6, 398-401.
- Berzina, I.G., E.B. Gusev, G.N. Fedina and V.M. Fedin, 1984, Investigation of Boron Diffusion During Boronizing of Engineering Steel 45, Phys. Met. Metall., 57, 5, 81-84.
- Biddulph, R.H., 1977, Boronizing for Erosion Resistance, Thin Solid Films, 45, 341-347.
- Bindal, C., 1991, Az Alaşımlı ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzey Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 149 s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bozkurt, N., 1984, Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 113 s.
- Budinski, K.G., 1993, The Wear Resistance of Diffusion Treated Surfaces, *Wear*, 162-164, 757-762.
- Çapan, L. and B. Alnıpak, 2000, Erosion-Corrosion Resistance of Boronised Steels, 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Özel Sayısı, 24, 126.
- Çelik, O.N., 1996, Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Ostemperleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli ile Değerlendirilmesi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 123 s.
- Çetinkaya, C., 1994, Pulluk Uç Demirlerinin Aşınmaya Dayanımlarının Belirlenmesi ve İyileştirme İmkanları Üzerinde Araştırmalar, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 96 s.
- Evtifeev, S.L. and A.S. Sin'kovskii, 1985, Method of Improving the Heat Resistance of Parts Working Under Conditions of Discontinuous Lubrication, *Metal Science and Heat Treatment (USSR)*, 27, 7-8, 627-629.
- Eyre, T.S., 1975, Effect of Boronising on Friction and Wear of Ferrous Metals, *Wear*, 34, 383-397.
- Fiedler, H.C. and R.J. Sieraski, 1971, Boriding Steels for Wear Resistance, *Metal Progress*, February, 101-107.
- Fichtl, W., N. Trausner and A.G. Matuschka, 1987, Boronizing with Ekabor, *Elektroschmelzwerk Kempten GmbH*, 6 p.
- Foley, A.G., P.J. Lawton, A.W. Barker and V.A. Mclees, 1984, The Use of Alumina Ceramic to Reduce Wear of Soil-Engaging Components, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30, 37-46.
- Foley, A.G. and R. Reznicek, 1988, Reducing Wear of Soil Engaging Equipment, *Proc. of the 3rd Int. Conf. Physical Properties of Agricultural Materials and Products*, Prague, 991-998.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Frantsuzova, L.P., A.V. Vladimirov, T.E. Chetchasova, L.A. Lisitskaya and A.I. Fal'kin, 1984, Increasing the Impact Strength of Constructional Steels by Thermocycling Treatment, *Metal Science and Heat Treatment (USSR)*, 26, 3-4, 269-272.
- Gopalakrishnañ, P., P. Shankar, R.V. Subba Rao, M. Sundar and S.S. Ramakrishnan, 2001, Laser Surface Modification of Low Carbon Borided Steels, *Scripta Materialia*, 44, 5, 707-712.
- Göktürk, B., 1995, Kültivatör Uç Demirlerine Uygulanan Farklı Isıl İşlemlerin Mekanik Özelliklere Etkilerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Araştırma, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 60 s.
- Grachev, S.V., L.A. Mal'tseva, T.V. Mal'tseva, A.S. Kolpakov and M.Y. Dmitriev, 1999, Boronizing and Borochromizing in a Vibrofluidized Bed, *Metal Science and Heat Treatment*, 41, 11-12, 465-468.
- Habig, K.-H. and C. Fischer, 1981, Wear Behaviour of Boride Layers on Alloyed Steels, *Tribology International*, August, 209-215.
- Habig, K.-H., 1983, Wear, Corrosion and Fatigue Behaviour of Steels Coated with Hard Surface Layers, *Proc. Int. Conf. On Wear of Materials, ASME*, 288-297.
- Hunger, H.J. and G. Trute, 1994, Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface Layers, *Heat Treatment of Metals*, 2, 31-39.
- Hunger, H.J. and G. Löbig, 1997, Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifluoride, *Thin Solid Films*, 310, 244-250.
- Hurricks, P.L., 1972, Review Paper: Some Aspects of the Metallurgy and Wear Resistance of Surface Coatings, *Wear*, 22, 291-320.
- Hurricks, P.L., 1973, Some Metallurgical Factors Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels. A Review, *Wear*, 26, 285-304.
- Hutchings, I.M., 1992, Surface Engineering in Tribology, Chapter 8, In: *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold Pub., London, 273 p.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ivanov, A.S. and A.N. Sokolov, 1998, Surface Hardening of Low-Carbon Martensitic Steels by Boronizing, *Metal Science and Heat Treatment*, 40, 7-8, 266-268.
- Jain, V. and G. Sundararajan, 2002, Influence of the Pack Thickness of the Boronizing Mixture on the Boriding of Steel, *Surface and Coatings Technology*, 149, 21-26.
- Karakan, M., A. Alsarar ve A. Çelik, 2002, Plazma Borlama, *Mühendis ve Makine*, 43, 512, 51-54.
- Karamış, M.B., 1985, Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 120 s.
- Keçecioglu, G. ve E. Ulusoy, 1975, Ege Bölgesinde Yapılan Bazı Pulluk Uç Demirleri Üzerinde Bir Araştırma, E.Ü.Z.F. Yayınları No:278, E.Ü. Matbaası, Bornova, İzmir, 56 s.
- Khruschov, M.M., 1974, Principles of Abrasive Wear, *Wear*, 28, 69-88.
- Kızılelma, S., 1987, Çalışma Koşullarında Pulluk Uç Demirinde Oluşan Deformasyon ve Gerilme Değerlerinin Üç Elemanlı Dikdörtgen Şekilli Strain Gage ile Saptanması, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 27 s.
- Komaç, O.Ş., B. Par, A. Özsoy ve K. Taşçı, 1988, Kulaklı Pulluk Malzemelerinin Mekanik Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, Tarımsal Mekanizasyon 11.Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, 135-145.
- Kufel, K. and K. Wierzcholski, 1993, The Wear of the Plough Bodies with Rigid and Elastic Connections to the Frame, *Wear*, 162-164, 1002-1003.
- Kushwaha, R.L., L. Chi and C. Roy, 1990, Investigation of Agricultural Tools with Plasma-Sprayed Coatings, *Tribology International*, 23, 5, 297-300.
- Kushwaha, R.L. and J. Shi, 1991, Investigation of Wear of Agricultural Tillage Tools, *Lubrication Engineering*, 47, 3, 219-222.
- Kushwaha, R.L. and P. Hua, 1992, Wear Characteristics of Regular and Hardfaced Cultivator Sweeps, *Lubrication Engineering*, 48, 11, 899-904.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Küper, A., X. Qiao, H.R. Stock and P. Mayr, 2000, A Novel Approach to Gas Boronizing, *Surface and Coatings Technology*, 130, 87-94.
- Mal, K.K. and S.E. Tarkan, 1973, Diffused Boron Ups Hardness, Wear Resistance of Metals, *Materials Engineering*, 77, 70-71.
- Matuschka, A.G., 1980, *Boronizing*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 100 p.
- Meriç, C., S. Şahin and S.S. Yılmaz, 2000, Investigation of the Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-Yielding Substances, *Materials Research Bulletin*, 35, 2165-2172.
- Misra, A. and I. Finnie, 1982, A Review of the Abrasive Wear of Metals, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 104, 94-101.
- Mohsenin, N., H.L. Womochel, D.J. Harvey and W.M. Carleton, 1956, Wear Tests of Plowshare Materials, *Agricultural Engineering*, 816-820.
- Moore, M.A., 1974a, A Review of Two-Body Abrasive Wear, *Wear*, 27, 1-17.
- Moore, M.A., 1974b, The Relationship Between the Abrasive Wear Resistance, Hardness and Microstructure of Ferritic Materials, *Wear*, 28, 59-68.
- Moore, M.A., 1975a, Abrasive Wear by Soil, *Tribology International*, 105-110.
- Moore, M.A., 1975b, The Abrasive Wear Resistance of Surface Coatings, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 20, 167-179.
- Mutaf, E., 1974, *Tarım Alet ve Makinaları I. Cilt*, Ege Üniversitesi Ziraat Fak. Yayınları No:218, İzmir, 414 s.
- Mutaf, E. ve E. Ulusoy, 1977, Toprak İşleme Aletlerinin İş Organlarında Kullanılan Bazı Çeliklerin Farklı Isıl İşlemlere Göre Laboratuar ve Tarla Şartlarında Aşınma Dirençleri, *TBTAK Yayınları No:337, TOAG Seri No:61*, Ankara, 64 s.
- Mutton, P.J. and J.D. Watson, 1978, Some Effects of Microstructure on the Abrasion Resistance of Metals, *Wear*, 48, 385-398.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nair, F., 1996, Koruyucu Gaz Atmosferinde Macun Borlama Tekniği ile Çelik Yüzeylerinin Sertleştirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 62 s.
- Nair, F., M.B. Karamış ve A. Taşdemirci, 2000, Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi, 8.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Denizli, 334-343.
- Owsiak, Z., 1999, Wear of Spring Tine Cultivator Points in Sandy Loam and Light Clay Soils in Southern Poland, Soil and Tillage Research, 50, 333-340.
- Özbek, İ. and C. Bindal, 2002, Mechanical Properties of Boronized AISI W4 Steel, Surface and Coatings Technology, 154, 14-20.
- Özemer, Y. ve T. Kurtay, 1977, Tarım Makinelerinin Esasları, İTÜ Müh.-Mim. Fak. Yayınları No: 116, İstanbul, 540 s.
- Özsoy, A., 1991, Çeliğin Borlanması ve Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 100 s.
- Palombarini, G. and M. Carbucchio, 1987, Growth of Boride Coatings on Iron, Journal of Materials Science Letters, 6, 415-416.
- Par, B. ve O.Ş. Komaç, 1990, Tarımsal Mekanizasyonda Östenitik Mangan Çeliğinin Aşınma Direncine Yüzey Basıncının Etkisi, 4. Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı, 803-813.
- Par, B., 1995, Toprak İşleme Aletleri, Osmangazi Üniversitesi Sirihisar Meslek Yüksek Okulu Yayınları No:1, Eskişehir, 81 s.
- Permyakov, V.G., V.F. Loskutov, I.Kh. Trush and V.N. Pisarenko, 1974, Boriding of Tool Steels in Commercial Boron Carbide, Metal Science and Heat Treatment (USSR), 16, 1-2, 160-162.
- Polat, Ş., 1994, Farklı Alaşımlardaki Çeliklerden Üretilen Kültivatör Uç Demirlerinin Aşınma Özelliklerinin Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 37 s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Quirke, S., O. Scheffler and C. Allen, 1988, An Evaluation of the Wear Behaviour of Metallic Materials Subjected to Soil Abrasion, *Soil and Tillage Research*, 11, 27-42.
- Rie, K.-T., 1999, Recent Advances in Plasma Diffusion Processes, *Surface and Coatings Technology*, 112, 56-62.
- Richardson, R.C.D., 1967, The Wear of Metallic Materials by Soil-Practical Phenomena, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12, 1, 22-39.
- Rus, J., C. Luis De Leal and D.N. Tsipas, 1985, Boronizing of 304 Steel, *Journal of Materials Science Letters*, 4, 558-560.
- Sarı, N.Y. ve E. Kaluç, 1996, Endüstride Aşınma Problemleri, *Makine ve Metal Teknolojisi*, 50, 64-68.
- Sarı, N.Y., Ş.Y. Şirin, E. Kaluç ve K. Tülbenççi, 1997, Makine Parçalarının Aşınmasına Karşı Modern Yüzey İşlemleri (1), *Makine Magazin*, 14, 48-51.
- Selçuk, B., R. İpek, M.B. Karamış and V. Kuzucu, 2000, An Investigation on Surface Properties of Treated Low Carbon and Alloyed Steels (Boriding and Carburizing), *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 310-317.
- Shadrichev, E.V. and S.I. Rumyantsev, 1982, Wear Kinetics of a Two-Phase Boride Layer, *Metal Science and Heat Treatment (USSR)*, 24, 7-8, 495-498.
- Singhal, S.C., 1977, A Hard Diffusion Boride Coating for Ferrous Materials, *Thin Solid Films*, 45, 321-329.
- Soydan, Y., 1996, Katı Ortamda Bor Yayınımı ile Yüzeyi Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 141 s.
- Subrahmanyam, J. and K. Gopinath, 1984, Wear Studies on Boronized Mild Steel, *Wear*, 95, 287-292.
- Sungur, N., 1974, Tarım Makinaları İşletme Tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fak. Yayınları No:215, İzmir, 96 s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

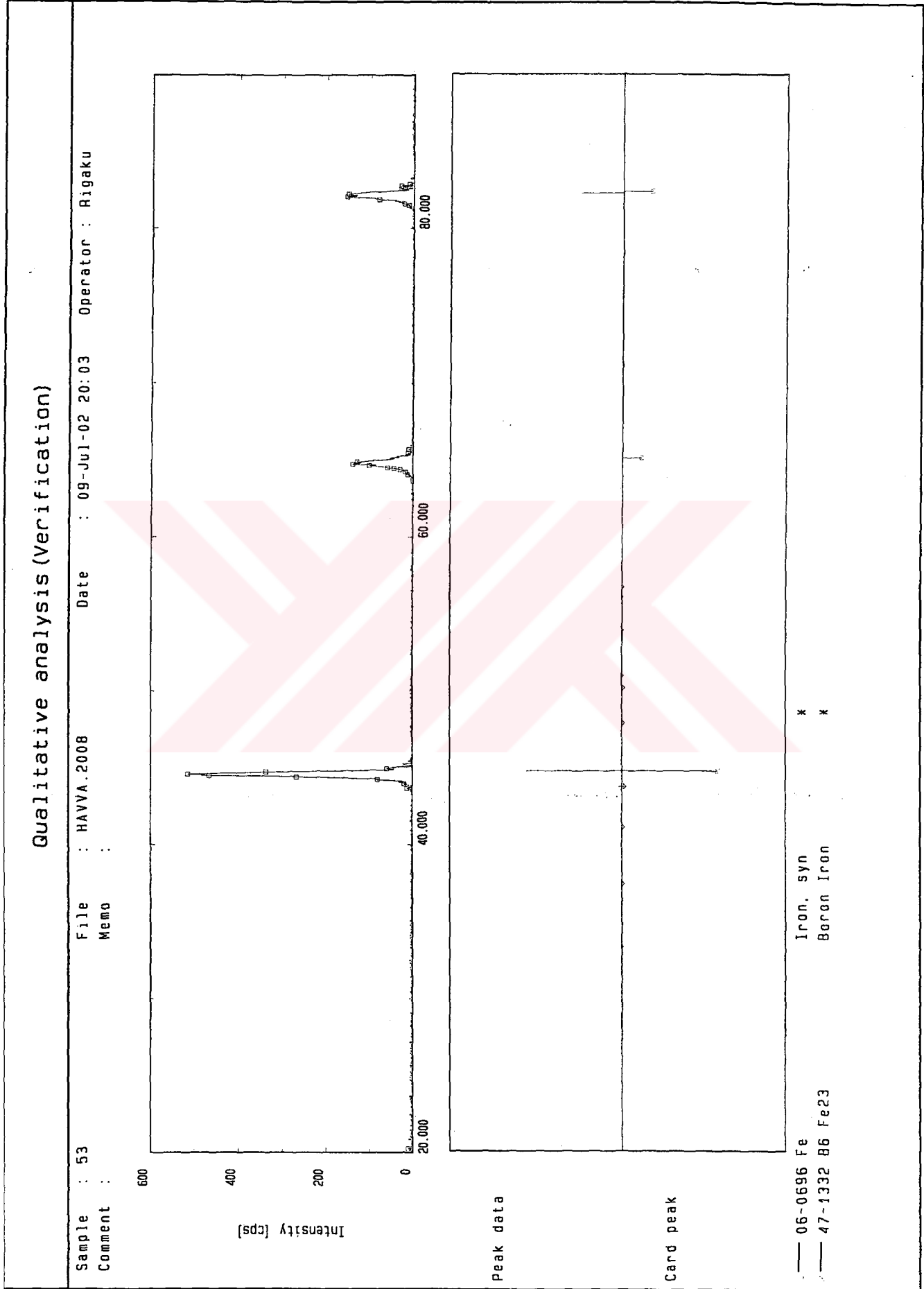
- Şen, Ş. ve C. Bindal, 1999, AISI 5140 Çeliğinin Yüzeyinde Oluşan Borürlerin Bazı Özellikleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Denizli Şubesi Bilim Günleri Bildiri Kitabı, 670-675.
- Şen, Ş., İ. Özbek, U. Şen and C. Bindal, 2001, Mechanical Behavior of Borides Formed on Borided Cold Work Tool Steel, Surface and Coatings Technology, 135, 173-177.
- Tarhuni, M., 1996, Bazı Kültivatör Uç Demirlerinde Aşınmanın Azaltılabilmesini Sağlayan Yöntemler Üzerinde Araştırmalar, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bornova, İzmir, 100 s.
- Tian, Z., W. Sun, M. Shang, X. Jiang, W. Han and L. Li, 1989, Application of Boronizing Technology on Ploughshares and Study on the Abrasive Wear Characteristics Under Low Stress of Boronized Layer, Proceedings of the International Symposium on Agricultural Engineering (89-ISAE), Beijing, 248-249.
- Tsipas, D.N. and J. Rus, 1987, Boronizing of Alloy Steels, Journal of Materials Science Letters, 6, 118-120.
- Uetz, H. and J. Föhl, 1978, Wear as an Energy Transformation Process, Wear, 49, 253-264.
- Vasil'eva, E.V., I.I. Yurkov, A.M. Uralpov and G.A. Mel'nichuk, 1985, Structure and Properties of Borided Chromium Stainless Steels, Metal Science and Heat Treatment (USSR), 27, 5-6, 391-394.
- Venkatesan, K., C. Subramanian and E. Summerville, 1997, Three-Body Abrasion of Surface Engineered Die Steel at Elevated Temperatures, Wear, 203-204, 129-138.
- Vijh, A.K., 1975, The Influence of Solid State Cohesion of Metals and Non-Metals on the Magnitude of their Abrasive Wear Resistance, Wear 35, 205-209.
- Wang, A.G. and I.M. Hutchings, 1988, Mechanisms of Abrasive Wear in a Boronized Alloy Steel, Wear, 124, 149-163.
- Yaldız, S., 1990, Bazı Toprak İşleme Aletlerinin İşleyici Organlarında Uygulanan Isıl İşlemler ve Uygun Isıl İşlemlerin Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 63 s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yoon, J.H., Y.K. Jee and S.Y. Lee, 1999, Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304, *Surface and Coatings Technology*, 112, 71-75.
- Yu, H.-J. and S.D.Bhole, 1990, Development of a Prototype Abrasive Wear Tester for Tillage Tool Materials, *Tribology International*, 23, 5, 309-316.
- Zagulyaeva, S. V., A. K. Denisyuk and L. S. Makashova, 1999, Boronizing and Resistance of Steel and Cast Iron to Thermal Erosion, *Metal Science and Heat Treatment*, 41, 11-12, 473-475.

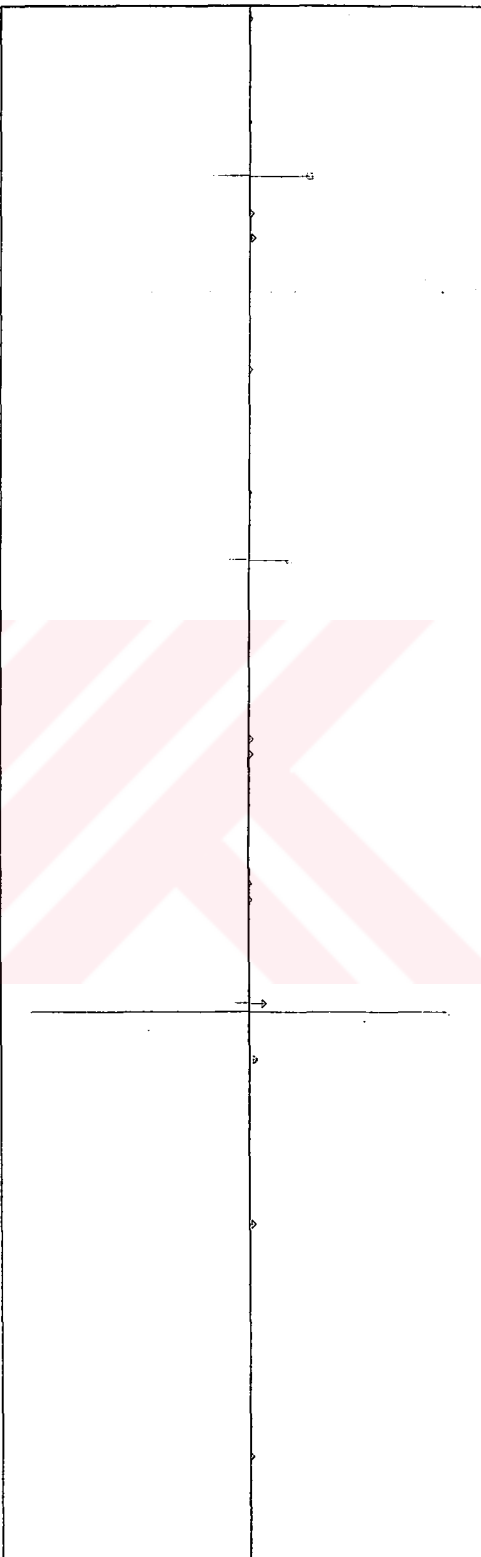


## EK - A. X-Işınları Analizlerinin Sonuçları



### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 56  
Comment :  
File : HAVVA.2009  
Date : 09-Jul-02 20:45  
Operator : Rigaku

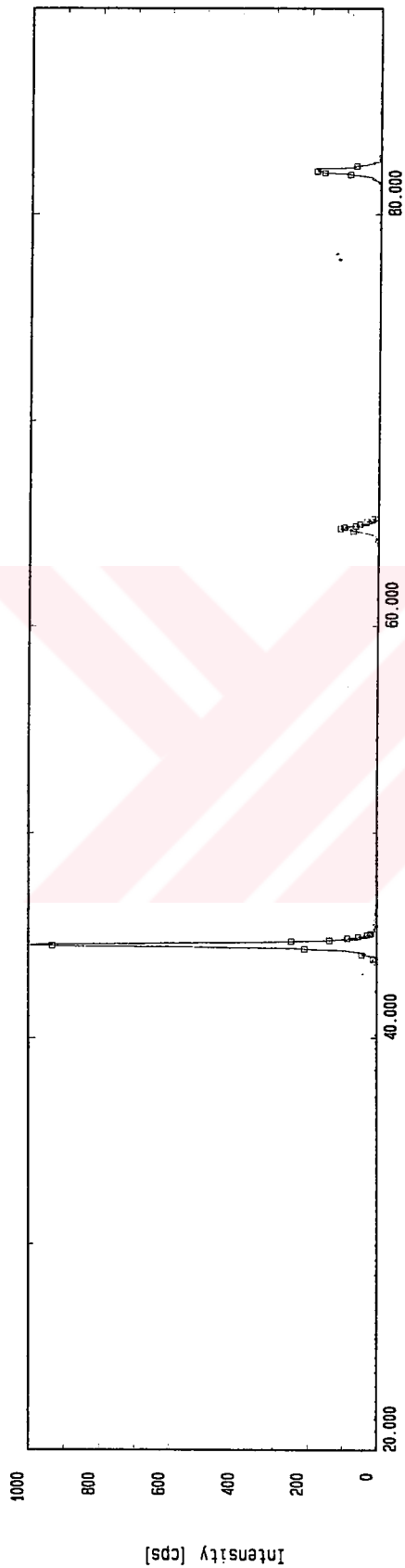


— 06-0696 Fe \*  
— 36-1332 Fe2 B \*

Şekil A.2. 900°C-4 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 59  
Comment :  
File : HAVVA.2007  
Date : 09-Jul-02 19:21  
Operator : Rigaku



Peak data

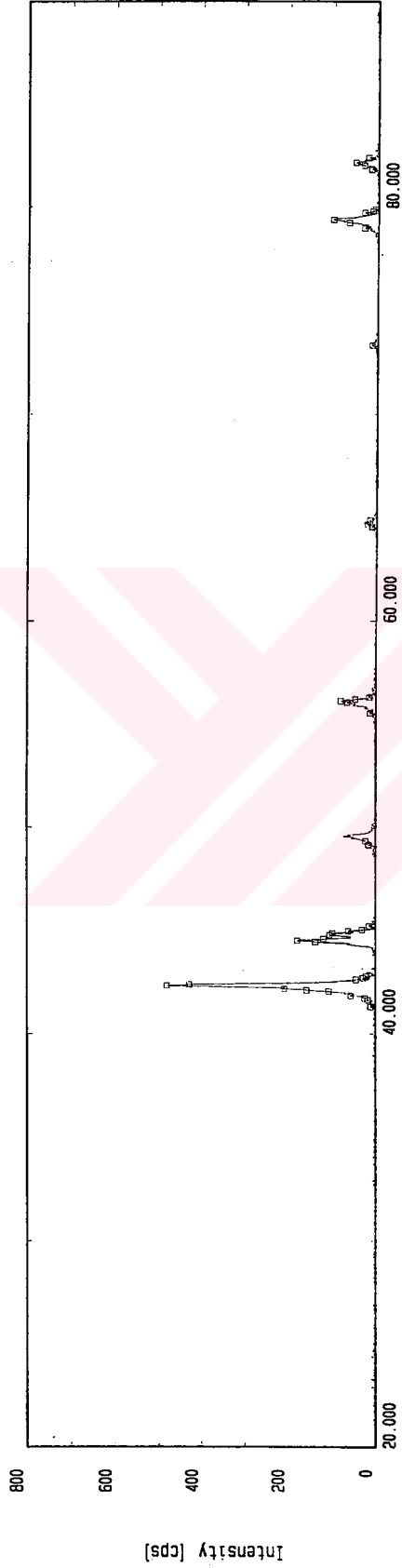
Card peak

06-0696 Fe Iron, syn \*  
36-1332 Fe2 B Boron Iron \*

Şekil A.3. 900°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 62  
 Comment :  
 File : HAVVA.1993  
 Date : 09-Jul-02 11:52  
 Operator : Rigaku



Peak data

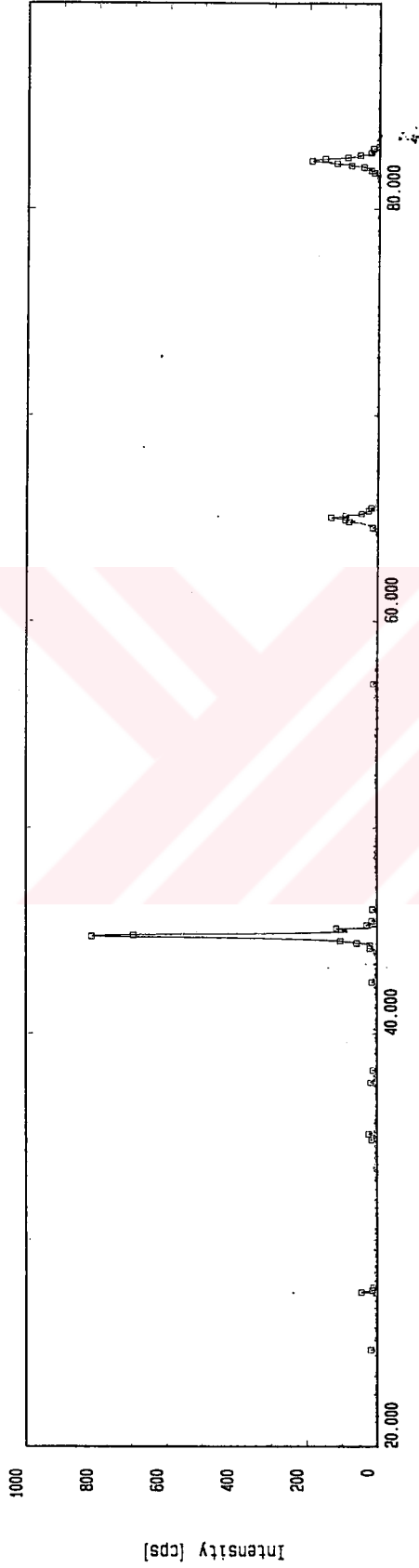
Card peak

06-0696	Fe	*
36-1332	Fe2 B	*
39-1314	Fe2 B	I
	Iron, syn	*
	Boron Iron	*
	Boron Iron	I

Şekil A.4. 950°C-2 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 82  
 Comment :  
 File : HAVVA.1994  
 Date : 09-Jul-02 12:28  
 Operator : Rigaku



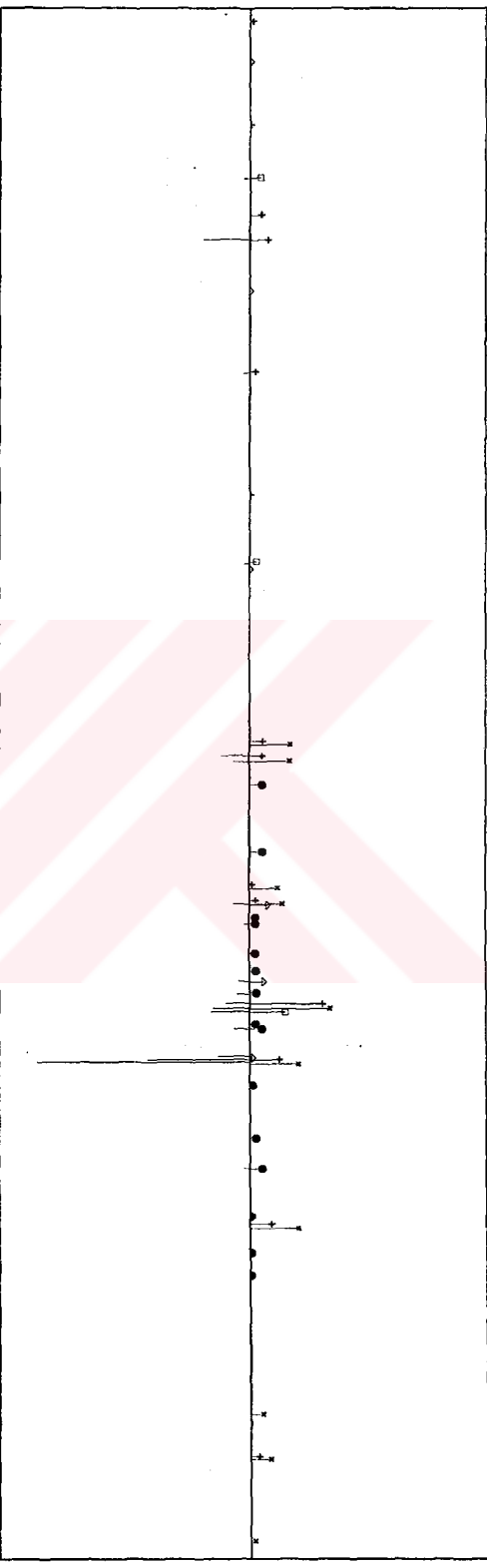
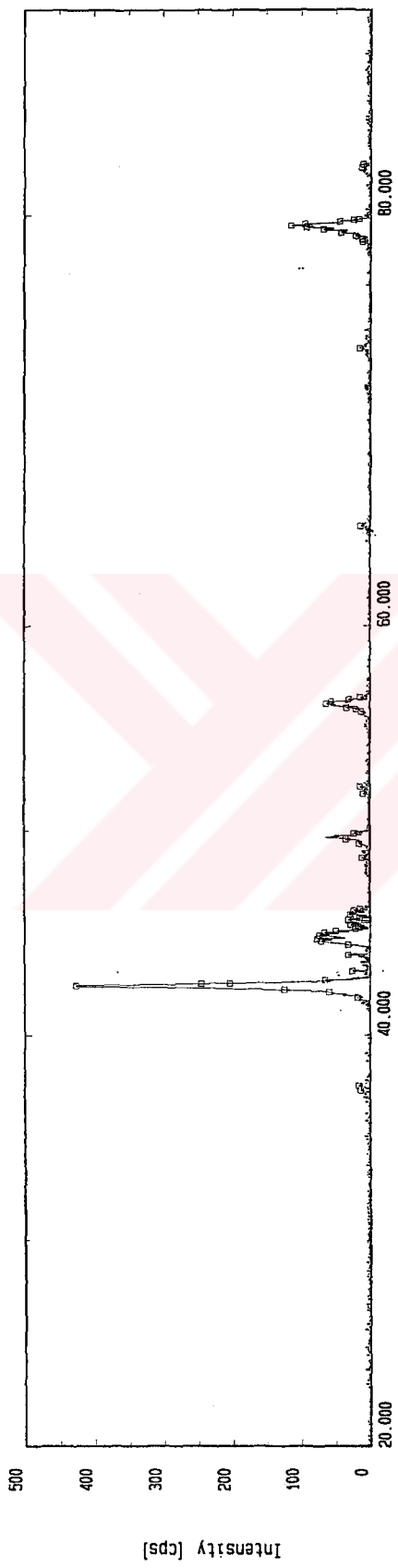
Peak data

Card peak

06-0696 Fe	Iron, syn	*
36-1332 Fe2 B	Boron Iron	*
39-1314 Fe2 B	Boron Iron	I

Qualitative analysis (Verification)

Sample : 68  
 Comment :  
 File : HAVVA.1992  
 Date : 09-Jul-02 11:11  
 Operator : Rigaku



Peak data

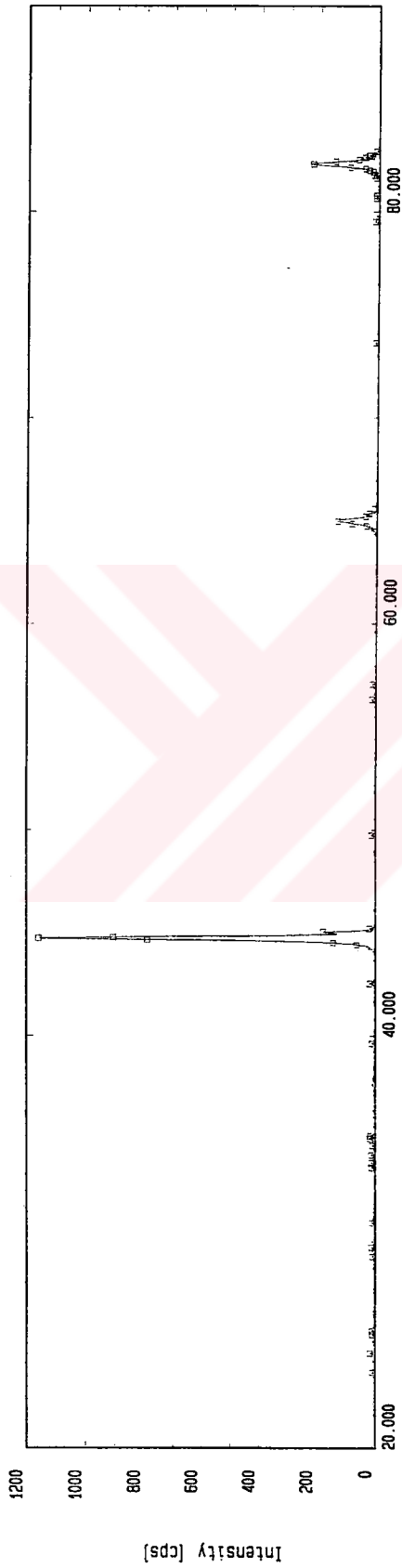
Card peak

—	06-0696	Fe	
∨	34-0529	Fe	
+	36-1332	Fe2 B	*
●	35-1339	B Iron	0
X	39-1314	Fe2 B	I
		Iron, syn	*
		Iron	
		Boron Iron	*
		Boron Iron	0
		Boron Iron	I

Şekil A.6. 950°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 71  
Comment :  
File : HAVVA.2004  
Date : 09-Jul-02 16:13  
Operator : Rigaku



Peak data

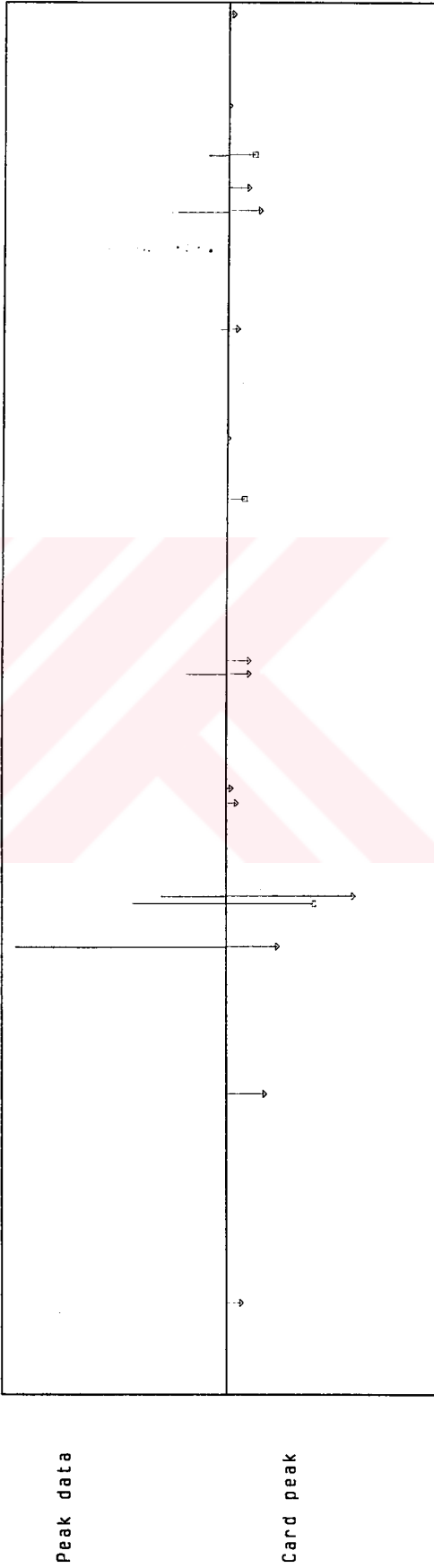
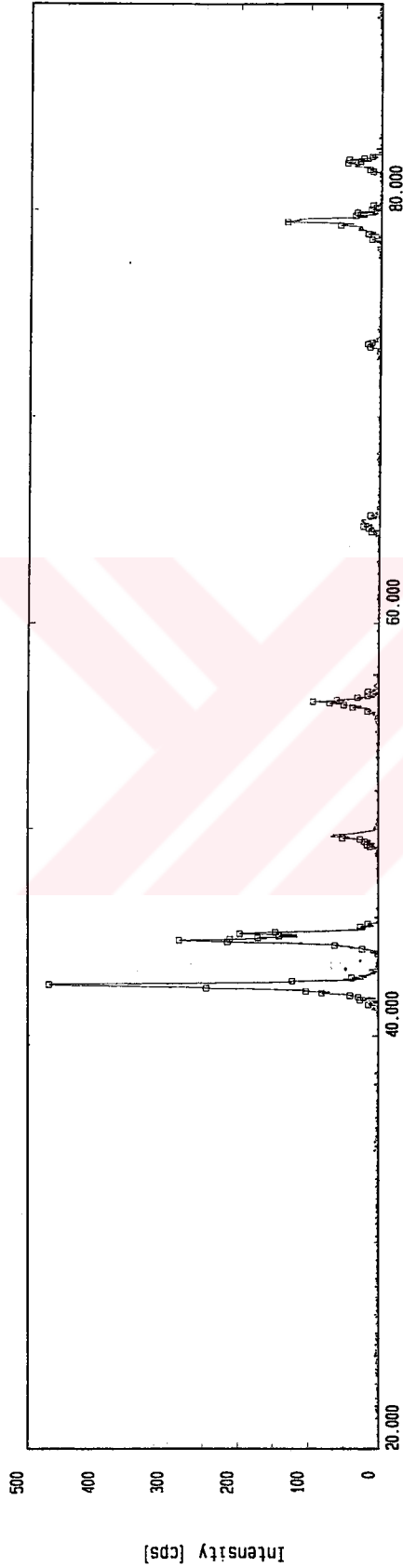
Card peak

—	06-0696 Fe	:	Iron, syn	*
—	36-1332 Fe2 B	:	Boron Iron	*

Şekil A.7. 1000°C-2 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

Qualitative analysis (Verification)

Sample : 74  
 Comment :  
 File : HAVVA.2006  
 Date : 09-Jul-02 18:45  
 Operator : Rigaku

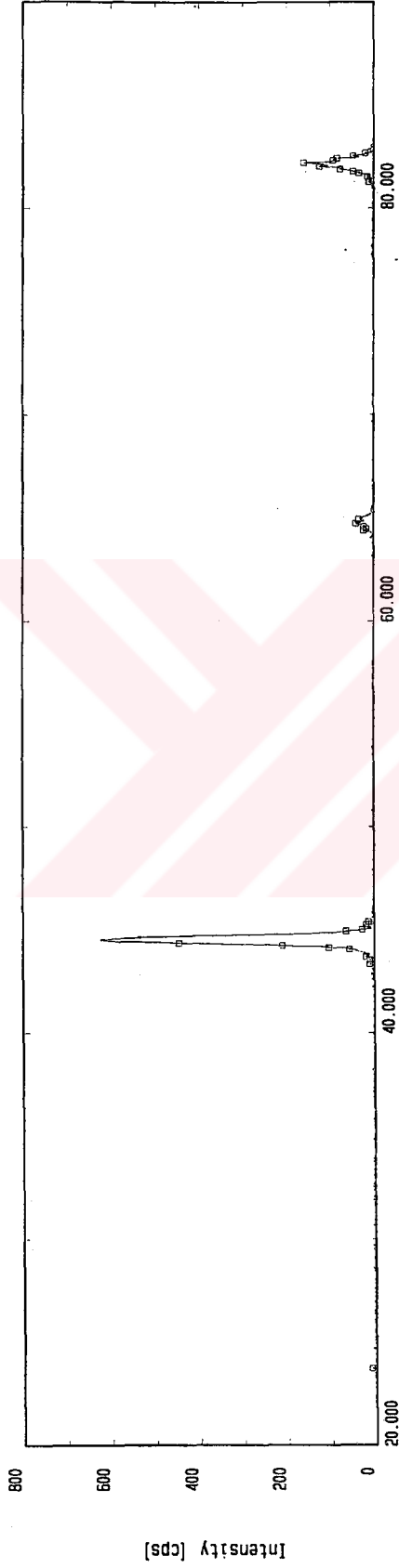


— 06-0696 Fe Iron, syn \*  
 - - 36-1332 Fe2 B Boron Iron x

Şekil A.8. 1000°C-4 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

### Qualitative analysis (Verification)

Sample : 77  
Comment :  
File : HAVVA.2003  
Date : 09-Jul-02 15:36  
Operator : Rigaku



Peak data

Card peak

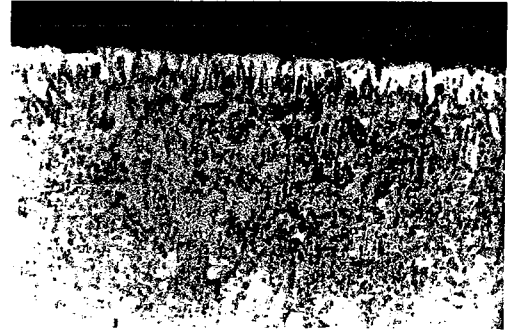
— 06-0696 Fe \*  
— 36-1332 Fe2 B \*

Iron, syn \*  
Boron Iron \*

Şekil A.9. 1000°C-6 saat borlanmış Erdemir 3990 numunelerin X-ışınları grafikleri

**EK - B. Mikro Yapı Fotoğrafları**

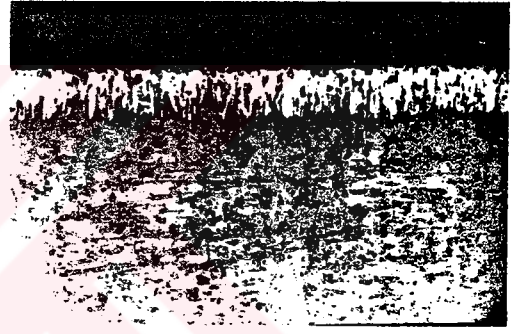
(a)



(b)



(c)



(d)

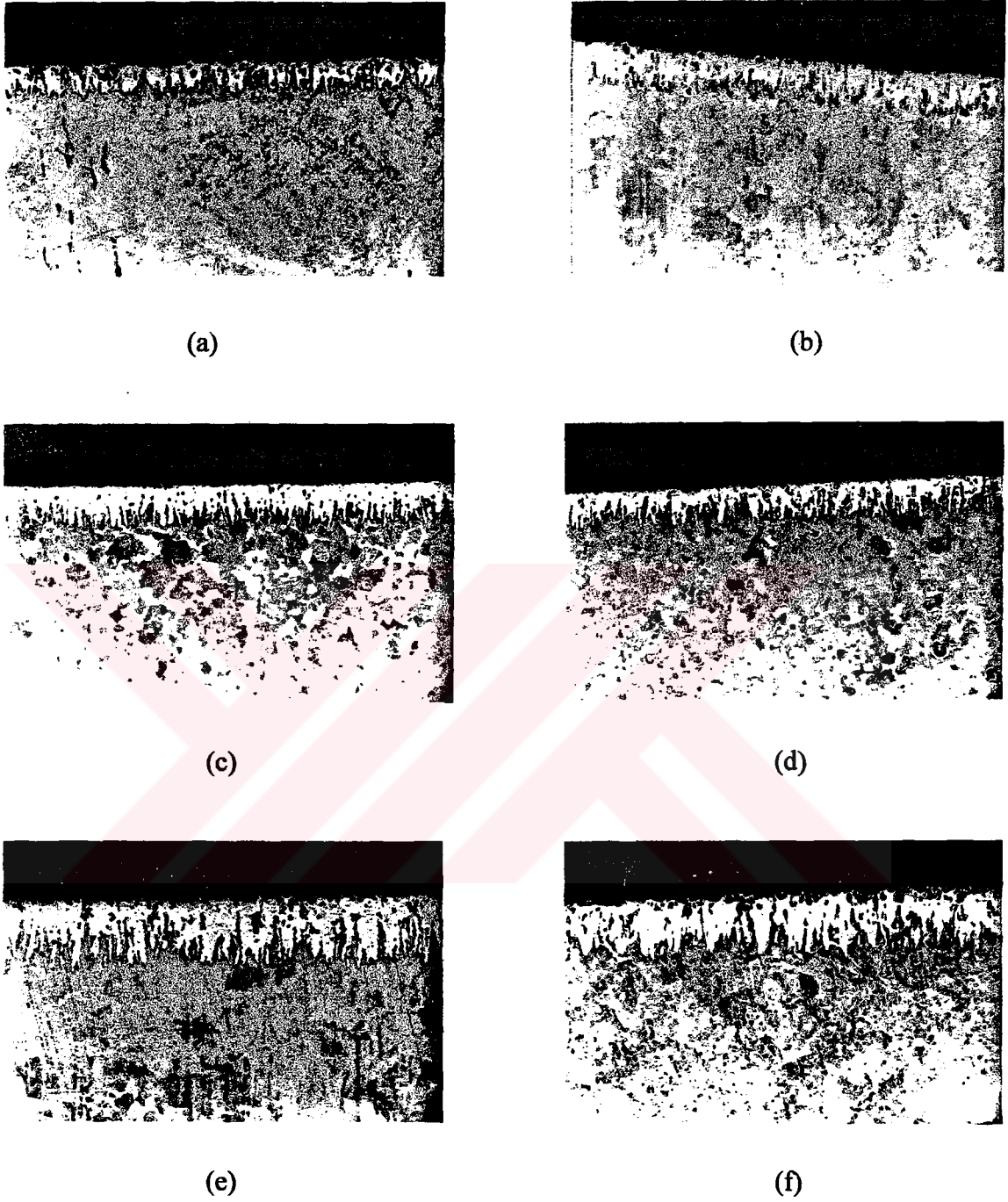


(e)

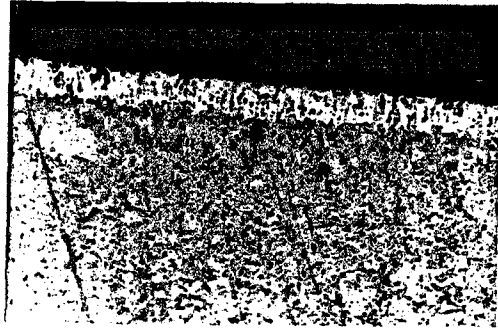


(f)

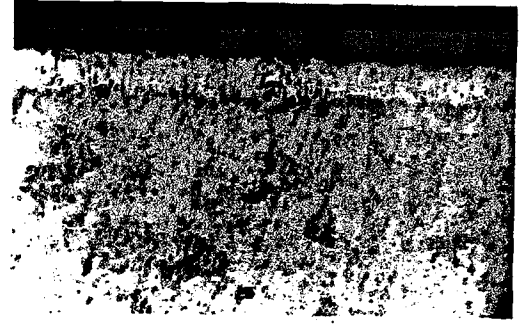
**Şekil B.1.** 950°C'de borlanmış Erdemir 3990 (19Mn6) ve AISI 1008 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50). 2 saat borlanmış (a) Erdemir 3990 (b) AISI 1008, 4 saat borlanmış (c) Erdemir 3990 (d) AISI 1008, 6 saat borlanmış (e) Erdemir 3990 (f) AISI 1008



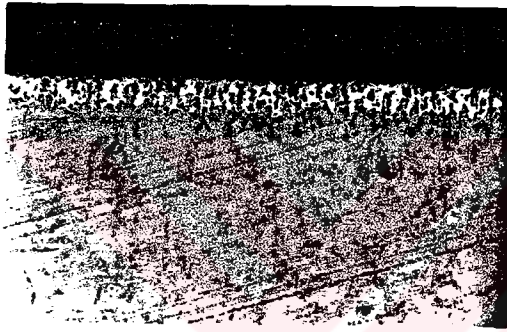
**Şekil B.2.** 950°C'de borlanmış AISI 1030 ve AISI 1040 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50). 2 saat borlanmış (a) AISI 1030 (b) AISI 1040, 4 saat borlanmış (c) AISI 1030 (d) AISI 1040, 6 saat borlanmış (e) AISI 1030 (f) AISI 1040



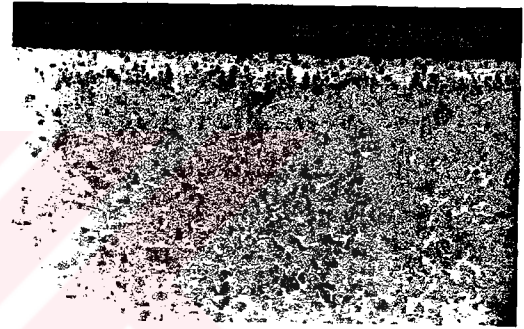
(a)



(b)



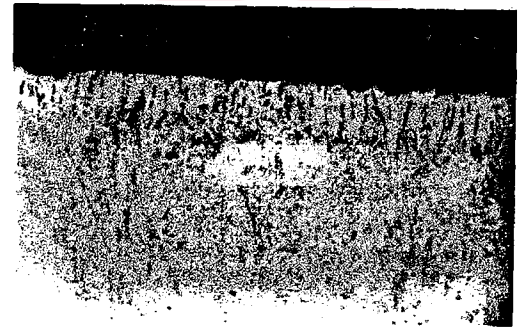
(c)



(d)

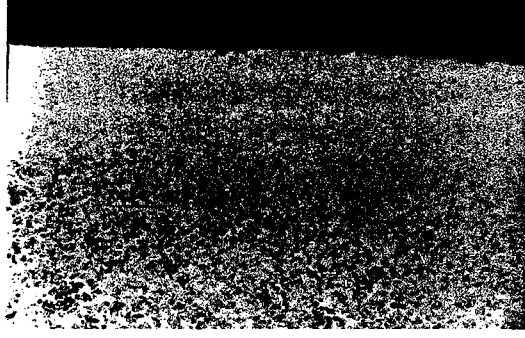


(e)



(f)

**Şekil B.3.** 950°C'de borlanmış AISI 1045 ve AISI 1050 çeliklerinin borlu tabakalarının mikroyapı fotoğrafları (x50). 2 saat borlanmış (a) AISI 1045 (b) AISI 1050, 4 saat borlanmış (c) AISI 1045 (d) AISI 1050, 6 saat borlanmış (e) AISI 1045 (f) AISI 1050



**Şekil B.4.** Isıl işlemlili Erdemir 3990 (19Mn6) çeliğinin mikro yapı fotoğrafı (x25)



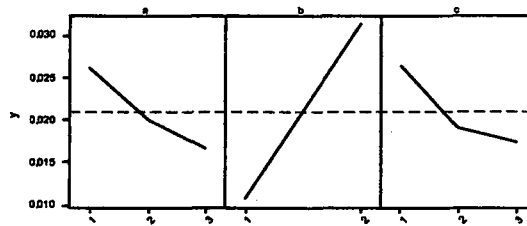
### EK - C. Varyans Analizi Sonuçları

**Tablo C.1.** Birinci analiz verilerine göre Minitab.13 programı varyans analizi sonuç tablosu

Factor	Type	Levels	Values	
a	fixed	3	1 2 3	İşlem süresi
b	fixed	2	1 2	Aşındırıcı
c	fixed	3	1 2 3	İşlem sıcaklığı

Analysis of Variance for y, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
a	2	0,0008312	0,0008312	0,0004156	325,26	0,000
b	1	0,0056980	0,0056980	0,0056980	4459,31	0,000
c	2	0,0008122	0,0008122	0,0004061	317,83	0,000
a*b	2	0,0000516	0,0000516	0,0000258	20,18	0,000
a*c	4	0,0001368	0,0001368	0,0000342	26,76	0,000
b*c	2	0,0000268	0,0000268	0,0000134	10,50	0,000
a*b*c	4	0,0004084	0,0004084	0,0001021	79,90	0,000
Error	36	0,0000460	0,0000460	0,0000013		
Total	53	0,0080110				

Main Effects Plot - Data Means for y



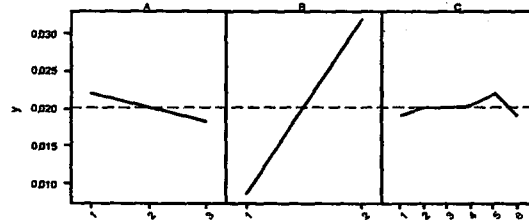
**Şekil C.1.** Birinci analizde ana faktör etkileri grafiği

**Tablo C.2.** İkinci analiz verilerine göre Minitab.13 programı varyans analizi sonuç tablosu

Factor	Type	Levels	Values	
A	fixed	3	1 2 3	İşlem süresi
B	fixed	2	1 2	Aşındırıcı
C	fixed	6	1 2 3 4 5 6	Malzeme türü

Analysis of Variance for y, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	0,0002249	0,0002249	0,0001124	118,71	0,000
B	1	0,0145255	0,0145255	0,0145255	1,5E+04	0,000
C	5	0,0001073	0,0001073	0,0000215	22,66	0,000
A*B	2	0,0001362	0,0001362	0,0000681	71,90	0,000
A*C	10	0,0002476	0,0002476	0,0000248	26,14	0,000
B*C	5	0,0000860	0,0000860	0,0000172	18,15	0,000
A*B*C	10	0,0001932	0,0001932	0,0000193	20,39	0,000
Error	72	0,0000682	0,0000682	0,0000009		
Total	107	0,0155889				

Main Effects Plot - Data Means for y



**Şekil C.2.** İkinci analizde ana faktör etkileri grafiği





## ÖZGEÇMİŞ

Ümit ER, 1971 Eskişehir doğumludur. 1988 yılında Eskişehir Cumhuriyet lisesini bitirdikten sonra Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden 1992 yılında mezun olmuştur. 1994 yılında Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak girmiştir. 1996 yılında Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde, hazırladığı "Motorlu Taşıtlardaki Titreşimlerin Teorik Analizi ve Bir Bilgisayar Modellemesi" isimli tez çalışması ile yüksek lisansını tamamlamıştır. Aynı yıl, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Doktora çalışmalarına başlamıştır. Halen, Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Öğretim Elemanı olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.