

**KLASİK ISIL İŞLEMLER VE MODERN YÜZEY
İŞLEMLERİ UYGULANMIŞ Ç 1050 (C45E) ÇELİĞİNİN
ABRAZİF+EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

100 657

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Nejat Y. SARI

100657

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Aralık 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Şubat 1999

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kutsal TÜLBENTÇİ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Niyazi ERUSLU

Prof.Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

Prof. Nurullah GÜLTEKİN

Prof.Dr. Erdiñç KALUÇ

ŞUBAT 1999

ÖNSÖZ

Doktora tezimin yöneticiliğini üstlenerek bu orijinal konuyu bana veren ve tezimin hazırlanmasında her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen ve her zaman kendisini örnek aldığım Sayın hocam Prof.Dr. Kutsal TÜLBENTÇİ' ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deney parçalarının hazırlanmasında ve deneysel çalışmalarda; plazma nitrüleme işlemleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Öğretim Üyelerinden Prof.Dr. Süleyman KARADENİZ' e ve İstanbul Isıl İşlem Ltd.Şti' nden Sayın Met.Y.Müh. T. Soydan KENEŞ' e, gaz ortamında nitrüleme işlemleri için 3T Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş.' nden Sayın Met.Y.Müh. Hasan ÇEP' e, tuz banyosunda nitrüleme işlemleri için İstaş Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş.' nden Sayın Met.Y.Müh. Ömer TURAN' a, endüksiyon sertleştirme işlemi için İnsa Endüksiyon-Nitrürasyon Isıl İşlem Ltd.Şti' nden Şirket Müdürü Sayın Koray YAVUZ' a , borlama işlemi için Sakarya Üniversitesi Öğretim Üyelerinden Sayın Yrd. Doç.Dr. Yavuz SOYDAN' a, PVD ile kaplama işlemi için Kocaeli Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Şadi KARAGÖZ' e, ısıtma işlemleri için Senkron Metal ve Seramik Kaplama San. ve Tic. A.Ş.' nden Sayın Elektrik Müh. Turgut HALAMOĞLU' na, As Kaynak-Kobatek Kaynak Tekniği San. ve Tic. A.Ş. ve Gedik Holding A.Ş. yetkililerine, ısıtma işlemleri için Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. İbrahim UZMAN' a, aşındırıcı taneciklerin temininde Kalemaden Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş.' nden Sayın Maden Müh. Ziya BENLİ' ye, aşındırıcı taneciklerin elektrik analizinde STFA Kalite Ekspertiz ve Gözetim Ltd, Şti.' nden Sayın Kalite Kontrol Mühendisi O. Belgan ONAT'a, deney tesisatının kurulmasında Sayın Dr. M. Sami KANTARCI' ya, metalografik çalışmalar için deney parçalarının hazırlanmasında fabrikanın laboratuvarını kullanıma açan Metkon Ltd. Şti. sahibi Sayın Mak.Y.Müh. Serdar YAVUZ' a, mikroyapı fotoğraflarının çekiminde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Bölümü Metalografi Laboratuvarı personeline, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde İstanbul Motor Piston ve Pim San. A.Ş. Fabrika Müdürü Sayın Mak.Y.Müh. Yavuz ERKMEN' e ve elektron mikroskobu çalışmalarında Arçelik A.Ş., Araştırma Geliştirme Merkezi Müdürü Sayın Mak.Y.Müh. Refik ÜREYEN ve Ar-Ge Teknisyeni Turgay GÖNÜL' e, istatistik çalışmalarında Prof. Dr. Meriç ÖZTÜRKCAN' a ve Dr. Hüseyin GÜL' e, emeği geçen tüm hocalarım ile arkadaşlarıma, ayrıca her türlü manevi ve maddi katkıları ile çalışmalarımı destekleyen aileme ve özellikle de ağabeyim İnş. Müh. Orhan SARI' ya sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu kadar geniş içerikli bir tezin konusunun güncelleştirilmesinde, deneylerin gerçekleştirilmesinde ve yazılma aşamasında tecrübelerinden yararlandığım, hoşgörülü yaklaşımı ile yardımlarını esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Erdi KALUÇ' a en derin minnet duygularımı sunarım.

04 Aralık 1998

Nejat Y. SARI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Aşınmanın Ekonomik Önemi	1
BÖLÜM 2 AŞINMA	4
2.1 Aşınmanın Tanımı	4
2.2 Tribolojik Sistem	5
2.3 Aşınma Mekanizmaları	7
2.3.1 Kayma aşınması	9
2.3.2 Abrasif aşınma	13
2.3.3 Tribokimyasal aşınma	20
2.3.4 Yorulma aşınması	21
2.4 Aşınma Miktarının Ölçümü ve Birimleri	21
2.5 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	22
2.5.1 Tasarım özellikleri	23
2.5.1.1 Yük	23
2.5.1.2 Hız	24
2.5.1.3 Malzeme şekli	25
2.5.1.4 Yağlama, sıcaklık ve nem	26
2.5.2 İşlem şartları	29
2.5.3 Aşındırıcı tanecik özeliği	31
2.5.4 Malzeme özellikleri	36
2.5.4.1 Malzemenin kimyasal bileşimi	36
2.5.4.2 Malzemenin mikroyapısı	38
2.5.4.3 Matris ve yüzey sertliği	41
2.6 Aşınma Deney Yöntemleri	47
2.6.1 Aşınma deney düzeneği tasarımları	50
2.7 Aşınmaya Karşı Dirençli Malzemeler	62

2.7.1 Yüksek kromlu beyaz dökme demir	64
2.7.2 Ostenitik mangan çelikleri	65
2.7.3 Yalın karbonlu çelikler	66
BÖLÜM 3 MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ	69
3.1 Yüzey Mühendisliği	69
3.1.1 Isıl püskürtme	71
3.1.1.1 Isıl püskürtme yönteminin gelişimi ve esası	71
3.1.1.2 Isıl püskürtme yöntemleri	74
3.1.1.2.1 Alev ile püskürtme	76
3.1.1.2.2 Elektrik arkı ile püskürtme	79
3.1.1.2.3 Patlamalı püskürtme(D-Gun)	80
3.1.1.2.4 Plazma arkı ile püskürtme	81
3.1.1.2.4.1 Transfer edilmiş plazma arkı ile püskürtme	84
3.1.1.2.4.2 Atmosferik plazma püskürtme(APS)	85
3.1.1.2.4.3 Vakum plazma püskürtme(VPS)	85
3.1.1.2.4.4 Eksenel enjeksiyonlu plazma püskürtme	86
3.1.1.2.4.5 Alev ve plazma püskürtmenin kombinasyonu	86
3.1.1.2.4.6 Reaktif plazma püskürtme	87
3.1.1.2.5 Yüksek hızlı oksı-yakıt püskürtme(HVOF)	88
3.1.1.3 Isıl püskürtme yöntemlerinde kaplama malzemeleri	93
3.1.1.4 Püskürtülecek yüzeylerin hazırlanması	96
3.1.2 Nitrürleme(Nitrürasyon)	96
3.1.2.1 Nitrürleme(Nitrürasyon) işleminin esası	97
3.1.2.2 Sıvı nitrürleme(Tuz banyosunda nitrürleme)	100
3.1.2.3 Gaz nitrürleme	100
3.1.2.4 Plazma(lyon) nitrürleme	101
BÖLÜM 4 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	107
BÖLÜM 5 KONUNUN ÖNEMİ VE ÇALIŞMANIN PLANLANMASI	118
BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	121
6.1 Giriş	121
6.2 Deney Tesisatı, Özellikleri ve Çalışma Prensipleri	121
6.3 Karşı Madde	124
6.4 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlemler	126
6.5 Deney Parçalarının Boyutları	129
6.6 Deneylerin Yapılışı	131
6.6.1 Aşınma deneyleri	131
6.6.2 Sertlik deneyleri	132
6.6.3 Metalografik çalışmalar	132
6.6.4 Tarama elektron mikroskobu(SEM) çalışmaları	133
6.6.5 Yüzey pürüzlülüğü çalışmaları	133
6.6.6 İstatistik çalışmaları	133

BÖLÜM 7 DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ	135
7.1 Aşınma Deneyi Sonuçları	135
7.2 Sertlik Deneyleri Sonuçları	163
7.3 Metalografi Sonuçları	171
7.4 Tarama Elektron Mikroskopisi Sonuçları	183
7.5 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları	204
7.6 İstatistik Sonuçları	210
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	213
KAYNAKLAR	217
EKLER	229
ÖZGEÇMİŞ	290



SEMBOL LİSTESİ

A	: Aşınma alanı
A_i	: Temas noktalarının alanı
A_r	: Gerçek temas alanı
D.A.	: Doğru akım
f	: Sürtünme katsayısı
H	: Aşınan malzemenin sertliği
H_a	: Aşındırıcı taneciğin sertliği
H_m	: Metalin sertliği
k	: Malzemeye bağlı aşınma katsayısı
L	: Sürtünme yolu
N	: Çevrim sayısı
P	: Anlamlılık düzeyi
R_a	: Yüzey pürüzlülük değeri
S	: Aşınma yolu uzunluğu
SS	: Standard sapma
V	: Aşınan malzemenin hacmi
W	: Normal yük
W_m	: Aşınma ağırlık kaybı
W_v	: Hacimsel aşınma ağırlık kaybı
$W_{v/s}$	: Hacimsel aşınma şiddeti
W_1	: Doğrusal aşınma miktarı
$W_{1/s}$	: Doğrusal aşınma şiddeti
W^{-1}, ε	: Aşınma direnci
ρ	: Aşınan malzemenin yoğunluğu
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	: Bileşenlerin hacimsel aşınma dirençleri
α, β	: Bileşenlerin hacimsel katılma oranları
θ	: Koni şeklindeki taneciğin eğim açısı
$\bar{X}$	: Aritmetik ortalama

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Bir tribolojik sistemin elemanları	6
Şekil 2.2	Yüzey mikroyapısı	7
Şekil 2.3	Aşındırma türleri ile aşınma işlemlerinin Sınıflandırılması	9
Şekil 2.4	Yüzeyler arasındaki bağlantıların ayrılması	11
Şekil 2.5	Aşınma oranı-yük ve aşınma oranı-hız Arasındaki ilişki	12
Şekil 2.6	Abrazif aşınmanın çeşitleri	14
Şekil 2.7	Abrazif aşınma mekanizmaları	15
Şekil 2.8	Oyucu abrazyon	16
Şekil 2.9	Yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon	17
Şekil 2.10	Düşük gerilmeli çizici abrazyon	18
Şekil 2.11	Abrazif aşınma kaybı modeli	19
Şekil 2.12	Yükün aşınma hacmi üzerine etkisi	24
Şekil 2.13	Aşınma miktarına hızın etkisi	25
Şekil 2.14	Aşınma oranının numune çapına etkisi	26
Şekil 2.15	Sınır ve sıvı yağlama	28
Şekil 2.16	Ostenitik paslanmaz çelik ve saf nikel için Sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi	29
Şekil 2.17	Görünen ve gerçek temas alanı	30
Şekil 2.18	Üç farklı sertlik değerindeki %0,8C' lu çeliğin aşınma oranına abrazif mineralinin etkisi	32

Şekil 2.19	Yük altında tanecik ve düz bir yüzey arasındaki temas durumu	33
Şekil 2.20	AISI 4340 çeliğinin aşınma oranı-aşındırıcı Tanecik sertliği ilişkisi	34
Şekil 2.21	Erezyon, 2-cisimli ve 3-cisimli abrazif aşınma etkisindeki bakır malzemenin SiC aşındırıcı taneciği boyutu-aşınma oranı ilişkisi	35
Şekil 2.22	Döküm öğütücü bilyaların aşınma oranına mikroyapının etkisi	38
Şekil 2.23	Sementit bileşeninin, izafi aşınma direncine ve sertliğe olan etkisi	40
Şekil 2.24	Saf metallerin, ısıtıl işlem yapılmış ve soğuk sertleşmiş çeliklerin izafi aşınma direnci ve matris sertliği arasındaki ilişki	42
Şekil 2.25	Sertleştirilmiş ve temperlenmiş karbonlu çeliklerin aşınma direnci ile matris sertliği arasındaki ilişki	43
Şekil 2.26	Tavllanmış çeliklerin(a) ve %0,38C-%0,75C içeren Temperlenmiş martenzitik yapının(b) sertlik Ve aşınma direnci ilişkisi	44
Şekil 2.27	Saf metaller ve ısıtıl işlemli çelikler için aşınma direnci ve matris sertliği arasındaki ilişki	45
Şekil 2.28	Abrazif aşınma mekanizmaları ile aşınma direnci ve sertlik arasındaki ilişki	46
Şekil 2.29	Tribolojik deneylerin sınıflandırılması	49
Şekil 2.30	Çeneli kırıcı ve parçaları	52
Şekil 2.31	Kuru kum kauçuk tekerlek deney makinası	53
Şekil 2.32	Islak kum kauçuk tekerlek deney makinası	54
Şekil 2.33	Düşük gerilmeli çizici abrazyon deney makinası	55
Şekil 2.34	İki cisimli abrazif aşınma için kullanılan pim-abrazyon deney makinası	56
Şekil 2.35	Blok disk aşınma deney makinası	57

Şekil 2.36	Kayma ve yuvarlanma hareketi yapabilen aşınma deney makinası	57
Şekil 2.37	Üç cisimli abrazif aşınma deney makinası	58
Şekil 2.38	Darbe abrazyon deney makinası	59
Şekil 2.39	Abrazif, erozif ve abrazif-erozif aşınmaya dirençli malzemeleri belirleyen deneysel yöntemlerin esası	60
Şekil 2.40	Öğütme işlemlerinde abrazif aşınma deney yöntemleri	61
Şekil 2.41	Metal-metal aşınmasında kullanılan temel sistemler	62
Şekil 2.42	Demir alaşımlarının abrazyon direnci ve karbon içeriği arasındaki ilişki	63
Şekil 3.1	Modern yüzey işlemleri	70
Şekil 3.2	Yüzey altı, yüzey üstü ve kaplama işlemleri	70
Şekil 3.3	İlk erimiş metal püskürtme tesisi	72
Şekil 3.4	İngiltere’ de ısı püskürtme kaplamalarının Endüstriye dağılımları	73
Şekil 3.5	Isı püskürtme işlem sırası	74
Şekil 3.6	Isı püskürtme kaplama tabakasının şematik görünüşü	75
Şekil 3.7	Isı püskürtme yöntemleri	76
Şekil 3.8	Toz alev püskürtme tabancası	77
Şekil 3.9	Tel/çubuk alev püskürtme tabancası	77
Şekil 3.10	Elektrik arkı ile püskürtme yöntemi	79
Şekil 3.11	Patlamalı püskürtme yöntemi	80
Şekil 3.12	Plazma arkı ile püskürtme tabancası	82
Şekil 3.13	Plazma arkı ile püskürtme sistemi	83
Şekil 3.14	Transfer edilmiş plazma arkı ile püskürtme	85
Şekil 3.15	Eksenel plazma püskürtme sistemi	86
Şekil 3.16	Reaktif plazma püskürtme işlemi	87

Şekil 3.17	İngiltere endüstrisinde yıllara göre HVOF sistemlerindeki artış	89
Şekil 3.18	İlk geliştirilen JetKote HVOF torcu	89
Şekil 3.19	Elmas jet(DJ) HVOF torcu	90
Şekil 3.20	JP-5000 HVOF torcu	91
Şekil 3.21	HVOF yöntemini etkileyen parametreler	92
Şekil 3.22	Çeşitli çeliklerin nitrülenmiş yüzey profilleri	98
Şekil 3.23	Alaşım elementlerinin sertliğe ve nitrürleme derinliğine etkisi	99
Şekil 3.24	Plazma nitrürleme işlemi	104
Şekil 3.25	Plazma nitrürleme işleminin mekanizması	105
Şekil 3.26	Plazma nitrürleme yönteminde gaz bileşimi ve yüzey yapısı ilişkisi	106
Şekil 4.1	Yalın karbonlu çeliklere uygulanan termokimyasal işlemler-aşınma direnci ilişkisi	108
Şekil 4.2	Yüzey işlemli numunelerin kuru kum kauçuk tekerlek deneyi sıralaması	110
Şekil 4.3	Yüzey işlemli numunelerin şerit abrazyon deneyi sıralaması	110
Şekil 4.4	Farklı yüzey işlemleri etkisindeki çelik dişlilerin toplam aşınma kaybı	113
Şekil 6.1	Aşındırma deney makinası	123
Şekil 6.2	Numunelerin hareket yörüngeleri	124
Şekil 6.3	Numunelerin uydulu dönüştürücüye bağlanma sistemi	125
Şekil 6.4	Numune taşıyıcısı ve numune	130
Şekil 7.1	Esas metale(N) ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	136
Şekil 7.2	Esas metale(N) ait toplam ağırlık-kayıp zaman değişimi	136
Şekil 7.3	Yağda soğutulmuş(YS) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	137

Şekil 7.4	Yağda soğutulmuş(YS) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	137
Şekil 7.5	Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	138
Şekil 7.6	Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş(YS3T) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	138
Şekil 7.7	Endüksiyon ile sertleştirilmiş(E) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	139
Şekil 7.8	Endüksiyon ile sertleştirilmiş(E) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	139
Şekil 7.9	Borlanmış(B) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	140
Şekil 7.10	Borlanmış(B) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	140
Şekil 7.11	Tuz banyosunda nitrülenmiş(TN) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	141
Şekil 7.12	Tuz banyosunda nitrülenmiş(TN) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	141
Şekil 7.13	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN6) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	142
Şekil 7.14	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN6) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	142
Şekil 7.15	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN12) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	143
Şekil 7.16	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN12) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	143
Şekil 7.17	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1/2) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	144
Şekil 7.18	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1/2) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	144
Şekil 7.19	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	145

Şekil 7.20	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	145
Şekil 7.21	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN4) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	146
Şekil 7.22	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN4) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	146
Şekil 7.23	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN12) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	147
Şekil 7.24	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN12) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	147
Şekil 7.25	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN24) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	148
Şekil 7.26	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN24) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	148
Şekil 7.27	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN48) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi	149
Şekil 7.28	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN48) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi	149
Şekil 7.29	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F1) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	150
Şekil 7.30	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F1) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	150
Şekil 7.31	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F2) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	151
Şekil 7.32	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F2) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	151
Şekil 7.33	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F1) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	152
Şekil 7.34	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F1) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	152
Şekil 7.35	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F2) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	153

Şekil 7.36	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F2) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	153
Şekil 7.37	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F1) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	154
Şekil 7.38	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F1) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	154
Şekil 7.39	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F2) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	155
Şekil 7.40	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F2) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	155
Şekil 7.41	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F3) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	156
Şekil 7.42	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F3) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	156
Şekil 7.43	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F4) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	157
Şekil 7.44	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F4) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	157
Şekil 7.45	Titanyum nitrür kaplı(TiN) numuneye ait ağırlık-kaybı zaman değişimi	158
Şekil 7.46	Titanyum nitrür kaplı(TiN) numuneye ait toplam ağırlık-kaybı zaman değişimi	158
Şekil 7.47	Yüzey işlemlerinin 10. saat sonundaki toplam ağırlık kayıpları	161
Şekil 7.48	Yüzey işlemlerinin 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kayıpları	162
Şekil 7.49	Plazma(İyon) nitrürlenmiş(IN1/2) numuneye ait sertlik taraması	163
Şekil 7.50	Plazma(İyon) nitrürlenmiş(IN1) numuneye ait sertlik taraması	164
Şekil 7.51	Plazma(İyon) nitrürlenmiş(IN4) numuneye ait sertlik taraması	164

Şekil 7.52	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN12) numuneye ait sertlik taraması	165
Şekil 7.53	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN24) numuneye ait sertlik taraması	165
Şekil 7.54	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN48) numuneye ait sertlik taraması	166
Şekil 7.55	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN6) numuneye ait sertlik taraması	166
Şekil 7.56	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN12) numuneye ait sertlik taraması	167
Şekil 7.57	Tuz banyosunda nitrülenmiş(TN) numuneye ait sertlik taraması	167
Şekil 7.58	Borlanmış(B) numuneye ait sertlik taraması	168
Şekil 7.59	Titanyum nitrür kaplı(TiN) numuneye ait sertlik taraması	168
Şekil 7.60	Yüzey işlemlerinin sertlik değerleri	170
Şekil 7.61	Esas metale(N) ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	171
Şekil 7.62	Yağda soğutulmuş(YS) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	172
Şekil 7.63	Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	172
Şekil 7.64	Endüksiyon ile sertleştirilmiş(E) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	172
Şekil 7.65	Borlanmış(B) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	173
Şekil 7.66	Tuz banyosunda nitrülenmiş(TN) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı	173
Şekil 7.67	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN6) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	173
Şekil 7.68	Gaz ortamında nitrülenmiş(GN12) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	174

Şekil 7.69	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1/2) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	174
Şekil 7.70	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN1) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	174
Şekil 7.71	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN4) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	175
Şekil 7.72	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN12) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	175
Şekil 7.73	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN24) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	175
Şekil 7.74	Plazma(lyon) nitrülenmiş(IN48) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	176
Şekil 7.75	Titanyum nitrür kaplı(TiN) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı(325X)	176
Şekil 7.76	Isıl püskürtme ile kaplı(1F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~700µm)	177
Şekil 7.77	Isıl püskürtme ile kaplı(1F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~420µm)	177
Şekil 7.78	Isıl püskürtme ile kaplı(2F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~105µm)	177
Şekil 7.79	Isıl püskürtme ile kaplı(2F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~1550µm)	178
Şekil 7.80	Isıl püskürtme ile kaplı(3F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~750µm)	178
Şekil 7.81	Isıl püskürtme ile kaplı(3F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~1100µm)	178
Şekil 7.82	Isıl püskürtme ile kaplı(3F3) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~700µm)	179
Şekil 7.83	Isıl püskürtme ile kaplı(3F4) numuneye ait makroyapı fotoğrafı(kaplama kalınlığı:~200µm)	179
Şekil 7.84	Esas metale(N) ait SEM fotoğrafı	183
Şekil 7.85	Yağda soğutulmuş(YS) numuneye ait SEM fotoğrafı	183

Şekil 7.86	Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş(YS3T) numuneye ait SEM fotoğrafı	184
Şekil 7.87	Endüksiyon sertleştirilmiş(E) numuneye ait SEM fotoğrafı	184
Şekil 7.88	Borlanmış(B) numuneye ait SEM fotoğrafı	184
Şekil 7.89	Tuz banyosunda nitrülenmiş(TN) numuneye ait SEM fotoğrafı	185
Şekil 7.90	Gaz nitrülenmiş(GN6) numuneye ait SEM fotoğrafı	185
Şekil 7.91	Gaz nitrülenmiş(GN12) numuneye ait SEM fotoğrafı	185
Şekil 7.92	Plazma nitrülenmiş(IN1/2) numuneye ait SEM fotoğrafı	186
Şekil 7.93	Plazma nitrülenmiş(IN1) numuneye ait SEM fotoğrafı	186
Şekil 7.94	Plazma nitrülenmiş(IN4) numuneye ait SEM fotoğrafı	186
Şekil 7.95	Plazma nitrülenmiş(IN12) numuneye ait SEM fotoğrafı	187
Şekil 7.96	Plazma nitrülenmiş(IN24) numuneye ait SEM fotoğrafı	187
Şekil 7.97	Plazma nitrülenmiş(IN48) numuneye ait SEM fotoğrafı	187
Şekil 7.98	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F1) numuneye ait SEM fotoğrafı	188
Şekil 7.99	Isıl püskürtme ile kaplanmış(1F2) numuneye ait SEM fotoğrafı	188
Şekil 7.100	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F1) numuneye ait SEM fotoğrafı	188
Şekil 7.101	Isıl püskürtme ile kaplanmış(2F2) numuneye ait SEM fotoğrafı	189
Şekil 7.102	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F1) numuneye ait SEM fotoğrafı	189
Şekil 7.103	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F2) numuneye ait SEM fotoğrafı	189

Şekil 7.104	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F3) numuneye ait SEM fotoğrafı	190
Şekil 7.105	Isıl püskürtme ile kaplanmış(3F4) numuneye ait SEM fotoğrafı	190
Şekil 7.106	PVD ile Titanyum nitrid kaplanmış(TiN) numuneye ait SEM fotoğrafı	190
Şekil 7.107	EDX analizi yapılan 1F1 numunesi	195
Şekil 7.108	1F1 numunesinde nokta EDX analizi	195
Şekil 7.109	1F1 numunesinde hat EDX analizi	195
Şekil 7.110	EDX analizi yapılan 1F2 numunesi	196
Şekil 7.111	1F2 numunesinde nokta EDX analizi	196
Şekil 7.112	1F2 numunesinde hat EDX analizi	196
Şekil 7.113	EDX analizi yapılan 2F1 numunesi	197
Şekil 7.114	2F1 numunesinde nokta EDX analizi	197
Şekil 7.115	2F1 numunesinde hat EDX analizi	197
Şekil 7.116	EDX analizi yapılan 2F2 numunesi	198
Şekil 7.117	2F2 numunesinde nokta EDX analizi	198
Şekil 7.118	2F2 numunesinde hat EDX analizi	198
Şekil 7.119	EDX analizi yapılan 3F1 numunesi	199
Şekil 7.120	3F1 numunesinde nokta EDX analizi	199
Şekil 7.121	3F1 numunesinde hat EDX analizi	199
Şekil 7.122	EDX analizi yapılan 3F2 numunesi	200
Şekil 7.123	3F2 numunesinde nokta EDX analizi	200
Şekil 7.124	3F2 numunesinde hat EDX analizi	200
Şekil 7.125	EDX analizi yapılan 3F3 numunesi	201
Şekil 7.126	3F3 numunesinde nokta EDX analizi	201

Şekil 7.127	3F3 numunesinde hat EDX analizi	201
Şekil 7.128	EDX analizi yapılan 3F4 numunesi	202
Şekil 7.129	3F4 numunesinde nokta EDX analizi	202
Şekil 7.130	3F4 numunesinde hat EDX analizi	202
Şekil 7.131	Esas metalin (N) yüzey pürüzlülük profili	205
Şekil 7.132	Yağda su verilmiş (YS) numunenin yüzey pürüzlülük profili	205
Şekil 7.133	Yağda su verilmiş+temperlenmiş (YS3T) numunenin yüzey pürüzlülük profili	205
Şekil 7.134	Endüksiyon ile sertleştirilmiş (E) numunenin yüzey pürüzlülük profili	205
Şekil 7.135	Borlama işlemi uygulanmış (B) numunenin yüzey pürüzlülük profili	206
Şekil 7.136	Tuz banyosunda nitrülenmiş (TN) numunenin yüzey pürüzlülük profili	206
Şekil 7.137	Gaz ortamında nitrülenmiş (GN6) numunenin yüzey pürüzlülük profili	206
Şekil 7.138	Gaz ortamında nitrülenmiş (GN12) numunenin yüzey pürüzlülük profili	206
Şekil 7.139	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1/2) numunenin yüzey pürüzlülük profili	207
Şekil 7.140	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1) numunenin yüzey pürüzlülük profili	207
Şekil 7.141	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN4) numunenin yüzey pürüzlülük profili	207
Şekil 7.142	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN12) numunenin yüzey pürüzlülük profili	207
Şekil 7.143	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN24) numunenin yüzey pürüzlülük profili	208
Şekil 7.144	Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN48) numunenin yüzey pürüzlülük profili	208

Şekil 7.145	TiN kaplı (TiN) numunenin yüzey pürüzlülük profili	208
Şekil 7.146	Aşınma deneyi uygulanmış bazı numunelerin Yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri	209
Şekil C.1	Bazı numunelerin 1. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	290
Şekil C.2	Bazı numunelerin 2. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	291
Şekil C.3	Bazı numunelerin 3. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	292
Şekil C.4	Bazı numunelerin 4. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	293
Şekil C.5	Bazı numunelerin 5. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	294
Şekil C.6	Bazı numunelerin 6. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	295
Şekil C.7	Bazı numunelerin 7. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	296
Şekil C.8	Bazı numunelerin 8. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	297
Şekil C.9	Bazı numunelerin 9. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.	298

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1	Aşınmayı önleme sonucunda İngiltere endüstrisinde elde edilen ekonomiklik	3
Tablo 2.1	Çeşitli malzeme kaldırma işlemlerinin özgül enerjisi	20
Tablo 2.2	Yaygın kullanılan aşındırıcıların sertlik değerleri	32
Tablo 2.3	Karbonlu çeliklerin uygulama alanları	67
Tablo 2.4	Aşınmaya dirençli alaşımların özellikleri ve uygulama alanları	68
Tablo 3.1	Kaplama kalitesini etkileyen parametreler	84
Tablo 3.2	Çeşitli püskürtme sistemleri ve kaplama özellikleri	93
Tablo 3.3	İngiltere' de plazma nitrürlenmiş malzemeler	102
Tablo 4.1	Yalın karbonlu çeliklere uygulanan termokimyasal işlemler	108
Tablo 6.1	Aşındırıcı taneciğin fiziksel ve kimyasal özellikleri	124
Tablo 6.2	Aşındırıcı tanecik elek analizi	126
Tablo 6.3	Deney malzemesi kimyasal bileşimi	126
Tablo 6.4	Deney malzemesine uygulanan işlemler	127
Tablo 6.5	Deney malzemesine uygulanan işlemlerin özellikleri	128
Tablo 6.6	İşlemlerin gerçekleştirildiği resmi veya ticari kuruluşlar	129
Tablo 7.1	Bazı malzemelerin difüzyon sabiti	203
Tablo A.1	Esas metalin(N) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	229
Tablo A.2	Yağda soğutulmuş numunenin(YS) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	230

Tablo A.3	Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş numunenin(YS3T) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	231
Tablo A.4	Endüksiyon ile sertleştirilmiş numunenin(E) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	232
Tablo A.5	Borlama işlemi uygulanmış numunenin(B) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	233
Tablo A.6	Tuz banyosunda nitrülenmiş numunenin(TN) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	234
Tablo A.7	Gaz ortamında nitrülenmiş numunenin(GN6) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	235
Tablo A.8	Gaz ortamında nitrülenmiş numunenin(GN12) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	236
Tablo A.9	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN1/2) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	237
Tablo A.10	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN1) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	238
Tablo A.11	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN4) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	239
Tablo A.12	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN12) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	240
Tablo A.13	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN24) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	241
Tablo A.14	Plazma(lyon) nitrülenmiş numunenin(IN48) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	242
Tablo A.15	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(1F1) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	243
Tablo A.16	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(1F2) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	244
Tablo A.17	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(2F1) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	245
Tablo A.18	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(2F2) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	246

Tablo A.19	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(3F1) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	247
Tablo A.20	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(3F2) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	248
Tablo A.21	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(3F3) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	249
Tablo A.22	Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin(3F4) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	250
Tablo A.23	Titanyum nitrür kaplanmış numunenin(TiN) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi	251
Tablo B.1	Numune kenarından merkeze doğru yapılan sertlik taramaları	252
Tablo B.2	Sertlik taraması yapılmadan ölçülen sertlik değerleri ve ortalamaları	253
Tablo C.1	Yüzey işlemlerinin birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı aritmetik ortalamalarının ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen anlamlılık düzeyleri	254
Tablo C.2	Yüzey işlemlerinin birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı aritmetik ortalamalarının($\bar{X}$) ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen standard sapma(SS), t ve anlamlılık(P) değerleri	264

**KLASİK ISIL İŞLEMLER VE MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ UYGULANMIŞ
Ç 1050 (C 45 E) ÇELİĞİNİN ABRAZİF + EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

ÖZET

Günümüz teknolojisinde tarım, çimento ve madencilik gibi endüstri alanlarında çalışan makina parçalarının aşınma etkisine maruz kalabilecek yüzeylerinin klasik ısıt işlemler veya yüzey ve yüzeyaltı özellikleri iyileştiren yüzey işlemleri yardımıyla aşınmaya karşı daha dirençli hale getirilmeleri önem kazanmaktadır. Bu konuda yapılan literatür araştırmasında, yüzey işlemlerinden plazma nitrüleme ve ısıt püskürtme yöntemleri konusundaki çalışmaların fazlalığı bu yöntemlerin önemini ortaya koymaktadır. Ancak, ilk ürünlerinin 90' ılı yılların başında son ürünlerinin ise 1995 yılında geliştirildiği ısıt püskürtme yöntemlerinden yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme (HVOF) işlemi ile oluşturulan kaplama tabakalarının aşınması konusunda sınırlı sayıda araştırmaya rastlanmıştır.

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak Ç1050 (C45E) çeliği seçilmiştir. Deney parçalarına; yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme şeklindeki klasik ısıt işlemlere ek olarak, endüksiyon sertleştirme, PVD ile TiN kaplama, termokimyasal işlemler ve ısıt püskürtme ile kaplama tabakası oluşturma şeklinde bir seri yüzey işlemleri uygulanmıştır. Termokimyasal işlemler olarak borlama, tuz banyosunda nitrüleme, gaz ortamında nitrüleme ve plazma nitrüleme işlemleri uygulanmıştır. ısıt püskürtme işleminde ise alevle püskürtme, alevle püskürtme+ergitme, HVOF ve HVOF+ergitme yöntemleri ile kaplama tabakası oluşturulmuştur.

Deneyler sonucunda, Ç1050 çeliğinin aşınma miktarının klasik ısıt işlemler ile azaldığı belirlenmiş ancak beklenen tersine endüksiyon sertleştirme, PVD ile kaplama ve termokimyasal işlemlerin ise iyi sonuç vermedikleri görülmüştür. Termokimyasal işlemlerin, deney parçalarında uygulandıkları sürelerdeki artışa bağlı olarak değişen boyutlarda tane irileşmesi etkisi meydana getirdiği ve daha iri tanelere sahip deney parçalarının daha çok aşındığı ve de bu tür işlemlerin uygulandıkları deney parçalarının aşınma yüzeylerinde şiddetli abrazif aşınma izlerinin olduğu görülmüştür. Buna karşın, yüzeye toz püskürtülerek yapılan ısıt püskürtme işlemleri sonucunda ise aşınma miktarının önemli ölçüde azaldığı hatta püskürtme işlemi sonrası kaplama tabakasına uygulanan ergitme işleminin aşınma miktarını daha da azalttığı ve bu tür numunelerin aşınma yüzeylerinde daha az şiddetle abrazif aşınma izleri ile daha çok bölgesel yüzeysel hasarlarının olduğu görülmüştür. Kplama tabakasının ana malzeme üzerine püskürtme işlemi sonrası uygulanan ergitme işlemi sonucunda difüzyon ile bağlandığı belirlenmiştir. Klasik ısıt işlemlerin uygulandığı deney parçalarının aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasına karşın, tane irileşmesi etkisi görülen termokimyasal işlemli numunelerde ise yüzey pürüzlülüğünün arttığı saptanmıştır. Termokimyasal işlemlerin uygulandığı deney parçalarından, benzer tane büyüklüğüne sahip olan ve hemen hemen eşit aşınma miktarı gösteren numuneler arasında istatistiksel farklılığın olmadığı ancak, ısıt püskürtme işlemi uygulanmış deney parçalarının ise hem kendi aralarında hem de diğer işlemlerin uygulandığı deney parçaları arasında istatistiksel farklılığın olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF ABRASIVE+EROSIVE WEAR BEHAVIOUR OF CONVENTIONAL HEAT TREATED AND MODERN SURFACE HARDENING METHODS APPLIED C 1050 (C45E) STEEL

SUMMARY

Since wear is a very sophisticated phenomenon, various definition has been made so far. Technically, wear is the removal of material from a solid surface as a result of mechanical interactions. According to DIN 50320, wear is defined as progressive loss of material from the surface of a solid body because of a mechanical effect in the form of movement and contact in relation with the solid, liquid or gaseous counterbody.

Technical systems involving wear and friction are called tribological systems. When studying the friction and wear behavior of engineering materials, the mechanical systems should be considered as tribological system. In other words, wear should be examined within a system. In wearing process 5 parameters are monitored. These are: (1) Solid body (wearing material), (2) Counter body, (3) Interfacial element, (4) Movement, (5) Load. Wearing begins when solid body and counter body move under slight or heavy loads with a interfacial element in between.

While DIN 50320 classifies wear processes into four basic wear mechanisms as adhesion, abrasion, surface fatigue and tribochemical reaction, some researchers have put forward a different classification including more wear mechanisms such as fretting, erosion, corrosion, surface fatigue, cavitation, oxidation. Researchers have revealed that the most common type of wear encountered in industry is abrasion. Adhesive, fretting and chemical wear may also be seen.

When two solid surfaces are in contact and under the effect of a load, they are welded at the point of contact forming adhesive wear. If there is a relative movement between two surfaces, these welded points break off to become abrasive particles and result in abrasive wear. Therefore, there is no clear distinction between types of wear.

The movement of hard particle on a surface under the influence of a force which oblique to the surface is called to as abrasive wear. The normal component of this force effects on the hard particle causes penetration of the surface by the particle. The parallel to the surface component of this force results in tangential motion between the particle and the surface. This type of wear is seen on tools contacting with the ground such as ploughs,

cultivators, grader and bulldozer blades, and in many other sectors including mining and cement industries.

Abrasive wear are divided into two categories: two-body abrasive wear and three-body abrasive wear. In some cases, hard particles carried by gas or liquid impinge on a surface, resulting in erosion. Two-body abrasive wear is the removal of material from a surface caused by the movement of a rough surface or fixed abrasive particles. When there are free particles between two sliding surfaces, the resulting abrasive wear is called three body abrasive wear. Three-body abrasive wear is group into three such as gauging abrasion, high stress grinding abrasion and low stress scratching abrasion.

Wear resistance is not an intrinsic material property. All wear events should be considered as a part of tribological system. Various tribosystem parameters influencing wear rate are design properties such as load, movement, shape of part, lubrication, temperature and environment; operating conditions such as contact area, contact pressure, surface condition of part, lubrication, temperature and environment; characteristics of abrasive particle such as hardness, sharpness, shape, size, ductility and wear resistance and material properties such as composition of alloy, microstructure of alloy, surface hardness and coating.

Wear is a very sophisticated phenomenon. While there are several wear mechanisms, they all respond differently to different parameters. There is no single universal parameter to define wear behaviour. And thus, there is no single universal wear test. This is proven by the existence of many wear tests and devices in literature. Wear tests are not able to define or measure the intrinsic material properties such as strength or modulus. In other words, they are not material tests. The actual purpose of wear testing is to measure or define the response or behaviour of a material in a system environment. Because wear is a system property rather than a intrinsic material property. Materials can behave differently in different wear situations.

Since it is difficult to obtain reliable results from field tests, wear tests are usually arranged as specific design. Moreover, standardization of a wear test is time consuming and expensive.

The abrasive wear seen in engineering materials which their surface contacting with abrasive particle may cause damage particularly the surfaces of moving parts. Therefore, improvement of wear resistance and frictional behaviour of materials is very important in solving the problem of wear. However, this may only be achieved through modifying and changing the surface properties of materials. The major advantage of surface treatments is that base material is selected from among some inexpensive alternatives and desired features are achieved later. To this aim, methods where the microstructure of the surface material may be modified without changing its chemical composition or where both the composition and the

microstructure may be changed together, or other treatments where the surface is coated with a material that has wear resistance and is completely different material from the base material may be applied. By means of surface treatments and coatings, materials are improved in terms of corrosion resistance, wear resistance, fatigue strength and physical properties or a combination of those.

Thermal spraying, which is a method of surface treatment, is commonly used in obtaining wear resistant coating from materials with quite different properties. This method is employed in most fields of industry. The additional wear resistant layer applied on the worn part extends the life of this part. Furthermore, this treatment costs much less than replacing the part and is therefore more economical. The coating materials in the form of powder, rod or wire that generated the coating is melted by means of combustible gases, electric arc or plasma arc and then sprayed on the substrate to be coated.

The most recent advancement in thermal spraying is the high velocity oxygen fuel (HVOF) spraying method. This process employs liquid fuel instead of gaseous fuel and coating generated with a supersonic velocity. High processing velocity enables to generate coatings with high bond strength and containing porosity below than 1%.

Surface hardening by means of diffusion, one type of surface treatment, aims to change the material surface chemically. Since heat is required to enable the diffusion of hardening species into the surface and subsurface regions of a part, the basic process used in surface hardening is thermochemical. These methods are based on the principle transporting hardening species such as carbon, nitrogen and boron to the surface of part. By each of these methods, a different case hardness and case depth is obtained.

In today's industry the combat against wear commonly uses nitriding treatment in particular. Plasma nitriding treatment is common because it is done at low temperatures, and consumes low energy and gas. Besides, among other advantages, the white layer that forms over the surface of nitrided part may be taken under control or completely prevented and a high case depth may be obtained.

As a result of the literature studying concerning plasma nitriding and thermal spraying, which are called as modern surface treatment methods and have a significant place in surface treatment technology, intense studies have been conducted in early '90s which underline the importance of these methods. In addition, limited number of studies have been found in literature concerning the wear resistance of coating layers formed by thermal spraying methods, of which the first generation products have been in early '90s and the second generation products in 1995 (like the HVOF method) and which has several different types.

Wear, which leads to serious losses in both technical and economical area, mostly appears in the form abrasive wear particular in the sectors of mining and agriculture. Most tillage tools are made of carbon steel or low alloy steel that provide enough strength for soil conditions. In our country also these types of steel are used to make tillage tools.

The research done on breakdown and maintenance costs of agricultural machines has shown that, besides fatigue and overloading, the most important factor leading to economical loss is wear with a ratio of 42.5%. In our country, when agriculture area of 24 million hectares is cultivated twice a year, and if the wear on plow shave is 150 gr per hectare, this means that 7.200.00 kg steel is wasted every year as a result of wear. Besides this, concentration degress in Turkish manufacturing industry in 1992 have been determined by the Republic of Turkey Prime Ministry State Institute of Statistics and one of the most concentrated sectors have been found as tillage manufacturing with 46 workshops.

In spite of these facts, the production of wear resistant parts by means of plasma nitriding and coating with thermal spraying, which is highly employed as a surface treatment technology in developed countries, is either rarely used or not known by manufacturers and users in our country.

In this study, the aim is to make a research on the abrasive-erosive wear behaviour of C 1050 (C45E) steel. Therefore, C45E steel has been subjected to a series of several surface treatments apart from the conventional heat treatment. These surface treatments may be grouped as:

- Conventional heat treatment (oil quenched, oil quenched+tempering),
- Changing microstructure of the surface material without changing its chemical composition (induction hardening),
- Changing both the chemical composition and microstructure of the surface material (nitriding and boronizing),
- Generating an additional layer on the surface material (thermal spraying).

Firstly, wear tests were carried out to the experimental parts which have been subjected to the above treatments. Before the test, the specimens were cleaned in alcohol in an ultrasonic cleaner, dried and weighed with an precision balance of 330 gr capacity and 0.1 mg sensitivity. During the wear tests, the same balance was used to determine the weight losses of all specimens. After the wear tests of a certain period and before the specimens are weighed to determine the weight losses, they were cleaned in alcohol in an ultrasonic cleaner for 10 minutes in order to remove the abrasive particles and foreign materials such as dust, dirt etc. on their surfaces.

From the specimen which has been subjected to every treatment including the base metal, a total of 5 specimen have been prepared, 4 of them aiming to get more accurate and reliable test results and 1 of them to be used in

hardness and metallographic studies. For every specimen, wear period is determined as 10 hours. Weight loss measurement is performed at one hour intervals. In the wear tests, treatment parameters such as abrasive particle size and type, the velocity of specimens and the depth of specimens within the abrasive particle were defined as constant for every specimen. Flint stone with 7 Mohs hardness was selected as the abrasive particle. Operating parameters are defined as specimen velocity: 1.35 m/sec.; shaft revolution in wear test machine: 150 rpm; total distance travelled by every specimen at the end 10 hours: 5.364 km; working depth: 55mm. A total of 40 hours is needed to wear the four specimens for a period of 10 hours where only one treatment has been applied. Since it is possible to wear two specimens at the same time in the wear test machine, the operate period is halved, therefore saving time. The abrasive particles have been replaced at the end of 40 hours considering that their abrasive properties have decreased due to interaction among them.

Hardness measurements were performed on the specimens using standard Vickers microhardness device. In these measurements, in order to ensure that the white layer formed during nitriding is not enough thick and that the hardness values between the outer surface and core can be scanned accurately, hardness tracks were formed during 20 seconds under 10 gr test load. The same test load was applied to all specimens except for those that have been subjected to thermal spraying. For the thermal spraying specimens, a test load of 20 gr was chosen considering that the coating is of enough thickness.

In order to determine the microstructure of specimens which have been subjected to several treatments and to make hardness measures from the outer surface to the centre, the specimens were first cut transversally in the abrasive cutter. Then the samples were mounted by hot mounting method. These cut and mounted specimens were then subjected to grinding and polishing by automatic machines for metallographic examination and later etched. Several etching reagents were tried and 10% Nital was chosen. Microstructure photographs were taken of the specimens which were finally ready for metallographic examination. For the thermal spraying specimens, macrophotographs were taken of the transversally cut and mounted specimens.

On each of the test specimen that was worn by the 10 hours wear test, surface topographical examination was made by scanning electron microscope and photographs of wear surfaces of the specimens were taken. Moreover, EDX studies were conducted by the scanning electron microscope on the specimens that have been coated by thermal spraying. To this aim, first of all a point EDX analysis was applied to define the elements in the coating layer. Later, in order to find out whether these elements were diffused towards the base material, a line EDX analysis was made on a straight line between the base metal and coating.

It was aimed to establish a relation between the amount of wear and surface roughness of some specimens that worn in the 10 hour wear test. Thus, the surface roughness of some worn specimens were measured.

T-test was applied to find out whether there was a statistically significant difference among the wear test results of specimens that were subjected to several surface treatments. In addition, the standard deviation among the total weight loss results of each specimens at the end of the 10 hour period was calculated. SPSS software package was used for the statistical studies.

In this study, C 1050 (C45E) steel with 0.5% carbon content, which, has been subjected to several conventional heat treatments and a series of modern surface treatments, was examined for wear behaviour in abrasive-erosive test conditions where low pressure and large size abrasive particles were used. The results are listed as follows:

1. For the specimens which were applied to wear test, the decrease in weight loss or the increase in total weight loss was more significant at the beginning of the test period, but later this increase and decrease was less obvious.
2. The surface hardness of the base metal was increased after conventional heat treatment and thermochemical treatment, thermal spraying and PVD method.
3. In terms of surface hardness, the lowest hardness value was of base metal (213 HV) whereas by boronizing (1284 HV) and TiN (1291 HV) coating methods the highest hardness value obtained.
4. As a result of hardness measurements, it was found that although the plasma nitriding treatment done at 500 °C for 1/2, 1 and 4 hours ensures higher surface hardness than done at 480 °C for 12, 24 and 48 hours, the case depths obtained by these methods are not much different.
5. At the end of the wear test, the test parts which have been subjected to low temperature, longer period plasma nitriding treatment (480°C-12, 24 and 48 hours) were much more worn than those subjected to high temperature, shorter period plasma nitriding treatment (500°C-1/2, 1 and 4 hours).
6. The base metal with the lowest surface hardness was less worn than specimens whose surface hardness was increased by methods such as induction hardening, boronizing, salt bath nitriding, gas nitriding, plasma nitriding, and TiN coating by PVD method. On the contrary, specimens which acquired the highest surface hardness through boronizing and TiN coating were more worn than those with lower surface hardness. Therefore, no linear relation was found to exist between hardness and amount of wear. This is due to the coarse grain formation among the test parts and the tribological structure of test system where coarse

abrasive particles were used (arithmetical average of grain diameter distribution of the abrasive material is 7.370 mm), which finally proves that wear is a system characteristic.

7. Metallographic studies revealed that, in the test parts which have been subjected to thermochemical surface hardening treatment, the base metal grains which are beneath the hard and brittle surface layer have a tendency to become coarse and coarse grain formation is seen towards the core. The grain size that have been formed after short period plasma nitriding (1/2, 1 and 4 hours) are much less than those that have been formed after boronizing, gas nitriding and long period plasma nitriding. In specimens with similar grain size, the amount of wear is almost the same and this amount increases with the increase in grain size.
8. The amount of wear in test parts which have been subjected to thermal spraying method to form wear resistant surface layers is much less than that in test parts which have been subjected to conventional heat treatment and thermochemical surface treatments.
9. Considered the thermal spraying treatments in terms of the methods applied, high velocity oxygen fuel spraying (HVOF) method appears better results than the flame spraying method. Even the additionally applied remelting treatment (HVOF+melting and flame spraying+melting) plays a more important role in reducing wear.
10. In this study, thermochemical treatments other than the oil quenched, oil quenched +tempering and thermal spraying which have been employed to reduce wear have not given satisfactory results.
11. In the SEM examinations done on the test part surface following the wear test, it has been found that with regard to the surface of the specimens which have been subjected to oil quenched, oil quenched + tempering and induction hardening treatments, significant traces of abrasive wear and a little surface damage have been found on the base metal. Although there are significant traces of abrasive wear on the surface of the specimens with thermochemical surface treatment, the wear surfaces of these specimens have also been severely damaged due to the adverse effects of coarse grains. On the contrary, slight traces of abrasive wear and regional surface damage such as damage of WC in the coating and/or breaking of WC from the matrix has been showed on the specimens with thermal spraying treatment.
12. EDX studies made on the scanning electron microscope revealed that in the specimens applied thermal spraying method, the coating layer has been bonded to the base metal by diffusion in the processes of HVOF+melting and flame spraying+melting where melting is applied after spraying.

- 13.** The measurements of surface roughness have shown that in the specimens where oil quenched, oil quenched+ tempering and induction hardening treatments have been applied with the base metal, surface roughness (Ra) decreases with increasing amount of wear and increases with decreasing amount of wear. In addition to that, in specimens with thermochemical surface treatments, surface roughness increases with increasing amount of wear.
- 14.** Statistical analysis have revealed no significant difference among the amount of wear in most specimens with similar grain size having been subjected to thermochemical treatment. Regarding the specimens with long period plasma nitriding treatment (12, 24 and 48 hours), no statistically significant differences have been found in the amount of wear both among the specimens themselves and when compared with other specimens which have been subjected to boronizing (B) and gas nitriding (GN 6 and GN 12) treatments. Similarly, GN6 and GN 12 specimens have not presented any statistically significant differences both among themselves and when compared to boronizing treatment. On the contrary, some statistical differences have been found among thermal spraying methods and between these methods and all other types of treatment.

In order to combat with wear, the first rule is to analyse the wear environment and conditions, in other words it should always be kept in mind that wear is a system characteristic. It is also important to be familiar with the wear phenomenon and types of wear.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Aşınmanın Ekonomik Önemi

Makina parçalarında ortaya çıkan başlıca hasarları, insana bağlı nedenler ve teknik esaslara bağlı nedenler oluşturur. %62' lik kısmı oluşturan insana bağlı nedenler önceliklerine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır;

- %16 Hatalı bakım,
- %12 Konstrüksiyona uymayan tasarım,
- %12 Uygun olmayan çalıştırma,
- % 9 Yanlış iş temposu
- % 6 Sağlıksız personel,
- % 7 Özel nedenler

şeklindedir. %38' lik kısmı oluşturan teknik esaslara bağlı nedenleri ise;

- %11 Yıpranma,
- %21 Makinanın aşırı çalışması,
- % 6 Diğer nedenler

oluşturmaktadır. Verilerden de görüldüğü gibi %38' lik teknik esaslara bağlı nedenlerin %11' ini yıpranma yani aşınma, korozyon, ısı ve diğer etkenler oluşturmaktadır. Dünyada yıpranmanın neden olduğu yıllık kayıp 200 milyar DM' dir[1].

Almanya' da aşınmadan dolayı meydana gelen zararın yıllık 5 milyar DM olduğu tahmin edilmektedir. Bu zararların endüstriye göre dağılımları ise;

- Metalurji 2 milyar DM
- Madencilik 1.5 milyar DM
- Plastik imalat sanayii 0.5 milyar DM
- Diğerleri 1 milyar DM

şeklindedir[2, s 150].

Birbirleri ile temasta olan yüzeyler hareket ettiklerinde sürtünme sonucu meydana gelen aşınma, gittikçe artan malzeme kaybı ile her iki yüzeyde de hasar oluşturacaktır. Aşınma; parçalar arasındaki açıklığın artışına, istenmeyen hareket serbestliğine, hassasiyet kaybına ve bununla beraber çok daha hızlı aşınmaya ve bazen de yorulma kırılmasına neden olmaktadır[3, s 1].

Aşınma problemlerinin çözümü, dünyada ilk defa 1966 yılında "İngiltere Hükümet Komitesi" tarafından ele alınmıştır. Komite, İngiltere endüstrisinde aşınmayı azaltacak önlemler alındığında elde edilecek olan tasarrufun araştırmasını yapmıştır (Tablo 1.1). Komite, daha fazla tasarrufun daha ileri araştırmalar ile elde edilebileceğini düşünerek Gayri Safi Milli Hasıla'nın en az %1' ini bu konuda yapılan araştırmalar için sermaye olarak kullanılacağını da kararlaştırmıştır[3, s 2].

OECD araştırma grubu da aşınmadan dolayı meydana gelen ekonomik kaybın A.B.D.' de Gayri Safi Milli Hasıla' nın %2,5' u, Almanya' da ise %4,5' u olduğunu belirtmiştir[4].

Kanada ekonomisinde ise aşınmadan dolayı yıllık kayıp yaklaşık 3,9 milyar \$' dır. Bu toplam kaybın sadece 2,5 milyar \$' ı aşınmanın değişik bir türü olan abrazif aşınmadan kaynaklandığı belirlenmiştir[5].

Ekonomik yönden çok önemli bir konu olmasına karşın, geleneksel makina mühendisliği çerçevesinde aşınma, yakın geçmişe kadar pek ağırlık kazanamamıştır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, aşınmanın eskiden günümüz tekniğinde olduğu kadar belirgin ve etkin bir rol oynamayıpıdır. Bugün her alanda daha ekstrem koşullarda çalışılmaya başlanmıştır. Çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklar, vakum veya yüksek basınç, artan hız v.s. gibi geçmişin ölçütleri dışına taşan teknik ile dar tolerans sınırları içinde kalma zorunluluğu, aşınmanın ön plana çıkmasını gerektiren yeni olgulardır[6, s 11].

Tablo 1.1 Aşınmayı önleme sonucunda İngiltere endüstrisinde elde edilen ekonomiklik[3, s 2].

Düşük sürtünmeden dolayı harcanan enerjideki tasarruf	%5*
İnsan gücündeki azalma	%2
Yağlama fiyatlarındaki tasarruflar	%2
Bakım ve onarım fiyatlarındaki tasarruflar	%45
Arızadan kaynaklanan kayıplardaki tasarruflar	%22
Daha iyi verimlilik ve kullanılışlılık ile yatırım masraflarındaki tasarruflar	%4
Tesisin artan ömründen dolayı ilk yatırım masraflarındaki tasarruflar	%20
(*)%' ler 1965 yılı fiatları baz alınarak 515.10 ⁶ pound üzerinden elde edilen tasarruf miktarlarını gösterir.	

BÖLÜM 2

AŞINMA

2.1 Aşınmanın Tanımı

Aşınma olayı çok karmaşık olmasından ötürü günümüze kadar bir çok tanımı yapılmıştır. Teknik anlamda aşınma, mekanik etkileşimlerin sonucunda katı bir yüzeyden malzeme kaldırılmasıdır[4, 6-8].

Standartlara göre Alman DIN 50320' de aşınma; “malzeme yüzeylerinden, mekanik nedenlerle ufak parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde meydana gelen değişiklik” olarak tanımlamaktadır. Yüzeylerin talaş kaldırılarak işlenmesi, taşlanması, parlatılması ile yeni motorun alıştırılması gibi işlemler aşınma olayı olarak kabul edilmemektedir. Bunun nedeni, istenilerek ve kontrollü olarak meydana getirilmiş olmasıdır. Kimyasal, termik, elektriksel veya fiziksel nedenlerle eskime veya yüzeyden büyük parçaların kırılarak ayrılması da aşınma olayı olarak düşünülmemelidir[7, 9].

Ramesh, Seshadri, Iyer[4] tarafından aşınma; “mekanik etkileşimlerin sonucunda yüzeyden taneciklerin kademeli kaldırılması” şeklinde tanımlanmış ancak korozyonun, diğer malzeme kaldırma işlemlerinin ve mekanik etkileşimin olmadığı kademeli hasarların bu tanıma dahil edilemeyeceğini de ayrıca belirtmişlerdir.

Misra ve Finnie[8] ise; aşınmayı, mekanik etkileşimlerin sonucunda katı bir yüzeyden malzeme kaldırılması şeklinde ifade ederek malzeme kaldırılmasının kimyasal etkenlerle de olabileceğini belirtmişlerdir.

Mühendislik malzemelerinin aşınması konusunda OECD araştırma grubu da aşınmayı “yüzeydeki izafi hareketin sonucunda parçanın çalışan yüzeyinden malzemenin ileri derecede kaybı” şeklinde tanımlamıştır[4,10, s 4].

1976 yılında DIN 50320' ye göre yapılan aşınmanın yeni tanımı ise; “katı, sıvı veya gaz karşı cisme göre izafi hareket ve temas şeklinde mekanik bir etkiden dolayı katı bir cismin yüzeyinden malzemenin ileri derecede kaybı” olarak tanımlanmıştır[10, s 4].

Aşınmayı bir tanım olarak vermek yerine, aşınma olayını belirleyen bazı koşulların veya kriterlerin belirtilmesi yerinde olacaktır. Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olaylarının aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- Yavaş ancak devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstenmediği halde meydana gelmesi.

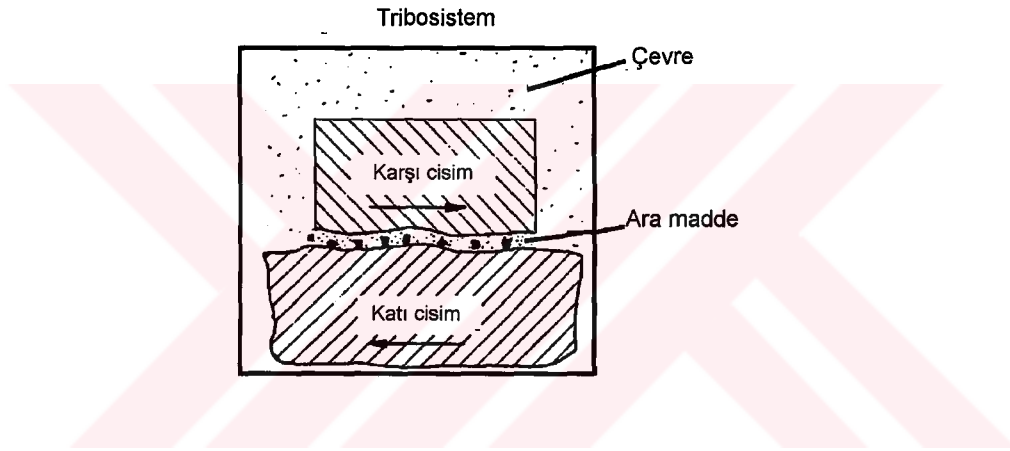
Korozyon, yukarıdaki bütün şartları sağlamasına karşın sürtünme ve mekanik hareket olmaksızın sadece kimyasal veya elektrokimyasal etki ile meydana geldiğinden aşınma olayı olarak düşünülmemelidir. Ancak mekanik bir etki ile birlikte kimyasal veya elektrokimyasal etki ile de malzeme yüzeyinden mikro tanecikler kopar veya yüzey bölgesi değişikliğe uğrar ise bu durumda korozyon aşınma kapsamına alınmalıdır[7].

2.2 Tribolojik Sistem

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır [3,s 1,10, s 3, 11]. Yunanca sürtünme anlamına gelen “tribos” kelimesinden türetilen triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve

tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir[10, s 3]. Ayrıca triboloji, “aşınma problemlerinin çözümü ile ilgilenen ve malzeme bilimi, kimya, fizik ve mühendislik bilimleri gibi çeşitli bilim dallarını içeren bir bilimdir” şeklinde de tanımlanmaktadır[12].

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır[7, 11]. Şekil 2.1’ de bir tribolojik sistemin elemanları görülmektedir.



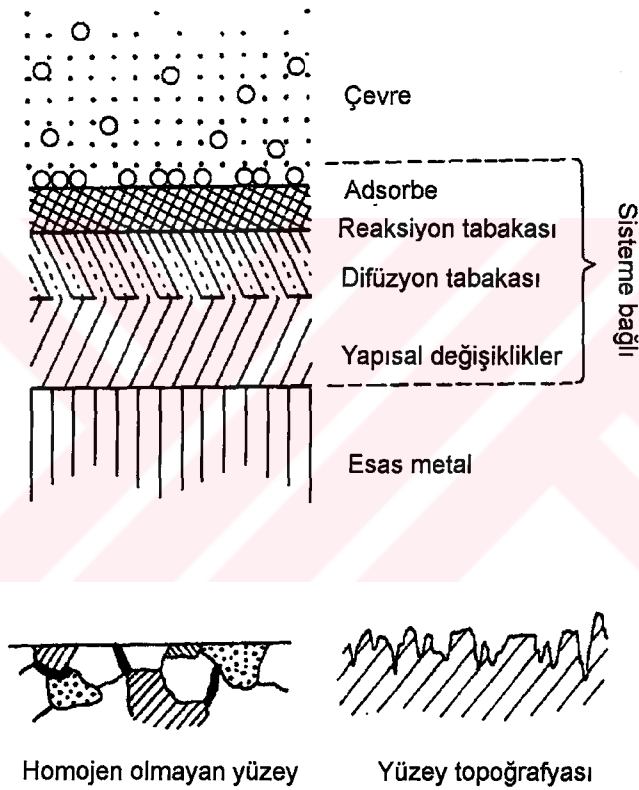
Şekil 2.1 Bir tribolojik sistemin elemanları[10, s 82].

Aşınma olayında 5 parametre gözlenir. Bunlar: (1) Ana malzeme(aşınan), (2) Aşındıran, (3) Ara malzeme, (4) Hareket, (5) Yük. Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşı cisim aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzeme ise katı, sıvı, gaz fazlarından birinde veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Hareket kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir. Yük ise gerilmenin az veya çok olmasının

yanısıra sabit, değişken, artan, azalan ve darbeli olabilir [1, 6, s 15, 7, 9, 10, s 83].

2.3 Aşınma Mekanizmaları

Sürtünme ve aşınma, hareketli parçaların yüzeylerinde meydana gelmektedir. Dolayısı ile yüzeyler bütün etkileşimlerin ana bölgesi şeklinde önemli bir rol oynamaktadır. Bütün katı yüzeyler (Şekil 2.2) mikro ölçekte incelendiğinde ideal olarak süreksiz biçimde değildir.



Şekil 2.2 Yüzey mikroyapısı[12].

Yüzeyin boyuna kesiti incelendiğinde; talaş kaldırma işlemlerinden dolayı yapısal değişimlerin olduğu tabakalar ortaya çıkmaktadır. Bu değişim tabakaları malzemenin yapısına ve işlenmesine bağlıdır. Özellikle, ısıtma işlem veya yüksek çalışma sıcaklıklarından sonra elementlerin içeriye ve dışarıya doğru yayıldığı difüzyon tabakası, reaksiyon tabakası ile aralarında bağlantısı olan tabakalardır. Örneğin, belirli elementlerin oksidasyonu, oksit

tabakası altında oksit oluşturan elementlerin azalmasına yol açabilir. Birbirleri ile etkileşim durumundaki parçaların sürtünmesini ve aşınmasını azaltmak için yapılan ilaveler de teknik açıdan bir hayli önemli etkiye sebep olan adsorbe tabakasını oluşturur.

Yüzeyin enine kesitinde ise, farklı fazlar ve/veya farklı tane yönleri şeklinde heterojen bir yapı ve pürüzlü veya dalgalı biçimde yüzey topoğrafyası görülmektedir[12].

İki yüzey birbirine yaklaştırıldığında temas, başlangıçta sadece birkaç noktada meydana gelmektedir. Normal yük artırıldığında daha çok sayıdaki pürüzler birbirleri ile temasa geçerek yüzeyler birbirlerine daha da yaklaşır. Pürüzler, yüzeye gelen normal yükü ve yüzeyler arasındaki etkili olan sürtünme kuvvetini karşılamaktadır[3, s 14].

Tribosistemdeki elemanların birbirleri ile olan etkileşimleri veya elemanlar üzerine olan etkiler çok değişik olabilir. Esas sürtünme elemanı üzerine olan etkiler; kayma, yuvarlanma, titreşim ve akma şeklinde olabilir(Şekil 2.3). Dolayısı ile aşınma işlemleri de kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, titreşim aşınması ve erozif aşınma şeklinde sınıflandırılabilir. Aşınma işlemlerinin bir diğer sınıflandırılması da karşı elemanın fiziksel durumunu içermektedir. Karşı eleman, esas sürtünme elemanına katı, sıvı veya değişik açılarda etki edebilir[10, s 83].

DIN 50320 aşınma işlemlerini; adhezyon, abrazyon, yüzey yorulması ve tribokimyasal reaksiyon şeklinde dört temel aşınma mekanizması şeklinde sınıflandırırken bazı araştırmacılar ise yenme, erozyon, korozyon, yüzey yorulması, kavitasyon, oksidasyon gibi daha fazla sayıda aşınma mekanizmalarını içerecek şekilde farklı gruplandırma yapmışlardır[10, s 86].

Ayrıca aşınma işlemleri, aşınma izinin görünüşüne göre, malzeme kaldırılmasının veya hasarın meydana geldiği fiziksel mekanizmaya göre ve aşınmanın gerçekleştiği koşullara göre üç ayrı grupta da sınıflandırılabilirler. Aşınma izi görünüşü çukurlanma, pullanma, çizilme, parlama, oyulma,

kemirilme ve kazıma şeklinde olabilir. Aşınmanın gerçekleştiği fiziksel mekanizma adhezyon, abrazyon ve oksitlenme şeklinde olabilir. Aşınma ortamı da yağlı aşınma, yağsız aşınma, metal-metal kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, yüksek gerilmeli kayma aşınması ve yüksek sıcaklık metalik aşınma şeklinde sınıflandırılabilir[13].



Şekil 2.3 Aşındırma türleri ile aşınma işlemlerinin sınıflandırılması[10, s 83].

Aşınma olayına etki eden bir ya da aynı anda birkaç faktör değişik aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarır. Bu aşınma mekanizmalarına endüstride %50 abrazyon aşınma, %15 adhezyon aşınma, %8 eroziv aşınma, %8 yenme aşınması, %5 kimyasal aşınma ve %14 diğerleri şeklinde değişen oranlarda karşılaşılır[14].

2.3.1 Kayma aşınması

İki katı yüzey, birbirleri üzerinde kayma hareketinde bulunduğunda meydana gelen aşınmaya kayma aşınması denilmektedir. Yüzeyler arasında yağ filmi var ise yağlı kayma aşınması yağ filmi olmaması durumunda ise kuru kayma aşınması denilmektedir. Bazen kayma aşınmasında, aşınma

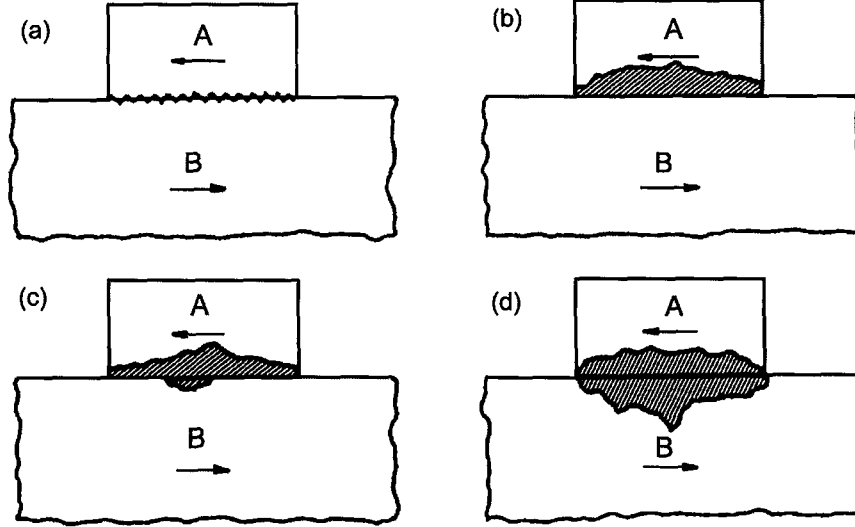
döküntüleri meydana geldiğinden bu durumda sistemde abrazyon aşınması da etkili olmaktadır. Dolayısı ile aşınma mekanizmaları arasında kesin bir sınır yoktur.

Kayma aşınmasını tanımlamak için “adhezif aşınma” ifadesinin kullanılması hatalı olabilir. Adhezyon, kayma aşınmasında önemli bir rol oynar ancak bu kayma aşınması sırasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylardan sadece birisidir[3, s 77]. Kayma temasında aşınma; adhezyon, yüzey yorulması, tribokimyasal reaksiyon ve/veya abrazyondan dolayı meydana gelebilir[10, s 355].

Adhezyon, temas halindeki yüzeyler arasındaki çekim kuvvetlerinden ortaya çıkan bir olaydır. Bu çekim kuvvetleri iyonik, kovalent, metalik, veya Van der Waals kuvvetleri olabilir[4]. Karşılıklı çalışan yüzeyler ne kadar hassas işlenirse işlensin moleküler düzgünlükte değildirler. Böyle teknik düzgünlükteki yüzeylerde görünüşteki temas alanından çok daha az olan gerçek değme noktalarında, taşınmakta olan yükün etkisi ile malzemenin akma sınırı aşılmakta ve gerçek temas alanı bu yükü taşıyabilecek genişliğe ulaşınca kadar artmaktadır. Bu plastik deformasyonla birlikte bölgesel kaynamalar da meydana gelmektedir. Bütün bu olayların hareket halindeki yüzeyler arasında olduğu düşünülürse açığa çıkan sürtünme ısı ile bu bölgelerde çok yüksek sıcaklıkların da ortaya çıkması olasıdır[6, s. 17].

Birlikte kaynamış olan yüzeylerin ayrılma durumları Şekil 2.4’ de gösterilmiştir. Bölgesel bağlantıların kayma mukavemeti, bağlantıyı oluşturan malzemelerden düşük ise temastaki yüzeyler birbirlerinden ara yüzeylerde ayrılırlar (Şekil 2.4a). Bu durum, yüzeylerin adhezyonunu azaltan oksit filmi ile kaplanması durumunda meydana gelmektedir. Ancak A malzemesi bağlantıya veya B malzemesine göre daha düşük mukavemete sahip ise bağlantının ayrılması sadece A malzemesinde meydana gelir (Şekil 2.4b). Yüksek mukavemetli bölgesel bağlantılarda ise yine A malzemesinin düşük mukavemetinden dolayı ayrılma A

malzemesinde baskın olarak meydana gelir (Şekil 2.4c). Malzemeler aynı veya eşit özelliklerde (Şekil 2.4d) ise bağlantılar ara yüzeyin her iki tarafında eşit olarak ayrılırlar[6, s 17, 10, s 87].



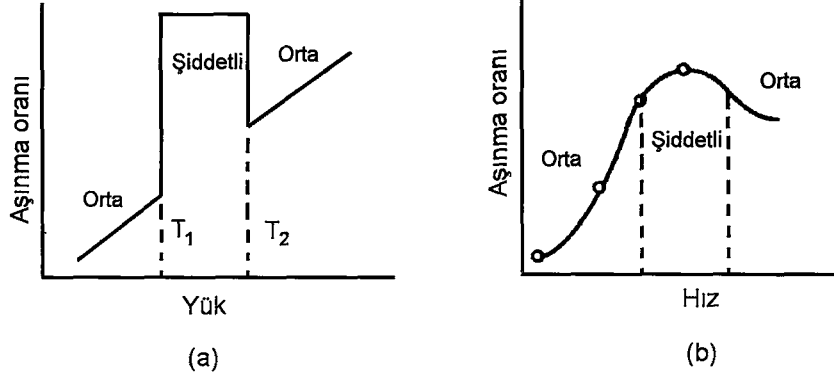
Şekil 2.4 Yüzeyler arasındaki bağlantıların ayrılması[10, s 87].

Adhezif aşınma orta ve şiddetli aşınma şeklinde iki gruba ayrılır. Aşınma ile oluşan hasar kayma hızı ve yük ile artarken sıcaklıktaki artış ile iyileşecektir (Şekil 2.5a ve 2.5b). Kayma hızındaki artış aynı zamanda sürtünme ısı etkisini de arttıracaktır. Hızdaki artış ile meydana gelen hasar, artan sıcaklık ile oluşan iyileşme etkisinden daha çok olabilir ve daha sonra sistem orta şiddette aşınmaya dönebilir[4].

Mühendislik yüzeyleri oksit filmleri ile kaplıdır. Bir çok aşınma sisteminde temas yüzeylerindeki oksit filmi kalkmaz ise, gerçek metal-metal teması asla kurulamayacaktır. Oda sıcaklığındaki hava, düşük temas yüklerinde orta şiddetli aşınma sisteminde, yüksek temas yüklerinde şiddetli aşınma sisteminde etkilidir[15].

Aşınma davranışı ya aşınma hacmi ile kayma mesafesi arasındaki basit bir doğrusal oranı ya da başlangıçtaki yüksek aşınma oranının daha düşük aşınma oranına değişiklik gösterdiği bir durum gösterir. Başlangıçtaki

yüksek aşınma oranına “geçiş aşınması”, sonraki aşınma oranına ise “denge aşınması” denilmektedir[4].



Şekil 2.5 Aşınma oranı-yük ve aşınma oranı-hız arasındaki ilişki[4].

Adhezif aşınma; metal-metal, seramik-metal, plastik-metal, seramik-seramik plastik-plastik ve diğer aşınma çiftlerini içermektedir. Metal-metal çiftlerinde, saf metaller ile düşük soğuk sertleşmeli ve tek fazlı alaşımlardan kaçınmak gereklidir. Sert metal çiftler yumuşak-sert çiftlere göre daha az aşınırlar. Seramik-metal çiftlerinde ise seramik malzemenin yüzeyinin pürüzsüz olması, yağlayıcı ve sert metal kullanılması gereklidir. Plastik-metal durumunda ise, cam gibi sert inorganik dolgu içeren plastiklerden kaçınılmalı ve tamamen sertleştirilmiş metal kullanılmalıdır. Seramik-seramik çiftlerinde ise aynı malzemelerden kaçınılması gereklidir. Örneğin alüminyum-alüminyum yerine alüminyum-krom kullanılmalıdır[16].

Adhezif aşınmanın temel eşitliği HOLM'a izafeten;

$$V = k W L / H \quad (2.1)$$

Şeklinde verilmektedir. Burada V, aşınan malzemenin hacmi; W, normal yük; L, sürtünme yolu; H, aşınan malzemenin sertliği; k ise malzemeye bağlı aşınma katsayısıdır[6, s 18, 17, s 3].

Archard isimli araştırmacı ise, adhezif aşınmanın matematiksel modelini;

$$V = k W L / 3 H \quad (2.2)$$

Şeklinde ifade etmiştir[4]. Bu denklemin Holm' un ifadesine göre farkı, keyfi olarak seçilen “k” aşınma katsayısının burada değişik aşınma kombinasyonları için deneysel olarak bulunmasıdır. Örneğin, az karbonlu çelik çiftinde $k = 45.10^{-3}$, paslanmaz çelik çiftinde $k = 21. 10^{-3}$, bakır - az karbonlu çelik çiftinde bakır için $k = 1,5. 10^{-3}$ ve çelik için $k = 0,5. 10^{-3}$ dir[6, s 20].

2.3.2 Abrazif aşınma

Bir yüzey üzerinde ve yüzeye eğik bir kuvvetin etkisinde olan aşındırıcı(abrazif) taneciğinin hareketine abrazif aşınma denilmektedir. Bu kuvvetin dik bileşeni sert taneciğe etki ederek yüzeyin etkilenmesine yol açar. Yüzeye paralel olan kuvvet bileşeni ise tanecik ve yüzey arasında teğetsel harekete neden olur.

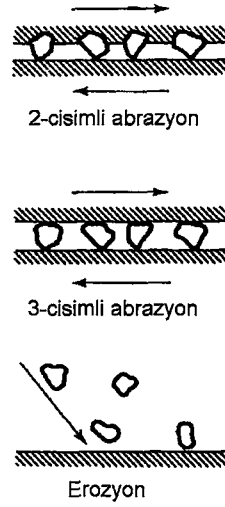
Aşındırıcı tanecikler ile temas halinde olan bir parça için abrazif aşınmanın önemi oldukça büyüktür. Zemin ile temas halinde olan aletler, örneğin sabanlar, toprak kazıyıcılar, grayder ve buldozer bıçakları bunun yanında madencilik ve minerallerden yararlanma endüstrisi ve diğer pek çok alanlarda bu tür aşınma ile karşılaşmaktadır[18].

Abrazif aşınma genel olarak 2-cisimli ve 3-cisimli abrazif aşınma (Şekil 2.6) şeklinde iki gruba ayrılır[2, 3, s 133, 4, 7, 8, 16, 18]. Serbest bir şekilde akan taneciklerin tek bir yüzeye hücum etmesine erozyon denilmektedir ve abrazif aşınmanın özel bir durumudur[3, s 133, 7, 18].

2-cisimli abrazif aşınma, pürüzlü bir yüzeyin veya sabit aşındırıcı taneciklerin hareketi ile yüzeyden malzemenin kaldırılmasıdır.

İki kayan yüzey arasında serbest tanecikler olması durumunda meydana gelen abrazif aşınmaya 3-cisimli abrazif aşınma denir. 3-cisimli abrazif

aşınmada iki yüzey arasındaki sert tanecikler kayma veya yuvarlanma hareketi yaparlar[3, s 133, 8, 18].



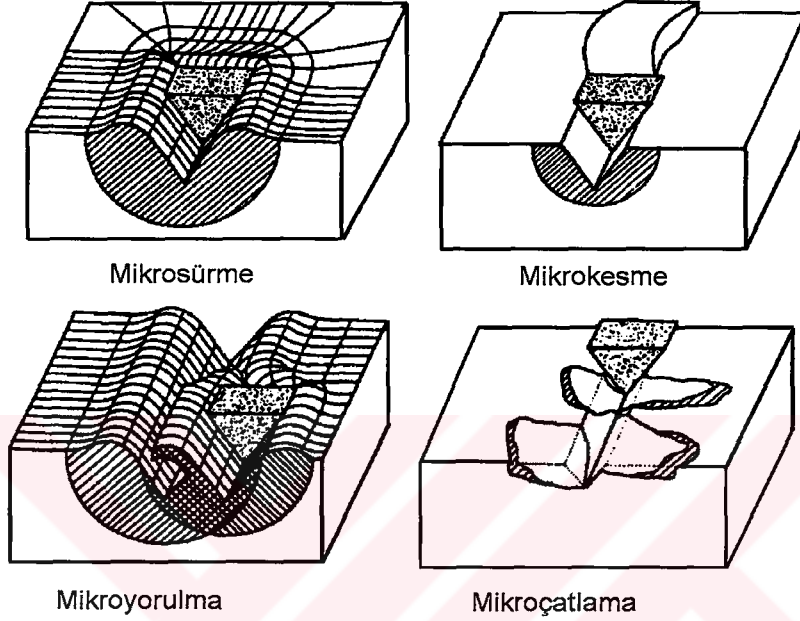
Şekil 2.6 Abrazif aşınmanın türleri[3, s 133].

Yüzeyler arasında bulunan yağlama yağına havadaki ince toz zerreciklerinin girmesi veya tribolojik sistem bileşenlerinin bölgesel olarak oksitlenmesi ile meydana gelen aşındırıcı tanecikler 3-cisimli abrazif aşınmaya neden olur. Buna karşılık kaya delici matkap 2-cisimli aşınmaya örnek olarak verilebilir. 3-cisimli abrazif aşınmadaki aşınma oranı 2-cisimli abrazif aşınmaya göre daha düşüktür. Bunun nedeni, hareketli taneciklerin zamanın %90' nını kesme etkisi meydana getirmeden yuvarlanma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır[3, s 134, 10, s 95, 18].

Katı, sıvı, gaz veya bunların birkaçının kayma veya darbe etkisi ile katı yüzeyler üzerinde erozif aşınmaya neden olunmaktadır. Erozif aşınma, tekrarlı şekil değişimi ve kesmenin kombine işlemidir. Kesme işlemine, dar açıda katı yüzeye çarpan tanecikler ve yüzeyden bir miktar malzemenin kazılması olayı katkıda bulunur. Erozif aşınmanın püskürtme erozyonu, çamur erozyonu, yağmur erozyonu, erozyon-korozyon ve ısı erozyon şeklinde değişik çeşitleri vardır[4]. Erozyon aşınmasında, aşındırıcı taneciğinin boyutu ile birlikte tanecik hızı ve darbe açısı erozif akışın kinetik

enerjisinin bir ölçüsüdür. Aşınmaya uğrayan yüzey gevrek kırılma yüzeyine benzer şekilde ince taneli bir görünüşe sahiptir[14].

Abrazif aşınma, mikrokesme, mikrosürme, mikroyorulma ve mikroçatlama şeklinde dört farklı mekanizma ile meydana gelir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Abrazif aşınma mekanizmaları[5].

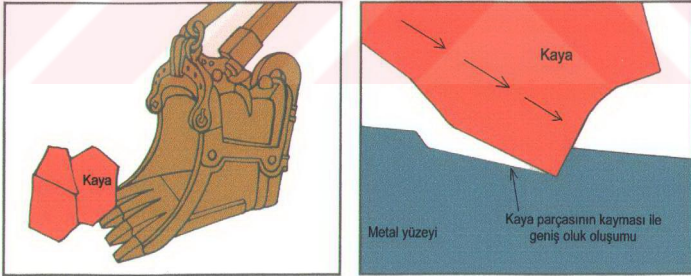
Mikrosürme mekanizması ile abrasif taneciği tarafından meydana getirilen aşınma oluşu hacminin bir kısmına eşit malzeme kaybı meydana gelir. Kalan kısım oluk kenarlarına plastik şekil değişimi ile yer değiştirir. Mikrokesme mekanizmasında ise abrasif taneciğinin tek bir geçişi ile meydana gelen aşınma oluşu hacmine eşit malzeme kaybı meydana gelir. Mikroyorulma mekanizması ise yüzey yorulmasından kaynaklanır. Bu mekanizma tekrarlı değişken yükleme ile çatlak oluşumu ve çatlak yayılması şeklinde karakterize edilir. Çatlak, başlangıçta aşınma yüzeyinde veya aşınma yüzeyi altında ve sonra olukta olabilir. Sonuçta aşınma yüzeyinde yüzeysel çukurlar ve küçük çatlaklar oluşur. Özellikle gevrek malzemelerde oldukça yüksek gerilme birikimleri olduğunda mikroçatlama mekanizması meydana gelir. Bu durumda çatlak oluşumu ve ilerlemesi

olduğundan aşınma yüzeyinden geniş parçacıklar kaldırılmaktadır[5, 10, s 96, 18].

3-cisimli abrazif aşınma oyuncu abrazyon, yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon ve düşük gerilmeli çizici abrazyon şeklinde üç gruba ayrılır.

Herhangi bir malzeme ve abrazif taneciği için aşınmanın şiddeti etkili olan kuvvete bağlıdır. Etki eden kuvvetin şiddeti yüksek olduğunda her abrazif taneciği başına aşınma oranı da yüksek olabilecektir. İster sabit tanecik olsun ister serbest tanecik olsun bu tür aşınma mekanizmasına oyuncu abrazyon denilmektedir[18].

Oyucu aşınma sonucunda metal yüzeyinden oldukça büyük parçacıklar kaldırılmaktadır. Oyucu aşınma, bir kepçenin taş yığınının saplandığı durumdaki gibi düşük hızda veya darbeli tür ezicilerdeki çekiç ya da kırıcı çubuklar gibi yüksek hızda da meydana gelir (Şekil 2.8). Oyucu aşınmaya şiddetli darbelerde etki etmektedir ve uygun aşınma dirençli malzeme seçiminde oldukça önemli bir faktör olmaktadır[19, 20].

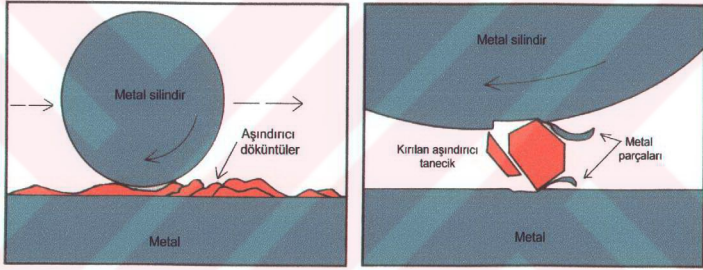


Şekil 2.8 Oyucu abrazyon[20].

Ostenitik mangan çelikleri bu tür aşınmaya dirençli malzemeler olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra su verilmiş ve temperlenmiş orta karbonlu

Çelikler de yeterli süneklik ve toklukları ile bu tür aşınmaya dirençli malzemeler olarak seçilebilirler[18, 19].

Abrazif taneciğine uygulanan gerilme, taneciğin ezilme direncini aşacak derecede yüksek ise bu tür aşınmaya yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon denilmektedir[18, 19, 21]. Bu aşınma türü (şekil 2.9), sürekli devam etmekte olan parçalanma veya yüzeyler üzerinde bulunan ve başlangıçta küçük boyutta olan abrazif taneciğinin öğütülmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Aşınma, abrazif temas noktasında yoğunlaşmış gerilme birikimi ile meydana gelmekte ve sonuçta plastik akış ve metal yüzeyinin sünek bileşenlerinin çatlaması gibi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır[18].

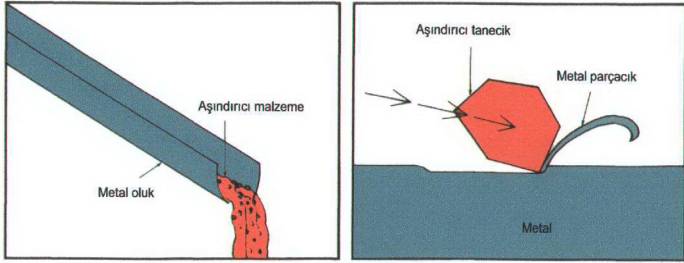


şekil 2.9 Yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon[20].

Yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon konveyör zincirleri, dişli zincir yuvası, açık dişliler, toprak kaldırma makinalarının bazı parçaları ile doğal minerallerin öğütüldüğü bilyalı ve ubuklu değirmenlerde göreceli olarak yüksek basıncılarda ortaya çıkmaktadır. Bu aşınma türü ile karşılaşacak olan parçaların imalinde nikel-krom' lu beyaz dökme demir ve yüksek karbonlu çelikler gibi kırılma toklukları düşük nispeten sert ve gevrek malzemeler yaygın biçimde kullanılmaktadır[18, 19].

Düşük gerilmeli çizici abrazyonda (şekil 2.10) ise gerilmeler, abrazif taneciğinin ezilmesine veya kırılmasına neden olacak derecede yüksek

değildir ve abrazif taneciğinin darbe kuvveti son derece düşüktür[8, 18, 19, 20].

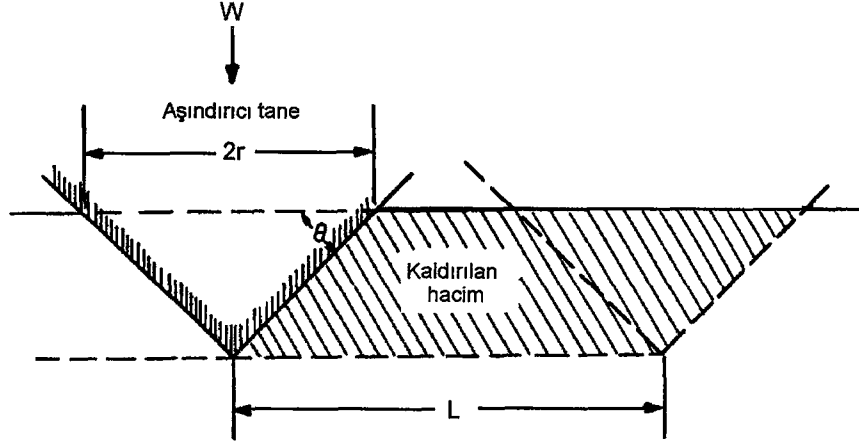


Şekil 2.10 Düşük gerilmeli çizici abrazyon[20].

Düşük gerilmeli çizici abrazyonda metal parçaları, değişen hızlarda yüzeyde hareket eden sert, keskin taneciklerin tekrarlı çizici etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Hız, sertlik, kenar keskinliği ve tanecik boyutunun başlangıç açısı aşınma miktarını etkileyen parametrelerdir[20].

Düşük gerilmeli çizici abrazyon, pulluk demirinin taşsız, killi veya kumlu topraklarda çalışması veya pompalarda akışkan içerisine girmiş ufak boyuttaki aşındırıcı taneciklerin sebep olduğu aşınma ile karakterize edilmektedir[18]. Bu tür abrazyona direnç için nispeten gevrek malzemeler kullanılabilir. Beyaz dökme demirler genelde tercih edilen malzemelerdir. Genellikle, yüksek alaşımlı dökme demirlere göre daha kısa ömre sahip perlitik dökme demirler de kullanılmaktadır ancak bunlar yerini, yüksek aşınma direnci ve bu nedenle servis bazında çok daha ekonomik olan martenzitik dökme demirlere bırakmıştır. Az alaşımlı veya alaşımsız beyaz dökme demirlerin kırıldığı yada pullanma şeklinde dökülerek aşındığı durumlarda martenzitik dökme demirler daha kullanışlı olurlar[19].

Abrazif aşınma işlemi genel olarak basit bir kesme işlemi gibi abrazif taneciği de küre, koni veya piramit şeklinde basit bir şekil olarak düşünüldüğünde (Şekil 2.11) kaldırılan malzeme hacmi;



Şekil 2.11 Abrazif aşınma kaybı modeli[22].

$$V = W \cdot L \cdot \tan\theta / \pi \cdot H \quad (2.3)$$

Bu denklemde; W , yük; L , koninin ilerlediği mesafe; θ , koninin eğim açısı; H ise malzemenin sertliğidir. (2.3) abrazif aşınma ile (2.2) adhezif aşınmanın denklemleri birbirlerine eşitlendiğinde abrazif aşınma katsayısının değeri denklem (2.4)' deki gibidir [6, s 22, 22].

$$K = 0,96 \cdot \tan\theta \quad (2.4)$$

Abrazif aşınma katsayısı çelik malzemede 2-cisimli abrazif aşınma için $k = 120 \cdot 10^{-3}$, prinç malzemede 2-cisimli abrazif aşınma için $k = 80 \cdot 10^{-3}$, çelik malzemede 3-cisimli abrazif aşınma için $k = 5 \cdot 10^{-3}$ değerindedir [6, s 23].

Soemantri[23], abrazif aşınma işlemlerini kesme ve taşlama gibi diğer malzeme kaldırma işlemleri ile karşılaştırmak amacı ile çeşitli aşınma türlerinin veya şekillendirme işlemlerinin bir göstergesi olacak şekilde özgül enerjinin kullanılabileceğini ifade etmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 incelendiğinde, malzeme kaldırma işleminde 3-cisimli abrazif aşınmanın verimliliği diğer işlemlere göre çok azdır. Ancak, malzeme kaldırma işleminde 2-cisimli abrazif aşınma, hemen hemen kesme işlemi

kadar etkilidir. Bu karşılaştırma malzemenin aşınma davranışını belirleyebilir. Örneğin, 2-cisimli abrazif aşınma oranının, kesmeye göre 2/8 oranında olduğu söylenebilir[23].

Tablo 2.1 Çeşitli malzeme kaldırma işlemlerinin özgül enerjisi[23].

İşlem	Özgül Enerji
Kesme	2H
2-cisimli abrazif aşınma	8H
Erozif aşınma	52H
Taşlama	60H
Kayma Aşınması	90H
3-cisimli abrazif aşınma	167H
H : Malzeme sertliği	

2.3.3 Tribokimyasal aşınma

Ortamda bulunan ara malzeme ve gazlar etkisi ile tribo-kimyasal ve tribo-adsorbsiyon gibi olaylar sonucunda aşınma çifti yüzeylerinde oluşan sınır tabaka, yassı aşınma parçacığı şeklinde sıyrıldığında yeniden oluşmakta ve aşınma olayını önemli ölçüde etkilemektedir[24]. Özellikle, kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makina elemanlarının yüzeyleri, bu maddeler ile reaksiyona girdiğinde ve ayrıca yağlayıcıda bulunan maddelerin de etkisinden dolayı ortaya çıkan bu sınır tabaka, yükün etkisi ile kırılmakta ve böylece aşınma parçacıklarını meydana getirmektedir. Sınır tabakanın kırılmasından sonra temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucunda yeniden sınır tabaka oluşmakta ve bu durum sürekli devam etmektedir[25, s 26].

Bilya ve yatak arası veya yatak ve bilyalı yatak üzerindeki muhafaza arası, mahruti dişliler, miller veya demiryolu aksları, perçinli bağlantılar, kavramalar, zincir halkaları, yaprak yaylar, kayan yüzeyler arasındaki contalar tribokimyasal reaksiyondan dolayı aşınabilen parçalardır[10, s 105].

2.3.4 Yorulma aşınması

Yuvarlanma hareketi sırasında tekrarlı yükleme sonucunda malzemenin sürekli mukavemet sınırı geçilir ise, malzeme yüzeyinde küçük çukurcuklar meydana gelmektedir. Yüzeyden pullanma şeklinde malzeme kalktığında parçanın ömrü kısa zamanda sona ermektedir. Rulmanlar, kamlar, rulolar ve dişliler gibi makina elemanlarında bu tür aşınma ortaya çıkmaktadır [10, s 99, 26, s 48].

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru ilerleyerek yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmektedir[25, s 23, 26, s 48].

2.4 Aşınma Miktarının Ölçümü ve Birimleri

Araştırmacılar, gerçekleştirdikleri aşınma deneyi sonuçlarını birbirlerinden çok farklı şekillerde değerlendirmişlerdir. Bu nedenle deney sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırılması çok zor yapılabilmekte hatta karşılaştırma yapmak bazen mümkün olamamaktadır. Aşınma miktarı zamana, kayma yoluna, aşındıran malzemenin debisine ve etkili olan aşınma mekanizmasına bağlı olarak farklılık gösterir. Aşınma miktarı, aşınmakta olan parçanın şekil ve ağırlık değişimine bağlı sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak ayırt edilmelidir. Olası yanlış değerlendirmeden kaçınmak için DIN 50321' de bazı ortak büyüklükler tavsiye edilmektedir[9].

DIN 50321' e göre: W_1 , doğrusal aşınma miktarı (m); $W_{1/s}$, doğrusal aşınma şiddeti (1); W_m , aşınma ağırlık kaybı (g); W_v , hacimsel aşınma ağırlık kaybı (m^3); $W_{v/s}$, hacimsel aşınma şiddeti (m^3/m) olmak üzere;

$$W_{1/s} = W_m / \rho \cdot A \cdot s = W_1 / s \quad (2.5)$$

$$W_v/s = W_m / \rho.s = W_v / s \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) denklemlerinde; ρ , aşınan malzemenin yoğunluğu; A, aşınma alanı; s, aşınma yolu uzunluğudur. W^{-1} ise aşınma ağırlık kaybının tersi olup aşınma direnci diye isimlendirilmektedir[10, s 124].

Aşınan parçanın deneyden önceki ve deneyden sonraki ağırlıklarının belirlenmesi en çok kullanılan yöntem olup aynı zamanda en doğru aşınma miktarını vermektedir. Radyoaktif izotoplar veya X-ışını teknikleri kullanarak deney parçalarının çalışma sırasında deney cihazından sökülmeden devamlı olarak ölçülmesi mümkün olabilmektedir[27].

Aşınma miktarının bir diğer ölçüm yönteminde ise, değişen deney şartlarından bağımsız olarak deney numunesinin aşınma direnci, kontrol veya referans malzemesine göre izafi olarak ifade edilebilir ki bu da "izafi aşınma direncini" belirtir[8].

2.5 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma olayının karmaşık bir özellik göstermesi, oldukça fazla aşınma mekanizmalarının varlığı ve bu mekanizmaları etkileyen bir çok değişkenlerin olması nedeni ile bu değişkenlerin tribolojik sistemi ne şekilde etkileyeceğini önceden belirleyebilmek oldukça zordur. Aşınmayı etkileyen paramatereler, literatürde çeşitli bakımlardan sınıflandırılmakla beraber burada yapılan sınıflandırmada abrazif aşınma mekanizması dikkate alınacaktır.

Aşınma direnci, karakterestik bir malzeme özeliği değildir. Tüm aşınma olayları tribolojik sistemin bir parçası şeklinde dikkate alınmalıdır. Aşınma oranını etkileyen çeşitli tribo-sistem parametreleri:

- Tasarım Özellikleri: Yük, hareket, parça şekli, yağlama, sıcaklık ve çevre,

- İşlem Şartları: Temas alanı, temas basıncı, yüzey durumu, yağlama, sıcaklık ve çevre,
- Abrazif Özeliği: Sertlik, keskinlik, şekil, boyut, süneklik ve aşınma direnci,
- Malzeme özellikleri: Alaşımın bileşimi, alaşımın mikroyapısı, yüzey sertliği ve kaplama[28].

2.5.1 Tasarım özellikleri

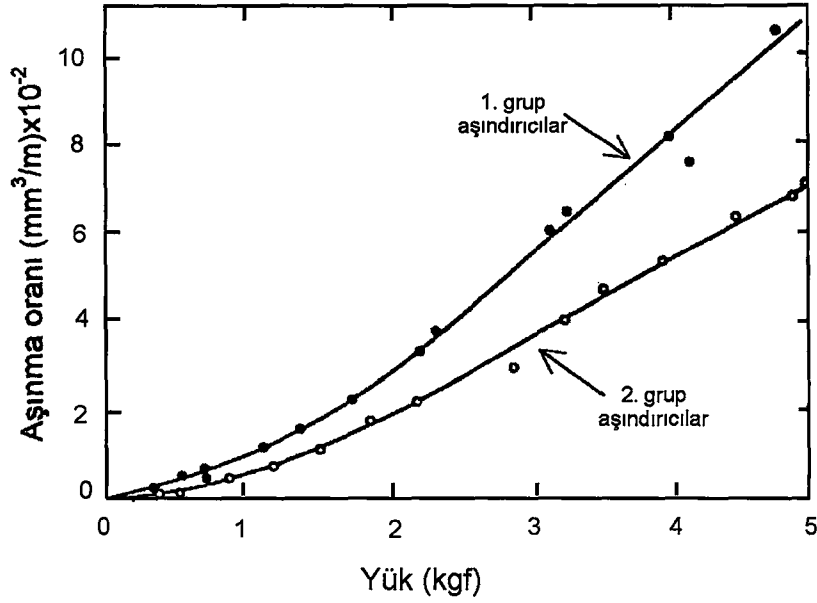
2.5.1.1 Yük

Tsukizoe[29], teorik olarak adheziv ve abrazif aşınmanın her ikisinde de aşınma oranının yük ile orantılı olduğunu ayrıca deneysel olarak da %0,45 C' lu bir çeliğin aşınma deneyleri sonucunda aşınma oranı ve yük arasındaki ilişkinin düz bir hat gösterdiğini ve aşınma oranının yüke doğru orantılı olduğunu belirtmiştir.

Hirano ve Levy[30], 7075 alüminyum alaşımının 2-cisimli abrazif aşınması üzerine yaptıkları çalışmalarında, aşınma oranının uygulanan yüke doğru orantılı olduğunu göstermişlerdir.

Moore[34], deney numunesinde kütleli şekil değişiminin başladığı kritik bir yüke kadar aşınma hacminin yük ile doğru orantılı olduğunu belirtmiştir. Nathan ve Jones ise daha küçük tane boyutlarında ve daha düşük yüklerde doğrusallıktan sapmanın olduğunu ifade etmişlerdir[31].

Misra ve Finnie[32], AISI 1020 çeliğinin 3-cisimli abrazif aşınmasını inceledikleri bir çalışmada, aşınma oranının aynı boyuta sahip iki farklı grup abrazif için (250 μm SiC), bir kuluçka periyodundan sonra yükün fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.12). İki ayrı yerden elde ettikleri abraziflerin aşınma oranlarının aynı yük değeri için farklı olmakla beraber aşınma oranı eğilimlerinin her iki grup için de aynı olduklarını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.12 Yükün aşınma hacmi üzerine etkisi[32].

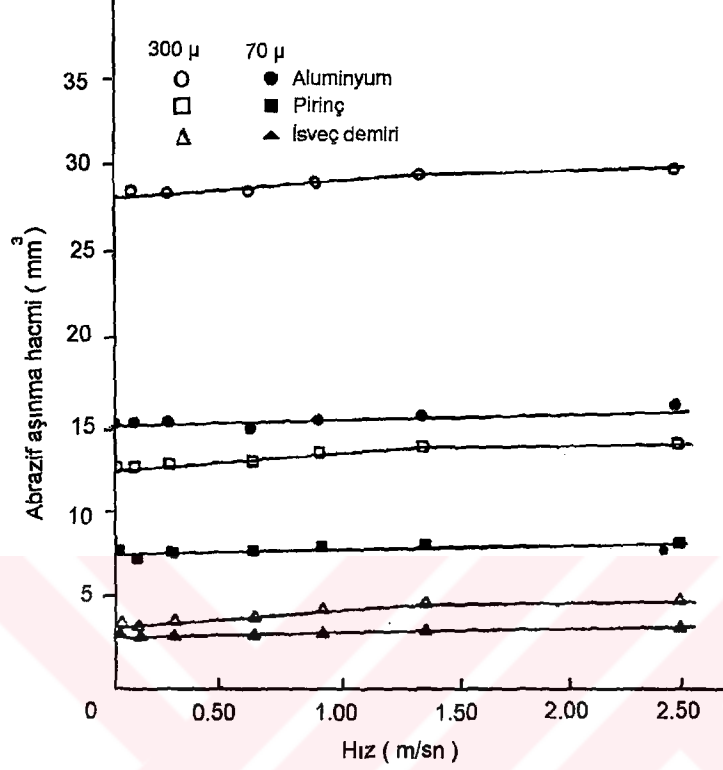
Sın, Nuh ve Saka[33], abrazyon taneciklerinin temas sayısının yük ile doğrusal olarak arttığını dolayısı ile uygulanan yük ile aşınma oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir.

2.5.1.2 Hız

Khrushov ve Babichev ile Nathan ve Jones, kayma hızının 0-2,5 m/s aralığındaki artışlarda aşınma hacminin çok az arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.13). Aşınma hacmindeki bu artış büyük tane boyutlarında daha belirgindir. Nathan ve Jones, bu artışı büyük boyuttaki tanelerden dolayı abrazyondaki ısınma artışından kaynaklandığını, Khrushov ve Babichev ise abrazyon özelliklerindeki %13' lük değişiklikten dolayı olduğunu ileri sürmektedir[8, 31].

Ancak yukarıda belirtilen araştırmacıların aksine Larsen-Basse ve Tanouye, alüminyum, bakır ve demir gibi malzemeler için 0,5-82 mm/s kayma hızı aralıklarında hızdaki azalma ile aşınma direncinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuç, Misra ve Finnie tarafından yapılan deneylerle de doğrulanmıştır. Belirli bir hızdan sonra kayma hızının aşınma üzerine çok

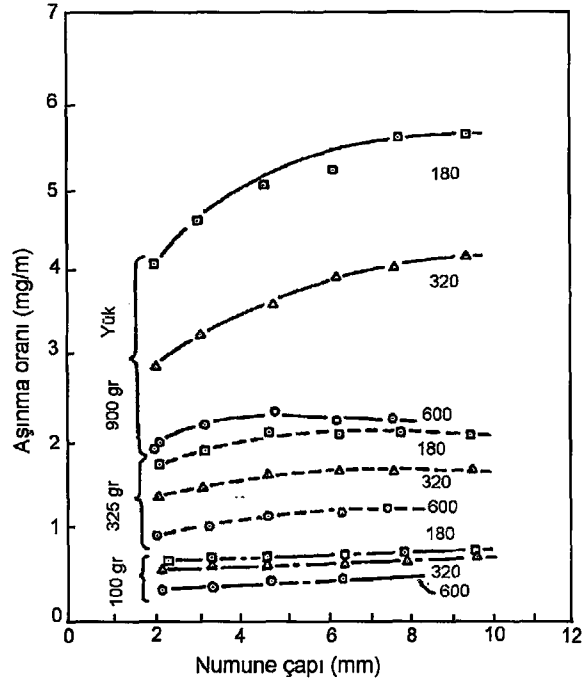
az etkili olması, büyük bir olasılıkla malzemenin akma gerilmesini arttıran gerilme oranındaki artışa dayandırılabilir. Çünkü, yüksek kayma hızlarında yüzey sıcaklığı gerilme oranının artan etkisini karşılamak için artacaktır[8].



Şekil 2.13 Aşınma miktarına hızın etkisi[31].

2.5.1.3 Malzeme şekli

Richardson tarafından geometrik boyutların aşınma üzerindeki etkilerini belirlemek amacı ile yaptığı deneysel araştırmalarda, toprak işleme aletlerinde kesme kenarının aşınma sonucunda parabolik şekle dönüştüğünü ve bu nedenle parabolik ağızların daha az aşındığını[7] ve Kantarcı[34] tarafından yapılan çalışmada da geometrik kesiti ideal daireye yakın olan numunelerin daha az aşındığını ve aşınma sonunda ideal daireye yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Larsen-Badse ise yük-tane boyutu ile aşınma oranının değişiminin (Şekil 2.14) numune boyutu etkisinden dolayı doğrusal olmadığını belirtmiştir[31].



Şekil 2.14 Aşınma oranının numune çapına etkisi[31].

2.5.1.4 Yağlama, sıcaklık ve nem

Metal yüzeyleri, teknik bakımdan çok iyi işlenmiş olsalar bile, hiçbir zaman geometrik anlamda düzlemsel değildir. Çok küçük yüklerde dahi gerçekte birbirine değen yüzeyler, görülen yüzeyin çok küçük bir oranıdır. Bu noktalarda basınç, malzemenin akma sınırını aşabilmekte ve böylece gerçek değme yüzeyleri, normal kuvveti dengelemek için artan yükleme ile büyürler. Buralarda bulunan oksit filmi yırtılır ve ve metal-metal teması ortaya çıkar. Metalik temasın olduğu yerlerde de soğuk kaynaklaşma olayı rahatlıkla görülebilmektedir[24].

Yağlayıcı maddeler; sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı önlemek veya en aza indirmek ve sıcaklık artışını engellemek için kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddenin fonksiyonu, çeşitli sürtünme durumları için farklıdır. Sıvı sürtünmesinde, yüzeyler arasındaki yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada önemli olan yağın viskozitesidir[25, s 26, 35, s 10]. Sınır sürtünmesi durumunda ise, yağlayıcı maddenin ıslatma

kabiliyeti ve dolayısı ile kimyasal bileşimi önemli rol oynamaktadır. Şekil 2.15' de kaymalı yatak için her iki sürtünme durumu da görülmektedir. Sıcaklığın herhangi bir tehlike oluşturmaması, yağın sürtünmeyi azaltması ve yüzeyler arasında oluşan ısıнын yağ ile dışarıya taşınması sonucunda mümkün olmaktadır[25, s 26].

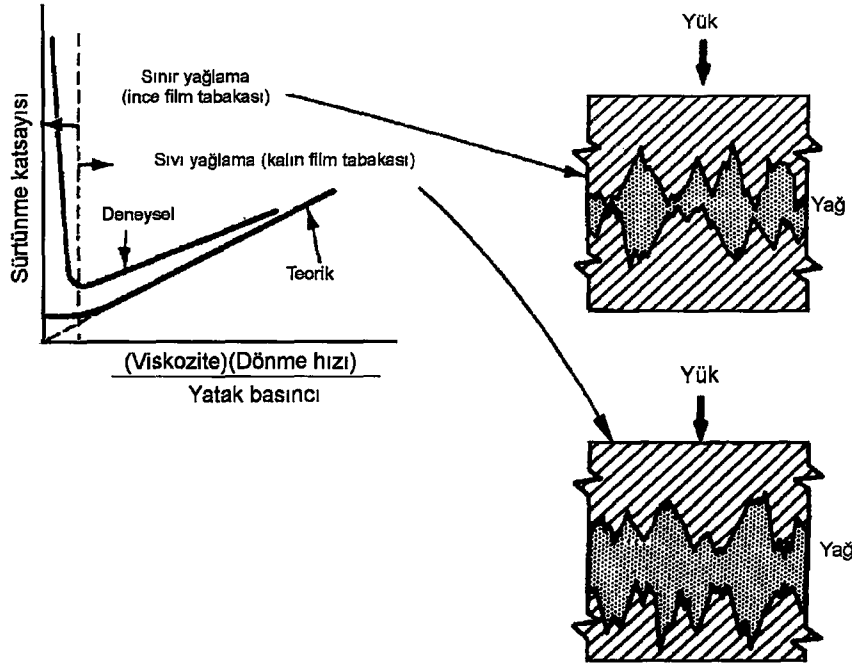
Bowden ve Tabor tarafından sürtünme katsayısı

$$f = s / p \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burda; s: Temas halindeki iki metalin daha düşük olanının kayma mukavemetini, p: Daha yumuşak olan malzemenin plastik akışına neden olan basıncını ifade etmektedir.

Sürtünme kuvvetini azaltmak için düşük kayma mukavemetine sahip bir film kullanmak gerekir. Böylece yük, sert ana malzeme üzerindeki film ile desteklenirken kayma, yumuşak ince film dahilinde meydana gelecektir. Düşük kayma mukavemetli filmler; oksitler, kimyasal reaksiyon filmleri (klorürler, sülfürler), metaller, akışkan yağlar olabilir. Yüzey filmleri, birbirlerine kaynaklanmış olan pürüzleri koparmak için gerekli olan sürtünme kuvvetini azaltmaktadır. Film ile yüzey arasındaki yapışma ne kadar iyi ise, filmin kırılma direnci daha büyük olur ve sonuçta yüzey pürüzlerinin birbirine kaynaklanması da iyileşir[35, s 23].

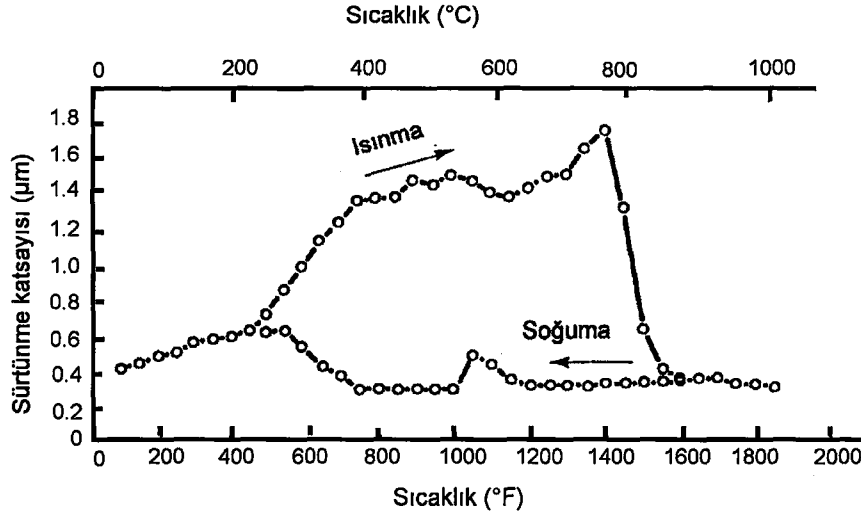
Eğer yüzeyler arasında yeteri kadar kalınlıkta bir yağ filmi var ise, hidrodinamik bir sürtünme gerçekleşir ve bu sırada hiçbir aşınma olayı meydana gelmez. Bu durumda malzeme çiftinin de önemi yoktur. Yağlamanın tam olabilmesi için en düşük bir hız gereklidir. Yani harekete başlama ve durma anında malzeme çiftleri birbirlerine değdiklerinden, buralarda istenilen bazı özelliklerin bulunması zorunludur[27].



Şekil 2.15 Sınır ve Sıvı Yağlama[35, s 10].

Saf nikel ve ostenitik paslanmaz çelik kayma hareketi yaptığında sıcaklığın artması ile metalin sünekliği artmakta ve sürtünme katsayısı da devamlı olarak artmaktadır ancak, 750 °C' de nikel üzerinde kalın bir nikel oksit filmi olduğundan dolayı sürtünme aniden düşmektedir (Şekil 2.16). Soğuma durumunda ise düşen sıcaklık ile birlikte düşük sürtünme katsayısı korunmakta ve oksit filmleri pürüzleri sürekli bir biçimde birbirinden ayırmaktadır[3, s 40].

Khruschov and Babichev ve Richardson, düşük hızda aşınma oranı üzerinde az bir etkiye sahip sürtünme ısısından dolayı abrazif aşınmada değişiklikler olduğunu belirtmişlerdir. Nathan ve Jones, kayma hızındaki artış ile aşınmadaki artışı sürtünme ısısına dayandırmışlardır. Moore, tanecik-talaş temas bölgesinde sıcaklığın 325-900 °C arasında olduğunu ve bu sıcaklığın abrazif aşınma üzerindeki etkisinin az olmasına rağmen temas bölgesinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini değiştirebileceğini belirtmiştir[31].



Şekil 2.16 Ostenitik paslanmaz çelik ve saf nikel için sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi[3, s 42].

Gürleyik, Ck 15, C 90 ve C 130 malzemeleri ve aşındırıcı kuarz taneleri ile yaptığı deneyler sonucunda atmosfer sıcaklığının aşınmaya etkisini belirlemiş ve bu malzemelerin 350 °C civarında farklı neticeler verdiğini görmüştür. 300 °C' ye kadar aşınmanın azlığı, yüzey oksidasyonunun kısmen koruyucu rol oynamasına bağlanır. Oda sıcaklığında ve vakumda meydana gelen aşınma havada meydana gelen aşınma miktarından %20 daha azdır. Sıcaklık arttığında meydana gelen aşınma miktarı da artar. 715 °C' deki aşınma, oda sıcaklığındaki aşınma miktarının yaklaşık iki katıdır[7].

Robinowicz, yüksek nem oranının abrazyon aşınma oranını yaklaşık %15 arttırdığını ve su buharının etkisinin de diğer yağlayıcıların etkisine benzer biçimde abrazyon etkisini arttırdığını ifade etmiştir. Khrushchov, Babichev ve Rizhardson, izafi aşınma direnci ve aşınma oranı üzerine nemin etkisinin sadece düşük şiddetteki aşınmada önemli olduğunu belirlemişlerdir [31].

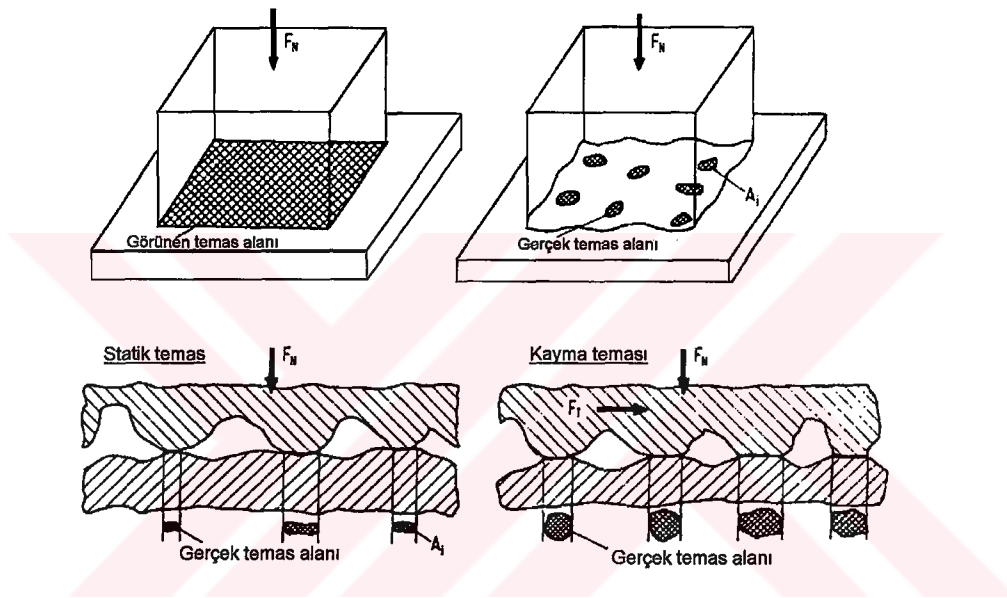
2.5.2 İşlem şartları

İki düz katı yüzey birbirine karşı bastırıldığında gerçek temas alanı ve görünen temas alanı arasında büyük farklılıklar görülmektedir (Şekil 2.17).

Gerçek temas alanının görünen temas alanına oranı 10^{-4} gibi oldukça düşük bir değerdir ve bu değer yüzeyin düzgünsüzlüğüne, kesme kuvvetine ve daha yumuşak olan malzemenin akma direncine bağlıdır [10, s 50].

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (2.8)$$

(2.8) denkleminde; A_r : Gerçek temas alanı, A_i : Belli başlı temas noktalarının alanını ifade etmektedir.



Şekil 2.17 Görünen ve gerçek temas alanı[10, s 50].

Tsukioze[32], metal yüzeyleri ve yüzey topağrafiyası arasındaki temas mekanizmasının aşınmaya olan etkisini teorik ve pratik olarak incelemiştir. Bu incelemelerde, yüzeylerin herhangi bir yönde aynı profil eğrisine sahip olduğu, yüzeydeki pürüzlerin koni şeklinde olduğu ve temas durumunda meydana gelen şekil değişiminin plastik olduğu kabul ederek adhezyon ve abrazyon aşınması ile malzeme yüzeyinden kaldırılan aşınma miktarının hesaplanabileceğini belirtmiştir. Araştırmacı, adhezif ve abrazif aşınmanın her ikisi için de aşınma oranının malzemenin akma direnci ile ters orantılı ve koni şeklindeki pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile orantılı olduğunu da belirtmiştir.

Malzeme yüzeyinin başlangıçtaki pürüzlülüğü, aşınma davranışı üzerinde etkili olan önemli bir parametredir. Jahanmir ve Suh tarafından yapılan deneylerde çok hafif temas gerilmeleri altında 0.1-4.8 μm aralığındaki pürüzlülük değerine sahip malzemelerde pürüzlü yüzeyler pürüzsüz yüzeylere göre başlangıçta daha az aşınırlar buna karşın ağır temas gerilmelerinde bunun tersi durum söz konusudur. İlk 100 metrelik kayma mesafesinde başlangıçtaki pürüzlerin şekli önemli ölçüde değişmekte ve izafi olarak pürüzsüz malzeme yüzeyinde aşınma taneciği meydana gelmektedir[36].

2.5.3 Aşındırıcı tanecik özeliği

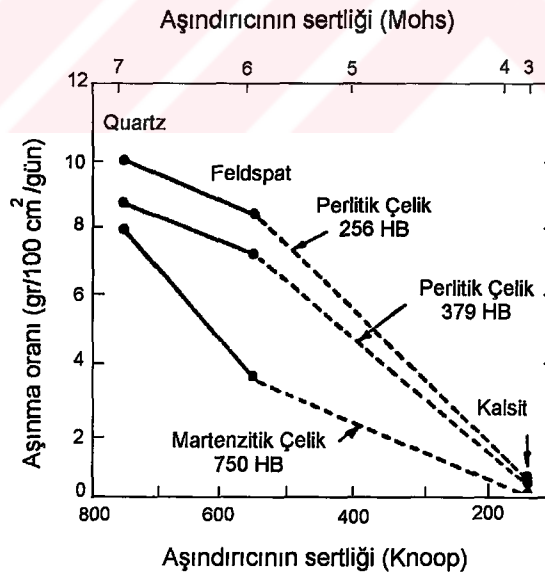
Abrazif aşınma için bir abrazif taneciğine ve gerilmeye gerek duyulmaktadır. Abrazif taneciğinin boyutu, sertliği ve keskinliği önemli olan parametredir. Örneğin yaygın yapı çeliği Mohs sertlik derecesi 4' ün altındaki malzemeler olan mermer, dolamit, kalsit, alçı taşı, talk vs. gibi abrazifler ile aşındırılamamaktadır. Ancak sert, köşeli, keskin kenarlı ve mukavim olduğundan dolayı kuvars kumu en çok yaygın kullanılan aşındırıcı mineraldir[18]. Yaygın kullanılan aşındırıcılar Tablo 2.2' de gösterilmiştir.

Aşınmaya dirençli malzemeler, aşındırıcı taneciğinin sertliği ile değişik davranışlar gösterirler. Şekil 2.18' den de görüleceği üzere, orta sertlikteki abrazif tanecik öğütüldüğü zaman aşınma dirençli malzemelerin aşınma oranlarında büyük bir dağılım vardır. Buna karşılık çok sert yada yumuşak taneciklerin öğütülmesi durumunda aşınma oranlarında daha az bir dağılım bulunmaktadır[8, 19]

Abrazif aşınmada metal kaldırma oranı; metalin sertliği (H_m) aşındırıcının sertliğine (H_a) yaklaştığı zaman önemli ölçüde azalır. Bu kritik değer Kruschov ve Babichev tarafından $H_a/H_m = 1.6$ olarak belirlenmiştir[14, 37].

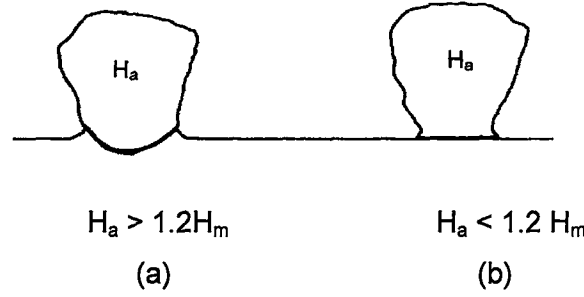
Tablo 2.2 Yaygın Kullanılan Aşındırıcıların Sertlik Değerleri[18].

Aşındırıcı Malzeme	Mohs Sertlik Derecesi	Knopp Sertlik Değeri
Talk	1	20
Gypsum	2	40
Kalsit	3	130
Fluorite	4	175
Apatite	5	435
Orthoclase	6	620
Quartz	7	840
Topaz	8	1330
Corundum	9	2020
Elmas	10	7575
Silisyum karbür		2585
Cam		455
Plastikler		25
Magnetit		575
Bituminous Coal		35
Garnet		1360
Flint		820
Emery		1400
Feldspat		550

**Şekil 2.18 Üç farklı sertlik değerindeki %0.8C' lu çeliğin aşınma oranına abrazif mineralinin etkisi[8].**

Küresel bir tanecik düz bir yüzeye karşı bastırıldığında (Şekil 2.19), maksimum temas basıncı tanecik malzemesinin sertliğinin yaklaşık 0.8

katıdır. Eğer yüzey malzemesinin sertliği (H_m), $0.8 H_a$ 'dan daha az ise yani $H_a/H_m > 1.25$ olduğunda malzeme yüzeyinde plastik şekil değişiminin olacağı beklenilecektir. Herhangi bir geometrik şekilli tanecik için eğer $H_a/H_m > 1.2$ olması durumunda (Şekil 2.19a) sadece plastik olarak çizilme meydana gelecektir. Bunun tersi durumda (Şekil 2.19b) ise tanecikte plastik akış meydana gelecektir[3, s 136, 8, 37].

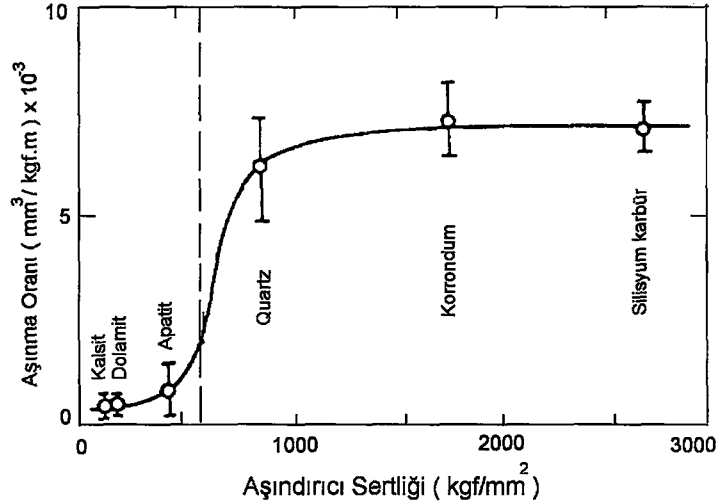


Şekil 2.19 Yük altında tanecik ve düz bir yüzey arasındaki temas durumu[3, s 136].

Misra ve Finnie[32] tarafından yapılan bir çalışmada, 250 μ m boyutundaki farklı Mohs sertliklerine sahip aşındırıcı tanecikler ile aşındırılmış olan yağda sertleştirilmiş ve 200 °C' de temperlenmiş AISI 4340 çeliğinin, aşınma oranına abrazif sertliğinin etkisi incelenmiştir (Şekil 2.20). Metalin başlangıç sertliği H_m , abrazifin sertliği H_a olmak üzere; $H_m / H_a < K$ (K ' nın değeri 0,65-0,75 arasındadır) olan değerden aşınma oranının azaldığı ve $H_m / H_a > 1,2$ olan değerde de çok düşük olduğu belirtilmiştir.

Aşınan yüzeyin sertlik değerine eşit veya daha az sertlik değerine sahip olan aşındırıcı taneciğe yumuşak abrazif, aşınan yüzeyden daha sert olan taneciğe ise sert abrazif denilmektedir[13, s 94].

Abrazif taneciğinin şekline bağlı olarak aşınma oranları önemli ölçüde değişmektedir. Açılı tanecikler ile ortaya çıkan aşınma oranı yuvarlak tanecikler ile karşılaştırıldığında daha fazladır[3, s 140].



Şekil 2.20 AISI 4340 çeliğinin aşınma oranı-aşındırıcı tanecik sertliği ilişkisi[32].

Bir coğrafi bölgeden diğerine taş, maden filizi ve toprak koşullarındaki değişiklik, dikaktlice yapılmış aşınma deneyleri sonuçlarını değiştirir. Taşlı bir bölge için en iyi olan malzeme kumlu yada gevşek abrazif taneciklerin olduğu topraklarda en zayıf malzeme olacaktır[18].

Scheffler ve Allen[38] tarafından yapılan bir çalışmada, ısıt işlem sonucunda çeşitli mikroyapıya ve mekanik özelliklere sahip yüksek karbonlu bir çeliğe taşlı, killi ve kumlu topraklarda abrazyon deneyleri uygulanmıştır. Taşlı toprak ile yapılan abrazyon deneyi sonucunda aşınma oranı kumlu topraktan 20 kat daha fazla ve killi topraktan ise 7 kat daha fazla olduğu bulunmuştur.

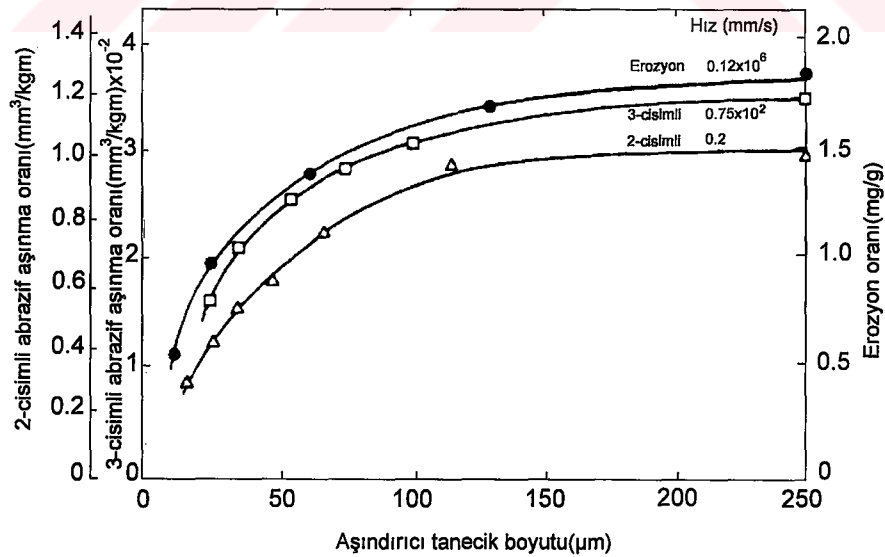
Abrazif aşınmada aşındırıcı taneciğin kırılmasından önce yuvarlanma ve kesme yapabilmesi için çok az bir zamanı vardır. Aşınan malzeme yüzeyindeki en önemli etki, abrazif tanecik-yüzey temas noktasındaki aşırı gerilmelerden ortaya çıkmaktadır. Sünek bir malzeme yüzeyi için yüzey malzemesi plastik olarak yer değiştirecektir. Abrazif taneciğinin kesme hareketi yapabilmesi olasılığı, aşırı gerilmeli olan abrazif taneciğindeki depolanmış olan elastik enerji tarafından sağlanmaktadır. Bu durumda da

aşınma, malzeme yüzeyinin gevrek kırılması sonucunda meydana gelecektir[18].

Fang, Kong ve Zhou[39] tarafından yapılan bir çalışmada saf dökme demir iki yüzey arasında yuvarlak ve köşeli olmak üzere iki değişik aşındırıcı taneciğin kayma ve yuvarlanma hareketleri izlenmiştir. Aşındırıcı taneciklerin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin kayma hareketine göre yuvarlanma hareketinde oldukça fazla olduğu bunun yanında kayma hareketinin kesme aşınmasına, yuvarlanma hareketinin de plastik şekil değişimine neden olduğunu da belirtmişlerdir.

Aşınma hacmi, aşındırıcı tanecik boyutunun kritik bir değerine kadar önemli bir oranda artmakta daha sonra bu artış yavaşlamakta (Şekil 2.18) veya sabit kalabilmektedir[8, 31, 33].

Şekil 2.21' den görüldüğü gibi aşınma direncine aşındırıcı tanecik boyutunun etkisi üç çeşit aşınma mekanizması için benzerlik göstermektedir. Dolayısı ile herhangi bir tür aşınma çeşidi için seçilen malzeme diğer aşınma çeşidi için de uygun olmaktadır[8].



Şekil 2.21 Erozyon, 2-cisimli ve 3-cisimli abrazyonun aşınma etkisindeki bakır malzemenin SiC aşındırıcı taneciği boyutu-aşınma oranı ilişkisi[40].

Aşındırıcı taneciğin boyut etkisi, birim miktarda malzeme kaldırmak için gerekli olan enerji şeklinde tanımlanan özgül kesme enerjisi şeklinde 2-cisimli abrazyon, öğütücü abrazyon ve metal kesme işlemleri için gözlenmiştir. Malkin ve arkadaşları, kritik abrazif boyutunun aşınma oranı ve özgül kesme enerjisinin her ikisi için de aynı olduğunu belirtmişlerdir. Larsen-Badse ve Oxley isimli araştırmacılar ise 2-cisimli abrazif aşınmada kesme derinliğinin abrazif tanecik boyutunun yaklaşık %12' si olduğunu ifade etmişlerdir[40].

2.5.4 Malzeme özellikleri

2.5.4.1 Malzemenin kimyasal bileşimi

Krom, molibden, nikel ve az miktarda bor gibi çeşitli alaşım elementlerinin ilavesi malzemenin sertleşebilirliğini ve aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirebilir[5].

Tavllanmış, su verilmiş, su verilmiş ve temperlenmiş malzemelerde en çok etkili olan alaşım elementi karbondur. Karbon ile karşılaştırıldığında diğer alaşım elementleri aşınma direnci üzerine az bir etkiye sahiptir. Karbür oluşturu elementlerin ilave edilmesi aşınma direncinde küçük artışlara yol açar. Vishnyakov ve Vinitskii, kromlu çeliklerdeki kübik karbürlerin, trigonal karbürlere göre aşınma direncini daha çok arttırdığını belirtmişlerdir. Martenzitik çeliklerde aşınma direnci ve matris sertliği, ağırlık olarak karbon yüzdesinin kare kökünün doğrusal fonksiyonudur[41].

Karbon, aşınma direncini olumlu yönde etkiler. Genellikle bağımsız karbon yüzdesinin artması ile karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin abrazif aşınma dirençleri de artmaktadır. Karbon miktarının artması, alaşımsız çeliklerde perlit miktarının artması ile, alaşımlı çeliklerde ise ince perlitik yapının martenzit-ostenit yapıya dönüşmesi ile aşınma direncini arttırmaktadır[7].

Khrushchov ve Babichev, Serpik ve Kantor ile Richardson perlitik çeliklerin aşınma direncinin karbon bileşeni ile arttığını bununla birlikte Serpik ve Kantor ötektoid üstü çeliklerde karbon içeriğinin artması ile perlitin yanı sıra sürekli sementit ağının oluşmasından dolayı aşınma oranındaki artışın daha düşük olduğunu ifade etmiştir[41].

Karbonlu çeliklerde kimyasal bileşime ve mikroyapıya bağlı olarak etkili olan aşınma mekanizması mikrokesmedir. Yüksek karbon seviyelerinde aşınma mekanizması oluk sonlarında kırılma veya pullanma olup daha düşük karbon seviyelerinde ise aşınma mekanizması mikrokesme ve mikroçatlama biçiminde olmaktadır[42]. Bunun yanında karbonlu çeliklerde yüksek hızlarda etkili olan aşınma mekanizması mikrokesme, düşük hızlarda ise mikroçukurcuk olmaktadır[43].

Karbürler, yüksek sertliklerinden dolayı aşınmaya dirençli malzemeler için oldukça önemlidir. M_3C türü karbürler, Fe_3Al metallerarası bileşiklerden üç veya dört kat daha serttir. Karbürlerin aşınma direncine olan etkisi, matris sertliğine göre karbürlerin izafi sertliklerine bağlıdır. Karbürlerin sertliğindeki artış, aşınma oranını azaltmaktadır. Eğer karbür sertliği matris sertliğine yakınsa, karbürler dahili çatlaklar şeklinde rol oynayacağından aşınma direnci düşecektir. Örneğin martenzitik matristeki M_3C türü karbürler buna ait bir örnektir[28]. İri karbürler ile sertleştirilmiş Co-esaslı alaşımlar aynı sertlikteki demir esaslı alaşımlardan daha iyi aşınma direnci gösterir. Küçük boyutlu karbürler içeren alaşımlar ise alaşım esaslı ne olursa olsun zayıf aşınma direnci gösterecektir. Bunun nedeni, küçük karbürlerin aşınma yerine rahatlıkla pullanma etkisinden dolayıdır[44].

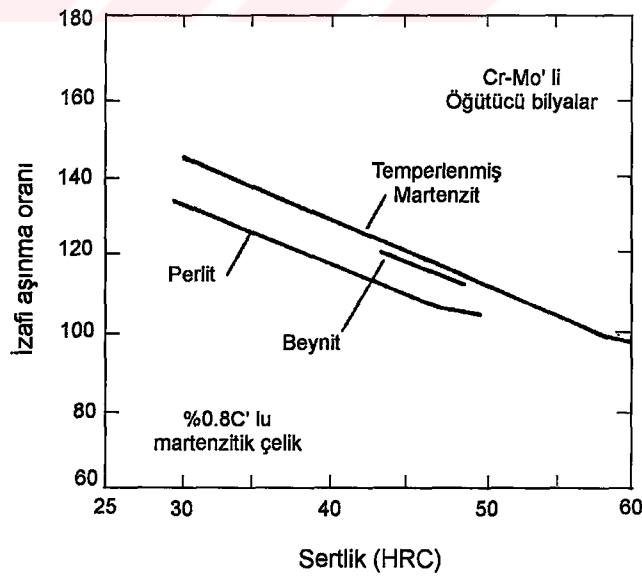
Krom bileşeni, çeliğin sertleşebilirliğini arttırmakta ve farklı morfolojilerde ikincil fazlar oluşturmakta böylece aşınmaya dirençli sert bölgeler şeklinde etkili olmaktadır. Döküm çeliklerinde kromun varlığı sadece ferrit fazını mukavemetleştirmez aynı zamanda çeliğin abrazyon aşınmasını düşürür. %0.25C içeren az alaşımlı çeliklerde herhangi bir temperleme sıcaklığında krom içeriğinin artması ile abrazyon direnci artmaktadır. %1' den daha fazla

krom içeren döküm çeliklerinde, 250-600°C arasında yapılan temperleme ile abrazyon direncinde önemli bir değişiklik olmamakla birlikte en fazla abrazyon direnci %2 krom içeriğinde elde edilmektedir ancak bu durumda döküm çeliğin darbe tokluğu çok düşük olmaktadır[45]. %15.4Cr içeren döküm çeliğin aşınma direnci de gri dökme demirden çok daha yüksektir. Bunun nedeni de krom içeriğinin sonucunda matriste ikincil fazın oluşumu ile açıklanabilir[46].

2.5.4.2 Malzemenin mikroyapısı

Malzemelerin mikroyapısı çok önemli bir faktördür. İnce taneli bir mikroyapı ile örneğin çeliklerde ve dökme demirlerde sert karbürler ve temperlenmiş martenzit gibi sert taneciklerin ikinci bir faz şeklinde dağılmış olduğu mikroyapı mükemmel abrazyon direnci gösterir[5].

Aşınma direnci, ferrit-perlit-beynit ve martenzit şeklinde değişen mikroyapı ile artmaktadır (Şekil 2.22). Mikroyapının bu eğilimi aynı zamanda sertlikteki artış ile de uyumludur. Aynı sertlik değerinde beynit, martenzitten daha iyi aşınma direnci gösterir[8, 19, 28, 42].



Şekil 2.22 Döküm öğütücü bilyaların aşınma oranına mikroyapının etkisi[8, 19].

Şekil 2.22' den görüldüğü gibi herhangi bir mikroyapı için aşınma oranı sertlikteki azalma ile artmaktadır. Ancak, aynı sertlik değerindeki farklı mikroyapılar karşılaştırıldığında aşınma oranlarında belirgin farklılıklar görülmektedir. Temperlenmemiş veya yaklaşık 232°C' nin altındaki sıcaklıkta temperlenmiş yüksek karbonlu martenzit diğer yapılara göre en iyi aşınma direnci gösterir. Ancak 50 HRC' nin altındaki sertlik değerlerine temperlenen yüksek karbonlu martenzit, aynı sertlik değerindeki ve karbon bileşenindeki perlite göre aşınma oranı daha düşüktür. Beynitik yapılar, aynı sertlikteki temperlenmiş martenzitle yaklaşık aynı aşınma direncine sahiptir[8, 19]. Beynitik yapılarda artık ostenit miktarı arzu edilmektedir çünkü ostenit-beynit arasındaki sertlik farkı martenzit-ostenit arasındaki sertlik farkından daha azdır. Artık ostenitin soğuk sertleşme veya dönüşümü sonucunda matris sertliği tamamen beynitik yapıya göre çok daha yüksektir[28].

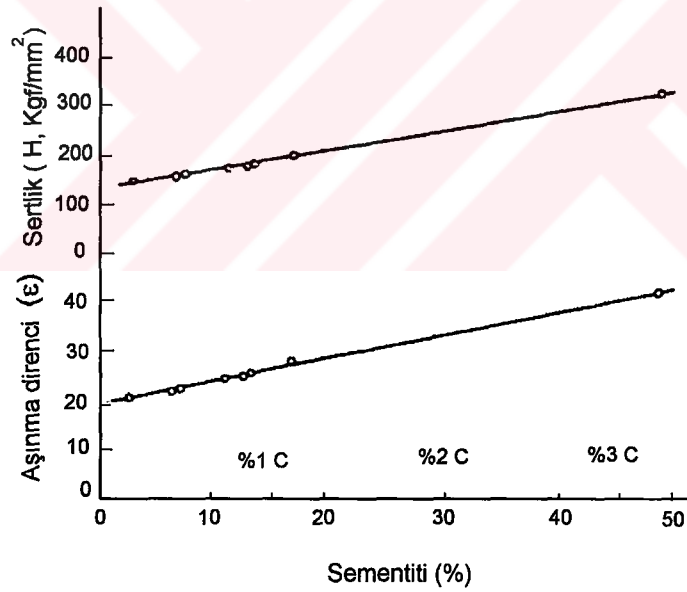
Yüksek karbon ve alaşım bileşenlerinde karbürlerin ve artık ostenitin çözülme eğilimi vardır. Ostenitleme sıcaklığındaki artış karbürleri elimine etmektedir. Daha sonraki su verme işlemi dönüşmemiş ostenit tarafından çevrelenen martenzit latalarını ortaya çıkarabilir. Bu ince tabaka, soğuk sertleşme ile boşlukların yaklaşmasını geciktirmektedir. Gevrek malzemelerde oluşan bu tür artık ostenit bileşimi aşınma direncini azaltabilir. Artık ostenit miktarı mukavemeti oldukça azalttığından fazla olması da aşınma direncini düşürebilir. Ancak bir miktar artık ostenit aşınma direncini optimize edeceğinden gerekli olabilmektedir. %20 artık ostenit içeren beynit çok iyi aşınma direnci gösterir[47].

Ferrit bileşeninden bir hayli sert olan perlit taneleri, farklı boyutta sert tanecikler şeklinde dikkate alınabilir. Aşındırıcı tanecik, ferritik-perlitik numunenin yüzeyini aşındırırken perlit bölgesinde çok az malzeme kaldırmakta buna karşılık, ferrit tanelerinin olduğu bölgelerde ise daha derin oluklar oluşturmaktadır[48].

Yapısal olarak heterojen malzemeler oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu tür malzemelerin belli başlı bileşenlerinin miktarına ve izafi aşınma dirençlerine, yapısal olarak heterojen malzemelerin aşınma direncinin ilişkisini belirlemek gereklidir[41]. Khrushov ve Babichev, yapısal olarak heterojen malzemelerin aşınmasını incelemişler ve bu tür malzemelerin aşınma direncinin, her bir bileşenin aşınma dirençlerinin toplamına eşit olduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 2.23' de sementit bileşeninin dökme demir ve çeliklerde aşınma direncini ne yönde etkilediği görülmektedir[31, 41].

İki fazlı malzemelerin aşınma dirençleri, bileşenlerin aşınma dirençleri toplamı olarak;

$$\varepsilon = \alpha \varepsilon_1 + \beta \varepsilon_2 \quad (2.9)$$



Şekil 2.23 Sementit bileşeninin, izafi aşınma direncine ve sertliğe olan etkisi[31].

Şeklinde ifade edilmiştir. Burada α ve β : bileşenlerin hacimsel katılma oranları, ε_1 ve ε_2 : bileşenlerin hacimsel aşınma dirençleridir[49].

Talanov ve Chelushkin, kır dökme demir gibi heterojen malzemelerde abrazyon aşınma direncinin, matriste bulunan mikroyapı bileşenlerinin sertliklerinin toplamı olarak yazılabileceğini önermektedirler[7].

2.5.4.3 Matris ve yüzey sertliği

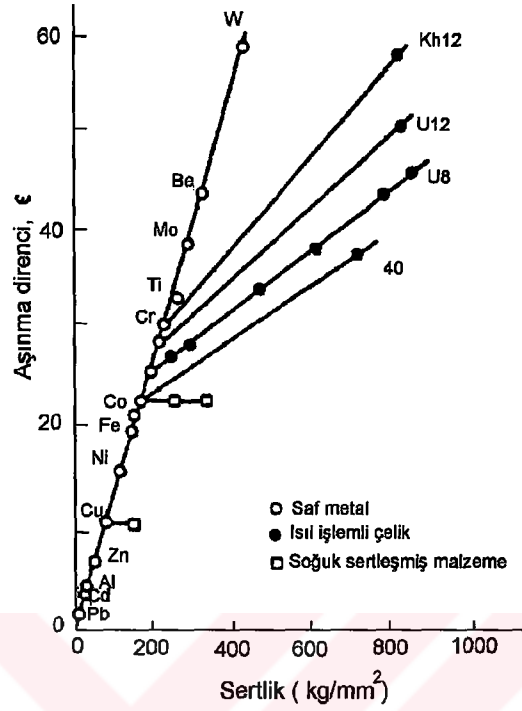
Aşınmaya karşı dirençli malzemeler geliştirmek için en çok bilinen yaklaşım malzemenin sertliğinin artırılmasıdır. Yumuşak bir malzemeye sert kaplama ya da yüzey sertleştirme işlemi uygulanabilir. Ayrıca doğal olarak da sert bir malzemenin kullanılması ile de sertlikten yararlanılır. Bu nedenle sertlik ve aşınma direnci arasında basit bir bağıntı bulunamamıştır[5].

Polimerler, düşük sertliklerinden dolayı düşük abrazyon direnci gösterirler. Seramikler, sert aşındırıcı tanecikler kullanıldığı zaman saf metallere veya tavlama çeliklerinden daha düşük abrazyon direnci göstermektedirler. Adhezyon aşınmada ise, temas bölgelerindeki maksimum kayma gerilmeleri malzeme sertliğinin altında birine ulaştığında orta şiddetteki aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş başlar. Kuru havada yağsız kayma teması şartlarında perlitik veya ferritik-perlitik yapıların aşınma direnci matris sertlikleri ile artar. Tribokimyasal aşınma da sertlik ile etkilenmektedir. Kayma teması sırasında yüzeyde oluşan ve daha sonra aşındırıcı tanecik olarak etkili olan oksit döküntülerinin sertliğinin esas malzemenin ve/veya karşı malzemenin sertliğine olan oranı önemli olmaktadır[4].

Aşınmış olan malzemenin sertliği, aşınma oranını etkileyen en önemli mekanik özelliktir. Bir malzemenin aşınmadan önceki sertliği ancak o malzemenin diğer malzemelere göre aşınma direncini gösterir[28].

Şekil 2.24' den de görüldüğü gibi Khrushov, saf tavlama çelikleri ve bazı alaşımlar için aşınma direncinin matris sertliği ile doğru orantılı olduğunu, sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelikler için de matris sertliği ile aşınma

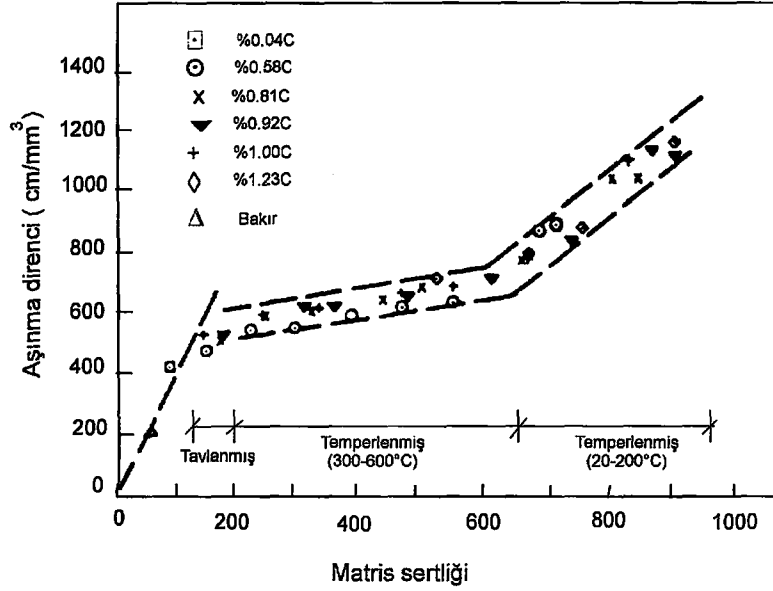
direnci arasında doğrusal ilişki olduğunu ancak soğuk sertleşmenin aşınma direncini arttırmadığını belirtmiştir[41].



Şekil 2.24 Saf metallerin, ısıtılmış ve soğuk sertleşmiş çeliklerin izafi aşınma direnci ve matris sertliği arasındaki ilişki[8].

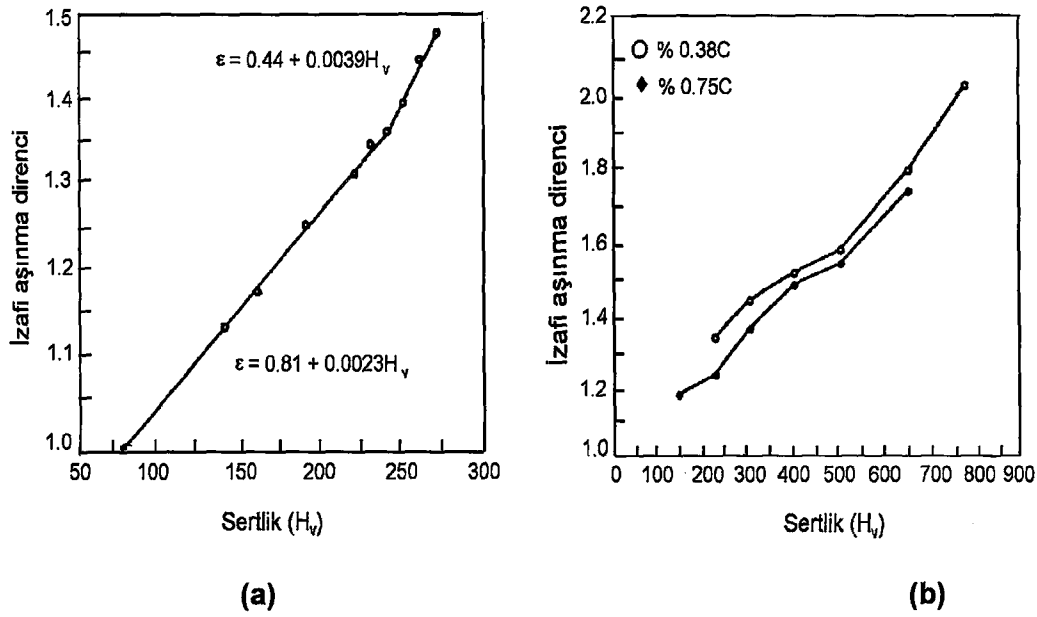
Khruschov ve Babichev tarafından elde edilen sonuçlara göre, ısıtılmış çeliklerin aşınma direnci, aynı sertlik değerindeki saf metallerden daha düşüktür bunun yanında aynı sertlik değerindeki ancak farklı bileşimdeki ısıtılmış çelikler aynı aşınma direnci göstermemektedir. Bu sonuçlar da sertlik ve aşınma direnci arasındaki genel kurala uymamaktadır[49].

Larsen Badse[50], sertleştirilmiş ve temperlenmiş karbonlu çeliklerin, matris ve yüzey sertlikleri ile aşınma dirençleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir (Şekil 2.25). Yaklaşık 650 HV' den daha düşük sertlik değerindeki çeliklerin düşük eğimli, 650 HV' den daha fazla sertlik değerindeki çeliklerin ise yüksek eğimli bir doğruya karşılık geldiğini göstermiştir.



Şekil 2.25 Sertleştirilmiş ve temperlenmiş karbonlu çeliklerin aşınma direnci ile matris sertliği arasındaki ilişki[50].

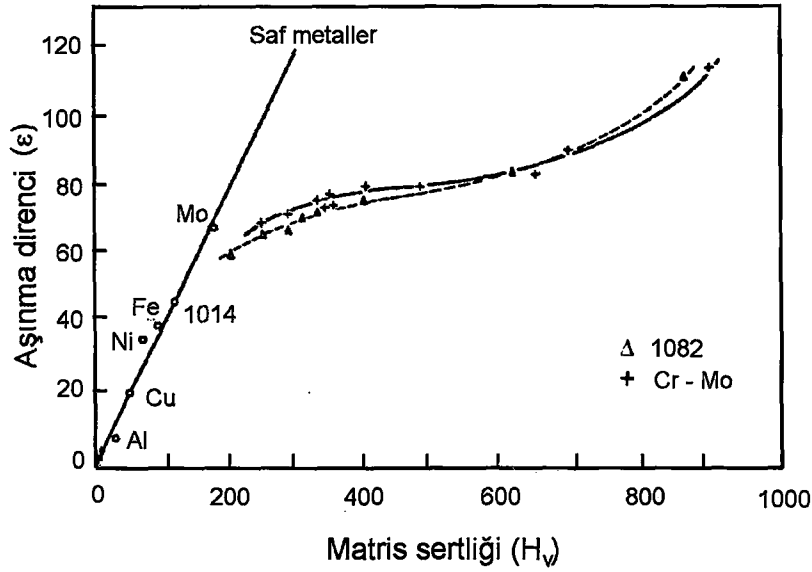
Karbonlu çeliklerin abrazyon aşınması ile sertliklerinin ve karbon bileşenlerinin her ikisi arasında çok sayıda ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Tavllanmış çeliklerde aşınma direnci ve sertlik, ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerde farklı eğimde olmak üzere karbon bileşeninin doğrusal fonksiyonudur. Ayrıca, ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerde sertlik ve aşınma direnci arasındaki doğrusal bağıntı farklı eğimdedir (Şekil 2.26a). Böylece sertlik, sadece aynı mikroyapıdaki tavllanmış çelikler için aşınma direncini belirleyici bir faktör olabilir[42]. %0,38 ve %0,45 C' lu çeliklerde temperlenmiş martenzitin aşınma direnci ve sertliği arasında (Şekil 2.26b), doğrusal olmayan bir ilişki vardır[42, 49]. Aşınma oranı, sertlik ile basitçe ilgili olmayıp aşınma yüzeyi malzemesinin plastik gerilme ve kırılma özellikleri ile ilgilidir[49]. Aşınma direnci ve sertlik arasındaki ilişkiyi belirlemede soğuk sertleşme üsteli önemli bir faktör olmakta ancak soğuk sertleşme üstelinin sabit olması durumunda aşınma direnci ve sertlik arasında doğrusal bir ilişki olmaktadır. Temperlenmiş martenzitin soğuk sertleşme üsteli temperleme sıcaklığı ile değişmektedir[50].



Şekil 2.26 Tavlanmış çeliklerin(a) ve %0.38C-%0.75C içeren temperlenmiş martenzitik yapının(b) sertlik ve aşınma direnci ilişkisi[42].

Khrushov' un çalışmalarından sonra malzemelerin matris sertliğinin yanısıra aşınmış olan yüzey malzemesinin soğuk sertleşmesinden dolayı yüzey sertliğinin kullanılması konusunda tartışmalar başlamıştır. Bu konuda Avient ve arkadaşları, yüzey sertliğinin abrazyon direncinin güvenilir bir göstergesi olduğunu belirtmiş ancak Richardson ise yüzey pürüzlülüğünden ve sertliğin yüzey kesiti boyunca değişiminden dolayı yüzey sertliğini kullanmanın sakıncalı olabileceğini belirtmiştir[48].

Murray, Mutton ve Watson[21] tarafından saf metaller ile çeşitli ısı işlem yapılmış çeliklerin abrazif aşınması incelenmiştir. Tavlanmış, tek fazlı malzemeler için aşınma direnci ve matris sertliği arasındaki ilişki(Şekil 2.27), Khrushov ve Larsen-Badse tarafından belirtilen ilişkiye benzemekte ancak ısı işlem yapılmış çelikler için çok daha karmaşık olup sertlik ve aşınma direnci arasında bir seri sigmoidal eğriler (S-şekilli) bulunmuştur[21, 49].

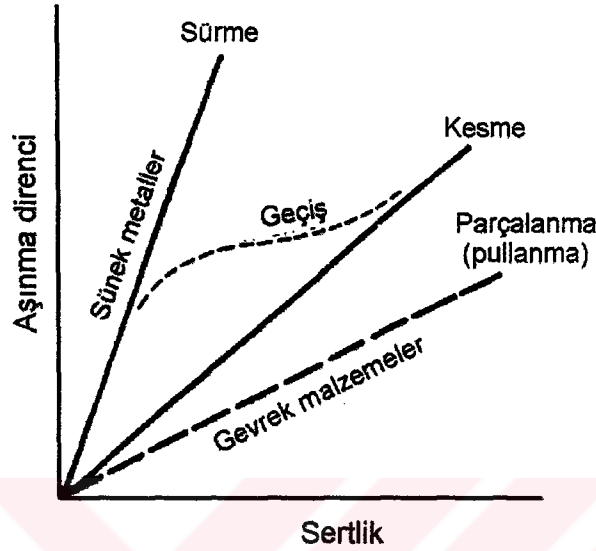


Şekil 2.27 Saf metaller ve ısıtılmış çelikler için aşınma direnci ve matris sertliği arasındaki ilişki[49].

Moore[51] tarafından yapılan çalışmada da, perlitik çeliklerin aşınma direnci ve sertliğinin perlit hacminin doğrusal fonksiyonu olduğunu, martenzitik çeliklerde ise karbon yüzdesinin karakökünün doğrusal fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak, ferritik malzemelerde matris sertliğinin aşınma direncinin doğrudan bir göstergesi olmadığını fakat benzer yapıda ancak farklı kimyasal bileşimdeki malzemelerde aşınma direnci ile matris sertliği arasında doğrusal bir ilişkinin olacağına dikkati çekerek aşınma direncine mikroyapının etkisinin sertliğe göre daha fazla olacağını ifade etmiştir.

Saf metallerin sertliği, elastiklik modülü ile doğrusal olarak artar. Benzer olarak katı çözelti sertleştirilmesi ile sertleştirilen homojen alaşımlarda da sertlik, elastiklik modülü ile artar. Ancak, sertleştirme; çökelme sertleşmesi, faz dönüşümleri ve soğuk sertleşme gibi diğer sertleştirme mekanizmaları ile elde edilirse elastiklik modülü sertliğin doğrusal fonksiyonu değildir. Archard'ın aşınma yasası sertleşme mekanizmasını dikkate almamaktadır. Sonuçta, aşınma hacmi ve sertlik arasında daima doğrusal bir bağıntı elde etmek mümkün değildir[44].

Abrazif aşınma mekanizmalarının aşınma direnci ve sertlik ile olan ilişkisi de Şekil 2.28’ de görülmektedir. Düşük sertlik değerlerinde mikrosürmeden yüksek sertlik değerlerinde kesmeye doğru bir geçişin olduğu görülmektedir[21].



Şekil 2.28 Abrazif aşınma mekanizmaları ile aşınma direnci ve sertlik arasındaki ilişki[21].

Hokkirigawa, Kato ve Li[52], ısıtılmış beş değişik sertlikteki yatak çeliğini elmas ile çizerek abrazif aşınma mekanizmasının, hiçbir malzeme kaybının olmadığı mikrosürme mekanizmasından, mikrosürmeye göre daha derin oluğa sahip olan ancak oluktan çıkarılan malzemenin elmas çizicinin ön tarafında yığıldığı kama mekanizmasına ve daha sonra da aşınma döküntülerinin oluştuğu ve diğer iki mekanizmadan daha derin oluğa sahip kesme mekanizmasına doğru değiştiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında numunenin sertliği ile elmasın nüfuziyet derecesi arasında abrazif aşınma diyagramı elde ederek bu diyagrama göre de mikrosürme mekanizmasından kama mekanizmasına geçişin sertlikten bağımsız olduğunu ancak kama mekanizmasından kesme mekanizmasına geçişin ise sertlikteki artış ile azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca kesme mekanizmasındaki aşınma miktarının sertlik ile arttığını da belirtmişlerdir.

2.6 Aşınma Deney Yöntemleri

Aşınma çok karmaşık bir olaydır. Çeşitli aşınma mekanizmaları olmakla beraber bu mekanizmaların herbiri farklı parametrelere farklı şekillerde tepki verirler. Aşınma davranışını tanımlayan tek ve universal bir parametre yoktur. Buna bağlı olarak tek ve universal aşınma deneyi de yoktur. Literatürde bulunan çok sayıdaki aşınma deneyleri ve cihazı da bunun ispatıdır. Aşınma deneyleri, mukavemet veya sabit değer şeklinde temel malzeme özelliklerini tanımlayamaz veya ölçemez. Bir başka ifade ile bir malzeme deneyi değildir. Aşınma deneylerinin esas amacı, malzemenin bir sistem ortamına verdiği tepkiyi veya bu ortamdaki davranışını belirlemek yada ölçmektir[13, s 147]. Çünkü aşınma, bir malzeme özeliği olmayıp bir sistem özeliğidir[1, 7, 10, s 80, 13 s 147, 53, 54, s 601-608]. Malzemeler de farklı aşınma ortamlarında farklı davranmaktadırlar[13, s 147].

Genellikle aşınma deneyleri, malzeme mühendisleri ve malzeme bilimcileri tarafından herhangi bir uygulama için optimum malzeme seçimi amacı ile malzemelerin aşınma direncini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu deneylerde standardizasyon, tekrarlanabilirlik, kısa deney zamanı ve basit ölçme teknikleri aranmaktadır[54, s 601-608]. Ancak aşınma deneyleri, ilave mühendislik bilgileri sağlamak için gereklidir. Örneğin, aşınma deneyleri, uygulama ile bağlantılı olarak aşınma denklemini ve aşınma mekanizmalarını teşhis etmeye yardımcı olması bakımından; çeşitli tasarım faktörleri (şekil, pürüzlülük, karşı yüzeyin özellikleri ve aşınma gibi) arasındaki gerekli mühendislik bağıntıları geliştirmek, numune yardımı ile aşınma parametrelerinin değerlerini belirlemek ve aşınma davranışındaki geçişleri belirlemek ve karakterize etmek gibi amaçlar doğrultusunda gerekli olabilir[13, s 147].

1960 yılında Amerikan Yağlama Mühendisleri Birliği (ASLE), 200' den fazla aşınma deneyleri ve cihazlarını sıralamıştır ve bu liste hergeçen gün artmaya devam etmektedir. Tasarlanan uygulamaların gerçek aşınma şartlarını taklit etme ihtiyacı, deney kolaylığı ve özel bazı kontrolleri

yapabilme gibi istekler bu büyümenin nedenlerini oluşturmaktadır[54, s 601-608].

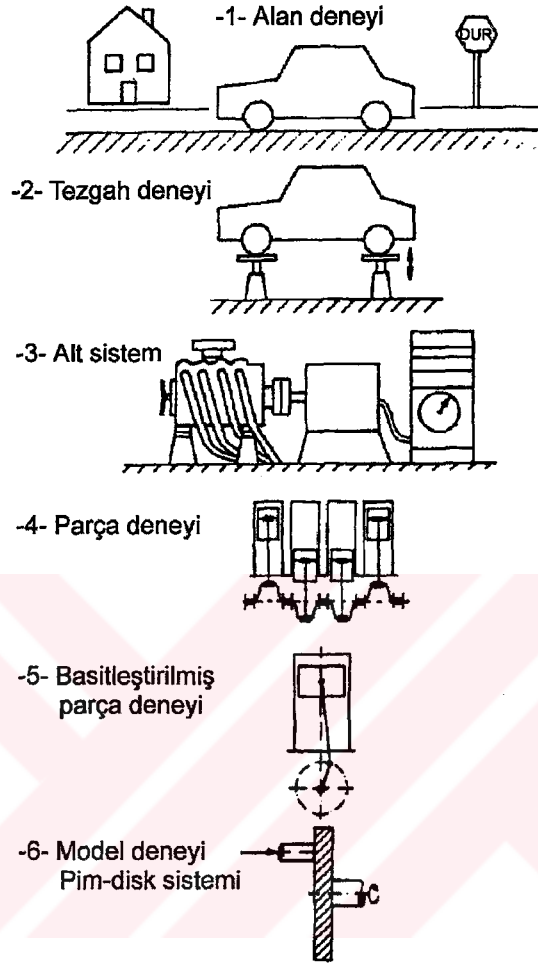
Uetz, Sommer ve Khosrawi ile DIN 50320' ye göre aşınma deneyleri 6 değişik sınıfa ayrılmıştır[10, s 116].

Alan deneyleri, pratik işletme koşullarına çok benzeyen şartlar altında ve uzun sürelerde gerçekleştirilir. Tezgah deneyleri ise çevre ve işlem değişkenlerinin biraz daha basitleştirilmesi ile laboratuvar şartlarında yapılır. Altsistem deneylerinde, sistemin etkileşim durumundaki bazı parçaları azaltılmıştır. Örneğin titreşim, sıcaklık ve çevre gibi değişkenler, alan ve tezgah deneylerindeki şartlardan oldukça farklıdır. Eleman deneyleri ise daha da ileri basitleştirme ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.29' dan görülebildiği gibi hareket halindeki bir araba ile yapılan deneyler; bir motor deneyine, 4 silindir ve daha sonra 1 silindir ile yapılan deneylere ve son olarak da piston-silindir gömleği tribolojik etkileşimini taklit eden model deneyine indirilmiştir[10, s 116].

Model deneyleri için;

- Seçilecek olan malzeme çiftlerinin deneye uygun numune şekli, malzeme özellikleri ile yüzey özellikleri belirlenmeli ve deneyden önce yüzeyler mutlaka temizlenmelidir,
- Ara madde (örneğin yağlayıcı), ve çevre ortamı ya da atmosferin kimyasal bileşimi, fiziksel ve kimyasal özellikleri tanımlanmalıdır,
- Hareketin çeşidi, yük, hız, sıcaklık ve deney süresini içine alan uygun işlem parametreleri grubu seçilmelidir,
- Malzemelerin değiştirilmiş yapısal parametrelerinin (sertlik ve pürüzlülük gibi) ve işlemsel parametrelerinin (yük ve hız değişimleri gibi) fonksiyonu olarak deneyler gerçekleştirilmelidir,
- Aşınma miktarları, gürültü, titreşim ve sürtünmenin neden olduğu sıcaklık artışı ile belirlenmesi düşünülen diğer büyüklüklerin hassas ölçümü için gerekli konstrüktif düzenlemeler yapılmalıdır,

- Yüzey pürüzlülüğü ile yüzeyin bileşimi ve yapıya göre malzeme çiftinin aşınmış yüzeyleri karakterize edilmelidir[55].



Şekil 2.29 Tribolojik deneylerin sınıflandırılması[10, s 116].

Özellikle toprak işleme takımlarının aşınmasını incelemeye alan deneyleri ile model deneylerinin birbirlerine çeşitli bakımlardan üstünlükleri vardır. Alan deneyleri, oldukça fazla değişik toprak şartlarından dolayı gerçek servis koşullarını yansıtabilir ve deney sonuçları takım ömrünü tahmin etmek veya belirlemek için kullanılabilir ancak çok zaman alması, pahalı olması ve deneyler sırasında işlem şartlarının karakterizasyonunu belirlemenin zor olması alan deneylerinin olumsuz olan taraflarıdır. Model deneylerinin olumlu yönü; düşük maliyet, kısa deney süresi, deney şartlarının kolaylıkla değiştirilerek bu değişime deney malzemelerinin

hassasiyetinin rahatlıkla kontrol edilmesi ve sonuçların tekrarlanabilirliğidir. Olumsuz olan tarafları ise, elde edilen verilerin sadece karşılaştırma olması ve servis koşullarının bir kısmını yansıtmasıdır[56].

Aşınma deneyinin seçimi, sadece incelenecek mekanizmaya bağlı olmayıp aynı zamanda deneyin amacına da bağlıdır. Deneyin türü malzemelerin ve/veya yağlayıcıların özelliklerini belirlemede veya belirli uygulamalar için malzeme seçimi konusunda önemli olmaktadır. Deney cihazı, tribolojik etkileşimlerin esasını anlama konusunda daha az önemli olmaktadır. Malzeme ve yağlayıcı madde özellikleri, yükleme şartları, temas alanı, temas zamanı, şekil, yüzey bitirme, hız, titreşimler, sıcaklık, atmosfer gibi değişkenler, tribolojik deneyler için önemli olan parametrelerdir[10, s 119, 57]. Üretim maliyeti, ekonomik bitirme, bulunabilirlik, ağırlık veya yoğunluk gibi özellikler de tribolojik uygulamalar için malzeme seçimindeki yardımcı faktörlerdir. Tribolojik özelliklere ek olarak mukavemet, tokluk, ısı iletkenlik ve yorulma veya korozyon direnci de sıkça dikkate alınmaktadır[10, s 119].

2.6.1 Aşınma deney düzeneği tasarımları

Aşınma deney düzenekleri genel olarak iki ana gruba ayrılır. Kapalı sistem denilen birinci grupta hem esas cismin hemde karşı cismin tribolojik davranışları incelenir. Açık sistem denilen ikinci grupta da sadece esas cismin tribolojik davranışı incelenir. Kapalı sistemde adhezif, tribokimyasal ve yüzey yorulması aşınması, açık sistemde ise abrazif aşınma incelenmektedir[10, s 120].

Burada açık sistem yani abrazif aşınma deney düzeneği tasarımları ağırlıklı olarak ele alınacaktır. Metal-metal aşınma deney düzenekleri ise ileriki sayfalarda toplu halde verilmiştir.

Abrazif aşınma deney düzenekleri aşağıdaki servis durumlarını taklit etmelidir:

- Etkili olan aşındırıcı taneciğin sertliği ve boyutu,
- Aşındırıcı tanecik ve aşınma yüzeyi arasındaki birim basınçlar,
- Aşınan yüzey ile ilişkili olan aşındırıcı taneciğin yönü ve hızı.

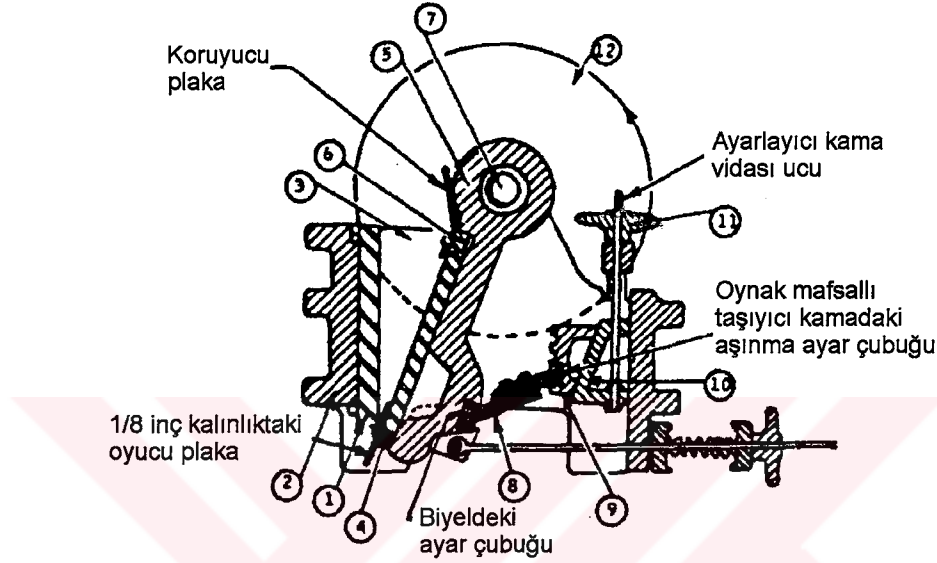
Aksi halde sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir[18].

Güvenilir deney sonuçları elde etmedeki zorluk gözönünde bulundurulduğunda aşınma deneyleri oldukça özel olabilmekte ve servis için bir malzemedan istenen karakterestikleri belirlemede oldukça yararlı olabilmektedir. Kantitatif terimlerle ifade edilen sonuçlar için bir aşınma deneyinin güvenilirliği sağlaması gerekmektedir. Bir aşınma deneyinin standard duruma getirilmesi her zaman pahalı bir işlem olup çok zaman gerektirmektedir ve yapılan deneyin standardtan sapmadığını garanti etmek için standard bir malzemenin kontrol amacı ile kullanılması önerilmektedir[18].

Madencilik endüstrisinde oldukça sık karşılaşılan oyucu aşınmaya dirençli malzemeleri belirlemek için çeneli kırıcılar kullanılmaktadır. Genellikle referans malzemesi ve referans malzemesi ile aşınma oranları izafi olarak ifade edilen farklı malzemeler birlikte deneye tabi tutulmuşlardır[8, 57]. Bu amaçla Amerika’ da “Climax Molybdenum “ şirketi küçük, ticari bir çeneli kırma makinasını (Şekil 2.30) yeniden düzenleyerek çeşitli malzemelerin oyucu abrazyon direncini ve sıralamasını yapmıştır[58].

Çeneli kırıcıda 22mmx137mmx190mm boyutlarında deney malzemesinden yapılmış sabit çeneli plaka, referans malzemesinden yapılan ve boyutları 180mmx132mmx216mm olan hareketli çeneli plaka ile karşı karşıyadır. Dönen eksantrik bir mil hareketli olan plakaya titreşim hareketi yaptırmaktadır. Levhaların üst tarafından yükleme alt tarafından da boşaltma yapılmaktadır. Sonuçlar, deney plakasının ağırlık kaybının referans plakasının ağırlık kaybına oranı şeklinde ifade edilmektedir[58].

Oyucu abrazyon deney yöntemine benzer bir yaklaşım, yüksek gerilmeli öğütücü abrazyon için de uygulanmıştır. Öğütücü abrazyona dirençli malzemeleri belirleyen deney cihazı bilyalı öğütücülerdir. Bu deney cihazında bilyalardan birisi incelenecek olan malzemedir diğeri ise referans malzemesinden yapılmıştır[8, 58].



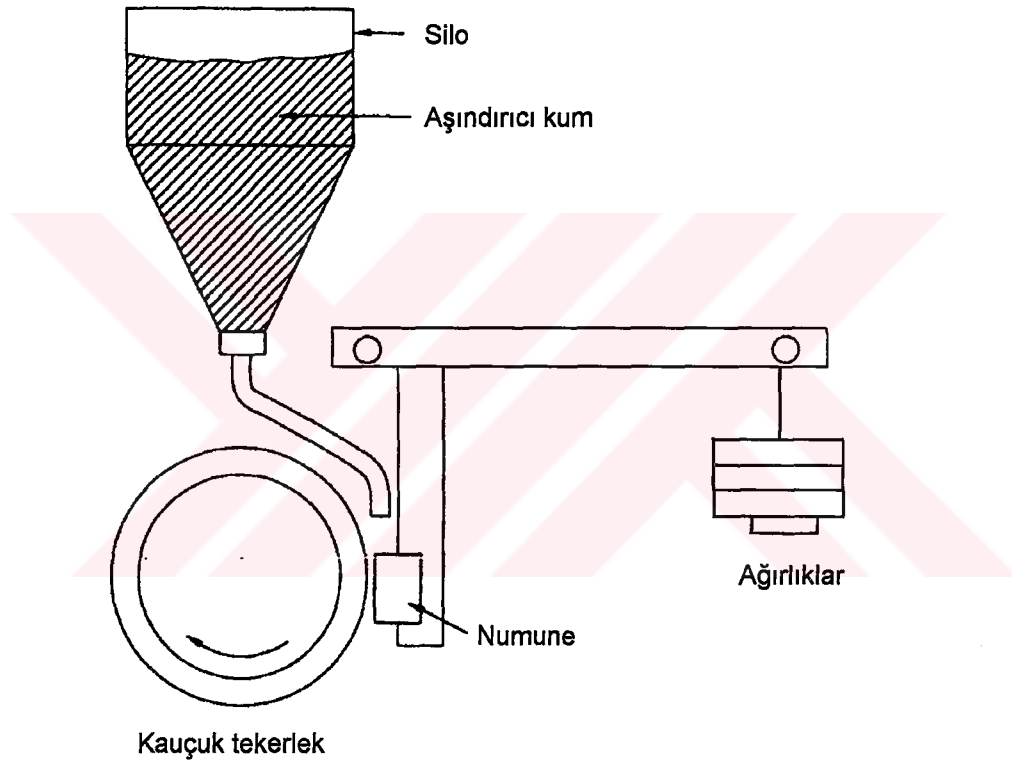
Parça No	Parça Adı	Parça No	Parça Adı
1	Sabit çeneli plaka	7	Ekzantrik mil
2	Montaj plakası	8	Uzunluğunu ayarlanabilen oynak mafsallı plaka
3	Yan levha	9	Oynak mafsallı plaka taşıyıcı kama
4	Haraketli çeneli plaka	10	Ayarlayıcı kama
5	Biyel	11	Ayarlayıcı el volanı
6	Biyel kolu kaması	12	Volan

Şekil 2.30 Çeneli kırıcı ve parçaları[58].

Malzemenin düşük gerilmeli çizici abrazyona karşı direncini belirlemek için kullanılan deney düzeneği tasarımları üç sınıfa ayrılabilir;

- Çamurlu kumda ya da kuru kumda dönen sabit bir numuneye karşı sürtünen kauçuk tekerlekten meydana gelen makina,
- Numunenin çamurlu kumda dönmesi ile aşındırıldığı makina,
- Numunelerin hava ile taşındığı abrazifler ile aşındırıldığı makina[58].

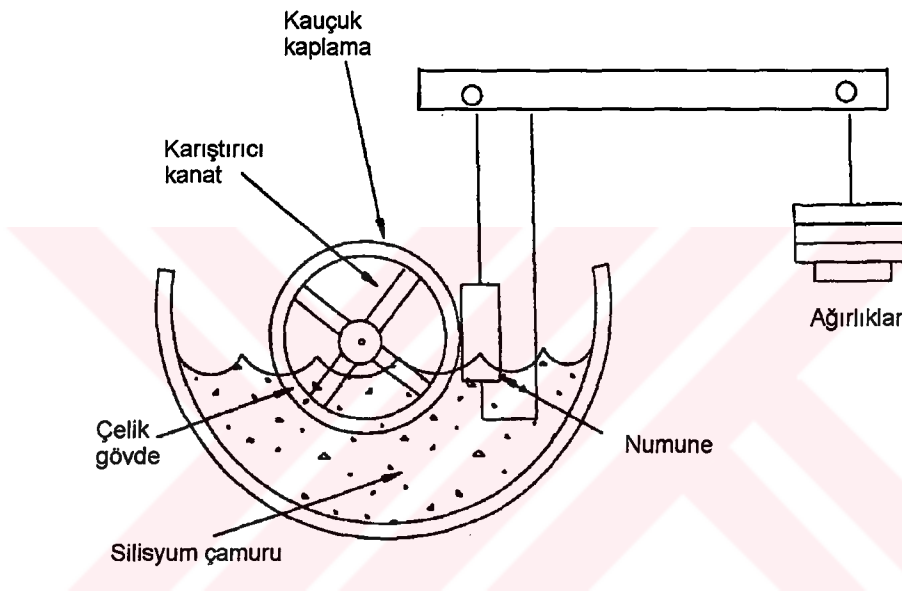
Haworth isimli araştırmacı, katılardaki hava akışını ya da boru sistemlerindeki sıvılara süspansiyon durumdaki abrazyonun akışını ve sapan demirinin aşınmasını iyi bir şekilde taklit eden bir deney makinasını geliştirmiştir. Avery isimli bir başka araştırmacı da bu deney makinasını yeniden düzenleyerek kuru kum kauçuk tekerlek deney düzeneğini geliştirmiştir (şekil 2.31). Bu deney makinasında abrazyonun etkisini ve ara yüzey basıncını azaltmak için kauçuk tekerlek kullanılmaktadır. Yavaşça dönen bir tekerlek ile sabit birim basınç oluşturmak için ölü ağırlık yüklü numune arasına aşındırıcı tanecik sürekli bir şekilde beslenmektedir[18].



şekil 2.31 Kuru kum kauçuk tekerlek deney makinası[13, s189].

İki cisimli abrazyon aşınmaya benzer bir şekilde deney malzemelerini aşındıran ve ASTM tarafından standart (ASTM G65) hale getirilen kauçuk tekerlek deney makinası, numune ve kauçuk arasına giren abrazyon tane boyutundan dolayı sınırlanmaktadır[8].

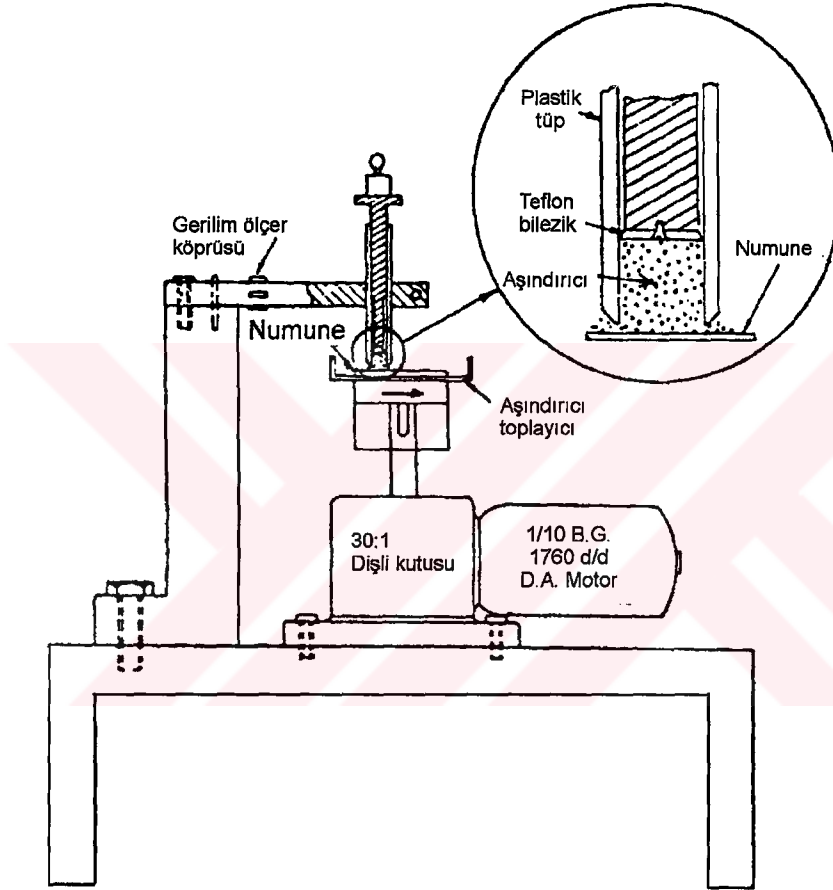
Düşük gerilmeli çizici abrazyonu taklit eden bir diğer deney makinası ıslak kum kauçuk tekerlek deney makinasıdır (ASTM G105). Kuru kum kauçuk tekerlek deney makinasına çok benzemekte ancak aşındırıcı tanecikler sulu çamur şeklindedir. Bu deneyin avantajı, pratiği çok daha iyi taklit etmek için sulu çamur kullanılması ile normal prosedürün değiştirilmesine olanak tanınmasıdır. Bu şekilde uygulama ile birlikte kimyasal etkiler de incelenmiş olmaktadır. Kuru kum kauçuk tekerlek deneyi makinasına benzer olarak ıslak kum kauçuk tekerlek deney makinası da (Şekil 2.32), malzemeleri sınıflandırmaya yaramakta ancak mutlak değerler vermemektedir[13, s 191].



Şekil 2.32 Islak kum kauçuk tekerlek deney makinası[13, s 192].

Bir başka düşük gerilmeli çizici abrazyon deney makinası Rabinowicz ve arkadaşları, Taporov ve Misra ile Finnie tarafından tasarlanmıştır. Rabinowicz ve Taporov deney makinasında yük altında biri diğeri üzerinde kayan iki yüzey arasına aşındırıcı tanecik girmektedir. Misra ve Finnie tarafından tasarlanan deney makinasında (Şekil 2.33) ise dönel disk şeklindeki numune, tüp dışına akan tanecikler ile aşındırılmaktadır. Tanecikler numune ile temas etmeden önce tüpe nakledilen yükün çoğu tüp duvarlarında sürtünmeye neden olur[8].

Malzeme çiftlerinin kayma aşınması davranışını değerlendirmek için ASTM tarafından ASTM G99 şeklinde standard hale getirilen düz bir diske karşı bastırılan iğne şeklindeki numuneden oluşan pim disk deney cihazı kullanılmaktadır. Bu deneyin uygulama ile ilişkisi simülasyon derecesine yani deney şartlarının uygulama şartlarına olan benzeşmesine bağlıdır. Numunenin şekli ve boyutu, yük, hız ve malzeme çiftleri bu deneyin değişen parametreleridir[13, s 214].

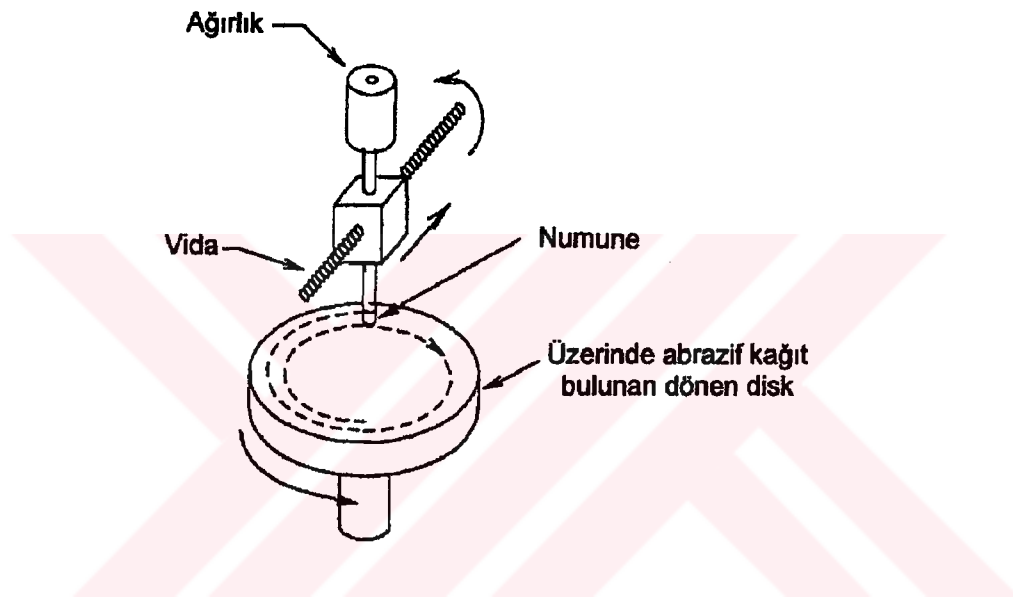


Şekil 2.33 Düşük gerilmeli çizici abrazyon deney makinası[8].

Şekil 2.34' de pim-disk deney makinasının, iki cisimli abrazyon aşınmaya dirençli malzemeleri belirlemek amacıyla kullanılan ve pim-abrazyon diye isimlendirilen bir diğer çeşidi görülmektedir. Abrazyon kağıdı dönel diskin üst yüzeyine bağlantılı olup iğne (pin) şeklindeki numune, ölü ağırlık yüklemesi ile abrazyon kağıdına karşı tutulmaktadır. Numune deneyin ilerleyişi sırasında sürekli olarak yeni aşındırıcıların etkisinde kalması için radyal olarak içeriye doğru

hareket etmektedir[8,56]. Bu tür deney makinası tahminen 1910 yılında Robin tarafından kullanılmış daha sonra Khrushov tarafından iyileştirilmiştir[8].

Kayma aşınmasının incelendiği ve malzemeleri kayma aşınmasına dirençleri bakımından sınıflandırmaya yarayan bir diğer deney makinası da blok disk (ASTM G77) aşınma deney makinasıdır. Bu deney makinasında (Şekil 2.35) hem blok hem de disk aşındığı için hem bloğun hem de diskin aşınması dikkate alınmalıdır[13, s 207].

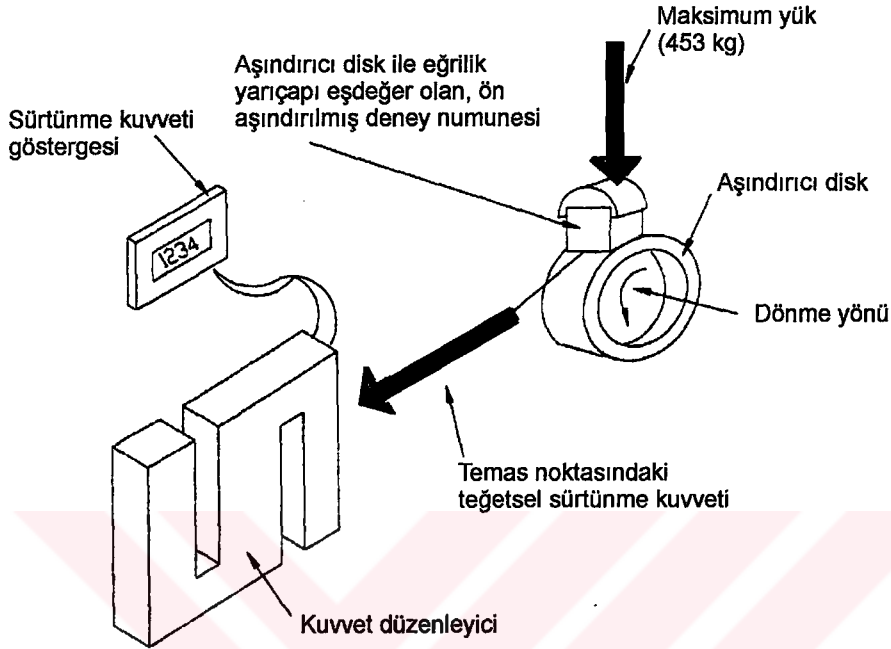


Şekil 2.34 İki cisimli abrazyon aşınma için kullanılan pim-abrazyon deney makinası[56].

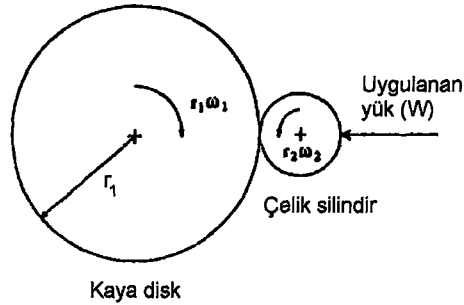
Yukarıda belirtilmiş olan ve standard hale getirilmiş deney makinaları yanında bazı araştırmacılar, hem değişik hareket etkisi altındaki aşınma olaylarını incelemek hem de standard durumdaki deney makinalarındaki bazı sakıncaları ortadan kaldırmak amacı ile çeşitli deney makinaları geliştirmişlerdir.

Mouritz ve Hutchings[59] tarafından yapılan bir çalışmada, madencilik uygulamalarında karışık hareketler ile metalik parçaların abrazyon kayalara karşı temasını taklit eden bir deney makinası geliştirilmiştir (Şekil 2.36). Bu deney makinası ile kaya karşı yüzeye kayma ve yuvarlanma hareketi ile

temasta olan az karbonlu temperlenmiş martenzitin aşınması incelenmiştir. Saat yönünün tersine silindirik çelik numune pnömatik olarak saat yönünde dönmekte olan kaya diske karşı bastırılmaktadır.



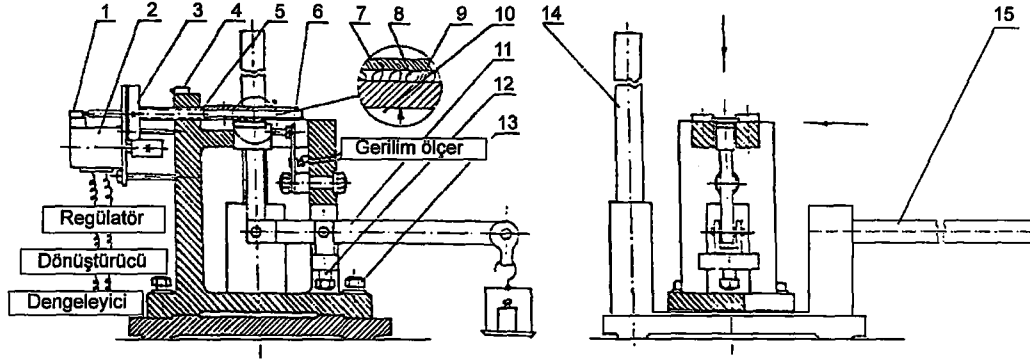
Şekil 2.35 Blok disk aşınma deney makinası[13, s 207].



Şekil 2.36 Kayma ve yuvarlanma hareketi yapabilen aşınma deney makinası[59].

Fang, Kong ve Zhou[39] tarafından yapılan bir çalışmada da, üç cisimli abrazif aşınmada aşındırıcı taneciklerin hareket şeklini değerlendirme ve izleme özeliğine sahip bir deney cihazı geliştirilmiştir (Şekil 2.37). Deney

makinasında, normal yük alttaki numuneye manivela yardımı ile uygulanmaktadır. Altaki numuneye yatay kuvvet ise bir civata ile uygulanmaktadır. Daha sonra sürtünme kuvveti sırası ile aşındırıcı taneciğe, alttaki numuneye ve gerilim ölçere nakledilir. Gerilim ölçerdeki okumalar sürtünme kuvvetine dönüştürülür. Abrazif taneciğinin hareketi ise, bir kamera ile birlikte mikroskop ile takip edilmektedir.



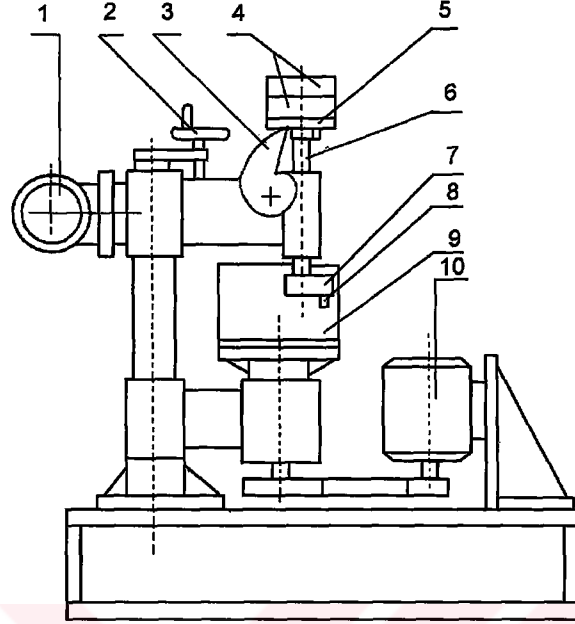
Parça No	Parça Adı	Parça No	Parça Adı
1	Hareket değiştirme anahtarı	8	Aşındırıcı tanecik
2	Motor	9	Alt numune
3	Dişli	10	Numune tutucu
4	Hareket anahtarı	11	Manivela
5	Civata	12	Ayar civatası
6	Elastik eleman	13	Civata
7	Üst numune	14, 15	Mikroskop yatağı

Şekil 2.37 Üç cisimli abrazif aşınma deney makinası[39].

Zhang, Beeley ve Baker[60], tarafından yapılan bir çalışmada da toprak kaldırma, bilyalı öğütücü ve küçük çeneli ezici gibi darbe abrazif aşınma şartlarını taklit eden basit, hızlı ve ekonomik bir laboratuvar türü deney makinası geliştirilmiştir (Şekil 2.38). Numuneye kazandırılan darbe enerjisi ve dönme hareketi yapan örsün üzerindeki numunenin kayma mesafesi hassas olarak kontrol edilebilmektedir.

Abrazif, erozif veya abrazif-erozif aşınmaya dirençli malzemeleri belirlemek için kullanılan deney makinalarının çalışma esası Şekil 2.39' da

görülmektedir. Şekil 2.39a' da, bir mile bağlı deney numunesinin aşındırıcı taneciklerin olduğu bir kazanda döndüğü ve böylece yavaş hareket eden



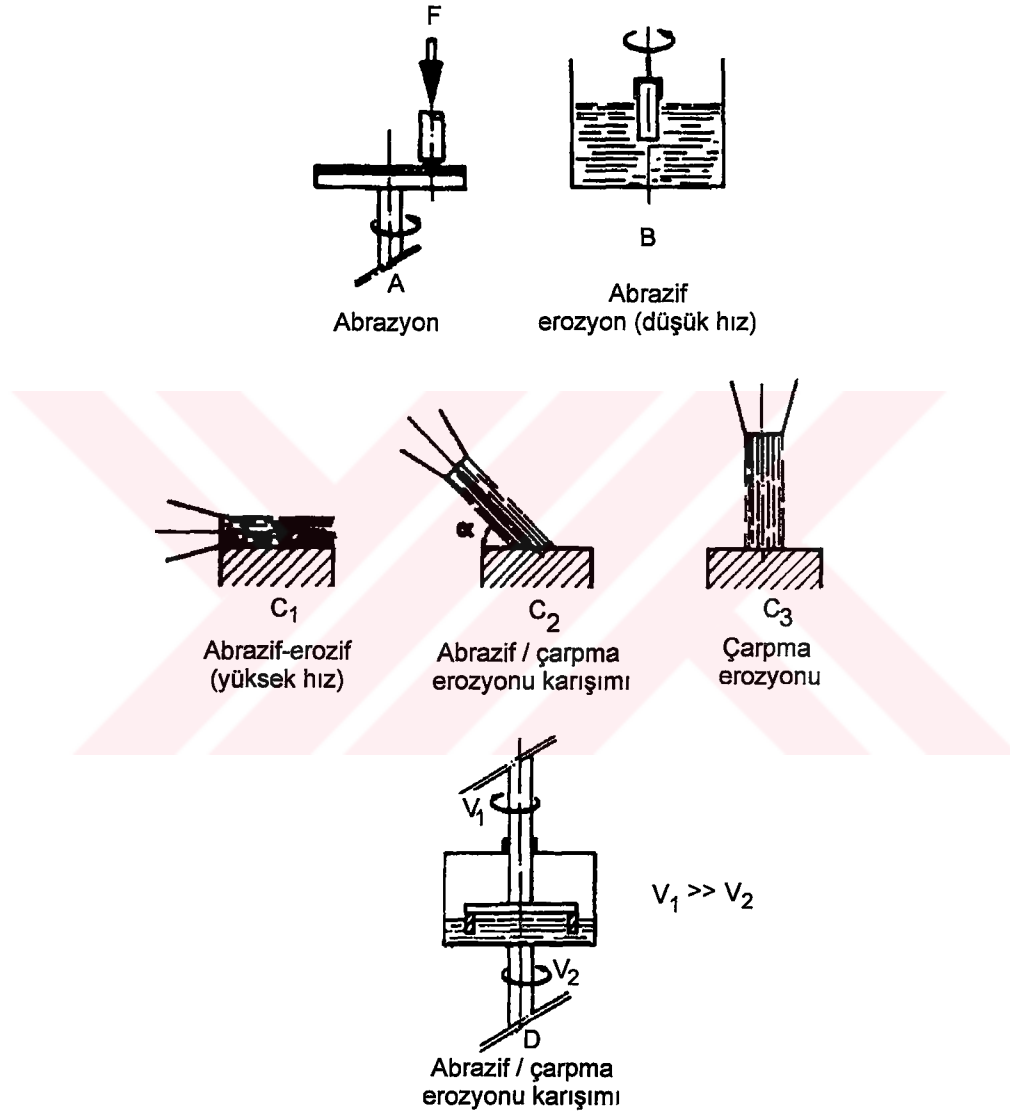
Parça No	Parça Adı	Parça No	Parça Adı
1	Sabit hızlı motor(d.a.)	6	Darbe mili
2	Ayar mekanizması	7	Krank
3	Kam	8	Numune
4	Ağırlık	9	Örs
5	İtici	10	Değişken hızlı generatör(a.a.)

Şekil 2.38 Darbe abrazyon deney makinası[60].

aşındırıcıların abrazif-erozif etkisinin incelendiği ve Şekil 2.39b' de ise, hızlı hareket eden aşındırıcı taneciklerin erozif etkisinin incelendiği deney yöntemlerinin esası görülmektedir. Şekil 2.39c' de ise nehir tarama işlemlerindeki uygun malzemeleri belirlemek için kullanılan abrazif-çarpma erozyonu deney makinasının esası görülmektedir. Şekil 2.39d' de ise milin her iki ucunda düşey olarak asılı olan numuneler, aşındırıcı tanecik veya çamurlu aşındırıcı tanecikler içerisinde hareket etmektedir[61].

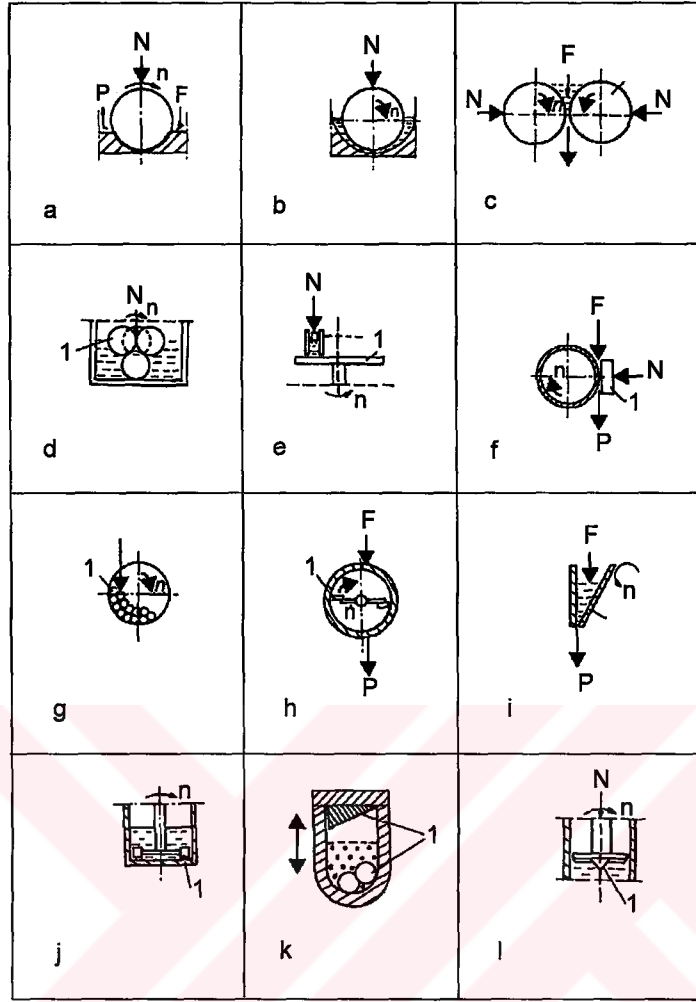
Özellikle, maden öğütme tesislerinde işlem maliyeti öğütücünün yakıt sarfiyatı ile güç ihtiyacı ve öğütücü parçaların aşınması ile doğrudan etkilenmektedir. Dolayısı ile, öğütülen malzemenin abrazifliği, öğütülebilirliği

ve öğütme elemanı olarak kullanılan malzemenin aşınma direnci önemli olmaktadır. Bu nedenle, kullanılan malzemelerin performansı; bu çeşit sistemlerde bulunan mekanik parçaların karışık ortamlara benzeyen işlem şartları altındaki simülasyonunun dikkatli bir şekilde tasarlanması ile belirlenebilir[62]. Bu tür öğütücüler için kullanılan deney düzeneği tasarımları Şekil 2.40' da görülmektedir[63].



Şekil 2.39 Abrazif, erozif ve abrazif-erozif aşınmaya dirençli malzemeleri belirleyen deneysel yöntemlerin esası[61].

Kantarıcı[34] ve Karamış[7], yaptıkları çalışmada da aşındırıcı tanecik dolu olan bir kazan içerisinde hem kendi ekseni hem de dairesel bir yörünge üzerinde dönen numunelerdeki aşınma miktarını hesaplamışlardır.

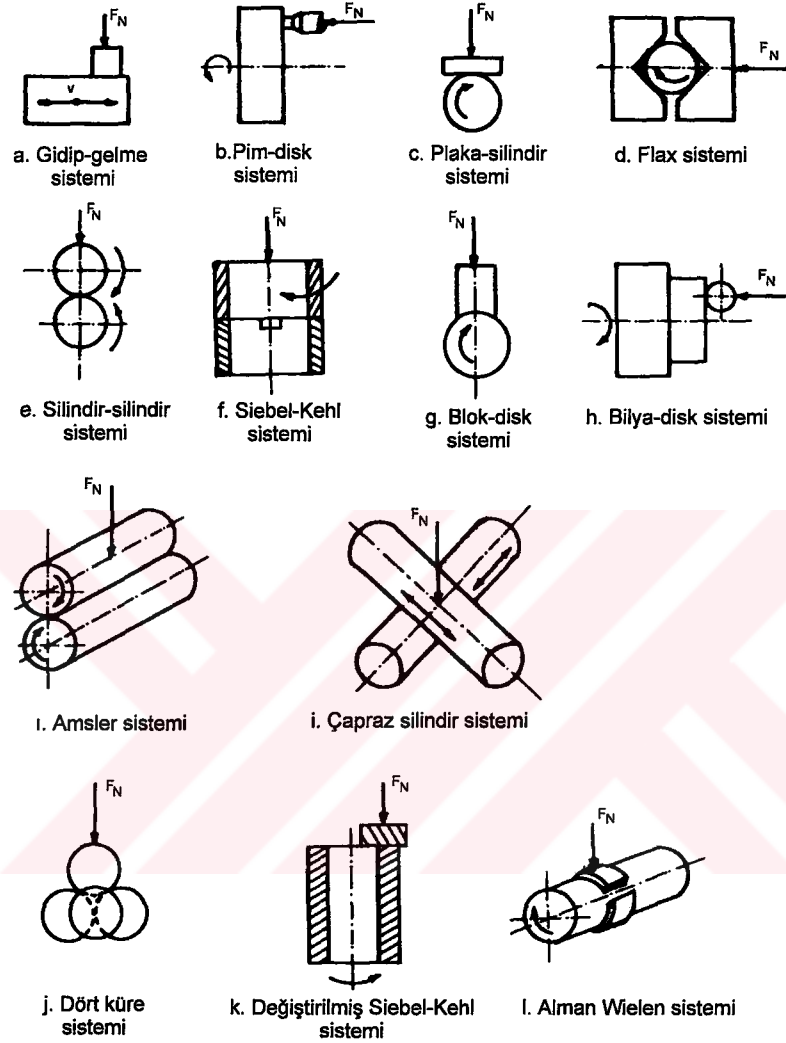


a	Bilezik ve bilyalı aşındırıcı düzenek	g	Küçük bilyalı değirmen türü düzenek
b	Aşındırıcı-kanallı bilyalı düzenek	h	Çekiçli darbeli öğütücü
c	Bcura türü rulolu aşındırıcı düzenek	i	Çeneli öğütücü oyucu abrazyon deney düzeneği
d	Dönen elektrod bilyalı aşınma deney düzeneği	j	Yancey, Geer, Price(YGP) abrazyon deney düzeneği
e	Abrazif kolona yükün uygulandığı aşınma deney düzeneği	k	Titreşim odalı darbe deney düzeneği
f	Kuru kum kauçuk tekerlek deney düzeneği	l	Sciezka öğütücüsü
F: Besleme, P: Ürün, 1:deney bıçağı/numune, N: Yük, n: Dönme yönü			

Şekil 2.40 Öğütme işlemlerinde abrazyif aşınma deney yöntemleri[63].

Metal-metal aşınmasına ait olan deney düzeneği tasarımları da Şekil 2.41' de toplu halde görülmektedir[64].

1960 yılı itibari ile Amerikan Yağlama Mühendisleri Birliği (ASLE) tarafından 200 den fazla aşınma deney düzeneği tasarımları olduğu ve bu sayının her geçen gün arttığı göz önüne alınırsa burada anlatılan deney düzeneklerinin bu sayının çok çok altında olduğu rahatlıkla söylenebilir.



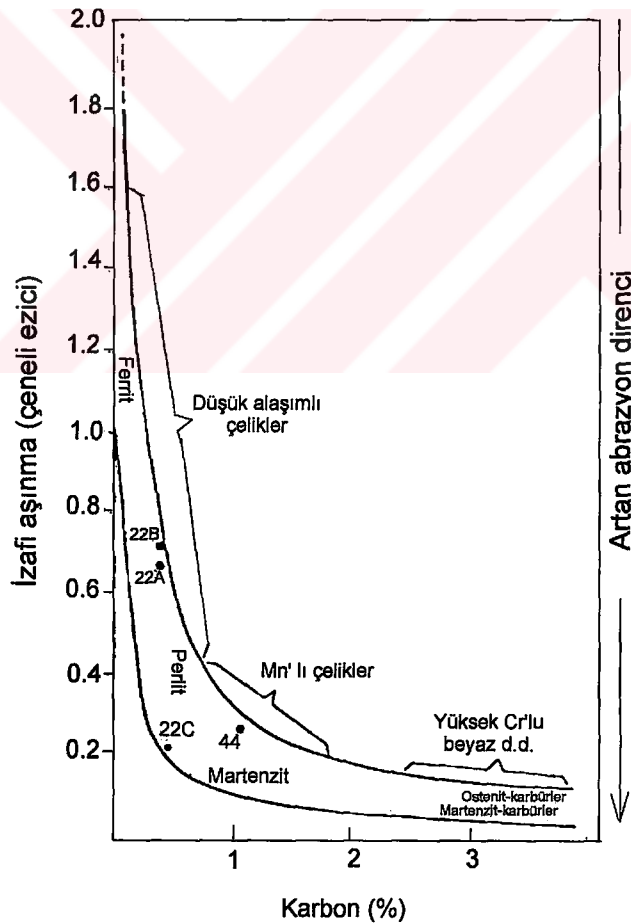
Şekil 2.41 Metal-metal aşınmasında kullanılan temel sistemler[64].

2.7 Aşınmaya Karşı Dirençli Malzemeler

Endüstrinin bir çok dalında, bakım giderlerinin büyük bir kısmını abrazyon dirençli malzemeleri yenileme maliyeti oluşturmaktadır. Örneğin, Colorado'daki Climax Madencilik Şirketi 'nde, bir günde ton başına 2 kg metal bulunan bir filizin 30.000 tonunun 300 mikronun altına ezildiği, öğütüldüğü ve işlendiği dikkate alındığında, 1959 yılı itibari ile aşınma dirençli parçaları

yenilemenin toplam maliyeti 1.000.000.000 Frang yani bir başka ifade ile 2.000.000\$' dır[65]. ABD' de, maden işletmeciliğinde abrazyon dirençli malzemelerin 1961 yılı verilerine göre yıllık tüketimi 350.000 ton dolaylarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu rakamın işlenilen malzemelerin hacmine bağlı olarak gelecekte çok hızlı artacağı beklenmektedir[19].

Ezici ve öğütücü makinalarda aşınan parçalar sadece abrazif aşınma etkisinde kalmayıp ani kırılmaya yol açan dinamik gerilmeler etkisinde de kalırlar. Dolayısı ile ağır gerilme etkisindeki parçalarda abrazyon direnci ve tokluk gibi iki zıt özellik arasındaki uygunluğu bulma yoluna gidilir. Karbon içeriği, demir alaşımların abrazif aşınma direnci ve tokluğuna zıt yönde fakat aynı etki eden başlıca faktördür (Şekil 2.42). Karbon içeriğine bağlı olarak abrazyon direnci artmaktadır[66].



Şekil 2.42 Demir alaşımlarının abrazyon direnci ve karbon içeriği arasındaki ilişki[66].

Aşınmaya karşı dirençli malzemeler oldukça çeşitli olup burada bazılarını değinilmiştir.

2.7.1 Yüksek kromlu beyaz dökme demir

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler pompalar, öğütücü astarlar, soğuk şekillendirme takımları, eziciler ve diğer madencilik makinalarındaki plakalar ve toprak kaldırma makinalarında abrazyon dirençli malzemeler olarak kullanılırlar[19, 67, 68]. Bu alaşımların mikroyapıları, martenzitik veya ostenitik bir matris ile çoğu M_7C_3 türü olan birincil ve ikincil karbürler ile karakterize edilir. Düşük gerilmeli abrazyona karşı yüksek dirençlidirler. Genellikle, orta alaşımlı martenzitik ve perlitik beyaz dökme demirlere göre pullanmaya karşı dirençli ve çok daha iyi tokluk özeliğine sahiptirler[68].

Yüksek kromlu dökme demirler, döküm şartlarında ostenitik kalmaya doğru güçlü bir eğilim gösterirler ve ince kesitlerde kolayca ostenitik bir matris elde edilebilir. Ostenitik matrisli alaşımların toklukları, martenzitik matrise sahip alaşımlardan daha yüksektir ve karbür yüzdesi de çok fazla olmadığı zaman da çok düşüktür. Kullanım şartlarına bağlı olarak abrazyon dirençleri martenzitik matrisli alaşımlardan çok daha düşüktür. Krom ilaveleri belirli korozyon özellikleri kazandırmaktadır[66].

Bu alaşımlarda, gevrek ve iri karbürler oluşturmada aşınma direncini iyileştirmek için %14-16 aralığındaki krom ile yüksek karbon içeriği kullanmak mümkündür. Molibden ilavesi ise özellikle kalın kesitlerde önemli olan perlitin meydana gelmesini önleyerek optimum aşınma direncinin elde edilmesini sağlayacaktır[19].

Az karbonlu perlitik beyaz dökme demirlerin geliştirilmeleri çok eski olup düşük abrazyon dirençli değişik tür parçalarda tavlınmamış şartlarda kullanılır. Yaklaşık 4 inç kalınlığında ve %3 karbon içeriğine kadar bu tür dökme demirler su soğutmalı kalıba döküldüğü zaman grafit içermezler. Bu yapıdaki dökme demirler, çeşitli abrazyon dirençli astarlar için kullanılır.

Grafit oluşumunu önlemek için bu çeşit dökme demirlerin %1-2 Cr içeren yüksek karbonlu kum kalıba döküm kaliteleri çok popüler olan çeşitleridir[68].

2.7.2 Ostenitik mangan çelikleri

Yüksek manganlı ostenitik çeliklerin ilk bulunuşları 1882 tarihinde İngiliz metalurjist Sir Robert Hadfield' ın %1,2C-%12Mn' lı çeliklerin keşfetmesiyle birlikte ortaya çıkmıştır. Ticari olarak %11-14Mn ve %1-1,4C bileşiminde tanıtılan bu çelik, bugün için uygulamalarda Hadfield çeliği olarak bilinir. Su verilmiş koşullarda bu çelikler önemli özelliklere sahiptirler. Manyetik olmayan karakteristiğini koruyarak 500HB sertliğine kadar ince bir yüzey tabakası soğuk sertleşmeyi hızlı bir biçimde gösterir[69].

Yüksek manganlı ostenitik Hadfield çeliği, olağanüstü abrazyon direnci özellikleri ile soğuk şekil değiştirme sertleşmesine neden olan yeterli yükleme koşulları altında çok iyi aşınma direnci gösterir. Biçimlendirilmek için talaşlı işlenmesi hemen hemen zor olup ancak dökülebilmekte ve taşlanabilmektedir. Günümüz endüstrisinde büyük ölçüde demiryolu çalışmalarında, toprak kazıyıcı makinaların kazıcı dişlerinde ve taş kırıcı çeneleri gibi madencilik endüstrisinde başarı ile kullanılmaktadır[70].

Lambert, Poyet ve Dancoisne[71], hadfield çeliğinin ince ve karışık kesitli dökümlerinin zor olduğunu belirterek kolay dökülebilen ve ısıtma işlem sonucunda manganlı çeliklerin özelliklerini veren manganlı dökme demir geliştirmişlerdir. Ezici makina parçaları, tank paletleri, kepçe dişleri ve pulluk demirleri gibi uygulama alanları %12Mn ve %3 C bileşimindeki manganlı dökme demirlerin kullanıldığı yerlerdir.

Hadfield çeliği, düşük ve orta darbe gerilmelerinde zayıf aşınma direnci gösterdiği için 1963 yılında aşınma direnci iyi olan fakat darbe tokluğu düşük olan orta manganlı çelik geliştirilmiştir. İğne şeklinde karbür ağı bulunan bu çeliğin darbe tokluğunu arttırmak için ekonomik olmayan yüksek sıcaklıkta

uzun süreli ısıtma işlemi gereklidir ki bu durumda çatlak olasılığını ortaya çıkarmaktadır. Döküm durumundaki orta manganlı çeliğe ucuz ve bol miktarda bulunan kalsiyum ilavesi ile iğne şeklindeki karbür ağı küresel şekilli karbürlere dönüşerek ostenit fazında dağılmakta ve aşınma direnci iyileşmektedir[72].

2.7.3 Yalın karbonlu çelikler

Ticari çelikler diye de isimlendirilirler. Teorik olarak bir Fe-C alaşımı olmakla birlikte normalde mangan, fosfor, kükürt ve silisyum içerirler. Bu dört ilave element, normal yüzdelerinde bulunduklarında ortaya çıkan ürün yalın karbonlu çelik diye isimlendirilmektedir. Bu tür çelikler üç gruba ayrılırlar. %0.3' den daha az karbon içeren çeliklere az karbonlu çelikler denilmektedir ve şekillendirilebilirliği ile kaynaklanabilirliği iyidir. %0.3-0.8 arası karbon içeren çeliklere orta karbonlu çelikler denilmektedir. Martenzitik bir yapı oluşturmak için su verilebilir ve yorulma dayanımı ile tokluğu oldukça iyidir. %0.8' den daha fazla karbon içeren çeliklere ise yüksek karbonlu çelikler denilmekte, tokluk ve şekillendirilebilirlik düşük ancak sertlik ve aşınma direnci yüksektir[73, s 132].

Karbonlu çeliklerin aşınma dirençleri, genel olarak sertliklerinin yanı sıra, iç yapılarında bulunan sert karbürlerin miktar, büyüklük ve dağılım şekline de bağlıdır. Karbür miktarı çeliğin karbon miktarına bağlı olduğundan, farklı miktarda karbon içeren buna karşın su verme sonucu sertlikleri aynı olan çeliklerde aşınmaya dayanıklılık açısından farklı durumlar ile karşılaşılır. Karbür miktarının artması ile özellikle bir karbür ağı bulunuyorsa malzemenin tokluğu düşmektedir. Bu neden ile aşınmanın ön planda bulunduğu durumlarda fazla miktarda karbür, darbe dayanıklılığının gerektiği durumlarda da az miktarda karbür içeren az veya orta karbonlu çelikler tercih edilir. Her iki özelliğin istendiği durumlarda da küreselleştirme ısıtma işlemi ile karbür ağları parçalanır ve bu işlemi takiben sertleştirme yapılır[74, s 14].

Aşınma direncinin yüksek olmasının beklenildiği yüksek karbonlu çelikler, alaşım içeriğine bağlı olarak su, yağ ve tuz banyosu gibi farklı ortamlarda sertleştirilmektedir. Ancak, sertleştirme işleminden sonra bazı çeliklerde önemli miktarda ostenit kalmaktadır. Az miktarda kalıntı ostenitin çeliğin mekanik özelliklerine bir zararı olmadığı gibi tokluk üzerine olumlu etkide bulunur. Ancak, kalıntı ostenitin miktarı mikroyapının önemli bir bileşeni olacak düzeyde olursa mekanik özellikler kötüleşmekte ve hatta çeliğin çatlayarak hasara uğramasına yol açmaktadır. Kalıntı ostenit, sıfır altı işlemler, temperleme ve deformasyonla martenzit ve/veya beynite dönüştürülebilir ancak çelikte her zaman bir miktar kalıntı ostenit vardır[75].

Tablo 2.3' de kullanım alanları belirtilmiş olan bu çeliklerin kimyasal bileşimleri, fiziksel ve mekanik özellikleri, ASTM, SAE ve ASME tarafından tanımlanan spesifikasyonlara sahiptir[76, s 6-25].

Tablo 2.3 Karbonlu çeliklerin uygulama alanları[76, s 6-26].

%C	Kullanım Alanları
0.05-0.10	Sac, şerit, boru, çivi teli
0.10-0.20	Perçinler, civatalar, yüzeyi sertleştirilmiş parçalar
0.20-0.35	Plaka, kam mili gibi dövme parçalar
0.35-0.45	Miller, akslar, bağlantı çubukları
0.45-0.55	Krank milleri, büyük dişliler
0.60-0.70	Civata başı, dövme kalıpları, raylar, pimler
0.70-0.80	Kesme bıçağı, keski, çekiç, kazmalar, şerit testere
0.80-0.90	Kaya deliciler, el keskisi
0.90-1.00	Yaylar, broşlar, raybalar, kalıplar
1.00-1.10	Küçük yaylar, torna tezgahı, planya makinası, mengene
1.10-1.20	Burma matkap, küçük pim, pafta kolu, küçük torna tezgahı takımı
1.20-1.30	Eğeler, bilya halkası, torna aynası, hadde kalıbı, ustura

Aşınmaya karşı dirençli malzemeler oldukça çeşitli olup bunlardan bazılarının kimyasal bileşimi, özellikleri ve uygulama alanları Tablo 2.4' de verilmiştir.

Tablo 2.4 Aşınmaya dirençli alaşımların özellikleri ve uygulama alanları[15].

Alaşım	Özellikleri	Uygulama Alanları
Az alaşımlı çelikler; %2-5Cr,%0.2-0.8C, %0-1Mo	Şiddetli aşınan parçaları yenilemek için kullanılır, abrazyon direnci iyidir, orta darbe direncine sahiptir.	Raylı taşıt hareket takımının yenilenmesi, kasnaklar, genel tamirler, çatal bağlantılar, tamburlar, miller.
Ostenitik mangan çelikleri; %3-5Cr,%2-4Ni, %10-20Mn,%1C	Hızlı soğuk sertleşme, son derece yüksek darbe direnci, düşük gerilmeli abrazyona orta direnç, oyucu abrazyona iyi direnç.	Kepçe ve ezici parçalar gibi manganlı çelik dökümlerin tamiri.
Kromlu beyaz dökme demirler		
Ötektik üstü %20-30Cr,%2.5-5.0C, %0-5Mo,%0-2Ni	Mükemmel yüksek ve düşük gerilmeli abrazyon direnci, orta-düşük darbe direnci.	Kazıyıcı dişler, pulluk demiri, toprak kaldırma takımları, çekiçli değirmen.
Ötektik altı %10-30Cr,%1.0-2.5C, %0-5Mo,%0-2Ni	Çok iyi yüksek ve düşük abrazyon direnci, orta darbe direnci.	Ötektik üstü dökme demirlerin kullanıldığı yerlerde ancak daha çok darbe direncinin gerekli olduğu yerlerde.
Tungsten karbür (WC) kompozitler		
İri taneli WC, dökme demir matris	Kayaya karşı en iyi kesici etki. Serviste yüzey parlamaz.	Kaya kesimi, matkap uçları, at nalı.
İnce taneli WC, dökme demir matris	Çok iyi abrazif aşınma direnci, serviste yüzey parlar.	Kültivatörler, kürekler, kepçeler, silo bıçakları, çekiçli değirmenler, el burguları, kazıcı dişler, kepçe dişi.
Ni esaslı alaşım matrisinde WC	İnce kaplama tabakası (<0.10inç). Çok iyi abrazif aşınma direnci ile iyileşen korozyon direnci.	Sondaj civataları, diskler.
Cr,B,S, içerikli Ni esaslı alaşımlar	Orta-mükemmel abrazyon direnci, çok iyi düşük gerilmeli metal-metal aşınma direnci, korozyon ortamlara direnç.	Sondaj civataları, diskler, bıçaklar, karıştırıcı parçalar.
Cr,W,C içerikli Co esaslı alaşımlar	Orta-çok iyi abrazyon direnci, iyi düşük gerilim ve yüksek gerilim metal-metal aşınma direnci, çok iyi ısı ve korozyon direnci.	Pompa ve valf elemanları, püskürtme nozulları, miller ve yataklar, dizel motor parçaları, yağlamasız metal-metal uygulamaları.

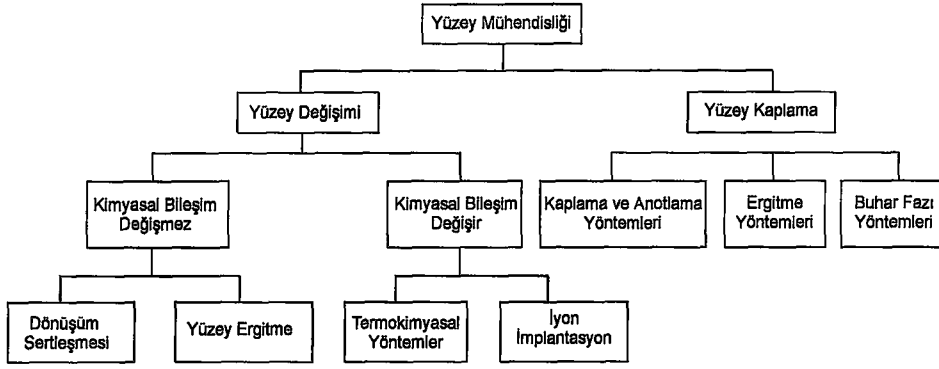
BÖLÜM 3

MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ

3.1 Yüzey Mühendisliği

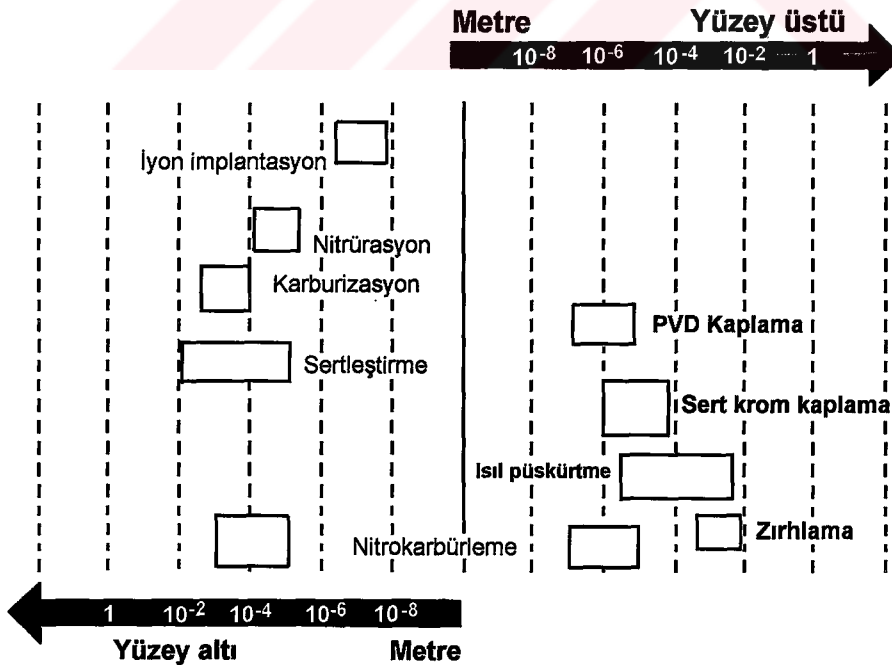
Genellikle mühendislikte kullanılan malzemelerin istenilen mukavemete sahip olması ve uygulanan yükleri taşıması gerekmektedir. Bu tür özellikler malzemenin kendisi ile doğrudan ilgilidir. Ayrıca, malzemelerin verimli olarak kullanılabilmesi için gerekli bazı yüzey özelliklerini de taşıması gerekir. Bu özellikler elektrik, optik ve ısı özellikleri olabileceği gibi malzemenin kullanım süresi ile yakından ilgili olan korozyon ve aşınma direnci gibi özellikler de olabilir. Genellikle bütün bu özellikleri (mekanik+yüzey) tek bir malzemede bulmak olanaksız veya çok pahalı olmaktadır. Bu nedenle mühendislik malzemelerinin gerekli yapısal özellikleri sağlayan ucuz bir malzemedan seçilmesi ve diğer yüzey özelliklerinin ise yüzey işlemleri ile sağlanması en uygun çözümdür[77].

Tribolojik uygulamalar için yüzey mühendisliğinin kullanılmasında iki amaç hedeflenmektedir. Bunlardan birisi malzeme yüzeyinin aşınma direncini arttırmak diğeri ise, malzeme yüzeyinin sürtünme davranışını düzeltmektir(Şekil 3.1). Dönüşüm sertleşmesi veya erimeyi izleyen hızlı soğuma ile kimyasal bileşim değiştirilmeksizin malzeme yüzeyinin mikroyapısı değiştirilebilir (örneğin endüksiyon sertleştirme). Zıt olarak, difüzyon işlemleri yardımıyla kimyasal bileşim ve mikro yapının her ikisi de değiştirilebilir (örneğin karbürizasyon, nitrürleme). Bu yöntemler ile kimyasal bileşimdeki ve mikro yapıdaki kimyasal değişiklikler kaçınılmaz olarak sınırlı olup, birçok amaç için tamamen farklı malzemelerden kaplamalar da uygulanabilmektedir (CVD, PVD ve ısı püskürtme gibi)[3, s 213].



Şekil 3.1 Modern yüzey işlemleri[3, s 213].

Yüzey işlemleri ve kaplamalar (Şekil 3.2), yüzey sertleştirme işlemleri olarak isimlendirilen mühendislik ve bilim dalları arasındaki uzlaşmadır. Kısacası, bir yüzey mühendisliği yöntemi, malzemenin kullanım özelliklerini iyileştirmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler; malzemenin korozyon direncini, aşınma direncini, yorulma mukavemetini, fiziksel özelliklerini, estetik görünümünü veya bunların bileşimi olan özellikleri iyileştirmek için kullanılabilir. Yüzey mühendisliği, bir kaplama tekniği veya diğer bir deyişle yüzey özellikleri kazandırma tekniğinden başka, imalat prosedürü ve parça tasarımını da içermektedir[78].



Şekil 3.2 Yüzey altı, yüzey üstü ve kaplama işlemleri[78].

Yüzeye farklı malzemeden ilave bir kaplamanın yapıldığı ısı püskürtme yöntemi ile malzeme yüzeyinin kimyasal bileşimi ve mikroyapısının değiştirildiği nitrüleme yöntemi, çalışmanın ana konusunu teşkil ettiğinden bundan sonraki kısımlarda sadece bu iki yöntem üzerinde durulacaktır.

3.1.1 Isı püskürtme

Metallerden ve oksitlerden, oksit seramik ve camsı metallere kadar geniş bir dağılım aralığındaki malzemeleri içeren ısı püskürtme kaplamaları, ana malzemenin beklenilmeyen ve gereksiz olan kırılmasından dolayı fabrikanın boşta çalışması ile ilgilenen üretim müdürlerinin her geçen gün ilgisini çekmektedir. Parçayı tamamen yenilemek için gerekli olan masrafın az bir kısmı ile ve çeşitli ısı püskürtme yöntemleri ile uygulanan yeni yüzey malzemesi, bu tür parçalara ilave ömür sağlayabilmektedir[79].

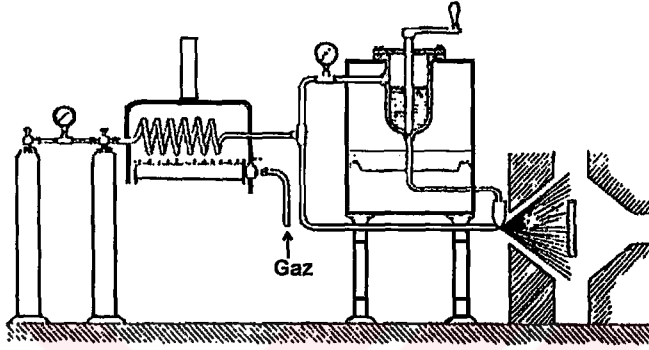
Yıllardır kullanılan dökme demir, karbonlu çelikler ve az alaşımlı çelikler gelecekteki uygulamalara bağlı olarak ihtiyaçları karşılayamayacaktır. Termik makinalarda, türbin motorlarında ve diğer kritik uygulamalarda yüksek sıcaklıkların kullanımı ve bazı malzemelerin sınırlı bulunuşları gelecek on yıl içerisinde ısı püskürtme endüstrisinin hızlı büyümesine yol açacaktır[80].

3.1.1.1 Isı püskürtme yönteminin gelişimi ve esası

Isı püskürtme yöntemine ilk zamanlarda “metalizasyon” adı verilmekteydi. 1890-1910 yıllarında metalizasyon amacı ile oksit-asetilen torcunun kullanılmaya başlanmasından sonra 1910 yılında Schoop ve arkadaşları, iletken metal tellerini eritmek, atomize etmek ve ana metal üzerine uygulamak için bir elektrik ark yöntemini geliştirmiştir. Daha sonraki gelişmeler de bu olayı izlemiştir[81].

Dr. M. U. Schoop' a bu fikir, duvara büyük bir kuvvet ile saçma attığında doğmuş ve daha sonra da Dr. Schoop ve arkadaşları tarafından metal

püskürtme işlemi ortaya çıkarılmıştır (Şekil 3.3). İlk geliştirilen metal püskürtme işleminde, yüksek basınçtaki gaz jetine erimiş metal buharının gönderilmesi ile ilk deneylere başlanmıştır. Bu sistem, kıvrımlı bir borudan geçerek ısıtılan havanın elde edilmesini sağlayan bir kompresörden meydana gelmekteydi. Bu sıcak hava, bir kaptan erimiş metali emmek ve uygun bir şekilde hazırlanmış olan yüzeye yapışan çok ince püskürtme tozlarını göndermek için kullanılmaktadır[82, s 2].



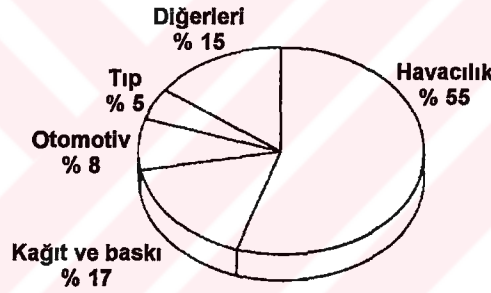
Şekil 3.3 İlk erimiş metal püskürtme tesisi[82, s 2].

Isıl püskürtme, 20. Yüzyılın ilk zamanlarında başlıca tamir amacı ile kullanılmaktaydı. 1960 yılından sonra ısı püskürtme işlemleri, yöntemleri ve kullanılan malzemeler bakımından korkunç bir gelişme meydana gelmiştir. Isıl püskürtme cihazlarındaki, işlem parametrelerindeki ve kullanılan malzeme biçimlerindeki teknolojik ilerlemeler, yeni ve potansiyel uygulamaların çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir[83].

1950 yılında "Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)" nin kurulması, daha yüksek sıcaklıklarda çalışan aşınma ve korozyon dirençli malzemelerin ve kompozitlerin yeni biçimlerini uygulamak için ilave tekniklere olan gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Bu gereksinimler ve plazma torcunun bulunuşu ısı püskürtmenin gelişimini, makina parçalarını tamir etme ve atmosferik korozyondan korumanın dışında daha ileri malzemeleri gerektiren karmaşık (sophisticated) alanlara yönlendirmiştir. 1960' lı yıllarda ısı püskürtme kaplamaların ısı kalkanlar ve aşınmaya dirençli yüzeyler biçiminde jet motorlarında kullanımı büyümeyi daha da arttırmıştır. 1970 ve

1980' li yıllarda vakum ve soy atmosferlerin kullanımı, ısı püskürtme kaplamalarının kalitesini arttırmış ve endüstrinin beklentilerini daha iyi karşılamıştır. Bilgisayar kontrollü püskürtme ekipmanları ile birlikte geliştirilen malzemeler, alaşım besleme teknikleri ve robotlar atmosfer kontrollü püskürtmeyi kaplamanın kalitesi ve uygunluğu yönünden daha da iyileştirmiştir[80].

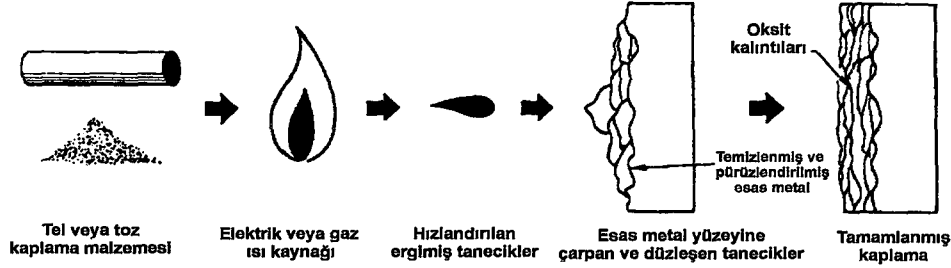
1996 yılı itibari ile İngiltere' deki ısı püskürtme pazarının toplam değeri tahminen 180 milyon£ veya 290 milyon \$' dır. Korozyona karşı olan pay hariç tutulursa mühendislik kaplamaları için pazar (aşınmaya karşı, ısı kalkanlar, yüksek sıcaklık korozyon direnci gibi) yaklaşık 70 milyon£ veya 115 milyon\$ dır. Havacılık sektörünün bu pazar içindeki payının yüksek olmaması (Şekil 3.4) sürpriz bir sonuç değildir ancak kağıt ve baskı ile otomotiv ve biyomedikal sektörlerinde de önemli canlılıklar vardır[84].



Şekil 3.4 İngiltere' de ısı püskürtme kaplamalarının endüstriye dağılımları[84].

Isı püskürtme, kaplama oluşturmak amacı ile önceden hazırlanmış olan esas metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökeltten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan jenerik bir terimdir. Kaplama malzemesi toz, çubuk ya da tel biçiminde olabilir. Isı püskürtme tabancası (torcu), kaplama malzemesini ergitmek için gerekli olan sıcaklığı yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder[3, s 228, 81,85]. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan parçanın soğuk olan yüzeyine püskürtülür. Yüzeye darbe etkisinde çarpan tanecikler, düzleşmekte ve esas metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmakta ve birbirleri ile temas haline gelerek tabaka meydana getirmektedir(Şekil 3.5). Ergiyen

kaplama malzemesinin esas metal ile birleşmesi ve birbirleri ile tabaka oluşturmaları difüzyon veya kaynak kabiliyetine bağlıdır. Kaplamalar, genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır[86].



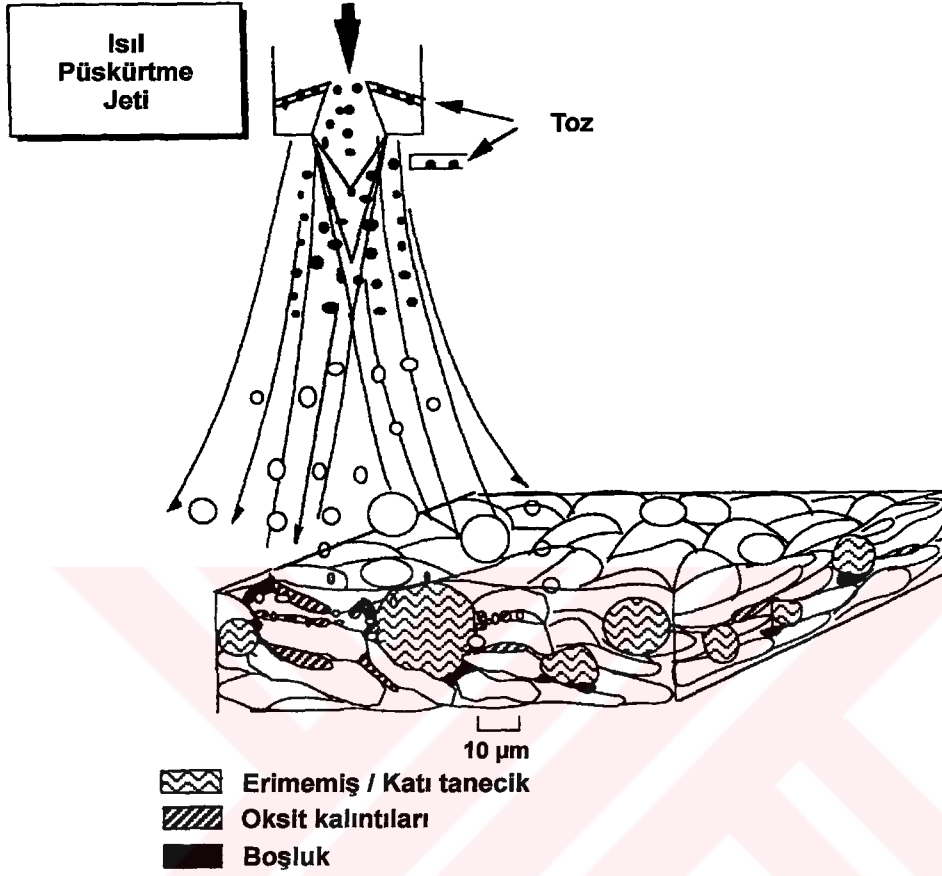
Şekil 3.5 Isıl püskürtme işlem sırası[87].

Isıl püskürtme ile çökelen kaplama tabakası boşluk, ergimemiş veya yarı ergimiş tanecikler, tamamen ergimiş tabakalar ve kalıntılardan oluşmuştur(Şekil 3.6). Oksit kalıntıları, püskürtme jetindeki sıcak taneciklerin bir kısmının çevre ile reaksiyonundan dolayı oksitlenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Milyonlarca tanecik aynı anda ısıtıldığından her biri aynı ısı etkisinde kalmamaktadır. Taneciklerin bir kısmı tamamen ergimemekte ve kaplamada boşluk ve ergimemiş tanecikler meydana gelmektedir. Bu durum, ısı püskürtme yöntemine, seçilen işlem parametrelerine ve püskürtülen malzemeye bağlı olarak değişmektedir[88].

3.1.1.2 Isıl püskürtme yöntemleri

Isıl püskürtme yöntemlerinde malzeme seçiminin hemen hemen sınırsız olması ve kaplama işleminin uygulandığı esas malzemedeki herhangi bir metalurjik değişiklik, çarpılma ve oksitlenme meydana getirmeden esas malzemeye çok az ısı girdisi (100-260°C) ile uygulanması yöntemi çok ilgi çekici kılmalıdır. Isı girdisinin çok az olması nedeni ile metal, plastik veya kompozit herhangi bir malzemeye kaplama işlemi rahatlıkla uygulanabilir. Kaplama işlemi, gerektiğinde parçanın belirli bölgesine ve/veya bölgelerine uygulanabilir ve gereksiz işlem basamaklarının ortadan kaldırılması ile

Üretim maliyeti azalır. Kaplama işlemi, uygulandığı parçaya olağanüstü performans özeliği kazandırarak kullanma ömrünü arttırmakta ve sonuçta yeni ve pazarlanabilir bir ürün elde edilmektedir[89].



şekil 3.6 Isıl Püskürtme kaplama tabakasının şematik görünüşü[88].

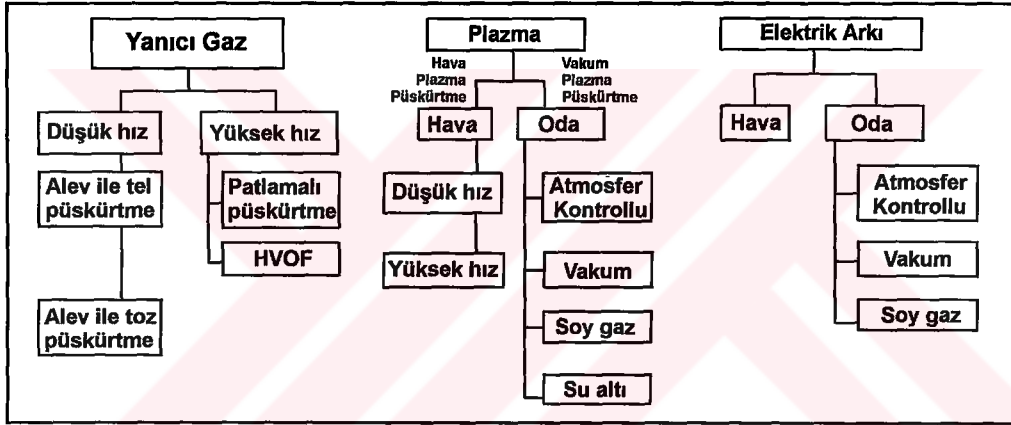
Isıl püskürtme yöntemleri ile elde edilen kalınlıklar 0.025mm' den 3 mm' ye kadar veya daha fazla kalınlıklarda olabilmektedir ve uygulama alanları da;

- Aşınmış olan makina parçalarının tamiri,
- Parçaların yüzey özeliklerinin iyileştirilmesi,
- Konstrüktif parçaların yüzeyleri için çinko veya alüminyum gibi koruyucu kaplamalar oluşturulması.

Günümüze kadar bir seri ısı püskürtme yöntemleri geliştirilmiştir. Yöntemler, temelde ısı kaynağı ve tel ya da toz biçiminde olabilen

püskürtme malzemesi şeklinde iki temel değişken ile farklılık göstermektedir[90].

Bütün ısı püskürtme yöntemlerinin en yaygın özeliği, kaplamayı oluşturacak olan malzemenin kimyasal veya elektrik enerjisi kullanılarak ısıtılması ve daha sonra hızlandırılarak kaplanacak yüzeye gönderilmesidir. Isıl püskürtme yöntemleri; enerji kaynağı (yanıcı gaz veya elektrik), kaplama malzemesi (tel veya toz) ve atmosfer (hava, düşük basınç veya soy gaz) bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Şekil 3.7' den görüldüğü gibi ısı püskürtme yöntemleri; yanıcı gaz ile püskürtme, elektrik arkı ile püskürtme ve plazma püskürtme yöntemleri şeklinde genel olarak 3 ayrı gruba ayrılmaktadır[88].

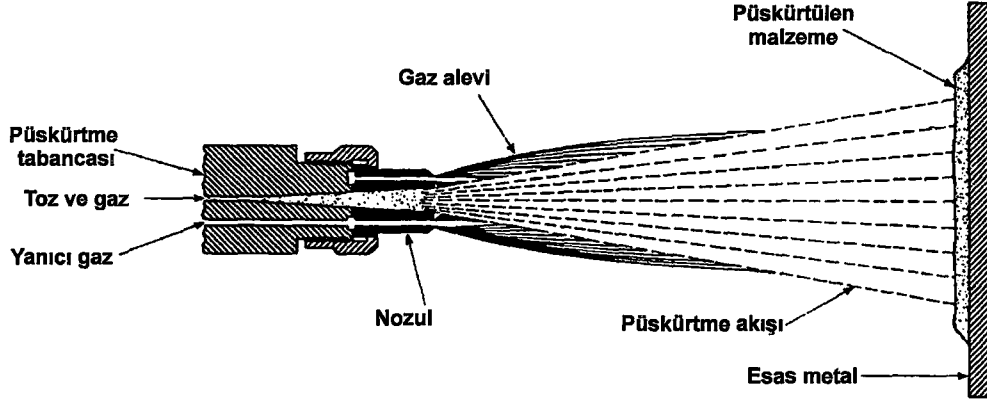


Şekil 3.7 Isıl püskürtme yöntemleri[88].

3.1.1.2.1 Alev ile püskürtme

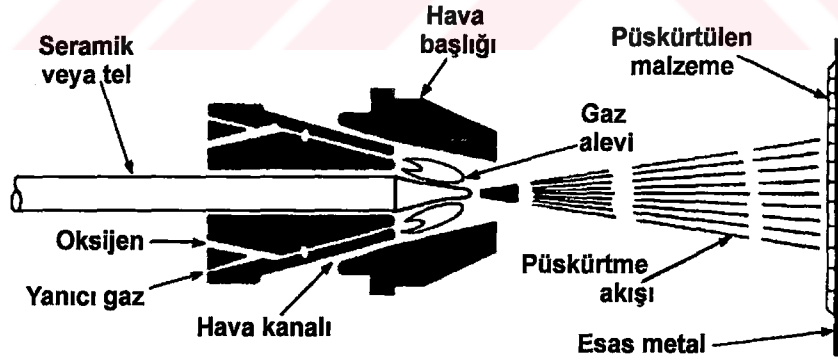
Bu yöntemde, kaplama malzemesini eritmek için gerekli olan ısı kaynağı, yanıcı gazlar ile elde edilmektedir. Alev ile püskürtme tabancaları çubuk, tel veya toz biçimindeki kaplama malzemelerini püskürtmektedir. Alev ile püskürtme tabancalarının bir çoğu, işlem maliyeti ve kaplama özelliklerini dengelemek için bazı gaz bileşenlerini kullanmaktadır. Çelikler için yanıcı gaz asetilendir. Ancak düşük ergime noktalı malzemeler için bazen propan ve ince tozların püskürtülmesi halinde hidrojen de kullanılmaktadır. Değişik biçimdeki kaplama malzemelerini püskürtmek için alev püskürtme

tabancasında yapılan değişiklik nozul ve/veya hava başlığı şeklindedir[90, 91]. Şekil 3.8 toz püskürten, Şekil 3.9 ise, tel veya çubuk püskürten alev püskürtme tabancasını göstermektedir.



Şekil 3.8 Toz alev püskürtme tabancası[91].

Kaplama malzemesinin toz biçiminde olması durumunda, toz malzeme aleve enjekte edilir ve burada ısıtılır ve sıcak gaz akışı ile iş parçası yüzeyine gönderilir. Tel veya çubuk (Şekil 3.9) biçimindeki kaplama malzemesi durumunda alev içinde bir erime ucu oluşturulur ve buraya basınçlı havanın püskürtülmesi ile alev, püskürtme akışına dönüştürülür ve iş parçasına doğru tanecikler gönderilir[90].



Şekil 3.9 Tel/çubuk alev püskürtme tabancası[91].

Bir alev püskürtme püskürtme düzeneği;

- Püskürtme tabancası,
- Püskürtülen malzeme ve malzeme besleme sistemi,

- Oksijen ve yakıcı gaz besleme tertibatı, basınç düzenleyiciler ve akışmetreler,
- Gerekğinde basınçlı hava kaynağı ve kontrol birimi,
- İş parçası ayar tertibatı,
- Gerekğinde otomatik veya yarı otomatik işlemler için tabanca ve iş parçası taşıma cihazından oluşmaktadır[83].

Alev ile püskürtmede yanma bölgesine tozun besleme oranı çok önemlidir. Toz besleme oranı çok düşük ise tozun buharlaşması sonucunda işlem maliyeti artacak ve yüzey kalitesi bozulacaktır. Ancak, yüksek olması durumunda ise toz tamamen ergimeyecek ve bu durum kaplama içerisinde ergimemiş taneciklerin artışına yol açarak çökme verimini düşürecektir[92].

Alev ile püskürtme yönteminde 25-30Mpa bağlantı mukavemetli, %10-15 aralığında değişen boşluklu ve %15' e kadar oksit bileşenli kaplamalar elde edilmektedir[90]. Alev sıcaklığı 3000°C dolayında, ergimiş damlalar 2000°C' nin üzerinde olup yaklaşık 100m/s hızla esas metale çarpmaktadır. Metalik teller, seramik malzemelerin çubukları ve tozlarını içeren yanıcı tüpler rahatlıkla püskürtülebilir[3, s 230].

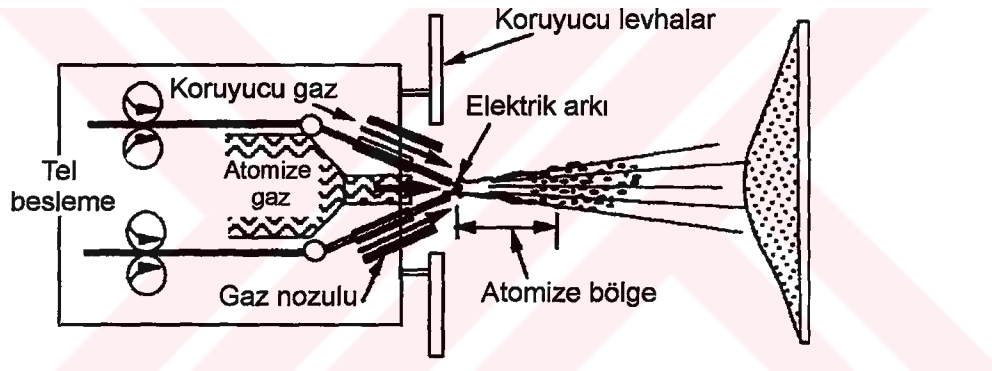
Alev ile püskürtmede elde edilen metalik kaplamalardaki boşluk, püskürtme işleminden sonra yüzeye uygulanan ısıtma ile (oksi-asetilen veya endüksiyon gibi) azaltılabilir. Bu işleme püskürtme-ergitme yöntemi denilmektedir. Bu yöntem ile sıfır boşluk seviyeli kaplama ve esas metal ile kaplama arasında güçlü bağlanma elde edilmektedir ancak ergitme işlemi sırasında malzemenin yüzey sıcaklığı yükselmektedir[3, s 230].

Alev ile püskürtme yöntemlerinin düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı önemli olan üstünlükleridir. Ancak daha düşük bağlantı mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi ve düşük çalışma sıcaklığı(3000°C) yöntemin olumsuz olan özellikleridir[91].

3.1.1.2.2 Elektrik arkı ile püskürtme

Bu yöntemde (Şekil 3.10), 4000°C'nin üzerinde bölgesel sıcaklıklar sağlayan iki tel elektrod arasında bir ark oluşturulmakta ve burada ergiyen malzeme, esas metale bir gaz jeti (genellikle basınçlı hava) ile gönderilmektedir. Bu yöntem ile yüksek dolgu oranları elde edilebilir ve otomatik sistemlere uyarlanması da kolaydır[3; s 230, 83, 90, 91, 92].

Elektrik ark püskürtme ile abrazyona, korozyona, erozyona, yenmeye ve sürtünmeye dirençli kaplamalar ile makina parçalarının aşınan kısımlarının yenilenmesi, uygunsuz bir şekilde işlenmiş parçaların geri kazanılması veya bitirilmiş parçaların karakteristiklerinin iyileştirilmesi için yeniden dolgu kaplamaları elde etmek olanağı vardır[85].



Şekil 3.10 Elektrik arkı ile püskürtme yöntemi[88].

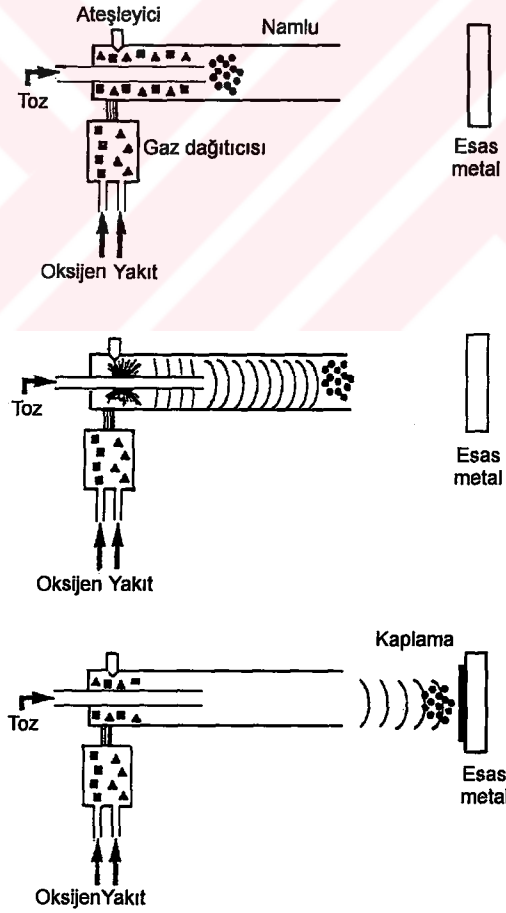
Bir ark püskürtme tesisatı; doğru akım güç kaynağı, iki adet tel besleyici makara, püskürtme tabancası ve basınçlı hava dağıtım sisteminden meydana gelir. Voltaj, 18-40 V aralığında olup ark stabilitesi için mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Voltaj arttığında tanecik boyutu artacaktır[92].

Elektrik arkı ile püskürtme yönteminde, bazı kaplama malzemeleri kullanılması ile oldukça yüksek bağ mukavemetli (69 Mpa' dan daha fazla) kaplamalar elde edilebilmekte ve nikel esaslı alaşımlar ile 55 kg/saat' kadar yüksek çökeltme oranları elde edilebilmektedir[91]. Yüksek mukavemetli bağlantılar; yüksek ark voltajı, düşük gaz akış oranı ve kısa torç-iş parçası

uzaklığı ile elde edilmektedir[83]. Bu yöntemde, tellerin ucundaki ergiyen damlaları ayırmak için soğuk gaz kullanıldığından bu durum ısıya karşı hassas olan malzemeler için bir avantaj olmaktadır. Alev ile püskürtme işlemine göre işlem sıcaklığı daha yüksektir[88]. Ancak yöntem, 1,5 mm çapında elektriksel olarak iletken yumuşak telin kullanılması ile sınırlı olduğundan karbürler, nitrürler ve oksitler püskürtülemezler[83, 91].

3.1.1.2.3 Patlamalı püskürtme(D-Gun)

Patlamalı püskürtme işlemi (Şekil 3.11), ilk olarak 1955' de "Union Carbide-ABD" tarafından geliştirilmiş ve 1969 yılında "Kiev'deki Malzeme Enstitüsü'nde" daha da geliştirilmiştir. D-Gun yöntemi A.B.D., Sovyetler Birliği ve Japonya' da özellikle uçak endüstrisinde uygulama alanı bulmuştur[93].



Şekil 3.11 Patlamalı püskürtme yöntemi[93].

Püskürtme tabancası uzun namlu biçimindeki bir tüpten oluşmakta ve toz halindeki kaplama malzemesi azot gazıyla birlikte verilmektedir. Oksijen-asetilen karışımı, saniyede birkaç kez (4-8 defa) elektrik kıvılcımı ile tutuşturularak, toz taneciklerinin ısıtılmasını ve hızlandırılmasını (600-800 m/s) sağlayan bir seri yüksek basınçlı ultrasonik dalgaları meydana getirir. Her defasında toz enjekte edildikten sonra patlamadan önce azot gazı boşaltılır[83,93].

Patlama dalgaları her yönde ilerlemeye eğilimli olup gaz besleme sistemine geri de dönebilir. Bu durum tehlikeli patlamalara yol açmaktadır. Patlama dalgalarının gaz dağıtıcısına geri dönüşünün önlenmesi, farklı oranlardaki yakıtı birbirinden ayıran azot gibi bir gazın kullanılması ile önlenir[93].

Bu yöntemde alev sıcaklığı yaklaşık 3000°C, esas malzemenin sıcaklığı ise CO₂ soğutma sistemi yardımı ile 150°C' nin altında olup erimiş damlaların hızı 800m/s' dir. Bu şekildeki yüksek hızlı damlalar, esas metal üzerinde boşluk seviyesi düşük (%0,5-1) ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirir[3, s 231]. Yöntem çok gürültülü olup ses şiddeti 150 dB'den fazladır. Bundan dolayı işlem, ses izolasyonlu bir odada yapılmaktadır[83].

3.1.1.2.4 Plazma arkı ile püskürtme

Plazma arkı ile püskürtme yöntemi ile seramikler, sermetler, ısıya dayanıklı alaşımlar ve süper alaşımlar gibi çok yüksek ergime noktalı malzemeler püskürtülebilir. 1950'li yılların sonunda uzay çağına giriş, plazma arkı ile püskürtmenin gelişimine yol açan yüksek performanslı malzemelere olan istemi arttırmıştır. Plazma püskürtmenin uçak parçaları üretim uygulamalarındaki başarısı bu yöntemin kağıt, tekstil, kimya, yağ ve gaz endüstrisi gibi alanlarda da uygulanmasını sağlamıştır[94].

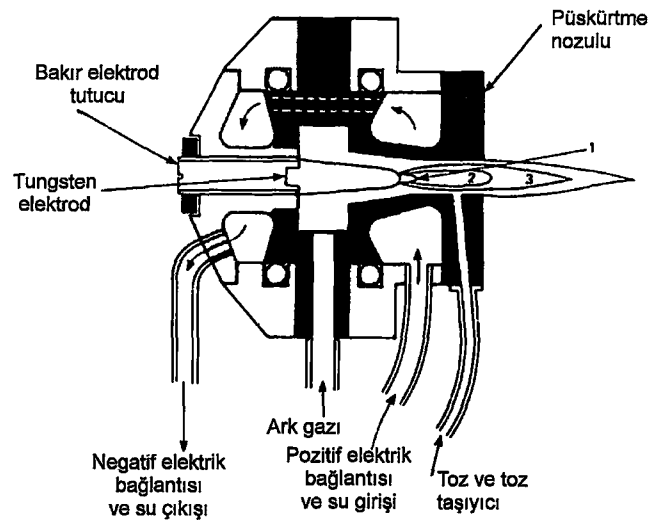
Türbin ve roket motoru parçaları son derece yüksek servis koşulları etkisindedir. Bu alanda var olan mühendislik malzemeleri, koruyucu ısıl püskürtme kaplaması yapılmadan yetersiz kalmaktadır. Oksit seramiklerden

ve karbürlerden meydana gelen kaplama malzemeleri, alev ve elektrik ark püskürtme işlemleri ile ulaşılan sıcaklıktan daha fazla sıcaklığa ihtiyaç duyarlar. Plazma arkı ile püskürtme yöntemi de bu gereksinimi karşılamaktadır[83, 85].

Son 15 yıl içerisinde plazma arkı ile püskürtme yöntemi, kaliteli kaplamalar üreten bir yüksek teknoloji haline gelmiştir. Günümüzde, plazma püskürtme yöntemi, fonksiyonel olarak etkili yüzeylerin oluşturulmasında uygulanan standard bir prosedür olup, plazma arkı ile püskürtmesiz hiç bir tasarım çoğu zaman mümkün olmayacaktır[86].

Plazma jeti, genellikle argon, azot veya helyum olan soygazın, nozul içinde oluşturulan bir elektrik akımı ile 20.000°C gibi çok yüksek sıcaklıklara ısıtılması ile elde edilir. Kaplamayı oluşturan toz malzeme, yüksek enerjideki plazma jetine taşıyıcı bir gaz(Ar) ile enjekte edilir ve ergiyen malzeme metal yüzeyine gönderilir[83, 85, 86].

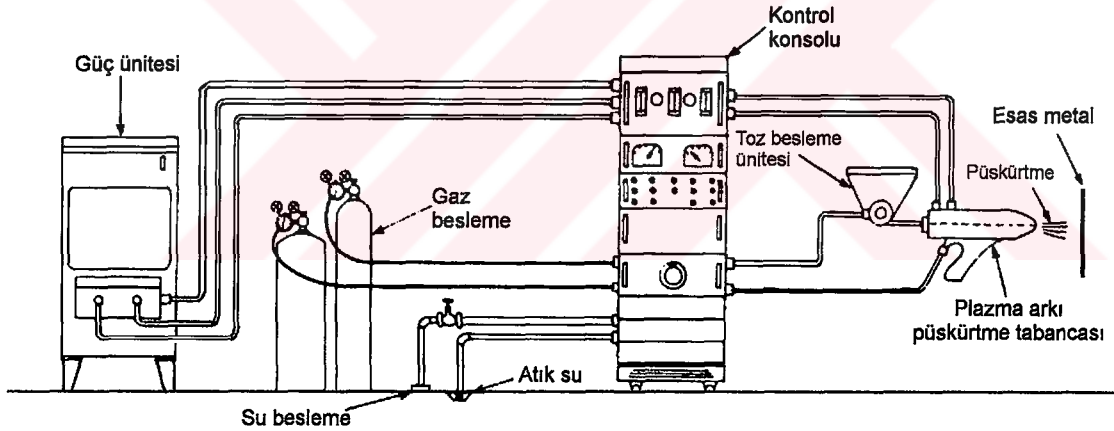
Bir plazma jeti tabancası (Şekil 3.12), iç içe geçmiş iki nozulu olan su soğutmalı bir torçtur. Nozul içine giren gaz, yüksek frekans bobini ile başlatılan ark içinden geçerken iyonize olmaktadır. Akım şiddeti 2000 A, gerilim aralığı 30-80V'dur[91].



Şekil 3.12 Plazma arkı ile püskürtme tabancası[91].

Gazın iyonize olması sonucu, gaz genişmekte ve bir koni biçiminde nozulu terk etmektedir. Tungsten elektrod sabit veya ayarlanabilir olabilir ancak nozul ile aynı düzlemde (eş eksenli) olmalıdır. Gaz akışını kontrol etmek amacı ile akışmetreler (akış ölçerler) kullanılmaktadır. Nozul tasarımı farklı türdeki tozları püskürtmek ve çeşitli plazma gazlarını kullanmak için değişik tasarımda olabilmektedir[83].

Temel bir plazma jeti ile püskürtme sisteminin elemanları Şekil 3.13' de görülmektedir. Güç seviyesi, plazma gazının basıncı ve akışı, tozun ve taşıyıcı gazın akış oranı, sistem konsolunda kontrol edilmektedir. Püskürtme tabancasının konumu ve tabanca-iş parçası uzaklığı genellikle önceden ayarlanır. İş parçasının hareketi, otomatik veya yarı otomatik tertibatlar ile sağlanır. Esas malzemenin sıcaklığı, ön ısıtma veya kademeli püskürtmeden dolayı işlem sırasındaki sıcaklık artışının sınırlandırılması ile kontrol edilmektedir[91].



Şekil 3.13 Plazma arkı ile püskürtme sistemi[91].

Plazma arkı ile püskürtme yönteminde kaplama kalitesini etkileyen parametreler plazma parametreleri ve kinematik parametreler şeklinde (Tablo 3.1) iki grupta toplanır[86].

Limoges Üniversitesi-Fransa' da yapılan araştırmaya göre plazma arkı ile ısı püskürtmede kaplama kalitesini etkileyen 50' den fazla parametre olduğu

belirlenmiştir. Bu parametrelerin, en uygun püskürtme koşullarını belirleme zorluğu yanında yeterli bir şekilde kontrolü da zor olmaktadır[95].

Tablo 3.1 Kaplama kalitesini etkileyen parametreler[86].

Plazma Parametreleri	Kinematik Parametreler
-Plazma gaz akışı	-Püskürtme mesafesi
-Plazma arkı kararlılığı	-Püskürtme açısı
-Toz püskürtme oranı	-Plazma jetinin hızı
-Toz taşıyıcı gaz akışı	-İş parçasının dönme hızı
-Toz enjeksiyonu	
-Plazma jeti karakteristiği	

Plazma arkı ile püskürtme işleminde 20 kW güç girdisi kaplama kalitesi için yetersiz olmakla birlikte güç girdisinin artması ile düşük boşluğa sahip ve pürüzsüz kaplamalar elde edilmektedir. Plazma gazındaki hidrojen miktarı belirli bir sınıra kadar oldukça yoğun kaplamalar vermektedir. Hidrojen içermeyen kaplamalarda boşluk oranı yüksek ve kaplamanın yapışması zayıf olmaktadır. Diğer yandan aşırı hidrojen miktarı da ana malzemenin fazla ısınması nedeni ile kaplamanın tabakalaşmasına yol açacağından hidrojen gazının miktarı belirli bir sınırı geçmemelidir[96].

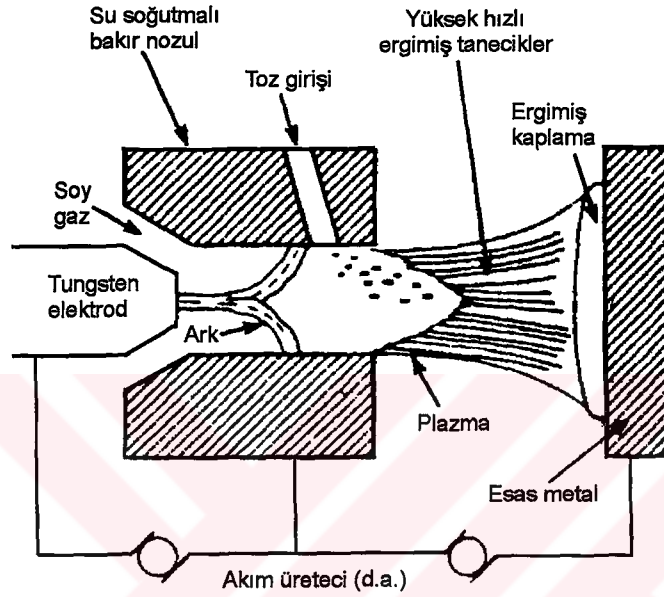
Plazma püskürtme yönteminin uygulamada çeşitli amaçlar için geliştirildiği bazı değişik türleri bulunmaktadır.

3.1.1.2.4.1 Transfer edilmiş plazma arkı ile püskürtme

Bu yöntemde (Şekil 3.14), plazma ve ana malzeme arasında ikinci bir ark oluşturulmaktadır. Bu ikinci ark ile yüzeyin ergimesi ve nüfuziyet derinliği kontrol edilmektedir. Yüksek kaplama yoğunluğu, yüksek çökeltme oranları ve her geçişte yüksek kalınlık yöntemin üstünlükleridir. Saatte 9 kg toz besleme oranlarında bir pasoda 0.50-6.35 mm kaplama kalınlıkları ve 32 mm' ye kadar genişlik elde edilebilmektedir. Ana malzemenin ısınmasından dolayı mikroyapısındaki kaçınılmaz değişiklik ve esas malzemenin elektrik iletkenliği yöntemin sınırlaması arasında yer almaktadır[91].

3.1.1.2.4.2 Atmosferik plazma püskürtme(APS)

Püskürtme işlemi normal çevre atmosferinde uygulanmaktadır. Hava ile püskürtülen tanecikler arasındaki reaksiyon, plazma jetinin koruyucu etkisi ile ve kısa geçiş zamanı ile büyük ölçüde sınırlandırılmıştır. Bazı metal ve alaşımların tozları bir miktar oksitlenmeye uğrayabilir[86].



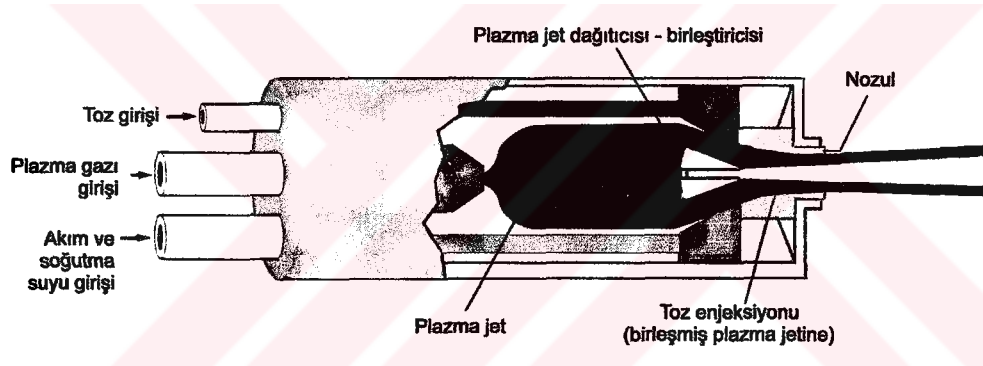
Şekil 3.14 Transfer edilmiş plazma arkı ile püskürtme[91].

3.1.1.2.4.3 Vakum plazma püskürtme (VPS)

Bu yöntem ile ana malzemeye daha iyi yapışan ve yoğun kaplamalar elde edilmektedir. Püskürtme odasındaki vakum ve soygaz atmosferi çevre ile ana malzeme ve püskürtme malzemesi arasındaki reaksiyonu azaltmaktadır. Plazmadaki gaz hızı vakumda oldukça yüksektir ve plazma jeti çok daha homojendir. Bu durum, tanecikler esas malzeme yüzeyine çarptığında daha yüksek kinetik enerji oluşturarak atmosferik plazma püskürtmeye göre daha yoğun ve iyi yapışan kaplamalar elde edilir[87,98]. Püskürtme öncesi transfer edilmiş plazma arkı ile numune yüzeyinin temizlenmesi ve ön ısıtma yapılması vakum plazma yönteminin bir diğer üstünlüğüdür[97].

3.1.1.2.4.4 Eksenel enjeksiyonlu plazma püskürtme

Bu yöntemde (Şekil 3.15), plazma jeti tek bir katod-anodtan oluşturulmakta ve daha sonra iki ayrı plazma jetine ayrılmaktadır. Ayrılmış durumdaki plazma jeti torcun nozul bölgesinde tek bir plazma jeti biçiminde birbirine yaklaşır ve bu durumda eksenel olarak toz enjekte edilir. Tek bir plazma kaynağının kullanımı ile, simetrik bir şekilde birbirine yaklaşan eşit ve üniform iki plazma jeti elde edilir. Dolayısı ile, tozun çok daha üniform ısıtılması ile kaplamanın ana malzemeye yapışabilirliği de iyileşmektedir. Bu yöntemde toz malzeme, plazma jetinin hareketi yönünde eksenel olarak verildiğinden, nozul çıkışında türbülansa neden olan radyal yönde toz beslemenin olumsuz etkisi giderilerek plazma yükleme kapasitesi artmakta ve alışılmış sistemlere göre %100-200 daha yüksek püskürtme oranları elde edilmektedir[98].



Şekil 3.15 Eksenel plazma püskürtme sistemi[98].

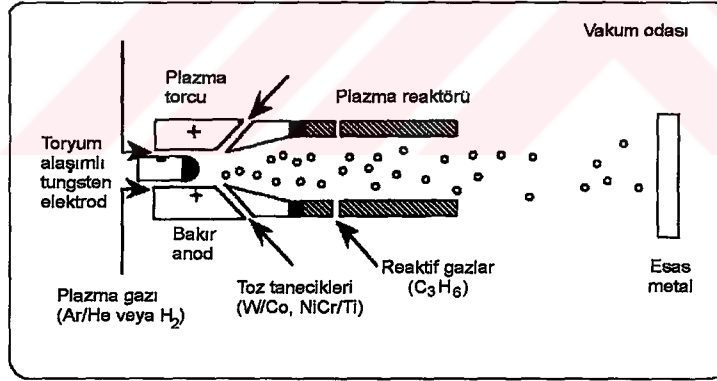
3.1.1.2.4.5 Alev ve plazma püskürtmenin kombinasyonu

Karbürler, borürler, silisler veya nitrürler gibi sert malzemelerin ilavesi ile oluşturulan kaplama tabakaları aşınma dirençli ikili alaşımlar diye adlandırılır. %5-50 oranında WC, TiC, VC, NbC ve TaC ilaveli Ni-Cr-B-Si esaslı toz kombinasyonu plazma arkı ile başarılı bir şekilde püskürtülebilir. Ancak, toz besleyicisinde tozların ayrışma tehlikesine karşın modern plazma püskürtme sistemlerinde ayrı ayrı toz besleyicisi kullanarak tozlar doğrudan doğruya plazmada karışmaktadır. Bu alaşımları püskürtebilmenin bir diğer yolu da aynı anda iki püskürtme yöntemi kullanmak ile mümkündür. Düşük ergime noktalı malzemeler(Ni-Cr-B-Si) alev püskürtme ile yüksek ergime

noktalı(karbür) malzemeler ise plazma püskürtme sistemi kullanılarak aynı anda püskürtülmektedir[97].

3.1.1.2.4.6 Reaktif plazma püskürtme

İleri malzemeler, mühendislik seramikleri, metallerarası bileşikler, takviyeli metaller, takviyeli seramikler, takviyeli metallerarası bileşikler ve elmaslar gibi malzemelerin gelişimi ile bu malzemelerin ticari olarak üretimi gündeme gelmiştir. Fiber, takviyeli metal ve seramik matrisler, uçak dış yüzeyinden otomobil motorlarına kadar oldukça geniş bir uygulama aralığında kullanılmak amacı ile tasarlanmıştır ancak bu malzemelerin ticari olarak kullanımı, ekonomik işlem yöntemlerinin eksikliğinden dolayı sınırlıdır. Bu tür malzemelerin üretimi, ana faz ya gevrek ya da dengesiz(metastabl) olduğundan ve/veya takviyeler ana malzemeden çok farklı olduğundan oldukça zordur. Araştırmalar, reaktif plazma püskürtme yöntemi ile(Şekil 3.16) bu tür malzemelerin üretiminin, döküm ve toz metalurjisi gibi bilinen yöntemlere göre çok daha üstünlük sağladığını göstermiştir[99].



Şekil 3.16 Reaktif Plazma Püskürtme İşlemi[100].

Reaktif plazma püskürtme yöntemi, tanecik ve/veya sıcak gaz akışına reaktif taşıyıcıların ilave edilmesi ile bilinen plazma püskürtme işleminin bir değişik türüdür. Sıvı, gaz veya katı reaktiflerin karışımını içerebilen taşıyıcılar, yüksek sıcaklıktaki plazma jeti ile temasa bağlı olarak ayrışmakta ve yeni bir bileşik oluşturmak için plazma jetindeki diğer ısıtılmış malzemeler ile birleşmektedir. Örneğin, gaz metan(CH₄) durumunda, ayrışma ürünleri;

$[CH_3]^-$, $[C_x]^-$ veya atomik karbondur. Bunlar daha sonra karbür(TiC, WC, v.s) veya özel durumlarda elmas oluşturmak için diğer elementler ile reaksiyona girebilmektedir[99].

3.1.1.2.5 Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme (HVOF)

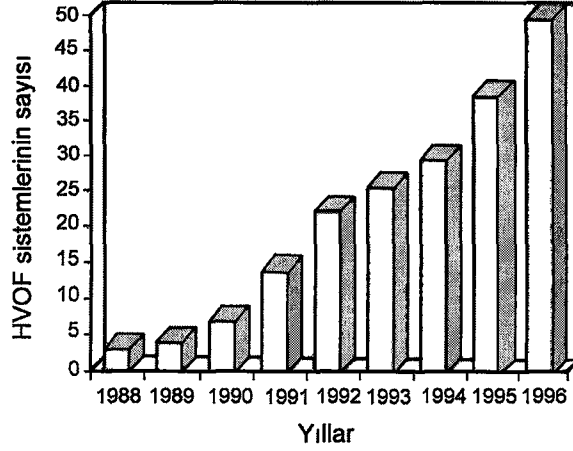
Isıl püskürtme cihazı üreten kuruluşlar ekipman, malzeme ve uygulamaların gelişiminden dolayı, ticari olarak uygulanan yöntemleri kullanarak en iyi kalitedeki kaplamayı üretme amacı ile araştırmalara yönelmişlerdir. Yüksek hızlı oksî-yakıt yöntemi (HVOF), metal püskürtme teknolojisinde son on yılın en önemli gelişimidir. Yöntem 1980'li yılların başında D-Gun yöntemine alternatif olarak geliştirilmiş ve yöntemin başarısından dolayı 1980'li yılların sonlarına doğru ticari olarak piyasa sunulmuştur. HVOF ekipmanındaki en yeni gelişme gaz yakıttan sıvı yakıtı olan değişikliktir[101].

Karbür içeren kaplamaların abrazyon, adhezyon, erozyon, yenme ve korozyon etkisindeki gaz türbini parçalarına uygulanışı patlamalı püskürtme yöntemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesine karşın kullanıcılar, kaplama maliyeti açısından bu yöntemle alternatif kaplama yöntemi geliştirmeye çalışmışlardır. 1985 yılında, "Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri ve General Elektrik Uçak Motorları" fabrikası tarafından HVOF yöntemi ile uygulanan WC-%12Co kaplamanın patlamalı püskürtme ile elde edilen kaplamaya eşdeğer özellikler gösterdiği ortaya konmuştur[102].

Isıl püskürtme teknolojisindeki en yeni gelişme olan yüksek hızlı oksî yakıt püskürtme yöntemi; yüksek tanecik hızı nedeni ile %80 MPa' dan fazla bağ mukavemeti ve %1' den az boşluk içeren yoğun kaplamalar elde edilmesi, kaplama yapılmış olan yüzeyin düşük pürüzlülük göstermesi ve plazma püskürtme yöntemi ile karşılaştırıldığında kaplama malzemesinde ısı destekli değişikliklerin daha düşük olması gibi üstünlüklere sahiptir[103].

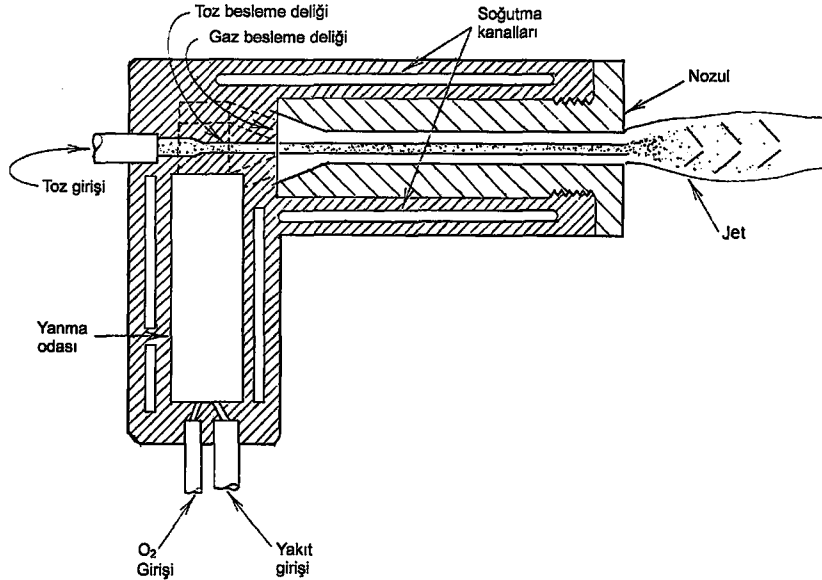
İngiltere endüstrisinde HVOF yönteminin kullanım sayısının yıllara göre artışı incelendiğinde (Şekil 3.17); "TopGun", "Diamond Jet", "Jet-Kote" gibi

HVOF torclarının ilk jenerasyon ürünlerinin geliştirildiği 1990-1992 yıllarında ve daha sonra da sıvı yakıtlı “JP5000” ile su soğutmalı “Diamond Jet Hybrid HVOF” gibi ikinci jenerasyon ürünlerinin geliştirildiği 1995 yılı sonrasında artış görülmektedir[84].



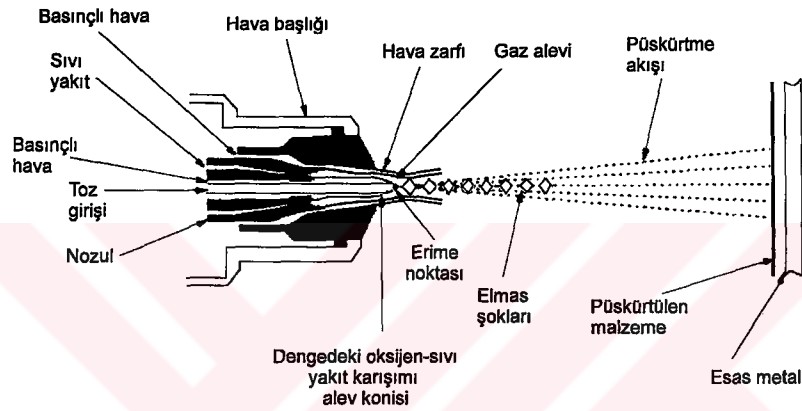
Şekil 3.17 İngiltere endüstrisinde yıllara göre HVOF sistemlerindeki artış[84].

JetKote (Şekil 3.18), ilk ticari HVOF torcu olup oksijen ve yanıcı gaz torcun yanma odasında yakılır ve sıcak gaz tabancanın namlusuna doğru yönlendirilir. Toz girişi aksenal olarak verilir ve ısıtılarak yanıcı gazlar yardımı ile namlu çıkışına hızlandırılır[104].



Şekil 3.18 İlk geliştirilen JetKote HVOF torcu[105].

Elmas Jet(DJ) HVOF torcunda (Şekil 3.19), 0,75 MPa gibi yüksek basınçta propan ve hidrojen gibi yanıcı gazlar patlatılarak veya yakılarak yüksek gaz hızı oluşturulur ve tanecikler çok yüksek bir hızda iş parçasına gönderilmektedir. Darbe sonucunda serbest kalan kinetik enerji diğer püskürtme yöntemlerine göre yüksek değilse eşit bir yapışma mukavemeti elde edilir. Bu yöntem, ana malzemeye çok iyi bağlanan ve yoğun kaplamalar elde edilmesi için plazma püskürtme yönteminin yüksek ısı enerjisine karşılık püskürtülen taneciklerin kinetik enerjilerinden faydalanır[90].

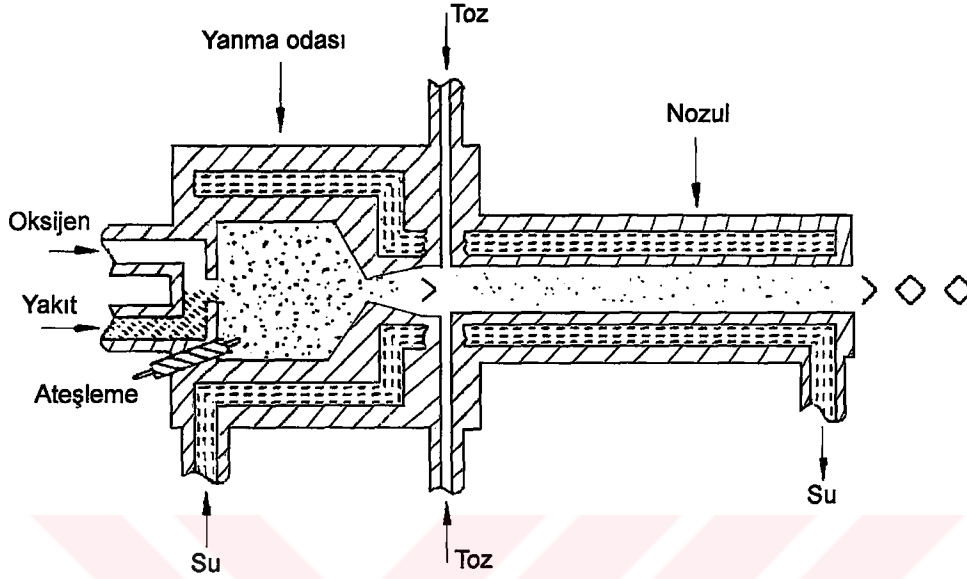


Şekil 3.19 Elmas Jet(DJ) HVOF torcu[90].

Elmas jet (DJ) türü HVOF torcu su soğutmasız ve namlusu yoktur. Su soğutması olmaması bazı faydalar sağlamaktadır ancak yüksek basınç odasının olmayışı ve basınç sınırlayıcı namlu, diğer HVOF torcları ile karşılaştırıldığında bazı olumsuzluklar getirmektedir. Bu yöntemde, aksenel olmayan hava akışı ile alev sıcaklığının sulanması ve düşük alev jeti basıncı nedeni ile toza olan ısı transferi zorlaşmaktadır. Bu durum oldukça ince, boyut olarak birbirine yakın ve pahalı tozların kullanımını gerektirmektedir. Ayrıca bu torc ile yapılan kaplama yüksek oksit bileşeni göstermekte ve çökeltme verimi de düşük olmaktadır[104].

HVOF ekipmanındaki en önemli gelişme gaz yakıttan sıva yakıtı olan değişiklik olmuştur. Bu amaçla üretilen JP5000 türü(Şekil 3.20) HVOF torcu bu alandaki pazarın hareketlenmesine neden olmuştur. Yanma odasındaki

basıncın oldukça fazla artmasından dolayı “yüksek basınçlı yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme” şeklinde isimlendirilmektedir. Roket teknolojisi esas alınarak tasarlanan torç ile yüksek basıncın birleşimi sonucunda aşınmaya ve korozyona oldukça dirençli kaplamalar üretilmektedir[101].



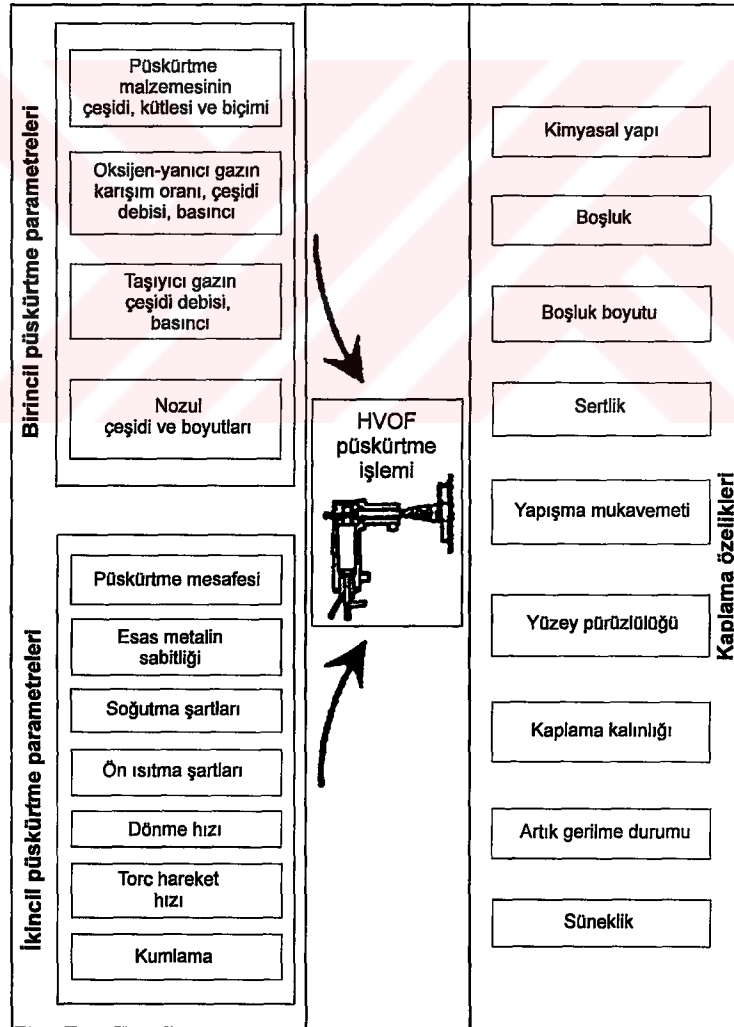
Şekil 3.20 JP-5000 HVOF torcu[104].

JP 5000 türü HVOF torcunda toz radyal olarak püskürtülür ve torç içindeki boğaz sonucu aşırı genişleme nedeniyle yüksek basınçlı toz besleme sistemine gerek kalmamaktadır. Yüksek püskürtme oranları, yüksek çökeltme verimi, oldukça değişik boyutlarda toz püskürtebilme ve düşük bakım giderleri gibi özellikler bu HVOF torcunun üstünlükleridir[104].

HVOF yönteminde, düşük sıcaklıklar (2800°C) ve yöntemin parametrelerinin hassas olarak kontrol edilmesi ile toz taneciklerinin aşırı yanması meydana gelmemektedir. Ergimiş taneciklerin sıcaklıkları, kaplanacak malzemeye olan darbeye bağlı olarak kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü sonucunda artmaktadır. Isıl enerjinin iş parçasına çok hızlı yayılması, kaplamanın hızlı katılaşmasını bunun sonucunda da gerilme içermeyen kaplama tabakalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanında toz besleme oranı da kaplama tabakası özeliğine etki eden önemli bir parametredir[106].

HVOF yönteminde kaplama tabakası, tanecik sıcaklığı ve hızı ile etkilenmektedir. Tanecik hızı ve sıcaklığı, yanma odasındaki basıncın ve sıvı yakıt/oksijen karışım oranının değişmesi ile bağımsız olarak kontrol edilebilir. En büyük tanecik sıcaklığı en büyük alev sıcaklığına karşılık gelmektedir. Tanecik hızı da yanma odasındaki basınca bağlıdır. Basınç arttığında tanecik hızı da artmaktadır. Yüksek basınç ve tanecik hızı, yüksek sertlikte kaplama tabakası oluşturmaktadır dolayısı ile çökme verimi tanecik hızı ve sıcaklığının fonksiyonu olmaktadır[107].

HVOF yönteminde etkili olan parametreler, genel olarak ekipman ile ilgili birincil parametreler ve kaplanacak parçanın şekli ve yüzeyi ile ilgili olan ikincil parametreler şeklinde (Şekil 3.21) iki grupta toplanabilir[103].



Şekil 3.21 HVOF yöntemini etkileyen parametreler[103].

Günümüzde oldukça fazla uygulama alanı bulan HVOF yönteminin diğer bazı ısı püskürtme yöntemleri ile karşılaştırması Tablo 3.2' de görülmektedir.

3.1.1.3 Isıl püskürtme yöntemlerinde kaplama malzemeleri

Yüzey sertleştirme; çeşitli aşınma işlemleri sonucunda meydana gelen malzeme kaybını veya aşınmayı azaltmak için kaynak veya ısı püskürtme yöntemleri ile bir parçanın yüzeyine sert ve aşınma dirençli bir malzemenin uygulanmasıdır[108, s 771]. Mühendislerin bir makina parçasının kullanım ömrünü uzatmak amacı ile yüzey sertleştirme malzemesini seçmelerinden önce parçanın aşınma nedenlerini anlamaları gerekmektedir[109]. Aşınmanın bütün farklı türlerine dirençli olabilecek bir yüzey sertleştirme malzemesi uygun olacaktır. Ancak, ekonomik şartlar ve çevrenin karmaşık etkisi oldukça fazla sayıda yüzey sertleştirme malzemesinin gelişimine yol açmıştır[108, s 772]. Malzeme yüzeyini aşınmaya karşı korumak için 4 temel yüzey sertleştirme alaşımı vardır. Bunlar; demir esaslı, nikel esaslı, kobalt esaslı ve tungsten karbür kompozitlerdir[84].

Tablo 3.2 Çeşitli püskürtme sistemleri ve kaplama özellikleri[102].

Kaplama Özellikleri	Isıl Püskürtme Yöntemleri			
	HVOF	D-Gun	Standard Plazma	Yüksek Hızlı Plazma
Alev sıcaklığı(°C)	2760	2760	11100	11100
Gaz hızı	Mach 4	Mach 3	Sesaltı	Mach 1
Sertlik (300gr)	1050	1050	750	950
Boşluk	0	<1	<2	<1
Oksit bileşeni	<1	<1	<3	<1
Bağ mukavemeti(psi)	10000	10000	8000	10000
En az kalınlık(inç)	0.060	0.030	0.025	0.015

Demir esaslı alaşımlar Bölüm 2.7' de "aşınmaya karşı dirençli malzemeler" kısmında ele alındığından burada nikeli esaslı, kobalt esaslı ve tungsten karbür kompozit malzemelere değinilecektir.

Nikel esaslı alaşımların tarım ve yol uygulamalarında kullanılabilirliği sınırlıdır. Başlıca aşınma mekanizmasının abrazyon ile birlikte korozif ortamların da söz konusu olduğu uygulamalarda demir olmayan nikel esaslı alaşımlar kullanılmaktadır[15]. Bu alaşımlarda krom karbür ve krom borür aşınma direncini iyileştirirken nikel-silisyum tokluğu iyileştirmektedir. Nikel esaslı alaşımlara, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere aynı zamanda katı çözelti serleştirme de uygulanabilir[109, 110]. Yüksek sıcaklıklarda metallerarası bileşiklerin çökmesi ile sertlik artışı sağlanmaktadır[110].

Borür içeren nikel esaslı alaşımlar, ilk olarak püskürtme ve ergitme tozları şeklinde ticari olarak üretilmişlerdir. Bu grup alaşımlar Ni-Cr-Bi-Si-C kompozisyonundadır. Bor içeriği, %0-15 aralığında değişen krom içeriğine bağlı olarak %1.5-3.5 aralığındadır. Oldukça yüksek krom bileşenleri genellikle fazla miktarda bor elementi içermekte ve böylece yaklaşık 1800 DPH (kg/mm^2) sertliğinde sert krom borür meydana gelmektedir.

Krom içeren nikel alaşımlarının kullanımı son derece sınırlı olup ucuzluğundan dolayı kobalt esaslı yüzey sertleştirme alaşımlarına bir alternatif olarak oldukça fazla rağbet görürler. Bu tür alaşımlar, Ni-Cr-Mo-C sistemindedirler[108, s 775].

Kobalt esaslı alaşımlar; yüksek sıcaklıklarda sertliklerini muhafaza edebilmeleri, katı eriyik sertleşmesine uygun olmaları ve düzenli dağılan bir karbür yapısına sahip olmalarından dolayı metal-metal aşınması, abrazyon aşınma, yorulma aşınması, erezyon ve tribokimyasal aşınmaya karşı direnç için yaygın olarak kullanılmaktadır[84, 111]. Kobalt esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları için yaygın olarak kullanılan Co-Cr-C-W alaşımları grubunda veya yüksek darbe aşınması da dahil olmak üzere yüksek sıcaklık uygulamaları için Co, Cr ve W bakımından zengin matrisin, Mo ve Ni veya Fe, C, Si ve B ilavesi ile düzenlendiği bir diğer grupta sınıflandırılırlar[111].

Kobalt esaslı alaşımların yaklaşık %1 C içeren orta karbonlu türleri, ostenitik matriste %15-20Cr ve %4 W' den meydana gelmektedir. Bu alaşımlar, metal-metal aşınmasına ve korozyif ortamlara karşı olağanüstü direnç gösterirler ve yüksek sıcaklık mukavemeti de katı çözelti sertleştirilmesinden dolayı oldukça iyidir[15].

Son derece abrazyif şartların gerekli olduğu uygulamalarda tungsten karbür çok yaygın sertleştirme fazı olarak kullanılmaktadır. Tungsten karbür, demir esaslı ana faza çözünme nedeni ile transfer olacağından tane büyüklüğü azalma eğilimindedir[110]. Tungsten karbürler, genellikle döküm ve ezilmiş WC/W₂C karışımı şeklindedirler ancak sinterlenmiş granüler WC/Co veya WC/Ni de kullanılmaktadır[15]. Saf döküm ezilmiş tungsten karbürler, düşük maliyetli ezilmiş-sinterlenmiş karbürler ile birlikte iyi mekanik özelliklere sahiptir[110].

Tungsten karbür ve krom karbür, mohs skalası 9 olan son derece sert bir malzemedir ve sadece 10. sıradaki elmas ile yarışır. Ni-Co matris veya Ni alaşımı, düzensiz şekilli tungsten karbür taneciklerini birarada tutar. Karbür kaplamalar; vites değiştirme çataları, pompa sızdırmazlık contası, boşaltma valfleri, torna merkezleme puntaları, emme vantilatörleri gibi abrazyif taneler ve tanecik erozyonu sonucu aşınma etkisindeki parçalar üzerine çok iyi uygulanmaktadır[84].

Tungsten karbür kompozit kaynak dolgularının mikroyapıları, alaşımlı çelik bir matriste dağılmış bulunan tungsten karbür tanecikleri içerir. Güçlü bir matris karbürlerin kısmi çözünürlüğünü sonuçlandırır. Kullanılan yöntemle bağlı olarak matriste çözünen tungsten miktarı değişmektedir. Yüksek miktarda tungsten veya molibden içeren bir matris, soğuma sırasında martenzite dönüşür. Martenzitik matris, perlitik çelik matrise göre karbür tanelerini daha güçlü olarak birbirlerine bağlar ve sonuçta abrazyif aşınma direnci iyileşmektedir[108, s 776].

3.1.1.4 Püskürtülecek yüzeylerin hazırlanması

Püskürtülecek tabakanın esas metal üzerinde iyi bir şekilde tutunabilmesi için, esas metalin yüzeyinin uygun şekilde hazırlanması gerekir. Özellikle, püskürtülen tabakanın kalınlığı arttıkça; ısının etkisi ile meydana gelen kendini çekme gerilmeleri, tabakanın yüzeyde tutunma mukavemetini azaltır ve çatlama ile tabakanın kırılması tehlikesi ortaya çıkar. Yüzeylerin püskürtülmeye hazırlanmasında kum püskürtme veya mekanik olarak hazırlama yöntemleri uygulanmaktadır[112, s 171].

Kum püskürtme işleminde kullanılan yaygın kuşlama ortamı köşeli ince çelik taneler, alüminyum oksit, sert köşeli kum ve silisyum karbürdür. Birçok çelik ve dökme demirlerde kaplama işlemi malzemenin oksitlenmemesi ve kirlenmemesi için kuşlamadan sonra 30 dak. içinde yapılmalıdır[84].

Mekanik olarak yüzey hazırlamada, püskürtülen kaplama malzemesinin yüzeylerde kolayca tutunmasını sağlayacak şekilde esas metal yüzeyinde çeşitli şekiller meydana getirilir. Bu şekiller; vida açma, testere dişi vida açma, farklı yönlerde testere dişi vida açma, basit kırılmaç kuyruğu vida açma ve çeşitli profillerde yarı açma şeklindedir[112, s 171].

3.1.2 Nitrürleme (Nitrürasyon)

Çeliklerin yüzeylerinin sertleştirilebilirliği; ucuz olan düşük karbonlu ve orta karbonlu çeliklerin kalın kesitleri de dahil olmak üzere ve herhangi bir çarpılma ve çatlama olmadan gerçekleştirilmesi nedeniyle bir avantaj oluşturmaktadır.

Difüzyon ile yüzey sertleştirme yöntemlerinde, malzeme yüzeyinde kimyasal değişimler oluşmaktadır. Parçanın yüzey ve yüzeyaltı bölgesine sertleştirme elementlerinin yayılımını (difüzyon) sağlamak için bir miktar ısıya gerek duyulduğundan yüzey sertleştirmede kullanılan temel işlem termokimyasaldır. Difüzyon yolu ile sertleştirme yöntemleri karbon, azot

veya bor gibi sertleştirme elementlerinin ve parça yüzeyine bu elementleri göndermek ve işlemek için kullanılan yöntemlerin değişik türlerini içermektedir. Bu yöntemler ile doğal olarak farklı sertlik ve sertlik derinliği üretilir. Çeliğin cinsi, istenilen sertlik ve sertlik derinliği belirli bir difüzyon yönteminin uygunluğunu etkileyen yöntemlerdir[113, s 259].

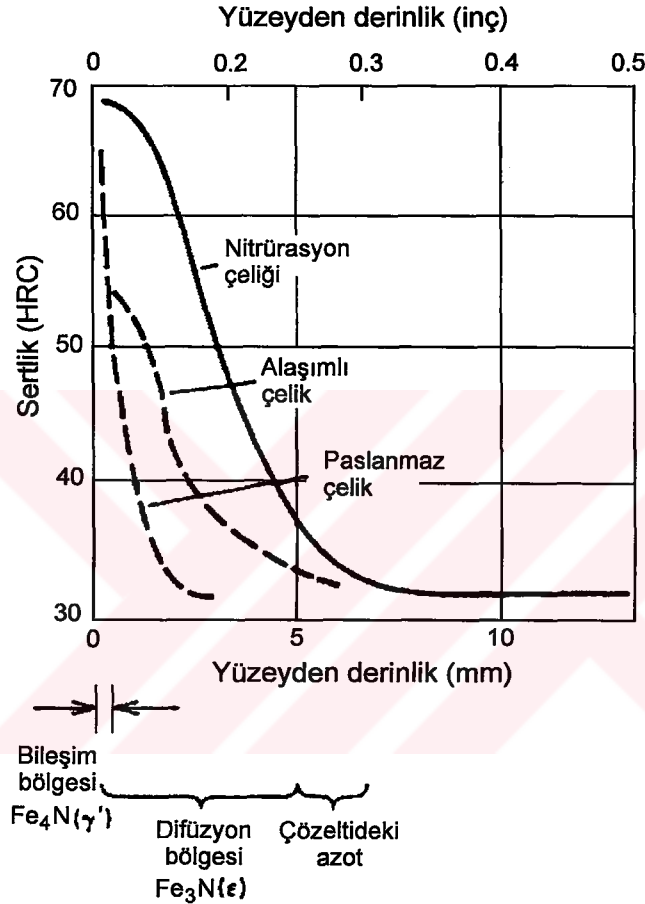
Günümüz mühendisleri çok sayıdaki difüzyon ile yüzey sertleştirme yönteminin sağladığı üstünlükten yararlanırlar. Difüzyon ile yüzey sertleştirme işlemleri özellikle çeliklerin kullanım alanlarının artmasında çok etkili yöntemlerdir. Birçok tasarım mühendisi karbürize edilmiş ve sertleştirilmiş çeliğin aşınma ömrünün sertleştirilmemiş çelikten daha iyi olduğunu bilmektedir. Ancak uygulamada daha az kullanılan difüzyon ile yüzey sertleştirme işlemlerinde de aynı durumun elde edildiğini pek fazla bilmemektedirler. Örneğin, nitrürlenmiş çeliğin aşınma direnci karburize edilmiş çelikten daha yüksektir. Ancak, tasarım mühendisleri karburize işlemini ve onun aşınma davranışını daha iyi bildiğinden karbürleme işlemi daha sık kullanılmaktadır. Oysa nitrürleme ile yüzeyi sertleştirilmiş çelik kullanılması durumunda karbürlemeye veya bilinen yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla belirgin aşınma ömrü iyileşmesi ortaya çıkar[114].

3.1.2.1 Nitrürleme(Nitrürasyon) işleminin esası

Nitrürleme işlemi 500-570 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu sıcaklıklarda karbonlu çelikler ferritiktir. Nitrürleme işlemi Al, Cr, Mo, Ti ve V gibi nitrür oluşturan elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır[3, s 223, 113, s 263]. Nitrürleme işleminde, çelik yüzeyindeki atomik azot iç kısımlara doğru yayılır ve genellikle 5-15 nm boyutunda çok ince nitrür çökeltileri oluşturmak için reaksiyona girer[3, s 223].

Demirde kısmen çözünen azot, %6' ya kadar olan bileşimlerde ferrit ile katı çözelti oluşturmakta ve %6 azot bileşiminde Fe_4N kristal yapılı γ' fazı oluşturmaktadır. %8' den daha fazla azot içeriğinde ise denge reaksiyon ürünü olan Fe_3N kristal yapılı ϵ fazı oluşmaktadır. Nitrürlenmiş yüzeyler

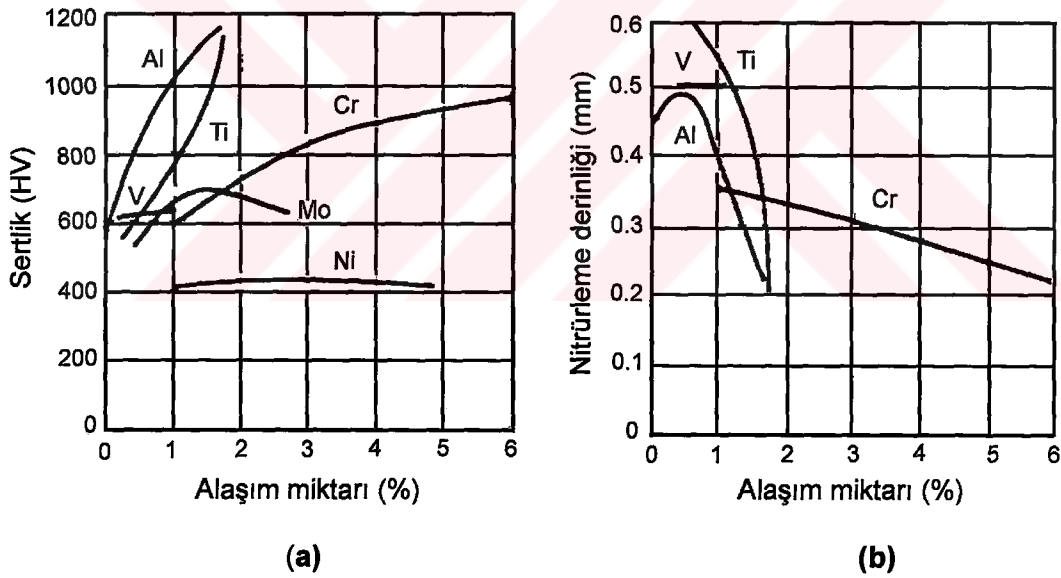
katmanlı bir yapıda olup en dış yüzey beyaz tabaka diye isimlendirilen γ' fazından oluşmaktadır. Böyle bir yüzey tabakası çok sert ve gevrek olup kullanımda pullanma şeklinde aşındığından istenmemektedir. Özel nitrürleme yöntemleri ile bu tabaka azaltılabilmekte veya daha az gevrek yapılabilmektedir (Şekil 3.22). Daha sonraki bölge Fe_3N kristal yapılı ϵ fazının oluşumu ile sertleşmiş olan difüzyon bölgesidir[113, s 263].



Şekil 3.22 Çeşitli çeliklerin nitrürlenmiş yüzey profilleri[113, s 263].

Az karbonlu çeliklerde, nitrürasyon sonrası önemli yapı değişimleri oluşmasına rağmen, difüzyon tabakası oldukça sert değildir. Ancak, azotlu ostenit bölgesinden su verme işlemi ile azotlu martenzit oluşumu sonucunda yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir. Nitrürleme işlemi genellikle yüksek aşınma direncinin elde edildiği orta karbonlu çeliklere uygulanmaktadır. Bu durum, nitrürlenmiş yüzeyin yapısı ve nitrürleme prosedürü üzerine değişik alaşım elementlerinin etkileri sorununı gündeme getirir[115]. Demir

alaşımlarının yapısında karbür ya da nitrürlerden hangi bağlantının bulunabileceği bir taraftan karbon, azot ve alaşım elemanı oranına, diğer taraftan da mümkün olan bağlantının stabilitesine bağlıdır. Karbür kafesinde azot, yeralan atom olarak da bulunabileceğinden karbonitrür meydana gelmesi de olanaklıdır[116]. Nitrürleşmiş çelikte ϵ ve γ fazları hem karbon hem de azot atomlarını aynı anda içerir. Özel atomların nitrürleri alaşımlı çeliklerin nitrürasyonu sonucu elde edilmektedir. Bu nitrürlerin aşırı dağılmış partikülleri kayma düzlemlerini birbirine bağlar ve böylece yüzey sertliği büyük ölçüde artar. Al, Cr, Mo, V sertliği önemli ölçüde artırırken alaşım elementleri nitrürleşmiş yüzeyin derinliğini bir miktar azaltırlar[115, 117]. Şekil 3.23' de %0.35C, %0.30Si, %0.70Mn içeren bir çeliğin 520°C' de 8 saat nitrürleşmesinden sonra alaşım elementlerinin sertliğe olan etkisi(a) ve 400HV' de ölçülen nitrürleme derinliği (b) görülmektedir[113, s 264].



Şekil 3.23 Alaşım elementlerinin sertliğe ve nitrürleme derinliğine etkisi[113, s 264].

Genelde, çelikleri nitrürlemek için gaz, sıvı (tuz banyosu) ve plazma(iyon) nitrürleme şeklinde üç ayrı yöntem belirtilmişken bazı yayınlarda ise gaz ve plazma şeklinde iki değişik nitrürleme işleminden söz edilmektedir[3, s 223].

3.1.2.2 Sıvı nitrürleme(Tuz banyosunda nitrürleme)

Sıvı nitrürleme işlemi, erimiş durumdaki siyanür yada siyanat içeren yüzey sertleştirme ortamlarında 510-580°C sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Sıvı nitrürleme işlemi, kimyasal bileşim bakımından sertleştirme ortamının benzer olduğu karburizasyon veya siyanürleme yöntemlerinden farklı olarak kritik dönüşüm sıcaklığının altında yapılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu neden ile, sıvı nitrürleme işlemi sonrası parçalar boyutsal hassasiyetini korumaktadırlar[118, s 410].

Orta karbonlu çeliklere ve bunun yanında orta ve az alaşımlı çeliklere de uygulanabilen nitrokarbürleme işlemi sık sık yanlış olarak “tuz banyosunda nitrürleme” şeklinde isimlendirilmektedir. İlk nitrokarbürleme yönteminde sodyum siyanür ve siyanat, sıvı banyoyu oluşturmakta ve bu işleme bazen patentli isimler de (Tufftride) verilmektedir. Nitrokarbürleme işleminde, beyaz tabakaya çok benzeyen bileşim tabakası çelik malzeme üzerinde sert ve aşınma dirençli yüzey elde etmek için kasıtlı olarak oluşturulmaktadır. İnce sert tabakaya ek olarak azotun yayılımı ile de önemli derecede sertleşme elde edilmektedir. Yüzey tabakasının sertliği, nitrürleme ile elde edilen yüzey tabakası sertliğinden daha düşük olup (500-650 HV) bunun yanında yöntem daha hızlı gerçekleşmektedir[3, s 224].

Tuz banyosunda nitrürlemenin diğer bir türü olan “Sulfinuz” veya “Sursulf” işleminde, banyoya sodyum siyanür (NaCN) ve sodyum siyanat (NaCNO)’ dan başka aktif olarak sodyum sülfür (Na₂S) ilave edilir. Bu işlemde kükürtün varlığı, nitrürlenmiş tabakanın sürtünmeye karşı özeliğini iyileştirir. Bu işlemden sonra parçaların ılık suda soğutulması ile iyi bir yüzey elde edilmektedir[117].

3.1.2.3 Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme, parçanın azot içeren bir gazda (genellikle amonyak) ve uygun bir sıcaklıkta (ferritik çelikler için Ac₁’ in altı) tutulması ile yüzeye

azotun yayındırıldığı bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bütün çelikler için nitrürleme sıcaklığı 500-570°C arasındadır. Gaz nitrürleme Al içeren az alaşımlı çeliklere, orta karbonlu krom içeren çeliklere (AISI 4100, 5300, 5100, 6100, 8600, 8700 ve 9800 serisi), sıcak iş takım çeliklerine (H11, H12 ve H13 gibi %5 Cr içeren türleri), az karbonlu krom içeren az alaşımlı çeliklere (AISI 3300, 8600 ve 9300 serileri), havada sertleştirilmiş takım çeliklerine (A-2, A-6, D-2, D-3 ve S-7 gibi), yüksek hız takım çeliklerine (M-2 ve M-4 gibi), ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklere (AISI 400 ve 500 serileri), ostenitik paslanmaz çeliklere (AISI 200 ve 300 serileri) ve çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere (13-8PH, 15-5PH, A-4PH, 17-7PH, A-286, AM 350 ve AM 355 gibi) uygulanabilmektedir[119, s 387].

Gaz nitrürleme yöntemi ile 0.5 mm' ye kadar nitrür derinliği elde edilmektedir. Yapılan deneylerde gaz nitrürleme işleminde en büyük sertlik 538°C' de, en büyük nitrürleme derinliği ise 650°C' de elde edilmektedir[117].

3.1.2.4 Plazma(İyon) nitrürleme

Plazma nitrürleme yöntemi 1932 yılında Almanya' da geliştirilmiştir. Yöntemin karmaşıklığından ve sürekli geliştirilmesinden dolayı endüstriyel kullanımı oldukça yenidir. Yöntemin pazara sunulduğu 1973 tarihinden itibaren Almanya' da 42, Japonya' da 10, İsviçre' de 5, Polonya ve İspanya' da 2, Romanya, Avusturya ve Fransa' da 1' er olmak üzere toplam 64 üretim birimi bulunmakta olup yılda işlenen çelik kapasitesi 80.000 ton' dur[120].

Almanya' da plazma teknolojisi alanında devam eden yatırımlar sonucunda 1992 yılında 300' den fazla üretim şirketi ile yılda 250.000 ton çelik plazma nitrürleme ile işlenmektedir. İngiltere' de ise 16 adet şirket olup yılda 1000 ton çelik işlenmektedir[78].

Tuz banyosu ve gaz nitrürleme işlemleri 500-570 °C sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Bu sıcaklıklarda her iki yöntem standard nitrürleme malzemelerini ve nitrokarbürlemeyi gerektirmektedir. Ancak nispeten dar sıcaklık aralığı, malzeme sayısını ve elde edilebilen özellikler aralığını sınırlamaktadır. Plazma nitrürleme yönteminde elektriksel boşalma ortamındaki gaz N-H atmosferi, elektrik alanı tarafından aktif hale getirilir ve sıcaklıktan bağımsız olarak iş parçası yüzeyine azot yayınır. Bu durum, 500°C' nin altındaki sıcaklıklarda temperlenen malzemelerin, ana malzemenin sonradan yumuşamaksızın kolayca ve rutin olarak işlenmesine olanak sağlar. Tablo 3.3, İngiltere' de plazma nitrürlenmiş malzeme türlerini göstermektedir[121].

Maddenin katı, sıvı ve gaz halleri olduğu gibi nitrürleme işlemi de katı, sıvı ve gaz şeklinde üç ayrı şekilde yapılabilmektedir. Maddenin bu üç halinden ayrı olarak bir dördüncü hali de vardır ki buna da plazma hali denilmektedir. İyon nitrürleme maddenin plazma halini kullandığından plazma nitrürleme şeklinde isimlendirilir[122].

Tablo 3.3 İngiltere' de plazma nitrürlenmiş malzemeler[121].

Az alaşımlı çelikler	722M24, 709M40, 32CrMo12, 655M13, S204, 817M40, 905M31, 080M40, 605M36, S106, S132
Takım çelikleri	BH13, BH10, BH11, BD2, AISI P20, AISI M2, ASP 23, AISI L6, BO1, BT1, VEW K190
Paslanmaz çelikler	15:5 PH, 17:4 PH, AISI 304, AISI 316, AISI 303, AISI 321, AISI 420, AISI 410, Inkonel 625, AISI 440C
Dökme demirler	Küresel grafitli dökme demir, kır dökme demir
Titanyum alaşımları	IMI 318, IMI 551

Her madde gaz fazında bulunduğu türüne, özeliğine ve doğasına bağlı olarak değişen bir sıcaklığa kadar ısıtılınca, moleküllerindeki hareketlenme nedeni ile atomlar dış kabuk elektronlarını yitirerek pozitif yüklü elektronlar

haline dönüşürler. Sıcaklık yükseldikçe, iyonlaşma derecesi yani iyonlaşmış atomların toplam sayıya yüzde oranı artar, sıcaklık bir kaç onbin derece gibi maddeye bağlı olarak değişen bir eşik değerden sonra ortamda yalnız pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlardan oluşmuş bir karışım bulunur. Elektriksel açıdan nötr ve yüklü parçacıklardan oluşması nedeni ile iletken olan bu karışıma plazma adı verilir[123, s 99].

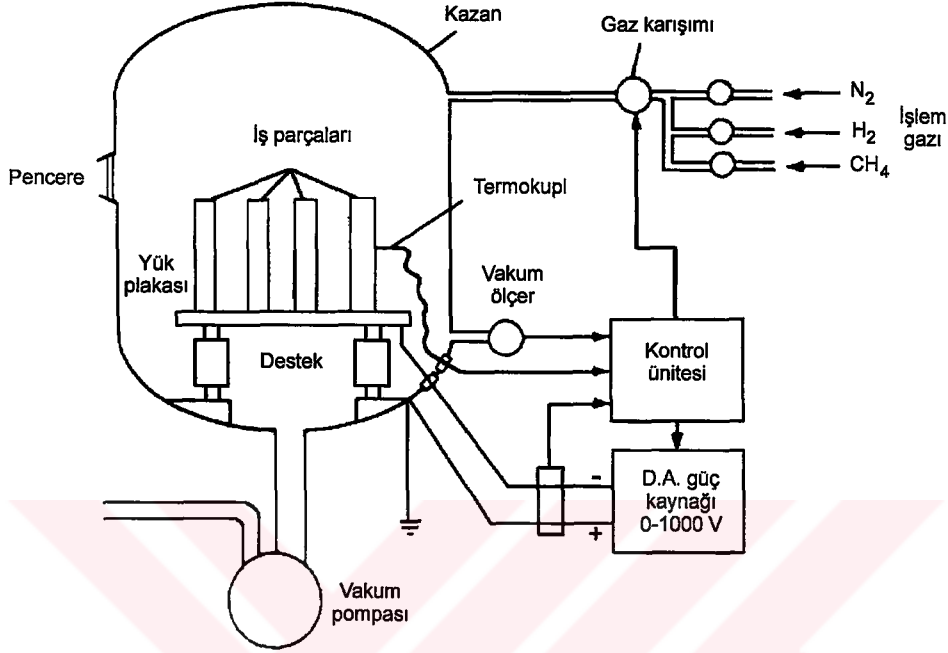
Plazma, içerisinde iyon, elektron, nötral atom veya molekül, uyarılmış atom ve foton içeren bir karışımdır. Plazma yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Plazma dış ortama karşı elektriki olarak nötrdür. Plazmayı dışarıdan magnetik ve termik olarak sıkıştırarak enerji yoğunluğunu ve stabilitesini arttırmak mümkündür[124].

Plazma durumu, iyonize olan gaz atomları ve molekülleri ile kazanılmaktadır. Sadece ısıl proseslerde plazma durumu, gazın yüksek sıcaklıklara ısıtılması ile elde edilmektedir. Ancak elektrik alanı kullanılıyorsa plazma durumu elektriksel boşalma ile kolayca elde edilebilir[122].

Yüzey mühendisliği uygulamalarında elektriksel boşalma, bir doğru akım kaynağından veya bir alternatif akım kaynağından oluşturulmaktadır. Ancak doğru akım elektriksel boşalma yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektriksel boşalma, plazmanın iki elektrod arasına birkaç yüz voltluk potansiyel fark uygulanması ile 10 mbar kadar düşük bir basınçta oluşturulmaktadır. İlave edilen gaz meydana gelen elektrik alanı içerisinde iyonlaşır ve elektriksel boşalma ile beraber bir parlama olayı görülür[125].

İyon nitrürleme işlemi Şekil 3.24' de görülmektedir. Fırın duvarından elektriksel olarak izole edilen ve fırın içerisine yerleştirilmiş veya asılı bir konumda olan iş parçaları katodu oluşturur ve fırın duvarına olan mesafeden bağımsız olarak tamamen kızgın gaz ile temas etmektedir. Elektriksel boşalma ile üretilen pozitif iyonlar, negatif yüklü iş parçasına doğru gönderilir ve iş parçası yüzeyine çarparak iş parçasını gerekli

difüzyon sıcaklığına kadar ısıtır[120, 126]. İyon nitrürlenme fırını sadece iş parçalarını vakumda tutan bir kazan olup(0.1-10 torr) elektriksel boşalmanın anot kısmını oluşturmaktadır. Dolayısı ile fırın herhangi bir klasik ısıtma fırını değildir[120].

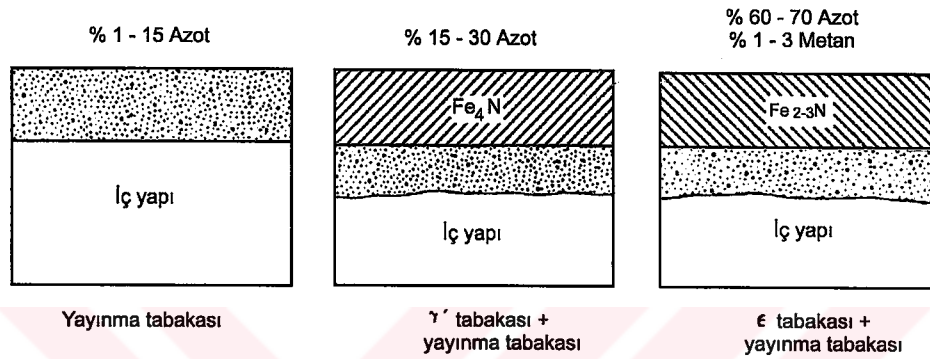


Şekil 3.24 Plazma nitrürlenme işlemi[127, s 421].

Plazma nitrürlenmede iyonlarına ayrılmış azot, sertleştirilecek parçaların etrafında karakterestik kıvılcık bir alev oluşmasını sağlar. İşlemde; vakum kabına, yüksek voltajda doğru akım güç kaynağına, gaz dağıtım sistemine ve basınç kontrol sistemine gereksinim vardır[127,128].

Plazma nitrürlenme işleminin mekanizması Şekil 3.25' de görülmektedir. Yüzeğe çarpan iyonlar, iş parçası yüzeyindeki demiri ve diğer alaşım elementleri atomlarını, metalik olmayan element atomlarını (C, O, N) ve elektronları yüzeyden uzaklaştırır. Yüzeğe çarpan iyonların çok az bir kısmı iş parçasına yayılır. Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları yüzey civarında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikir. FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır ve kararlı diğer nitrürlere (Fe_2N , Fe_3N ve Fe_4N) dönüşür. Dönüşüm sırasında serbest kalan azot atomları ya metale yayılır ya da plazmaya döner[125].

çıkmaktadır. Ayrıca, iyon nitrürlenme işleminin yapıldığı yerler ve nitrülendirilmiş olan parçalar son derece temiz olduğu için çalışanlar açısından da istenilen bir ortam ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık, basınç, akım ve voltaj gibi parametrelerin ölçümü ve kontrolü basit elektronik aletler ile yapılmakta ve böylece işlem kolayca kontrol edilmekle birlikte parametreler de kolayca tekrarlanabilmektedir. Vakum fırınında sadece iş parçası ısıtılmakta ve fırın duvarı su soğutma ile oda sıcaklığında tutulmaktadır[129].



Şekil 3.26 Plazma nitrürlenme yönteminde gaz bileşimi ve yüzey yapısı ilişkisi[127, s 421].

Daha uzun kullanım ömrü ve yüksek boyut tamlığı, plazma nitrürlenme yönteminin ekonomikliğini hissedilebilir şekilde etkileyebilir. Plazma nitrürlenme tesisi, bilinen diğer nitrürlenme ekipmanlarından daha pahalıdır. Enerji ve gaz sarfiyatı diğer nitrürlenme işlemlerinden daha düşüktür. Gaz sarfiyatı çok büyük tesislerde bile yaklaşık 30 lt/saat' dir. Nitrürlenme işleminden önce parçaların taşınması, temizlenmesi ve depolanması gibi işlemler diğer nitrürlenme işlemleri ile karşılaştırılabilir. Kısmi nitrürlenme işlemleri gerektiğinde plazma nitrürlenme yöntemlerinde çabuk ve kolay bir şekilde kullanılan maskeleme yöntemleri iyi bir ekonomiklik sağlamaktadır. Nitrürlenme işlemi tamamlandığında, parçaların yıkanması gibi herhangi bir işlem gerekmemektedir. Vakum pompaları hariç herhangi bir hareketli parça olmadığından bakım ve tamir masrafları da düşüktür[120].

BÖLÜM 4

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışı; yüzey malzemesine ve yüzeylerin mekanik özelliklerine, fiziksel yapısına, kimyasal bileşimine ve yüzeyin topoğrafyasına önemli ölçüde bağlıdır. İzafi hareket ile yüzeyler arasındaki temas, bu özelliklerde değişikliklere neden olacak ve bu durum daha sonraki temaslarda önemli olabilecektir[130].

Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmek yeni mühendislik özellikleri kazandırmak veya dekoratif açıdan çekici kılmak insanoğlunun eski çağlardan beri süregelen amaçlarından biri olmuştur. Günümüzde, malzeme yüzeylerinin değiştirilmesine yönelik işlemler, “yüzey ve taban malzemenin tasarımını birarada ele alan ve her ikisinin tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri ekonomik olarak sağlayabilen” işlemler olarak tanımlanabilir. Yüzey işlem teknolojileri ve yüzey mühendisliği özellikle 90’ ılı yıllardan sonra önemli hale gelmiştir. Günümüzde hem klasik hem de modern teknolojilere dayanan yüzey işlemlerinin önemi artmaya devam etmektedir[131].

Kim ve Kweon[132] isimli araştırmacılar, yalın karbonlu çeliklerin üç cisimli abrazif aşınmasını, çeşitli termokimyasal işlemler uygulayarak (Tablo 4.1) kuru kum kauçuk tekerlek deneyi yardımı ile incelemişlerdir.

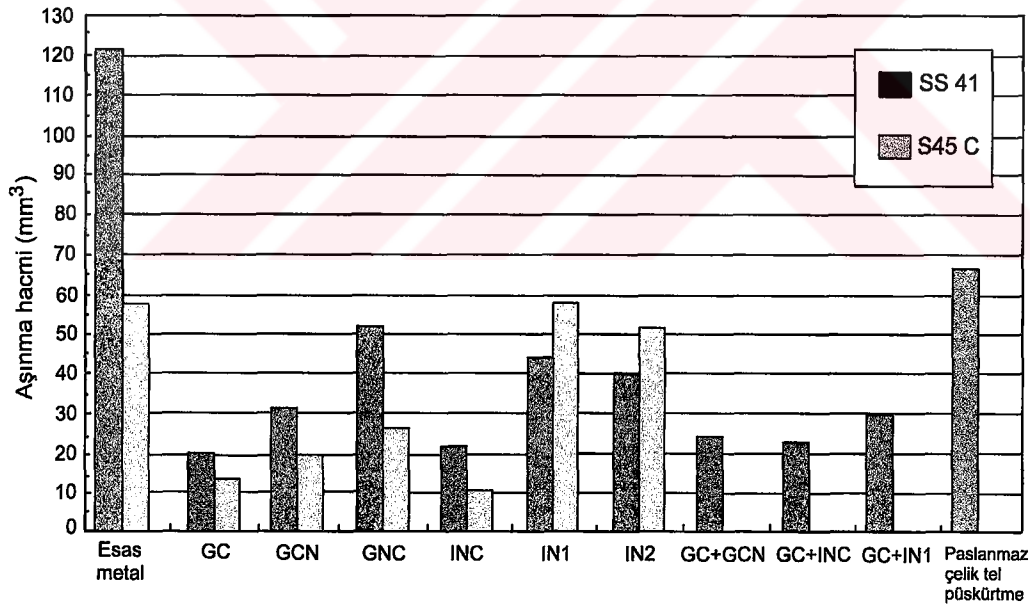
Araştırmacılar, tüm termokimyasal işlemlerin paslanmaz çelik tel alev ile püskürtülmüş kaplamalardan daha iyi aşınma direnci gösterdiğini buna karşılık gaz karbürizasyonu(GC) ve iyon nitrokarbürizasyonu(INC)

işlemlerinin aşınma direncini en çok arttıran işlemler olduğunu (Şekil 4.1), bununla birlikte duplex işlemlerin tek gaz karbürizasyonu işlemi ile karşılaştırıldığında aşınma direncini iyileştirmediyini belirtmişlerdir.

Tablo 4.1 Yalın karbonlu çeliklere uygulanan termokimyasal işlemler[132].

İşlemler	İşlem Zamanı (Saat)	Sıcaklık (°C)	Katılan Gazlar	Su Verme Ortamı	Temperleme
Gaz Karbürizasyonu(GC)	5	930	$N_2+CH_3OH+C_6H_5CH_3$	Yağ ¹	150°C, 60dak.
Gaz Karbonitrürleme(GCN)	2.5	830	CH_3OH+NH_3+LPG	Yağ ²	150°C, 60dak.
Gaz Nitrokarbürizasyonu(GNC)	4	570	$NH_3:N_2:CO_2=60:38:2$	Yağ ²	-
İyon Nitrokarbürizasyonu(INC)	6	570	$N_2+H_2+CH_4(3:2:5)$	Hava	-
İyon Nitürleme#1(IN1)	20	570	$N_2+H_2(4:1.5)$	Hava	-
İyon Nitürleme#2(IN2)	20	550	$N_2+H_2+Ar(2:2:2)$	Hava	-

1) Oda sıcaklığı
2) 120°C



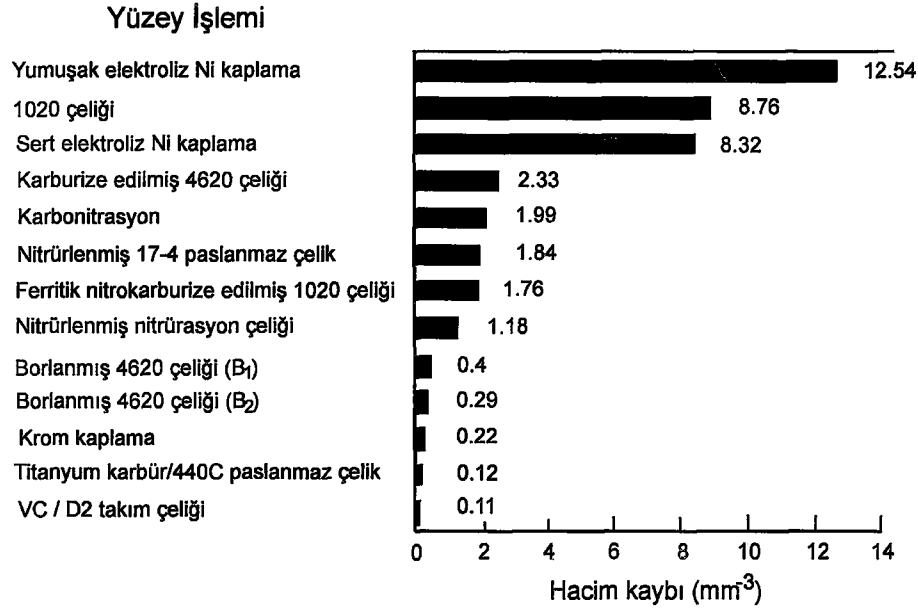
Şekil 4.1 Yalın karbonlu çeliklere uygulanan termokimyasal işlemler-aşınma direnci ilişkisi[132].

Peng[133] isimli araştırmacı, sertleştirilmiş ve temperlenmiş sıcak iş takım çeliğine (5CrMnMo), nitrokarbürleme, plazma nitürleme ve elektriksel deşarj kaplama yüzey işlemlerini uygulayarak, çeşitli aşınma deneylerini oda sıcaklığında, kuru hava atmosferinde yağlamasız koşullarda uygulamıştır.

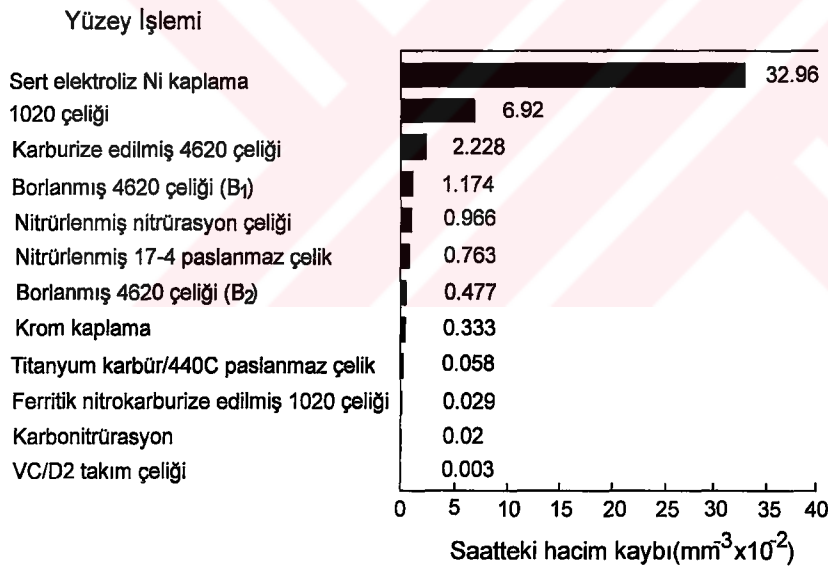
Deneyler sonucunda, sıcak iş takım çeliklerinin yüzey sertliklerinin bilinen sertleştirilmiş ve temperlenmiş sıcak iş takım çeliklerinden daha yüksek olduğunu ve sürtünme katsayısının da daha düşük olduğunu belirlemiştir. Deneyler sonucunda, plazma nitrülenmiş malzemenin en fazla aşınma direnci gösterdiğini, bunu elektriksel deşarj kaplama ve nitrokarbürizasyon işlemli parçaların izlediğini belirtmiştir.

Budinski[114], 4620 çeliğini, 17-4 PH (çökelme sertleşmeli) paslanmaz çeliğini ve D2 takım çeliğini kullanarak gerçekleştirdiği bir dizi deneyde karburizasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon, nitrokarbürizasyon, borlama, titanyum karbür ve vanadyum karbür kaplama şeklindeki yüzey işlemlerinin abrazyon dirençlerini sıralamıştır. Araştırmacı, 3µm - 500µm gibi oldukça geniş bir aralıkta uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncini tespit etmenin zor olduğunu belirterek, kaplamanın değerlendirilmesi için kuru kum kauçuk tekerlek deneyini (ASTM G65), difüzyon işlemlerinin abrazyon direnci sıralaması ve bu difüzyon işlemlerinin krom ve elektroliz nikel kaplamalar ile karşılaştırılması için şerit abrazyon deneyini kullanmıştır. Ayrıca aynı yüzey işlemli numuneleri, blok disk aşınma deneyinde (ASTM G77), hem kendisi hemde karbürize edilmiş karşı yüzey ile eşleştirerek karşılamıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçları krom ve elektroliz nikel kaplamanın abrazyon direnci ile karşılaştırmıştır.

Araştırmacı, kuru kum kauçuk tekerlek deneyi sonucunda (Şekil 4.2), VC ve TiC işlemli yüzeylerin abrazyon direncinin diğer yüzey işlemli numunelere göre son derece iyi olduğunu belirtmiştir. VC kaplamanın şerit abrazyon deneyinde en düşük abrazyon oranı gösterdiğini, krom kaplamanın abrazyon direncinin difüzyon işlemlerinin bir çoğundan iyi olduğunu ve elektroliz Ni/P kaplamanın abrazyon direncinin de düşük olduğunu belirtmiştir (Şekil 4.3). Bunun yanında difüzyon işlemli yüzeylerin abrazyon direncinin çiftin yapısı ile değiştiğini, TiC ve VC yüzey işlemlerinin kendileri ile eşleştğinde düşük aşınma oranına sahip olduğunu ve krom kaplamanın VC ve TiC yüzey işlemlerinden sonra üçüncü sırada olduğunu da belirtmiştir.



Şekil 4.2 Yüzey işlemleri numunelerin kuru kum kauçuk tekerlek deneyi sıralaması[114].



Şekil 4.3 Yüzey işlemleri numunelerin şerit abrazyon deneyi sıralaması[114].

Su ve Lin[134], aşınma dirençli malzemelerin seçiminde kolaylık sağlamak amacı ile farklı yüzey işlemlerinin etkisindeki çeşitli malzemeleri birbirleri ile eşleştirerek kayma ve yuvarlanma koşulları altında bir grup deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların uyguladıkları yüzey işlemleri; karbürizasyon, gaz nitrürlenme, iyon nitrürlenme, sülfatlama (sursulf),

nitrokarbürizasyon, indüksiyon sertleştirme, krom kaplama, iyon implantasyon ve daha sonra lazer ile yeniden ergitme, nitrürlemeden sonra indüksiyon sertleştirme ve kum püskürtme, ısı püskürtme ile %88WC+%12Co seramik kaplamadır. Araştırmacılar bu yüzey işlemlerini, az karbonlu ve az alaşımlı çeliklere uygulamışlardır.

Deneyler sonucunda araştırmacılar, kuru aşınma şartlarında krom kaplı numunelerde, krom ve demir geçişinin önemli aşınma mekanizması olduğunu, gaz ve iyon nitrürlenmiş numunelerin de yüzeyaltı incelemesinin tipik yorulma çatlaklarını yüzeyin de pullanma davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Yağlı aşınma sırasında ise gaz ve iyon nitrürlenmiş numuneler için etkili aşınma mekanizmasının adhezif ve yüzey plastik deformasyonu olduğunu, krom kaplı numunelerde ise yüzeyin parlaması ve kırılması olduğunu belirterek seramik kaplamaların ağır yük koşulları altında başarılı olmadığı da ayrıca ortaya konmuştur.

Bell ve arkadaşları[135] tarafından yapılan bir çalışmada ise AISI 304, AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ve IMI 318 titanyum alaşımına plazma nitrüleme işlemi uygulanmış ve SiC pimler kullanılarak abrazif aşınma deneyleri uygulanmıştır. Araştırmacılar, deneyler sonucunda ostenitik paslanmaz çeliklerin ve titanyum alaşımının aşınma özelliklerinde iyileşmenin olduğunu bunun yanı sıra paslanmaz çeliklerin korozyon direncinin nitrüleme ile azaldığı ancak yüksek azot bileşenli işlem atmosferi ile bu azalmanın en aza indirilebileceği de saptanmıştır.

Bell ve Sun[136] isimli araştırmacılar da, sertleştirilmiş ve temperlenmiş düşük alaşımlı 24CrMo13 çeliğine değişik sıcaklık ve sürelerde plazma nitrüleme işlemi uygulamışlardır. Deneyler sonucunda, işlem sıcaklığı ve süresi arttığında sertlik derinliğinin de arttığı ayrıca nitrürlenmiş bütün numunelerin nitrülenmemiş numunelerden daha az aşındığı ifade edilmiştir. Araştırmacıların elde ettiği bir başka sonuç ise, deney numunelerinde 500°C' de 10 ve 35 saat plazma nitrüleme işlemi yapıldığında yüzeyde kalın ve dayanıklı tabakaların oluşması ve çeliğin aşınma direncinin esaslı

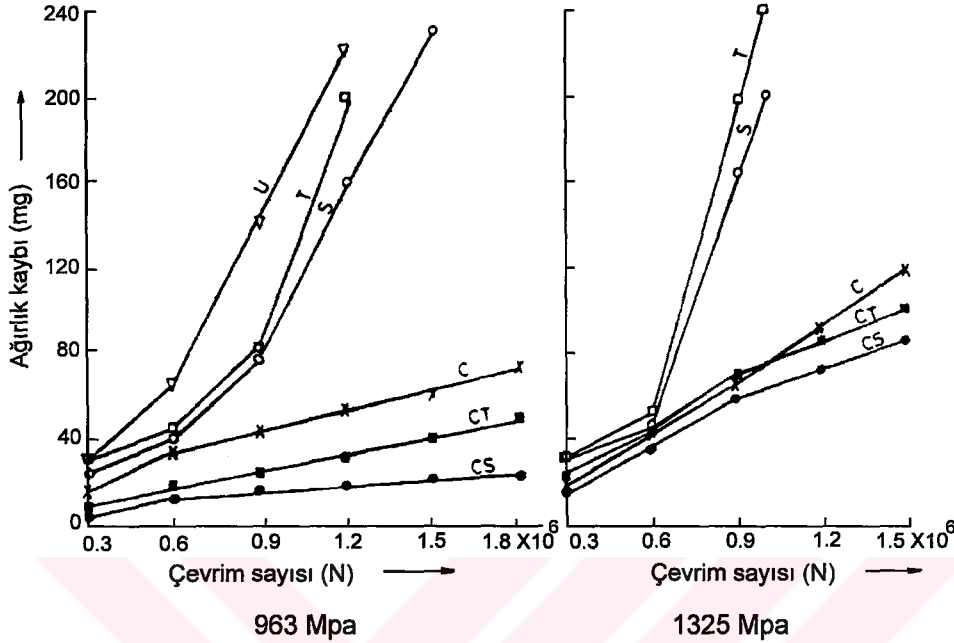
bir şekilde iyileştirdir. Numunelerde geliştirilen sert ve kalın nitrürlenmiş tabakaların yüzeyaltı plastik deformasyonu önlediği ve kalın nitrürlenmiş tabakanın aşınma sırasında yüzeyaltı kaymasını önlemede etkili olduğu da belirtilmiştir.

Karamış[137] tarafından yapılan bir çalışmada da AISI 722M24 (24CrMo13) çeliğine 550-570°C' de 4 saatten 64 saate kadar çeşitli sürelerde plazma nitrüleme işlemi uygulanmış ve abrazif aşınma davranışı incelenmiştir. Abrazif aşınma deneyleri yağlı ve yağsız abrazif aşınma olarak iki değişik şekilde gerçekleştirilmiştir.

Karamış, deneyleri sonucunda plazma nitrüleme işleminin yüksek yüzey sertliği, ince teneli mikroyapı ve tok bir çekirdek yapı vermesi nedeniyle adhezif ve abrazif aşınma ile yorulmaya karşı direnci iyileştirdiğini belirtmiştir. Buna ilaveten, beyaz tabakanın gevrek oluşu ve aşınmanın ilk zamanlarında malzeme kaybında artışa yol açtığını ancak yağlamalı aşınma şartlarında beyaz tabakanın gözenekli oluşu nedene ile yağ depolama ve ince abrazif tanecikleri tutabilme kabiliyeti ile yenme ve pullanma türü aşınmaya karşı direncinin iyileşebileceğini ifade etmiştir. Yüzey özelliklerinin ise; beyaz tabakanın sünek ve aşınma direnci iyi olan γ' -Fe₄N tek fazlı tabakadan oluştuğunu, her iki işlem sıcaklığı ve uzun süreli nitrüleme ile derin yüzey derinliği elde edildiğini belirtmiştir.

Krishnamurthy ve Ramamohana[138] isimli araştırmacılar ise, bir grup yüzey işlemi yapılmış yalın karbonlu bir çelikten (%0.14C) imal edilmiş dişlilere, aşınma deneyleri uygulamıştır. Hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış(U) dişlilere ek olarak uygulanan diğer yüzey işlemleri; sülfatlama (S), tuz banyosunda nitrüleme (T) ve dupleks işlemler şeklinde karbürizasyon + sülfatlama (CS) ile karbürizasyon + tuz (CT) banyosunda nitrüleme şeklindedir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, benzer gerilme ve farklı çevrim şartlarında en düşük aşınmanın karbürizasyon+sülfatlama işlemi yapılmış dişlilerin gösterdiğini ve bunları takiben karbürize edilmiş+tuz banyosunda nitrürlenmiş, sülfatlanmış, tuz banyosunda nitrürlenmiş ve

hiçbir işlem görmemiş dişlilerin izlediğini belirtmiştir. Şekil 4.4' de araştırmacılar tarafından elde edilen iki ayrı gerilme seviyesi için aşınma kayıpları görülmektedir.



Şekil 4.4 Farklı yüzey işlemleri etkisindeki çelik dişlilerin toplam aşınma kaybı[138].

Ahmed ve arkadaşları[139] tarafından yapılan bir çalışmada, orta karbonlu bir çeliğe plazma arkı ile püskürtme yöntemi ile 0.05-1.5mm kalınlıklarda Ni-%5Al ve WC-%17Co kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve aşınma deneyi uygulanmıştır. Araştırmacılar, artan kaplama tabakası kalınlığı ile boşluğun azaldığı ve kaplama tabakası kalınlığındaki artış ile aşınma direncinin de arttığını tesbit etmişlerdir.

Niemi ve arkadaşları[140] tarafından yapılan bir çalışmada, az karbonlu çelik bir ana malzeme üzerine atmosferik plazma püskürtme ve patlamalı püskürtme yöntemleri ile yapılan Al₂O₃, Al₂O₃+%3TiO₂, Al₂O₃+%40TiO₂, TiO₂ ve Al₂O₃+%40ZrO₂ şeklindeki seramik kaplamaların aşınma direnci kuru kum kauçuk tekerlek deneyi ve tanecik erozyon deneyi ile incelenmiştir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, az miktarda (%3) TiO₂ ilavesinin her iki yöntem ile yapılan kaplamaların aşınma direncini iyileştirdiğini ancak %40 TiO₂ ilavesinin ise azalttığını ve her iki kaplama

yönteminde de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \%40\text{ZrO}_2$ kaplamanın en iyi abrazyon direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, patlamalı püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalara göre daha iyi abrazyon ve erozyon aşınma direnci gösterdiğini de ifade etmişlerdir.

Vuoristo ve arkadaşları[141] tarafından yapılan bir çalışmada da, WC ve Cr_3C_2 tozlar kullanılarak patlamalı püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların abrazif aşınma direncine çökeltme şartlarının ve tozların özelliklerinin etkisi kuru kum kauçuk tekerlek deneyi ile araştırılmıştır. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, kaplamaların abrazyon direncinin, püskürtme parametreleri ile kaplama öncesi kullanılan tozun özelliklerine bağlı olduğunu, uygun gaz bileşimi kullanıldığında, küçük karbür boyutu içeren sinterlenmiş ve küresel WC+%12Co tozu ile yapılan kaplamanın en yüksek aşınma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar buna ek olarak, çok düşük ve çok yüksek $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$ gaz karışımı oranlarında yapılan kaplamaların abrazif aşınma deneylerinde ağırlık kayıplarının arttığını da ifade etmişlerdir.

Soykan ve arkadaşları[142] tarafından yapılan bir çalışmada Al_2O_3 , MgZrO_3 ve WC-Co seramik kaplamaların pim disk aşınma deney cihazında kuru kayma şartlarında sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Araştırmacılar, seramik kaplamaların tamamında kırılmanın baskın olduğu bir abrazif aşınma mekanizması olduğunu ve aşınmış yüzeylerden malzeme kaybının küçük tabakalar şeklinde meydana geldiğini gözlemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, kaplama tabakalarının sürtünme katsayısı değerlerinin düşük bir aralıkta değiştiğini, kaplamaların fiziksel özellikleri ve sürtünme katsayıları ile aşınma hızları arasında belirli bir ilişkinin kurulamadığını ifade etmişlerdir.

Dallaire, Legoux ve Levert[143] tarafından yapılan bir çalışmada, atomize gaz olarak argon veya hava kullanılarak elektrik arkı ile püskürtme yöntemi ile AISI 304 paslanmaz çelik ve TiB_2 tanecikler içeren paslanmaz çelik

kaplamaların abrazif aşınma direnci kuru kum kauçuk tekerlek deneyi yardımı ile incelenmiştir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, hava ile püskürtülen paslanmaz çelik kaplamaların aşınma direncinin paslanmaz çelik matrsten bir miktar fazla olduğunu ancak argon gazı ile yapılan paslanmaz çelik kaplamaların ise az bir miktar düşük olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, kompozit paslanmaz çelik/TiB₂ tanecikler içeren kaplamaların aşınma direncinin ise püskürtülen taneciklerin miktarına, boyutuna ve sertliğine bağlı olarak paslanmaz çelik matrsten 2-4 kat daha fazla olduğunu da ifade etmişlerdir.

Kim, Kweon ve Chang[144] isimli araştırmacılar ise, atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile püskürtülen WC-%12Co kaplamanın kuru kum kauçuk tekerlek deneyi ile abrazif, kare-disk deneyi ile adhezif ve 45-90 µm çapındaki alüminyum tanecikleri yardımı ile erozif aşınma direncini incelemişlerdir. Araştırmacılar, kaplamadaki boşluk miktarının, kaplama sertliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün aşınma direncini etkileyen başlıca faktör olmadığını, kaplamanın kohezif mukavemetinin aşınma direncini etkileyen en önemli faktör olduğunu ifade ederek kohezif mukavemet arttığında abrazif, adhezif ve erozif aşınma direncinin de arttığını belirtmişlerdir.

Bahadır ve Yang[145] tarafından yapılan bir çalışmada ise, 1044 çeliği ve Ti-6Al-4V ana malzeme üzerine, patlamalı püskürtme (D-Gun) yöntemi ile gerçekleştirilen (W,Ti)C-Ni ve WC-Co seramik kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışları, blok-disk aşınma deneyi ile incelenmiştir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, her iki ana malzeme üzerindeki WC-Co kaplamanın kuru kayma aşınmasına karşı direncinin (W,Ti)C-Ni kaplamadan daha yüksek olduğunu ve titanyum esaslı ana malzeme üzerindeki her iki kaplamanın aşınma direncinin çelik ana malzeme üzerindeki kaplamalardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, çelik ana malzeme üzerine yapılan kaplamaya ısı işlem yapıldığında aşınma direncinin azaldığını belirterek bunun nedeninin kaplama tabakası ile ana malzeme arasındaki dengeli olmayan genleşme

ve büzülme sonucu kaplama tabakasında meydana gelen çatlamadan kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Mohanty, Smith, Bonte, Celis ve Lugscheider[146] isimli araştırmacılar, yüksek hızlı oksji-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi ile gerçekleştirilen Cr_3C_2 / NiCr kaplamanın, oda sıcaklığındaki kayma sürtünmesi ve tribolojik davranışını yük, hız ve karşı cismin malzemesine bağılı olarak pim-disk aşınma deneyi ile incelemişlerdir. Araştırmacılar, kaplamanın tribolojik davranışının, kaplamadaki boşluk ve ikinci fazın oluşumu ve dağılımı gibi mikroyapısal özellikler ile önemli ölçüde etkilendiğini ayrıca kayma aşınma deneyi şartlarındaki değişikliklerin kaplamanın sürtünme ve aşınma davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar buna ek olarak, sürtünme katsayısının en çok yük ile etkilendiğini ve hızdaki artış ile sürtünmenin azaldığını ancak hızdaki artış ile aşınmanın önce azaldığını ve daha sonra arttığını da ifade etmişlerdir.

Wood, Mellor ve Binfield[147] isimli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada ise patlamalı püskürtme (D-Gun) yöntemi ile gerçekleştirilen WC-Co-Cr kaplama tabakasının kum/su jeti çarpma cihazı kullanılarak erzoyon direnci araştırılmıştır. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, kaplama tabakası üzerine uygulanan erozyon deneylerinin tamamında iki erozif aşınma mekanizmasının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu mekanizmaların, sünek bağ tabakası durumunda kesme ve oyucu mekanizma ile gevrek bağ tabakası durumunda çatlak mekanizması olduğunu ve meydana gelen bu mekanizmaların, kaplama tabakasına çarpan taneciklerin gelişine ve enerjisine bağılı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar buna ek olarak, birinci derecede erozif aşınma mekanizmasının kaplama yüzeyine paralel kritik altı çatlak büyümesi ve pullanma olduğunu ve ikinci derecedeki erozif aşınma mekanizmasının ise düşük açıdaki tanecik darbelerinde mikrokasma ile mikrosürme olduğunu da ifade etmişlerdir.

Li, Ding, Huang ve Zhang[148] isimli araştırmacılar tarafından yapılan bir çalışmada da, plazma püskürtme yöntemi ile gerçekleştirilen TiO_2 kaplama tabakasına karşı $\text{Cr}_3\text{Cr}_2\text{-NiCr}$ kaplama tabakasının sürtünme ve aşınma direnci blok-disk aşınma deneyi yardımı ile incelenmiştir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, sürtünme katsayısının hız ve yükün artması ile azaldığını ayrıca uygulanan yüke bağlı olarak $\text{Cr}_3\text{Cr}_2\text{-NiCr}$ kaplama tabakasının aşınma mekanizmasının değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. Aşınma mekanizmalarındaki bu değişimin, düşük yüklerde TiO_2 kaplama tabakasından yorulma destekli ayrılma mekanizması olduğunu, ağır yüklerde ise plastik deformasyon, kayma kırılması ve pullanma şeklinde olduğunu belirtmişlerdir.



BÖLÜM 5

KONUNUN ÖNEMİ VE ÇALIŞMANIN PLANLANMASI

Son yirmi yıl içerisinde demir-çelik sanayiinde sağlanan teknolojik gelişmeler, mamul çeliğe dönüşümde 1974' de %78 olan verimliliğin 1991' de %89' a ulaşmasını sağlamıştır. Benzer değişim, çelik kullanımında da yaşanmış, çeliğin en çok tüketildiği makina-otomobil-bina yapımında daha nitelikli çelik kullanılarak birim çelik tüketiminde azalma sağlanması, toplam tüketimde fazla bir artışın olmamasına yol açmıştır. Bu nedenledir ki; aslında çelik kullanılan üretim türü ve ürün miktarı artmasına karşın, genelde çelik üretim ve tüketiminde çok hızlı bir artış görülmemiştir. Örneğin; serbest pazar ekonomisi uygulayan ülkelerde 1974 yılında toplam tüketim 380 milyon ton/yıl iken, 1991' de 432 milyon ton/yıl değerine ulaşmış yani 20 yılda tüketim %14 oranında yani 52 milyon ton/yıl kadar artmıştır. Son yirmi yılda demir-çelik sanayiinde görülen üretim artışı; üretim verimliliğinde ve üretilen çeliğin kalitesindeki artış üzerine dikkatlerin yönlendirilmesi ile sağlanmıştır[149].

Çelik üretimi ve tüketiminde çok hızlı artışın görülmeyişi; çelik imalatındaki üretim verimliliğinin ve üretilen çeliğin kalitesindeki artış ile sağlanmasının yanısıra, mamul çeliğe uygulanan ve serviste kullanıcıya istenilen özellikleri sağlayan ve böylece çeliğin daha uzun süreli kullanımına yol açan yüzey işlemlerin etkisinin de önemli rol oynadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Mühendislik malzemelerinin, kullanım yerinde mekanik olarak tok ve kırılmaya dirençli bir özeliğe sahip olmasının yanında yüzey işlemleri sonucunda aşınma ve korozyon direnci ile yorulma mukavemeti gibi iyileşen bazı yüzey özelliklerini de kazanması ekonomik bakımdan istenmektedir.

Yüzey işlemleri teknolojisinde önemli bir yere sahip olan ve “modern yüzey işlemleri” olarak adlandırılan özellikle plazma nitrürleme ve ısı püskürtme yöntemleri konusunda yapılan literatür taraması sonucunda, 90’ lı yıllardan sonra yoğun çalışmaların gerçekleştirilmiş olması bu yöntemlerin önemini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, özellikle ilk jenerasyon ürünlerinin 90’ lı yılların başlarında, ikinci jenerasyon ürünlerinin ise 1995 yılında geliştirildiği (HVOF yöntemi gibi)[84] ve bazı değişik çeşitleri olan ısı püskürtme yöntemleri ile oluşturulan kaplama tabakalarının aşınma direnci konusunda literatürde sınırlı sayıda araştırmaya rastlanmıştır.

Teknik ve ekonomik alanda büyük kayıplara yol açan aşınma, özellikle madencilik ve tarım sektörü başta olmak üzere en çok abrazif aşınma türü ile kendini göstermektedir. Toprak işleme takımlarının bir çoğu, toprak şartlarında yeterli mukavemeti sağlayacak yalın karbonlu veya az alaşımlı çeliklerden imal edilmektedir[5]. Ülkemizde de toprak işleme aletleri parçalarının yapımında genellikle bu tür çelikler kullanılmaktadır[7].

Tarım makinalarında yapılan arıza ve gerekli bakım giderleri araştırması sonuçları göstermiştir ki, yorulma ve aşırı yükleme gibi nedenlerin yanısıra değer kaybına yol açan en önemli faktör %42,5 payla aşınma olmaktadır. Ülkemizde, 24 milyon hektarlık tarla alanının yılda iki defa sürülmesi durumunda ve pulluk uç demirlerindeki aşınmanın hektar başına 150gr olduğu kabul edildiğinde yılda 7.200.000 kg çelik aşınma sonucunda boşa harcanmaktadır[6, s 26-27]. Bunun yanında Devlet İstatistik Enstitüsü tarafından 1992 yılında Türkiye imalat sanayiinde yoğunlaşma dereceleri hesaplanmış ve çok yüksek yoğunlaşmanın olduğu sektörlerin başında 46 işyeri sayısı ile tarımsal makina yapımının geldiği belirtilmiştir[150].

Tüm bu olayların bilinmesine karşın, yüzey işlemleri teknolojisinde gelişmiş ülkelerde yaygın uygulama alanı bulan plazma nitrürleme ve ısı püskürtme ile kaplama yöntemleri sonucunda aşınmaya karşı dirençli elemanların üretimi ülkemizdeki üretici firmalar ve kullanıcılar tarafından yaygın olarak uygulanmamaktadır ve hatta hiç bilinmemektedir.

Yapılan çalışmada, Ç1050 (C45E) çeliğinin abrazif-erozif aşınma direncinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla C45E çeliğine, bilinen ısı işlemlerin yanında bir seri çeşitli yüzey işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri genel olarak, malzeme yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmeksizin sadece mikroyapısının değiştirilmesi, kimyasal bileşim ile mikroyapının her ikisinin de değiştirilmesi ve yüzeye ilave bir kaplama yapılması şeklinde üç ayrı grupta toplanmaktadır. Bunun yanında, yüzey işlemlerinden bazılarının kendi aralarındaki diğer yöntemleri ve/veya aynı yöntemin değişik parametrelere sahip türleri de uygulanmıştır. Deneyler sonucunda ısı işlem ve yüzey işlemleri etkisindeki her bir malzemenin aşınma davranışları ile aşınma mekanizmalarının belirlenmesi ve uygulanan işlem gruplarının birbirleri ile çeşitli bakımlardan karşılaştırılmasının yapılması planlanmıştır.



BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Giriş

Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi aşınma bir malzeme özeliği olmayıp bir sistem özeliğidir. Bu amaçla literatürde oldukça fazla deney cihazları tasarlanmıştır. Tasarlanan uygulamaların gerçek aşınma şartlarını taklit etme ihtiyacı, deneylerin uygulanma kolaylığı ve özel bazı kontrolleri yapabilme gibi istekler deney cihazlarındaki artışın nedenleridir. Model deneylerinde, elde edilen sonuçların yorumlanabilirliğinde ve servis durumlarını iyi bir şekilde taklit edilmesinde bazı güçlüklerin ortaya çıkabilmesine karşın alan deneylerine göre üstünlüğü düşük maliyet, kısa deney süresi, deney şartlarının kolaylıkla değiştirilerek bu değişime deney malzemelerinin hassasiyetinin rahatlıkla incelenmesi ve sonuçların tekrarlanabilir olmasıdır.

6.2 Deney Tesisatı, Özellikleri ve Çalışma Prensibi

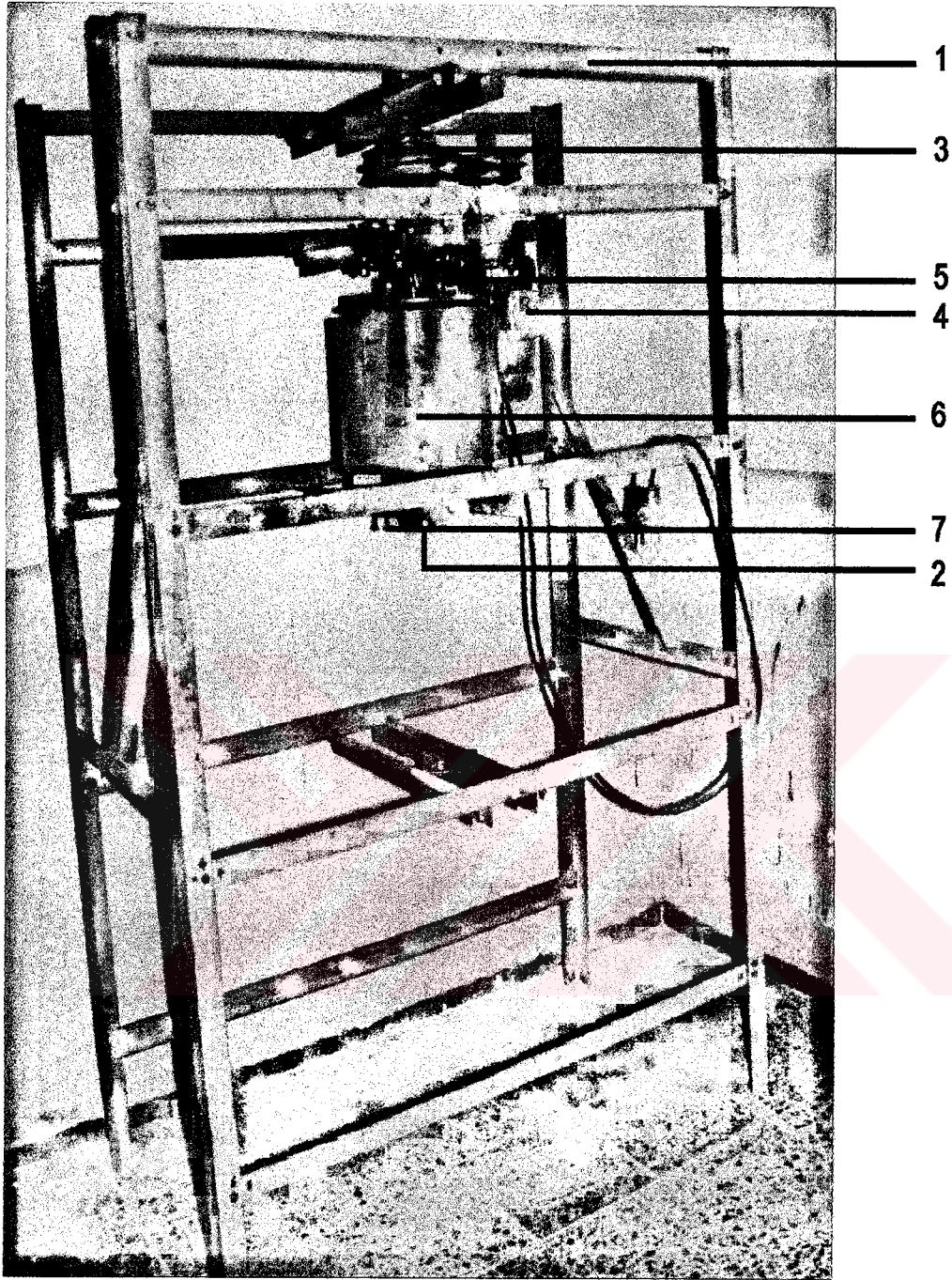
Bu çalışmada kullanılan ve “aşındırma makinası” adı verilen deney tesisatı, konstrüksiyon bakımından tamamen orijinal olup, İ.T.Ü. Ziraat Makinaları Enstitüsü’nde imal edilmiştir. Bu deney tesisatı, daha önce İ.T.Ü.’de ve Erciyes Üniversitesi’nde yapılan doktora çalışmalarında da kullanılmıştır.

Deney tesisatında kullanılan numune, aşındırıcı tanecikler ve atmosfer tribolojik sistemin başlıca elemanlardır. Aşınma döküntülerinin, aşındırıcı tanecikler içinde kaybolması ve atmosfer haricinde aşınmayı etkileyecek olan nemin olmamasından dolayı tribolojik sistemde ara madde bulunmamakta ve sistem, teknik kuru sürtünme durumunda bulunmaktadır.

Aşındırma makinası, 625x1250x1750 mm boyutlarında köşebentlerden oluşan bir ana çatı üzerine tesbit edilmiş olup karıştırıcı bir deney tesisatıdır. Bu deney cihazı [6, 24, 53,61] kaynaklarındaki deney tesisatı ile benzerlik göstermektedir. Deney tesisatını meydana getiren elemanlar ve özellikleri(Şekil 6.1) ise;

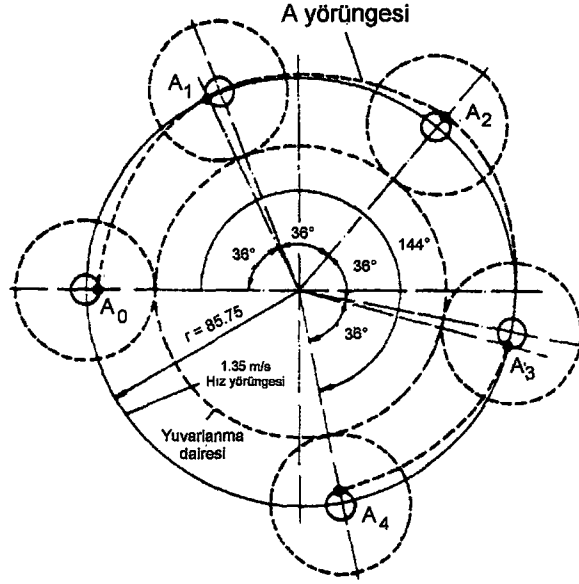
- 1- 0.75 kw, 220-380 Volt, 50 Hz ve 1400 d/dak. özelliklerinde bir elektrik motoru,
- 2- Redüksiyon oranı 1/10 olan motora bağlı redüktör,
- 3- 85-150-260 d/dak. arasında hız değişimi verebilen kademeli kayış-kasnak çifti,
- 4- Planet dişli mekanizması ve ana tahrik dişlisi taşıyıcı düzeni,
- 5- Planet dişli mekanizması ve diski,
- 6- İç ölçüleri ϕ 290x195 mm olan çelik kazan,
- 7- Derinlik ayarlama civataları,
- 8- Mil.

Aşındırma makinası harekete geçtiğinde, çalışmaya başlamış olan motor kayış-kasnak yardımı ile 3 adet rulmanla yataklanmış olan mili döndürmekte ve aynı zamanda mile bağlı olan planet dişli mekanizması ve tablasını da hareket ettirmektedir. Planet dişli mekanizması, 1 ana (sabit) ve 2 planet dişli (hareketli) olmak üzere 3 helisel dişliden oluşmaktadır. 2 adet planet dişli disk ile birlikte dönerken aynı zamanda taşıma düzenine düzenine sabitlenmiş olan ve hareket miline yataklık eden ana tahrik dişlisi etrafında da yuvarlanmaktadır. Böylece, dönme ve karıştırma esasına göre çalışan aşındırma makinasında, planet dişli merkezine bağlanan numunelerin, aşındırıcı tanecikler içinde hem mil hem de kendi eksenleri etrafında dönmesi ile numunelerin sadece bir tarafının aşınmasından doğacak olan şekil değişikliğinin aşınmayı etkilemesi önlenmekte ayrıca sürtünme yolunun arttırılması ile de deneylerin daha kısa zamanda tamamlanması sağlanmaktadır. Numunelerin çizdiği yörüngeler Şekil 6.2' de, numunelerin planet dişli sistemine bağlanma pozisyonu ise Şekil 6.3' de görülmektedir.



Parça No	Parça Adı	Parça No	Parça Adı
1	Tesisat çatısı	5	Planet dişli mekanizması
2	Ana mil	6	Kazan
3	Kademeli kasnak	7	Derinlik ayarlama civataları
4	Motor-redüktör		

Şekil 6.1 Aşındırma deney makinası



Şekil 6.2 Numunelerin hareket yörüngeleri

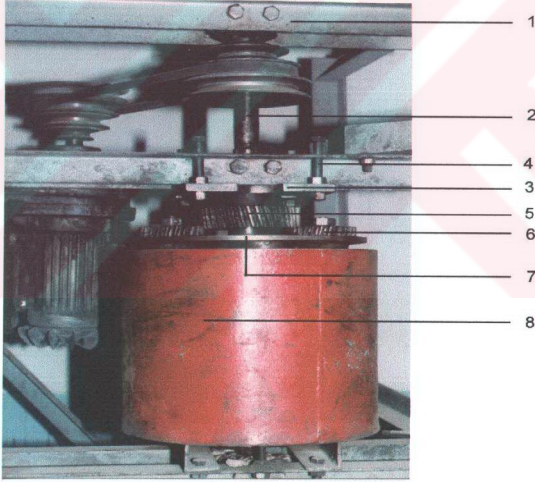
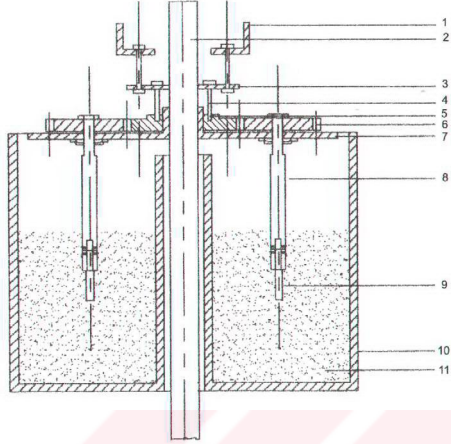
6.3 Karşı Madde

Çalışmada kullanılan aşındırıcı tanecik olarak, 820 Knopp sertlik değerindeki flint taşı seçilmiştir. Aşındırıcı taneciklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.1' de verilmiştir. Aşındırıcı tanecikler, deneylerde kullanılmadan önce çeneli kırıcı ile kırılmış ve elek analizi ile tane çap dağılımı belirlenmiştir (Tablo 6.2).

Tablo 6.1 Aşındırıcı taneciğin fiziksel ve kimyasal özellikleri[151]*.

Fiziksel Özellikleri		Kimyasal Özellikleri (%)	
Doğal rengi	Gri, açık gri	SiO ₂	97.64
Piştirdiğindeki rengi	Beyaz, açık gri	Al ₂ O ₃	1.60
Görünüş	Camsı	Fe ₂ O ₃	0.07
Yoğunluk	2.6-2.7 gr/cm ³	MgO	0.07
Sertlik (Mohs)	7 - 7.5	Na ₂ O / TiO ₂	0.04 / 0.03
Asit deneyi	Dayanıklı, köpürmez, yüzeyi etkilenmez	CaO / K ₂ O	Eser halde / Eser halde

* Aşındırıcı tanecikler, KALAMADEN – Endüstriyel Hammaddeler San. Ve Tic. A.Ş.-Çan/ÇANAKKALE' deki maden ocağından alınmıştır.



Parça No	Parça Adı	Parça No	Parça Adı
1	Çatı	7	Taşıma Tablası
2	Mil	8	Numune taşıyıcısı
3	Taşıma düzeneği	9	Numune
4	Taşıma Cıvatası	10	Kazan
5	Ana tahrik dişlisi	11	Karşı madde
6	Planet dişli		

Şekil 6.3 Numunelerin uydulu dönüştürücüye bağlanma sistemi

6.4 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Uygulanan Isıl İşlemler

Deneylerde kullanılan malzeme, Asil Çelik A. Ş. üretimi olan Ç1050 (C45E) olup kimyasal bileşimi Tablo 6.3' de verilmiştir.

Tablo 6.2 Aşındırıcı tanecik elek analizi*

Elek Çapı (mm)	Her Elekte Kalan Ağırlık %' si	Elek Çapından Büyük Tanelerin Ağırlık %' si
19.00	2.50	2.50
16.00	8.50	11.00
12.50	9.10	32.30
9.50	20.00	52.30
6.30	19.70	72.00
4.75	21.30	81.10
2.36	10.40	91.50
Tava	8.50	100
Tane çap dağılımı aritmetik ortalaması: $\bar{X} = 7.370$		
Standard sapma: $SS = 7,248$		
* Aşındırıcı taneciklerin elek analizi, STFA Kalite Ekspertiz ve Gözetim Ltd. Şti. – İSTANBUL' da yapılmıştır		

Tablo 6.3 Deney malzemesi kimyasal bileşimi*

Deney	Kimyasal Bileşim (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Ç1050(C45E)	0.533	0.293	0.883	0.033	0.012	0.255	0.183	0.098
* Spektral analiz, Anadolu Döküm A. Ş.- Kocaeli tesislerinde gerçekleştirilmiştir.								

Tablo 6.3' de kimyasal bileşimi verilmiş olan deney malzemesine, bilinen ısıtma işlemleri ile bir seri yüzey işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemleri genel olarak;

- Bilinen ısıtma işlemi (yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme),
- Malzeme yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmeksizin sadece mikroyapısının değiştirilmesi (endüksiyon sertleştirme),
- Malzeme yüzeyinin kimyasal bileşimi ile mikroyapısının her ikisinin de değiştirilmesi (nitürleme, borlama),
- Malzeme yüzeyine ilave kaplamanın yapılması (ısıtma püskürtme, PVD kaplama)

şeklinde gruplandırma yapmak mümkün olmaktadır.

Deneyler sonucunda çeşitli bakımlardan karşılaştırma yapılması amacı ile deney malzemesine yüzey işlemleri uygulanırken, bazı yüzey işlemlerinin kendi aralarındaki diğer yöntemleri ile bazı işlemlerin de değişik parametrelerdeki diğer türlerinin uygulanması şeklinde bir yol izlenmiştir. Deney malzemesine uygulanan işlemler Tablo 6.4' de, işlem özellikleri Tablo 6.5' de ve işlemlerin gerçekleştirildiği resmi veya ticari kuruluşlar ise Tablo 6.6' da verilmiştir.

Tablo 6.4 Deney malzemesine uygulanan işlemler.

Uygulanan İşlem	Uygulanan Teknoloji	Parametre Değişikliği	Deney Kodu
İşlem uygulanmamış	-	-	N
Yağda soğutma	-	-	YS
Yağda soğutma ve temperleme	-	-	YS3T
Endüksiyon sertleştirme	-	-	E
Borlama	-	-	B
Nitrürleme	Tuz banyosu	-	TN
	Gaz Nitrürleme	6 saat	GN6
		12 saat	GN12
	İyon nitrürleme	1/2 saat	IN1/2
		1 saat	IN1
		4 saat	IN4
		12 saat	IN12
		24 saat	IN24
		48 saat	IN48
	Isıl Püskürtme*	1.firma 1. toz	1F1
		1.firma 2. toz	1F2
		2.firma 1. toz	2F1
		2.firma 2. toz	2F2
		3.firma 1. toz	3F1
		3.firma 2. toz	3F2
		3.firma 3. toz	3F3
		3.firma 4. toz	3F4
PVD	-	-	TiN
(*) İşlemler 3 ayrı firmadan sağlanan tozlar ile gerçekleştirilmiştir.			

Tablo 6.5 Deney malzemesine uygulanan işlemlerin özellikleri

Uygulanan İşlem	Uygulanan Teknoloji	İşlem Özeliği
İşlem uygulanmamış	-	Esas metal olup herhangi bir işlem uygulanmamıştır
Yağda soğutma	-	850°C'de 30dak. ısıtma ve yağda soğutma
Yağda soğutma ve temperleme	-	850°C'de 30dak. ısıtma, yağda oğutma, 300°C'de 1 saat temperleme
Endüksiyon sertleştirme	-	Endüksiyon sertleştirme
Borlama	-	Elektrik direnç fırınında, katı B ₄ C ortamında, 950°C'de 6 saat borlama
Nitrürleme	Tuz banyosu	%35CNO, %0.89-1CN, %15-7CO ₃ ortamında 565±5°C' de 3.5saat süre ile nitrürleme
	Gaz nitrürleme	%50NH ₃ -%50N ₂ atmosferinde, 540°C' de, 6 ve 12 saat süre ile gaz nitrürleme
	Plazma(lyon) nitrürleme	%70H ₂ -%30N ₂ atmosferinde, 500°C', de 1/2, 1 ve 4 saat süre ile iyon nitrürleme
	Plazma(lyon) nitrürleme	NH ₃ atmosferinde, 480°C' de, 12, 24 ve 48 saat süre ile iyon nitrürleme ve vakum altında soğuma
Isıl Püskürtme	Alev püskürtme(1.firma)	Ni-Cr-B-Si ve WC-Ni-Cr-B-Si esaslı toz ile kaplama
	Alev püskürtme(2.firma)	Ni-Cr-B-Si ve WC-Ni-Cr-B-Si esaslı toz ile kaplama
	Alev püskürtme + eritme(3.firma)	Cr-Ni-Co-W ve Cr-Ni-B-Si esaslı toz ile kaplama
	HVOF(3. Firma)	Ni-Cr-B-Si-Co-W esaslı toz ile kaplama
	HVOF+eritme (3.firma)	%35WC + %65(Cr-Ni-B-Si) esaslı toz ile kaplama
PVD	-	1 saat süre ile TiN kaplama

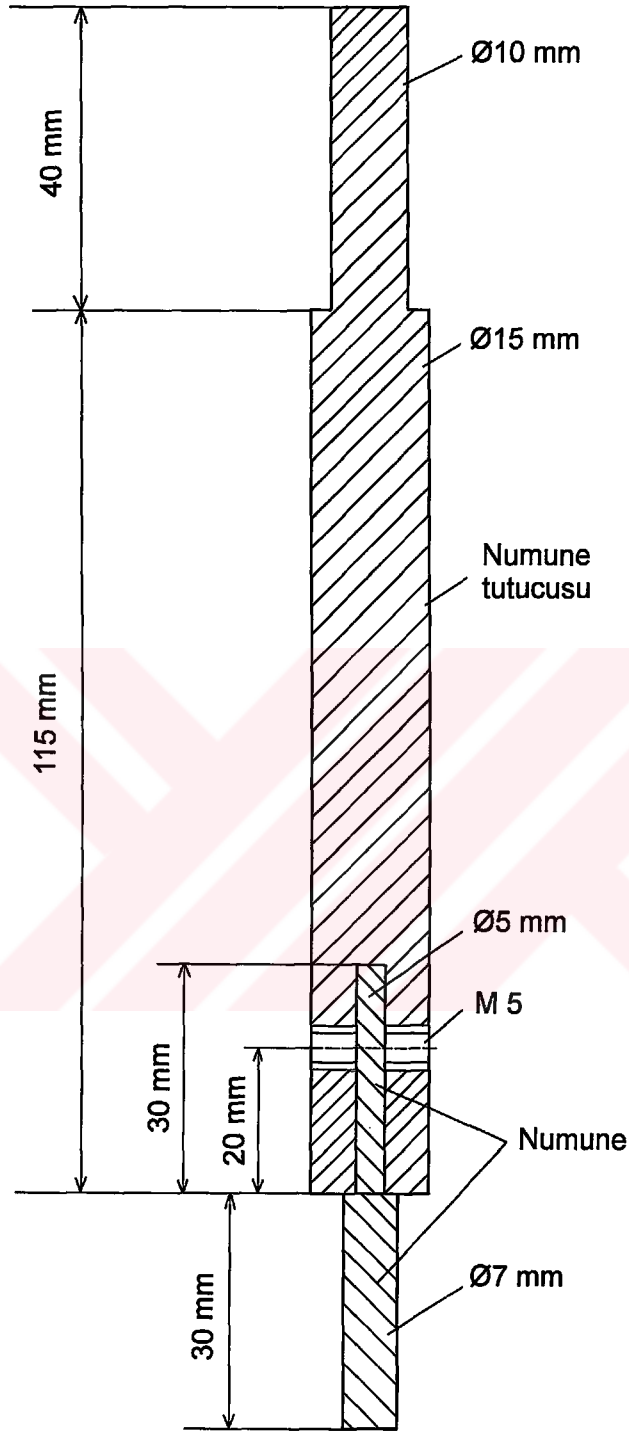
Yüksek hızlı oksijen yakıt ile püskürtme yöntemi (HVOF) ile kaplama tabakası oluşturmada, JP-5000HP/HVOF türü yüksek basınçlı/HVOFpüskürtme tabancası kullanılmış olup 8 inç nozul uzunluğu, 350 mm püskürtme mesafesi, 13 lb/saat püskürtme oranı, 140 ± 10 psi oksijen basıncı, 50 psi azot basıncı ve 130 ± 5 psi yanma basıncı değerlerinde işlem parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 6.6 İşlemlerinin gerçekleştirildiği resmi veya ticari kuruluşlar.

Uygulanan İşlem	Uygulanan Teknoloji	İşlemin Gerçekleştirildiği Resmi veya Ticari kuruluşlar
Yağda soğutma	-	Kocaeli Üniversitesi
Yağda soğutma ve temperleme	-	Kocaeli Üniversitesi
Endüksiyon sertleştirme	-	INSA, Endüksiyon – Nitrürasyon - Isıl İşlem San.Ltd.Şti. / İstanbul
Borlama	-	Sakarya Üniversitesi
Nitrürleme	Tuz banyosu	İSTAŞ, Isıl İşlem Sanayi ve Tic. A.Ş./ İstanbul
	Gaz Nitrürleme	3T Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş. / İstanbul
	Plazma (lyon) nitrürleme (1/2, 1 ve 4 saat)	Dokuz Eylül Üniversitesi / İzmir
	Plazma (lyon) nitrürleme (12, 24 ve 48 saat)	İSİL, İstanbul Isıl İşlem Ltd. Şti. / İstanbul
Isıl Püskürtme	Alev püskürtme, alev püskürtme+eritme, HVOF ve HVOF+eritme	SENKRON, Metal ve Seramik Kaplama San. ve Tic. Ltd. Şti; Gedik Holding –Castolin + Eutectic ; As Kaynak, Kaynak Tekniği San. ve Tic. A.Ş.
PVD	-	Kocaeli Üniversitesi, Metalurji Müh. Böl.

6.5 Deney Parçalarının Boyutları

22 mm çapındaki C45E çeliğinden tornalanarak elde edilen deney numuneleri, numune taşıyıcısına sabitlenmek amacı ile, toplam 60 mm uzunluğunda ve 30 mm' lik kısmı 5 mm çapında diğer 30 mm' lik kısmı ise 7 mm çapında olacak şekilde kademeli olarak tasarlanmıştır. Deney numunelerinin aşındırılacak olan kısmı, numune taşıyıcı ucundaki 7 mm çapındaki ve 30 mm uzunluğundaki bölgesidir. Numune taşıyıcısı normal çelik malzemeden imal edilmiştir. Numuneler, numune taşıyıcısına iki taraftan M5 gömme başlı civatalar yardımı ile sabitlenmiştir. Şekil 6.4' de numune taşıyıcısı ve numune taşıyıcısına sabitlenmiş deney numunesi görülmektedir.



Şekil 6.4 Numune taşıyıcısı ve numune

6.6 Deneylerin Yapılışı

6.6.1 Aşınma deneyleri

Kazan içerisinde bulunan aşındırıcı tanecikler arasında planet dişli mekanizması ile hem kendi eksenini hem de ana mil etrafında dönen numunelerin, aşınma miktarları ağırlık kayıplarına göre belirlenmiştir.

Deney öncesi numuneler, ultrasonik temizleyicide alkol içerisinde temizlenerek kurutulmuş ve 0.1 mg hassasiyetli 330 g kapasiteli elektronik terazi* ile tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Aşınma deneyleri boyunca bütün numunelerin ağırlık kayıpları ölçümleri için aynı terazi kullanılmıştır. Numunelerin, belirli sürelerdeki aşınma deneyi sonucunda ağırlık kayıplarını belirlemek için tartıma alınmadan önce, yüzeylerinde aşındırıcı taneciklerden veya herhangi bir nedenden dolayı oluşabilecek toz, kir v.s. gibi yabancı maddelerden temizlenmesi amacı ile ultrasonik temizleyicide 10 dakika süre ile alkol içerisinde olmak üzere temizlenmiştir.

Esas metal de dahil olmak üzere her bir işlem uygulanmış numuneden, deney sonuçlarının daha hassas ve güvenilir olması bakımından 4 adet, bunun yanında sertlik ve metalografik çalışmalarda kullanılmak üzere 1 adet olmak üzere toplam 5 adet numune hazırlanmıştır. Her bir numune için aşınma süresi 10 saat olarak belirlenmiştir. Ağırlık kaybı ölçümleri ise her 1 saatlik süreler sonunda yapılmıştır. Aşınma deneyleri boyunca, aşındırıcı tanecik boyutu ve cinsi ile numunelerin hızı ve aşındırıcı tanecik içerisindeki derinliği gibi işlem parametreleri her bir numune için sabit olarak seçilmiştir. Sadece bir işlemin uygulandığı 4 adet numuneyi 10 saat süre ile aşındırabilmek için toplam 40 saatlik bir süreye ihtiyaç olmaktadır. Aşındırma deney makinasında aynı anda iki adet numunenin aşınması mümkün olduğundan işlem zamanı yarıya inmekte ve böylece zamandan

(*) Shimadzu-Libror EB-330H marka elektronik terazi, Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarı

tasarruf sağlanmaktadır. Aşındırıcı tanecikler, kendi aralarındaki etkileşimlerinden dolayı aşındırma kabiliyetlerinin azaldığı gözönünde bulundurularak 40 saatlik süreler sonunda yenilenmiştir.

6.6.2 Sertlik deneyleri

Bütün numunelerin sertlik ölçümlerinde standard Vickers mikrosertlik cihazı* kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde özellikle nitürleme gibi yüzey işlemlerinde oluşan beyaz tabakanın kalınlığının az olması ve dış yüzey-çekirdek bölgesi arası sertlik değerlerinin hassas bir şekilde taranabilmesi amacıyla 10 gr' lık deney yükü altında 30 sn. süre ile izler oluşturulmuştur. Isıl püskürtme işlemli numuneler haricinde tüm numuneler için aynı deney yükü uygulanmıştır. Isıl püskürtme yüzey işlemi uygulanmış numunelerde, kaplama tabakasının yeterli kalınlıkta olduğu gözönünde bulundurularak 20 gr' lık deney yükü belirlenmiştir.

6.6.3 Metalografik çalışmalar

Çeşitli işlemler uygulanmış deney numunelerinde ortaya çıkan mikroyapıyı belirleyebilmek ve yüzey işlemleri sonucunda dış yüzeyden çekirdek bölgesine doğru sertlik taramasını gerçekleştirebilmek amacı ile numuneler önce abrazif diskli kesme makinasında enine kesilmiştir. Kesilen numuneler daha sonra sıcak kalıplama** yöntemi ile kalıplanmıştır. Kesilen ve kalıplanan numuneler, metalografik inceleme için otomatik makina kullanılarak kaba ve ince zımparalama ile parlatma işlemlerinden geçirilmiş ve daha sonra dağlanmıştır. Çeşitli dağlama ayıraçları*** denenmiş ancak uygun dağlama ayırıcı olarak %10' luk Nital seçilmiştir. Metalografik inceleme için hazır duruma getirilen numunelerden daha sonra mikroyapı fotoğrafları**** çekilmiştir. Isıl püskürtme işlemi uygulanmış numunelerde

(*) Zvick marka mikrosertlik cihazı, KO.Ü., Makina Müh. Böl.

(**) Metkon, Endüstriyel Cihaz San. Ve Tic. A. Ş.- Bursa

(***) Petkim, Petrokimya Holding A. Ş.- Körfez / Kocaeli

(****) Tübitak, Marmara Araştırma Merkezi- Gebze / Kocaeli, Malzeme Böl. Lab.

ise enine kesilen ve kalıplanan numunelerin makrofotoğrafları çekilmiştir.

6.6.4 Tarama elektron mikroskobu(SEM) çalışmaları

10 saatlik aşınma deneyi sonucunda aşınan her bir deney numunesinin, yüzey topoğrafyası incelemeleri tarama elektron mikroskobunda* gerçekleştirilmiş ve numunelerin aşınma yüzeylerinden fotoğraflar çekilmiştir.

Ayrıca, tarama elektron mikroskobunda özellikle ısıl püskürtme ile kaplama tabakası oluşturulmuş olan numunelerde EDX çalışması da gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle kaplama tabakasındaki elementleri belirlemek için “nokta EDX” analizi yapılmıştır. Daha sonra kaplama tabakasındaki elementlerin ana malzemeye doğru difüzyona uğrayıp uğramadığını belirlemek için de ana malzeme ile kaplama tabakası arasındaki düz bir hat üzerinde “hat EDX” (line scan) analizi yapılmıştır.

6.6.5 Yüzey pürüzlülüğü çalışmaları

10 saatlik aşınma deneyi sonucunda aşınmış olan bazı numunelerin, gösterdikleri aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü arasında ilişki kurulması amaçlanmıştır. Bu nedenle, aşınmış bazı numunelerin yüzey pürüzlülüğü** ölçülmüştür.

6.6.6 İstatistik çalışmaları

Çeşitli yüzey işlemleri uygulanmış numunelerin aşınma deneyleri sonuçları arasında, istatistiksel olarak önemli bir fark olup olmadığını belirlemek için t-testi uygulanmıştır. Buna ek olarak, her bir numunenin 10 saat’ lik süre sonundaki toplam ağırlık kaybı sonuçları arasındaki standard sapma da

(*) Jeol JSM 6400, Arçelik A. Ş., Araştırma Geliştirme Merkezi Tuzla – İstanbul

(**) Mahr-Perthometer S6P marka yüzey pürüzlülük çekim cihazı, İstanbul Motor Piston ve Pim San. A.Ş.- Kocaeli

belirlenmiştir. İstatistik çalışmaları için SPSS paket programı kullanılmıştır. Bu program, SPSS Inc. tarafından hazırlanmış olup dünyanın en iyi istatistik paket programlarından biridir[152].



BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

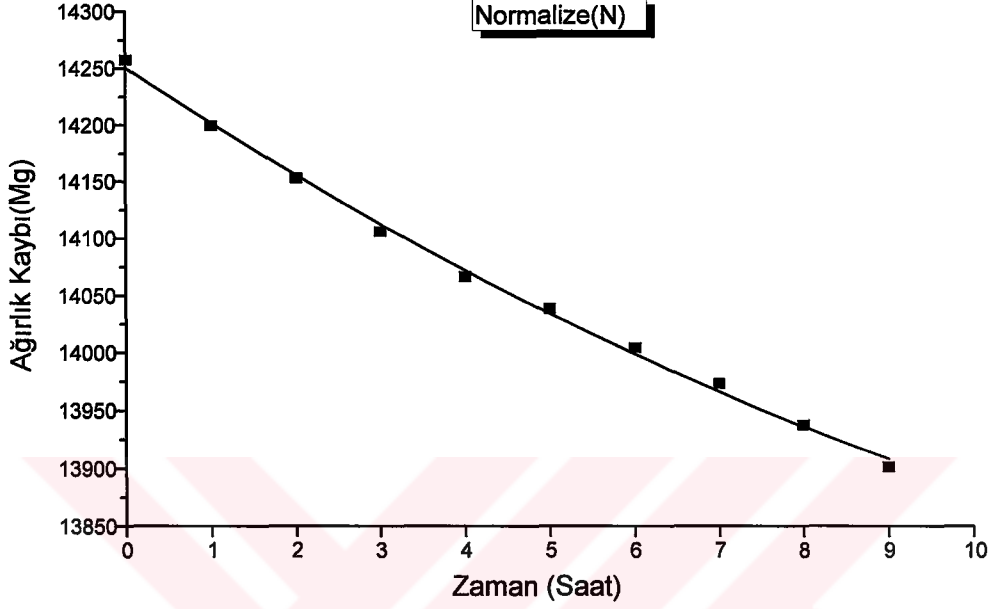
7.1 Aşınma Deneyleri Sonuçları

Hiç bir işlemin uygulanmadığı esas metal ile çeşitli işlemlerin uygulandığı deney malzemelerinden her biri için toplam 4' er adet hazırlanmış olan deney numuneleri 10 saat süre ile aşınma deneyine tabi tutulmuş ve her 1 saatlik süreler sonunda ağırlık ve toplam ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Her bir numune için çalışma derinliği, hız, aşındırıcı tanecik cinsi, deney süresi gibi işlem parametreleri sabit olarak seçilmiştir. Her bir numuneye ait ağırlık ve toplam ağırlık kaybı sonuçları ve deney parametreleri Ek A' da Tablo A.1' den başlayarak A.23' e kadar sıralanmıştır.

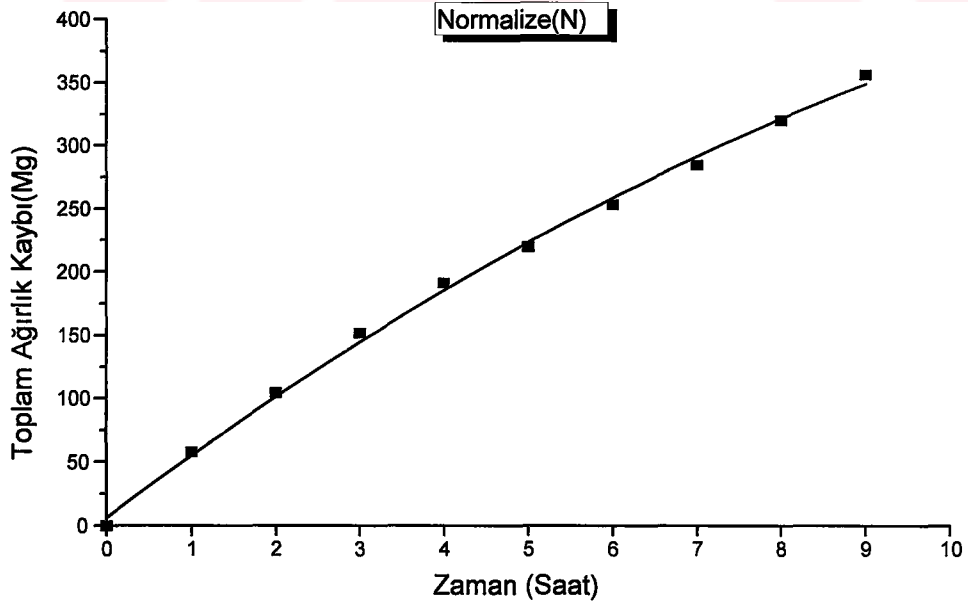
Ağırlık ve toplam ağırlık kaybı tablolarından da görüleceği gibi bütün numunelerde, 1. saat sonundaki ağırlık kaybı değeri diğer sürelerle göre oldukça farklı olduğundan, ağırlık kaybı değerleri için 1. saat sonundaki ağırlık kaybı başlangıç değeri olarak seçilmiştir. Toplam ağırlık kaybında ise yine 1. saat sonundaki ağırlık kaybı değerleri dikkate alınmamış ve başlangıç değeri olarak seçilerek sıfır kabul edilmiştir.

İlk 1 saatlik süre sonunda ağırlık miktarındaki ani azalmanın veya toplam ağırlık kaybı miktarındaki ani artışın nedeni, özellikle yağda soğutma, yağda soğutma ve temperleme ile endüksiyon sertleştirme gibi bilinen ısı işlemlerin sonucunda numune yüzeyinde meydana gelen oksit ve yağ tabakası ile diğer yüzey işlemlerinde de işlem özeliğine bağlı olarak yüzeyde oluşan karakterestik işlem tabakasının numune yüzeyinden aşınarak sıyrılmasıdır.

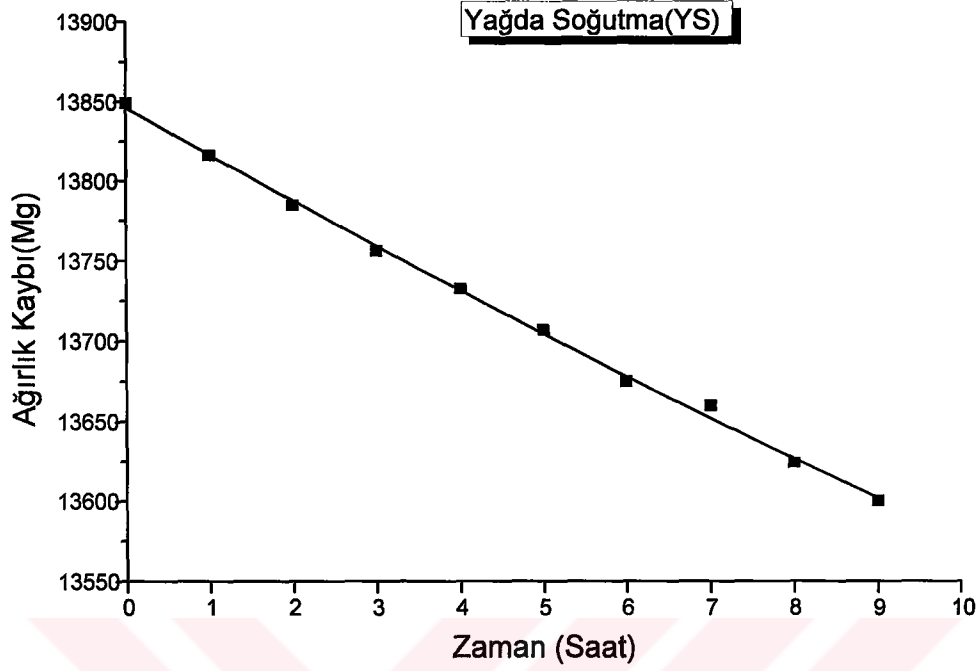
Ağırlık ve toplam ağırlık kayıplarının zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 7.1'den Şekil 7.46'ya kadar sıralanmıştır.



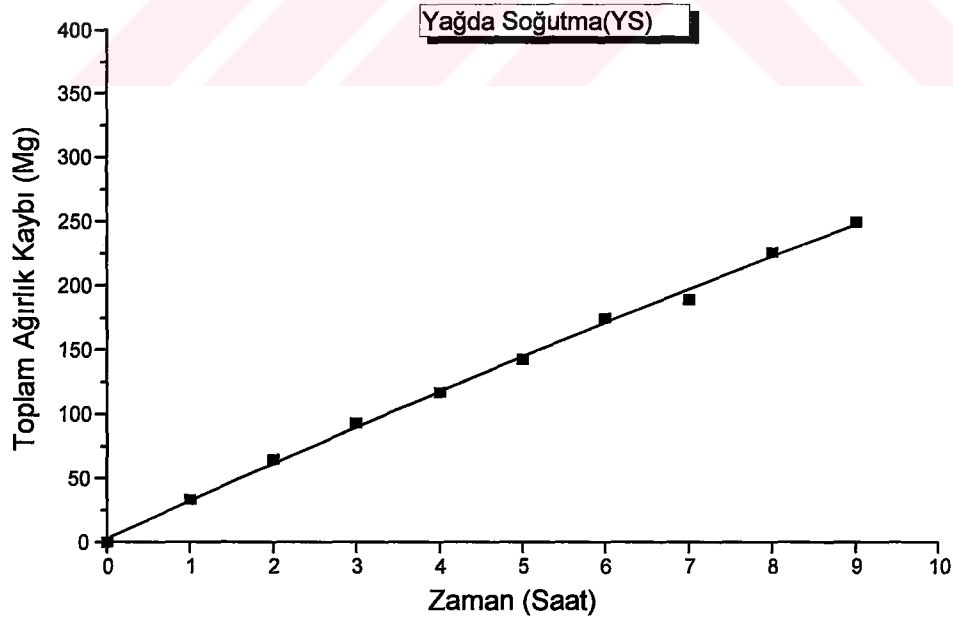
Şekil 7.1 Esas metale (N) ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



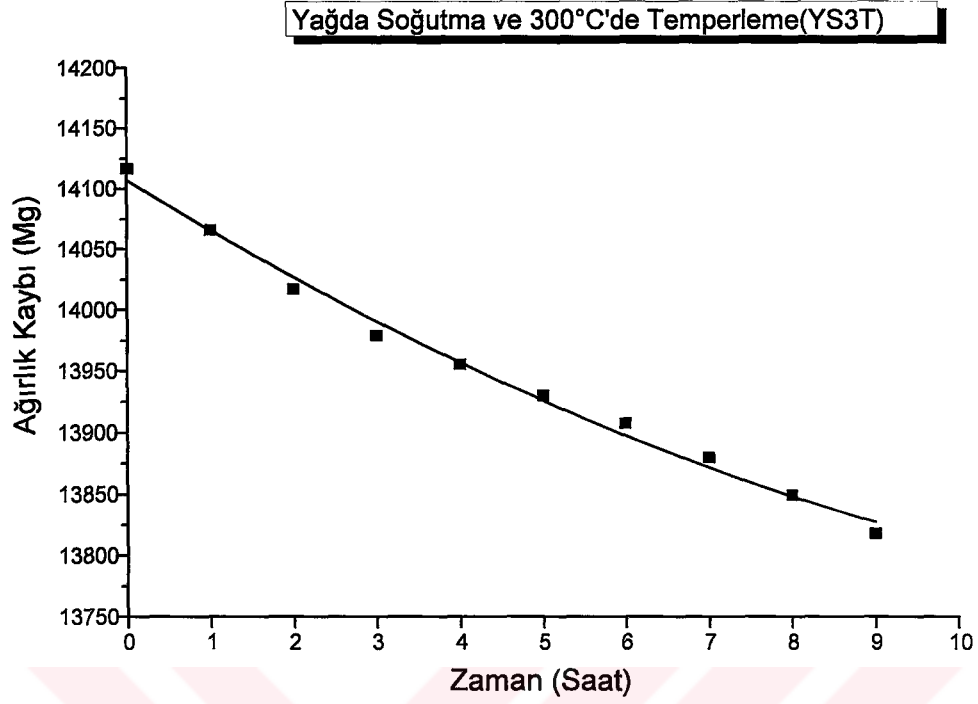
Şekil 7.2 Esas metale (N) ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



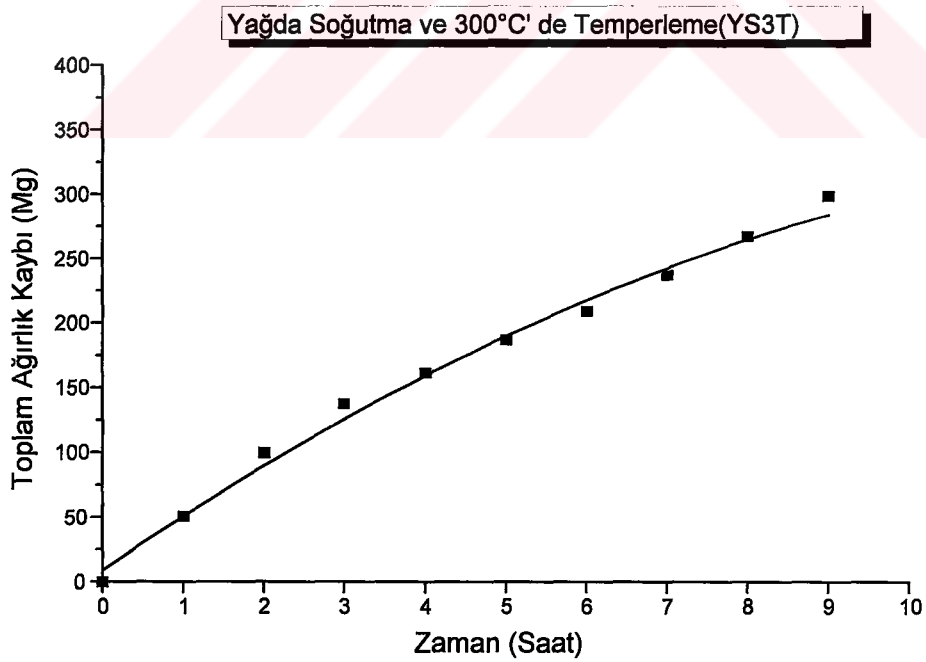
Şekil 7.3 Yağda soğutulmuş (YS) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



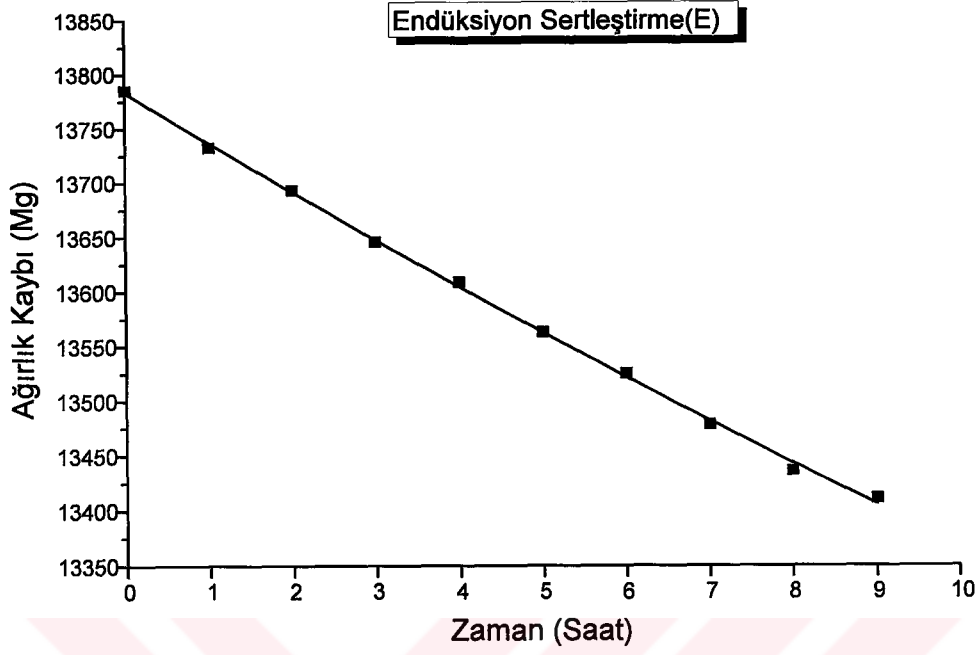
Şekil 7.4 Yağda soğutulmuş (YS) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



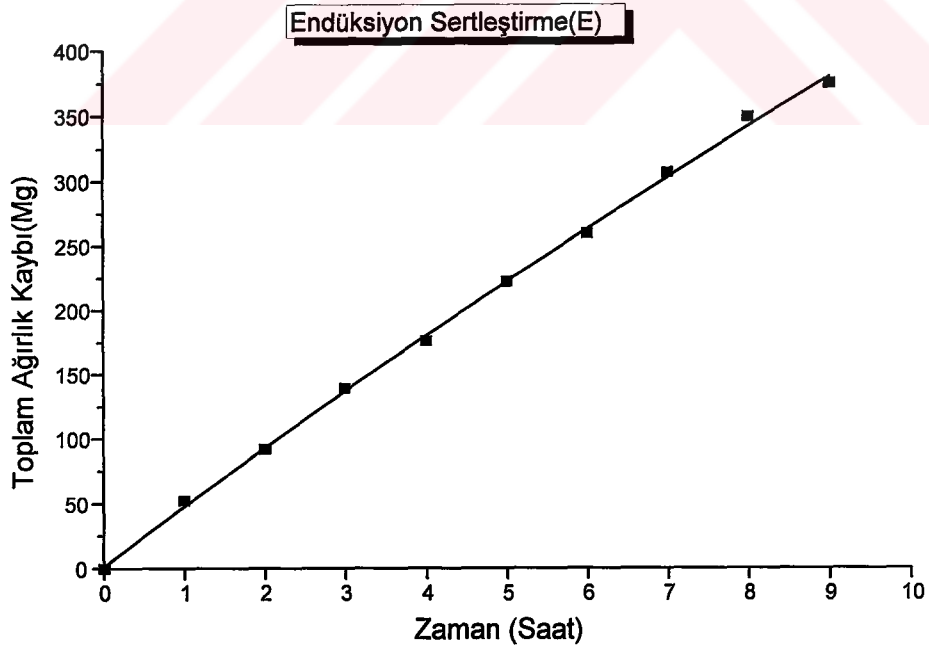
Şekil 7.5 Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



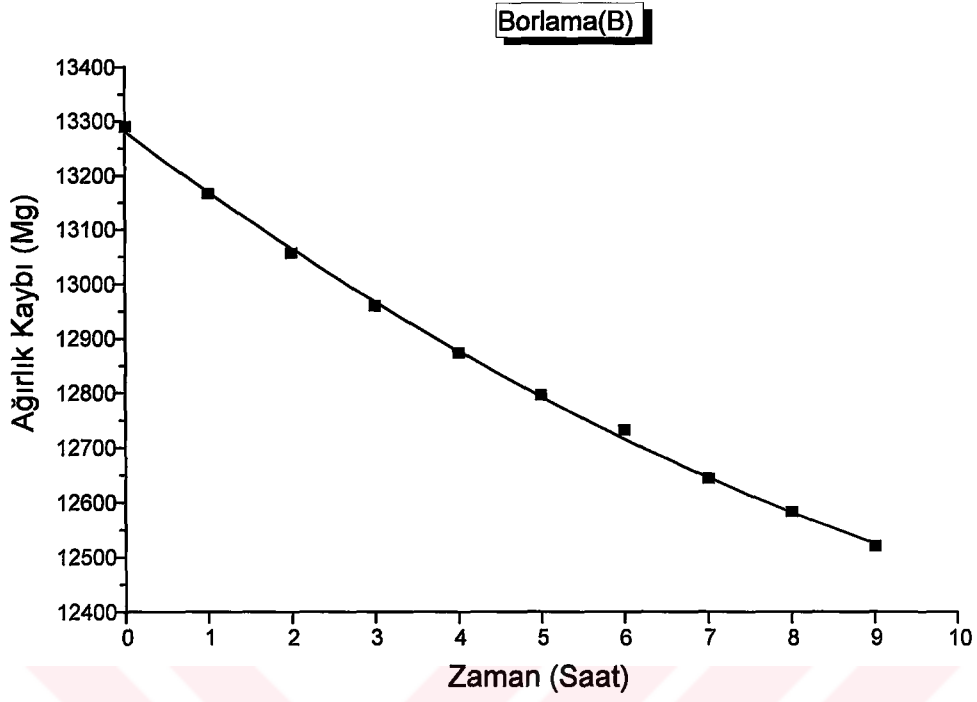
Şekil 7.6 Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



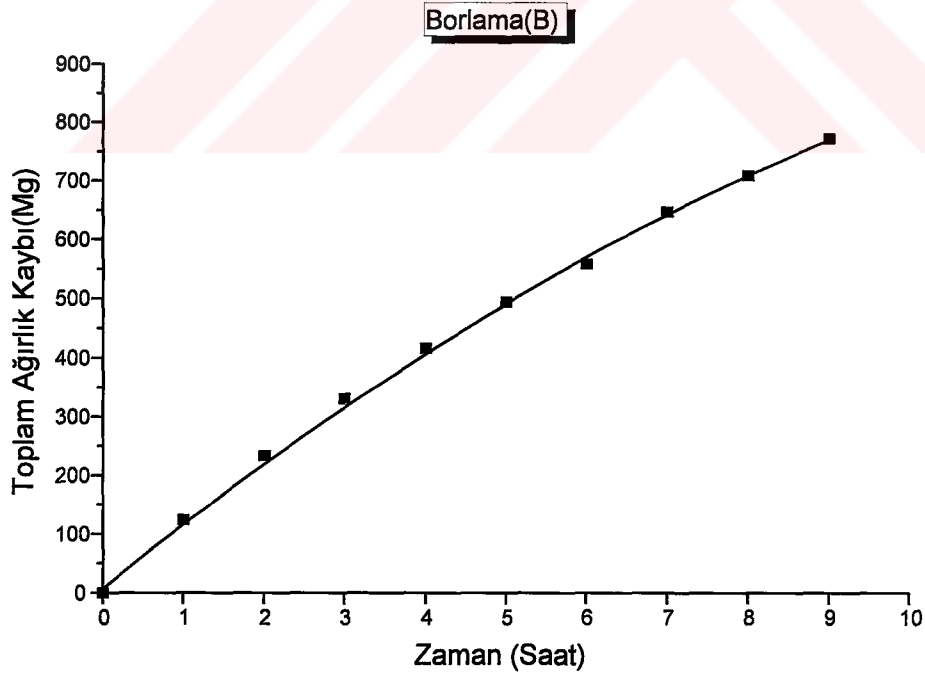
Şekil 7.7 Endüksiyon ile sertleştirilmiş (E) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



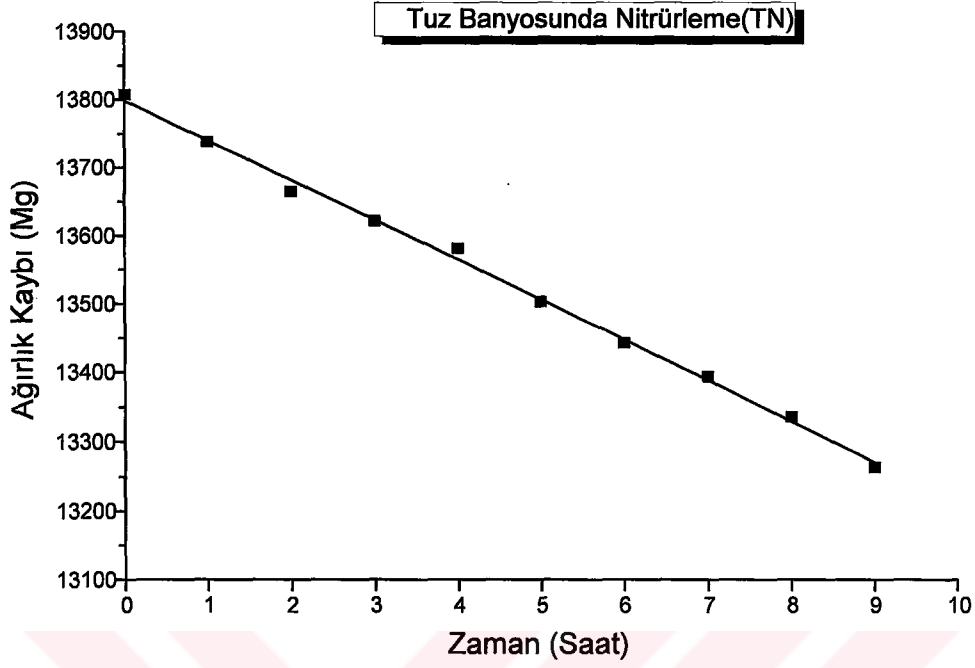
Şekil 7.8 Endüksiyon ile sertleştirilmiş (E) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



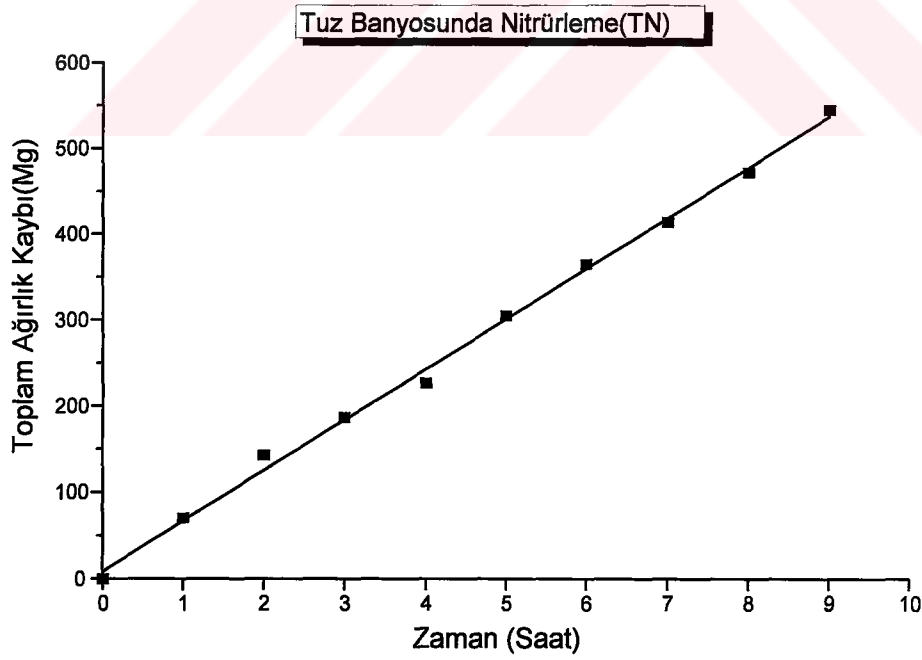
Şekil 7.9 Borlanmış (B) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



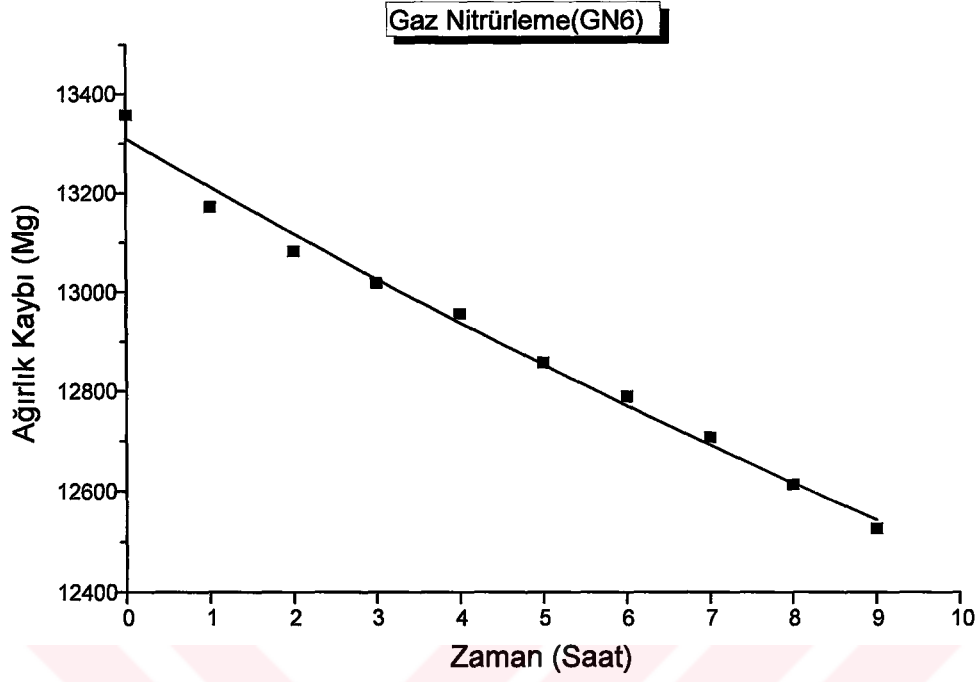
Şekil 7.10 Borlanmış (B) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



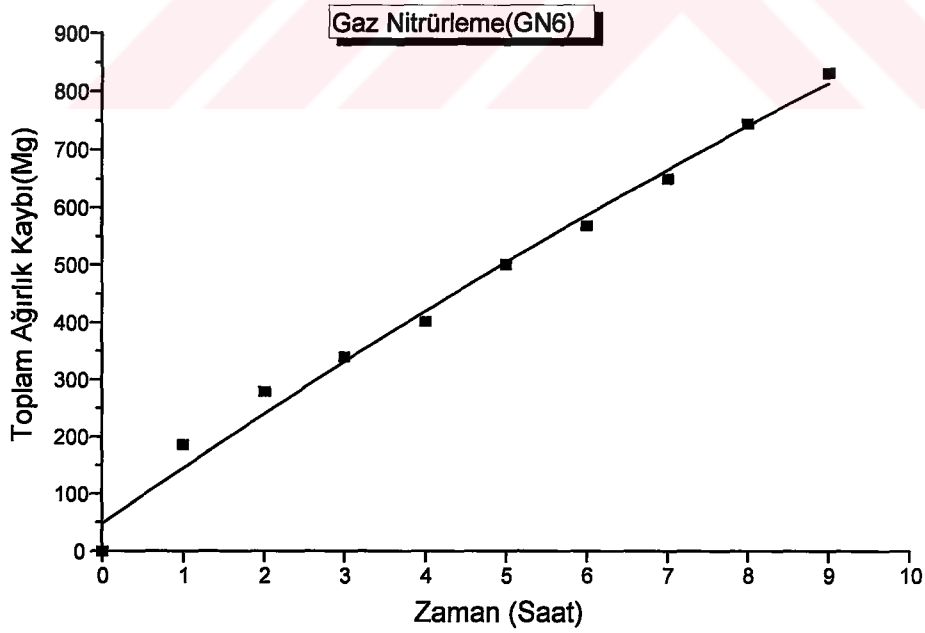
Şekil 7.11 Tuz banyosunda nitrürlenmiş (TN) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



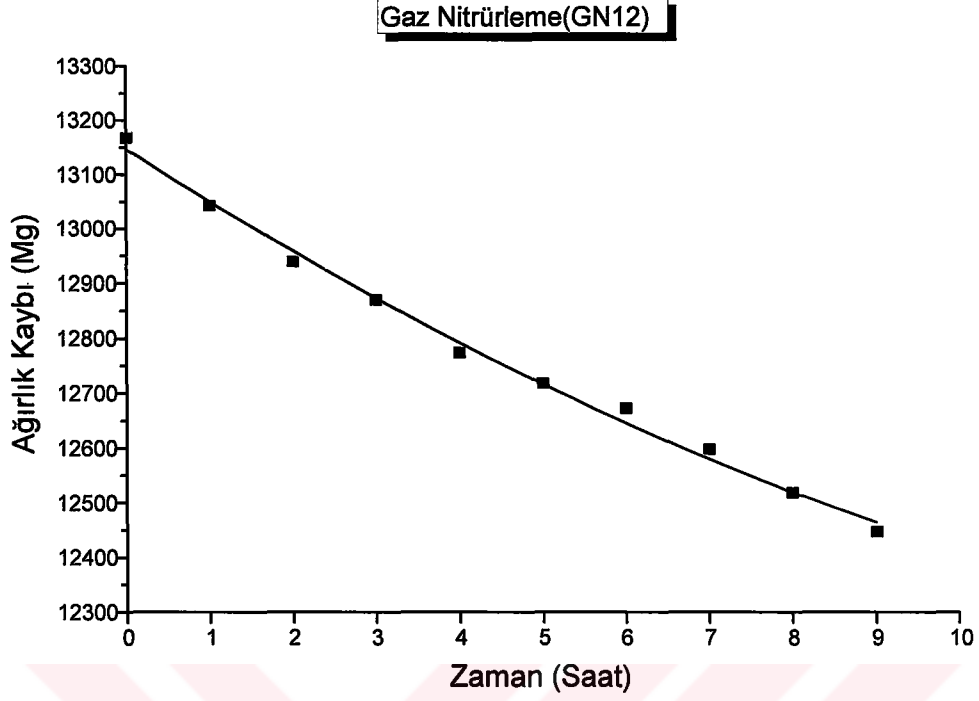
Şekil 7.12 Tuz banyosunda nitrürlenmiş (TN) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



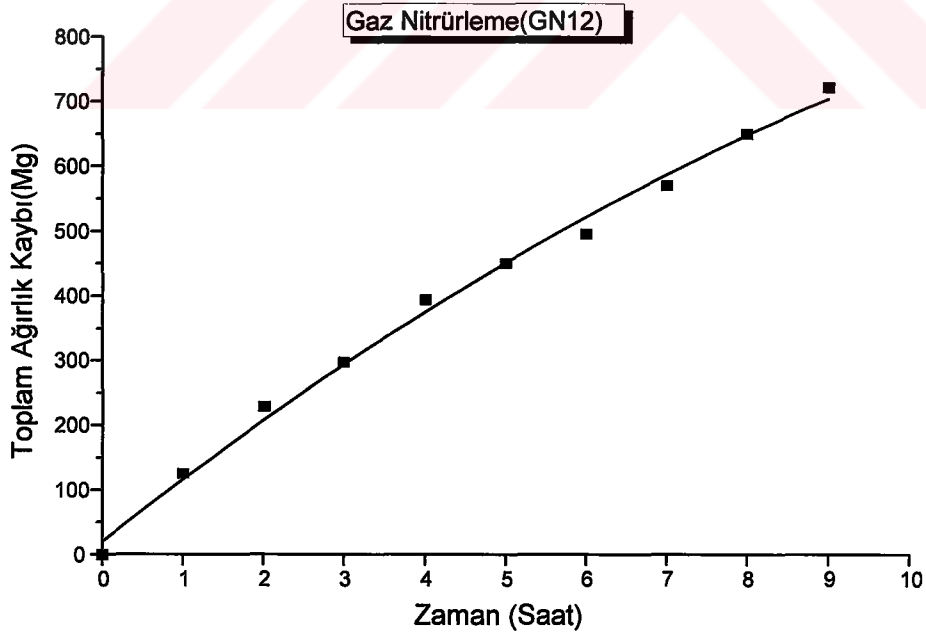
Şekil 7.13 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN6) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



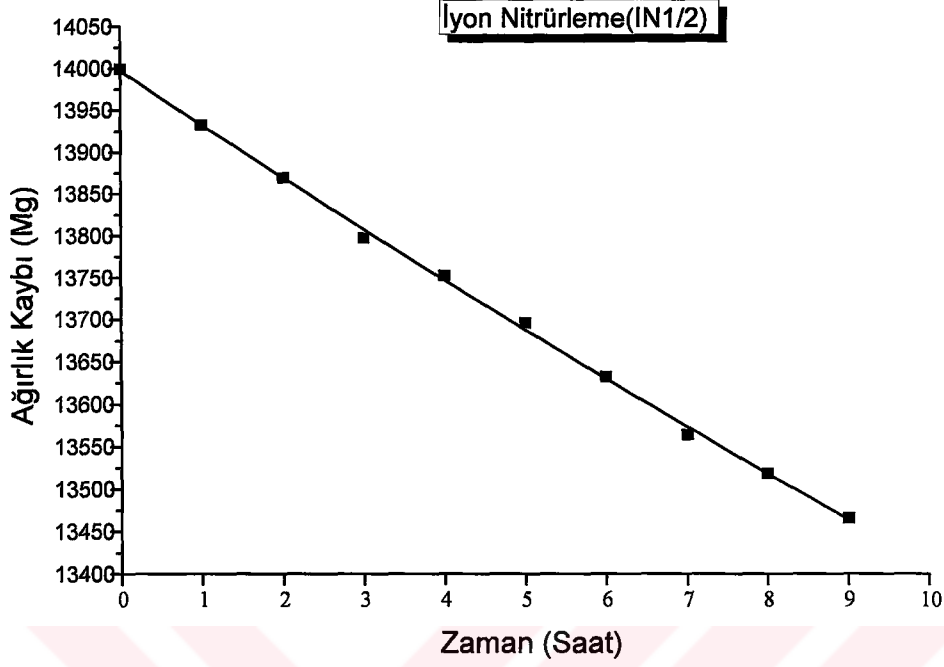
Şekil 7.14 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN6) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



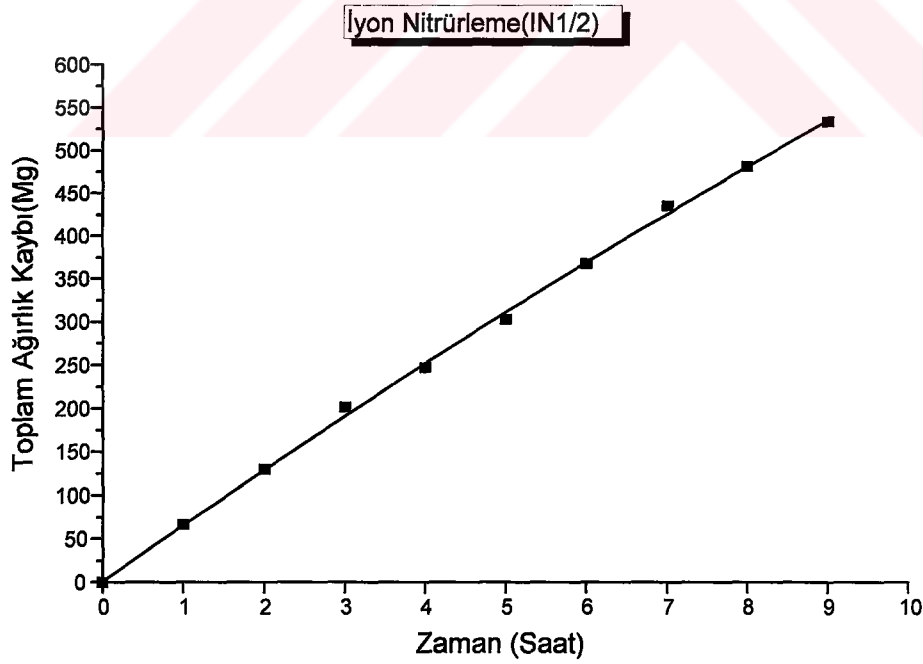
Şekil 7.15 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN12) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



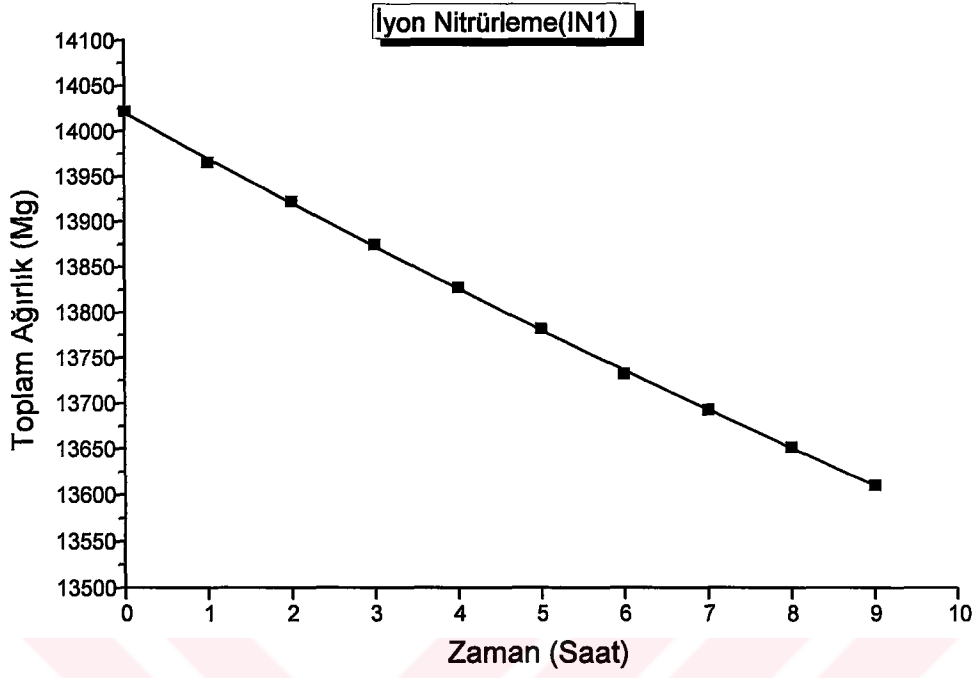
Şekil 7.16 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN12) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



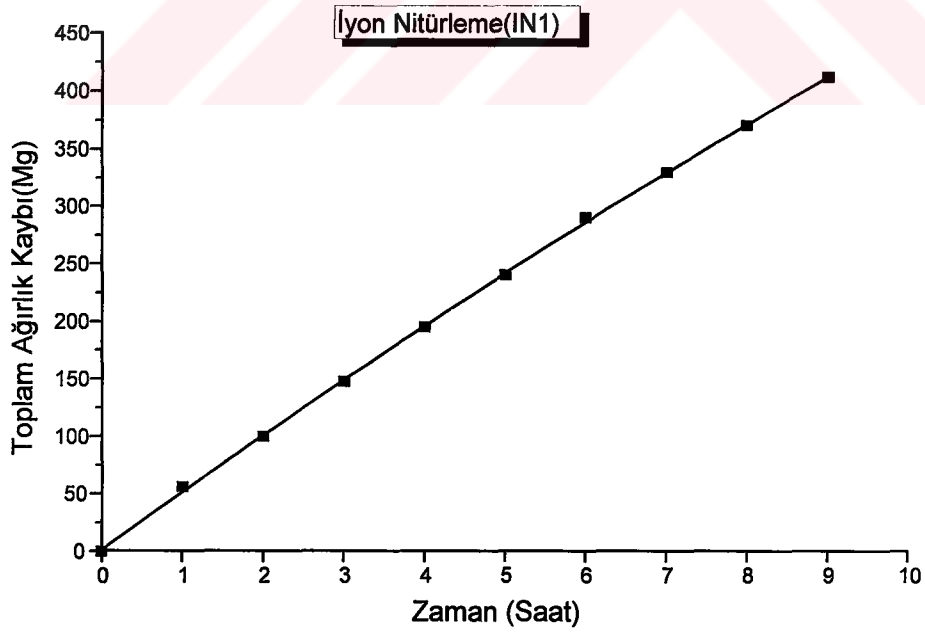
Şekil 7.17 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN1/2) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



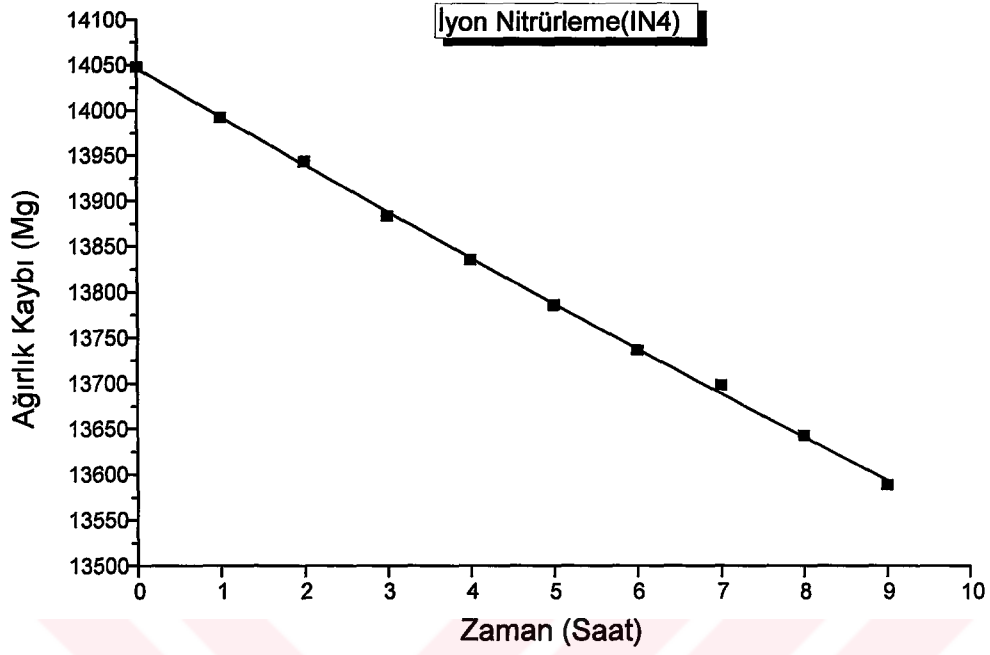
Şekil 7.18 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN1/2) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



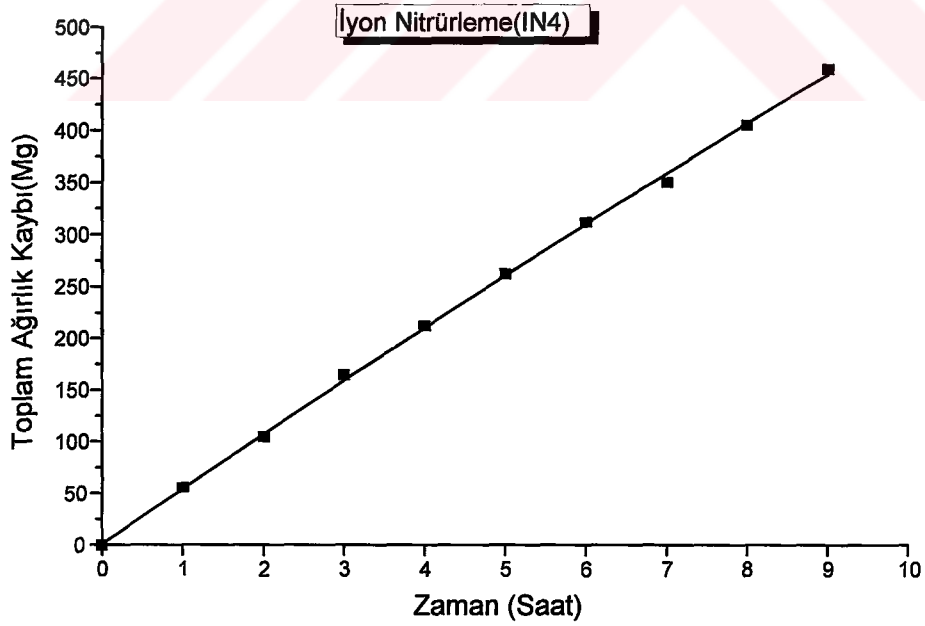
Şekil 7.19 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



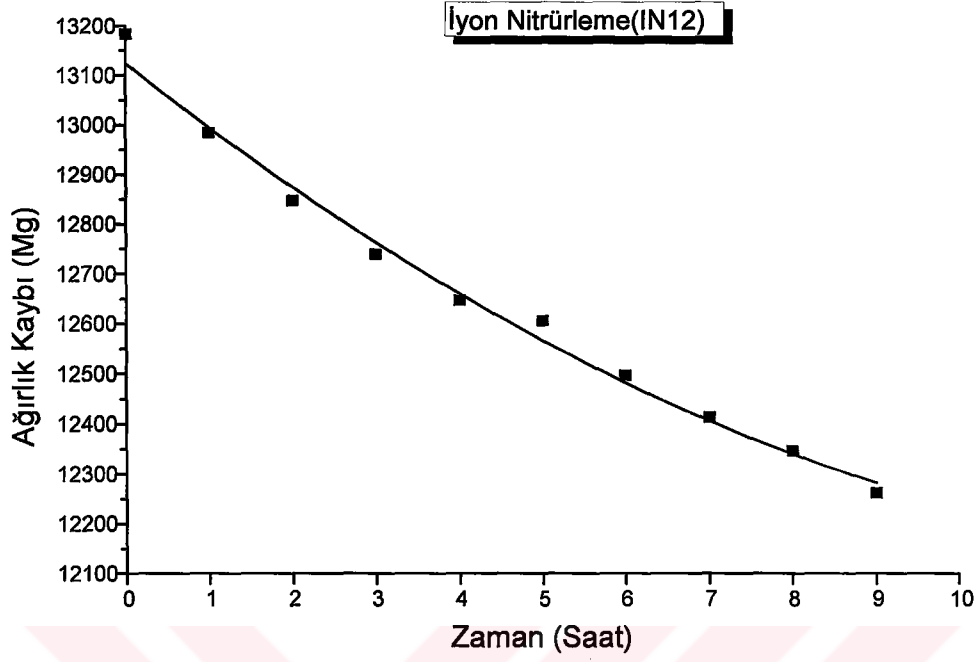
Şekil 7.20 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



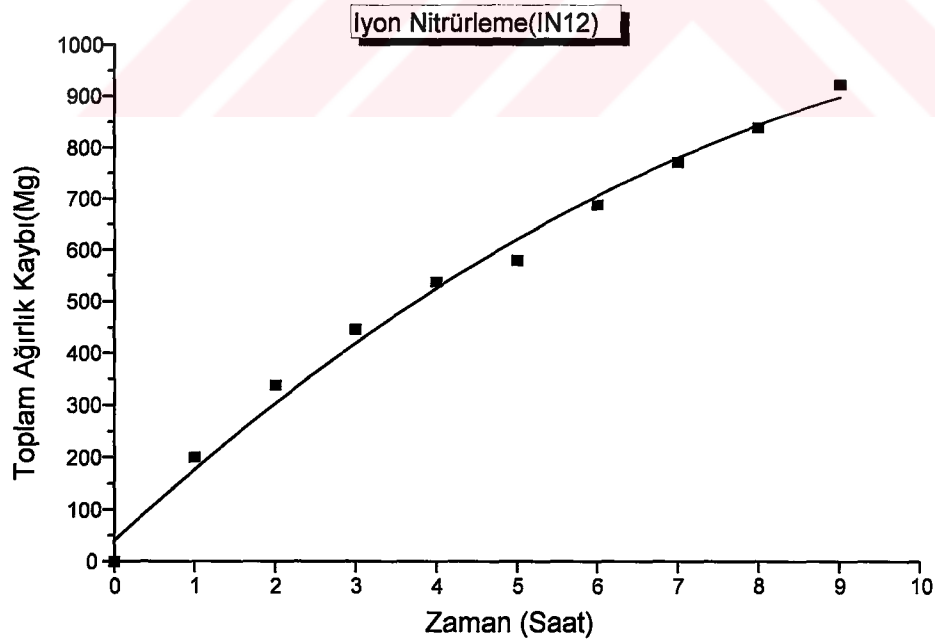
Şekil 7.21 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN4) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



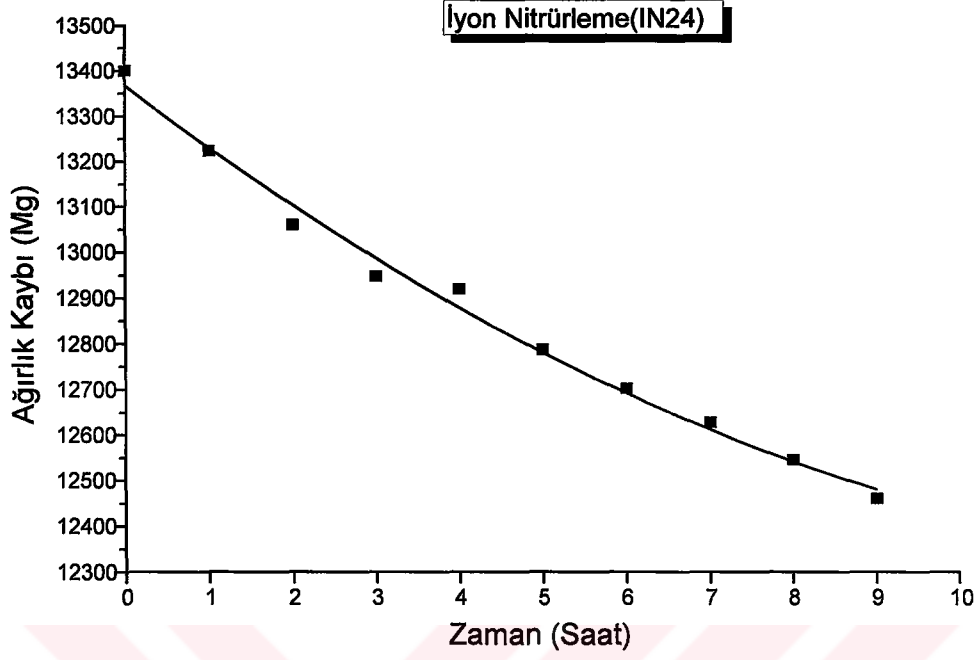
Şekil 7.22 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN4) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



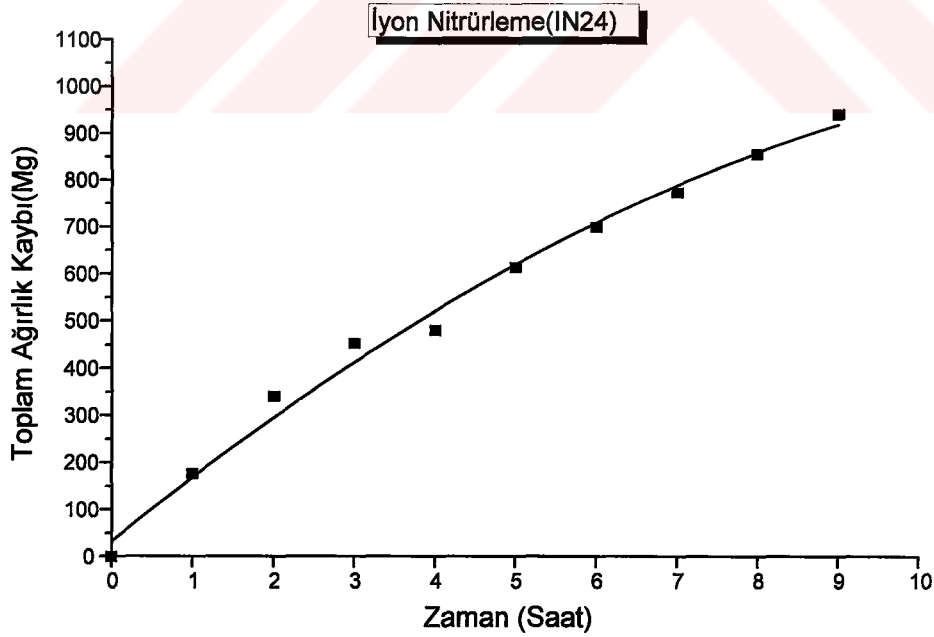
Şekil 7.23 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN12) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



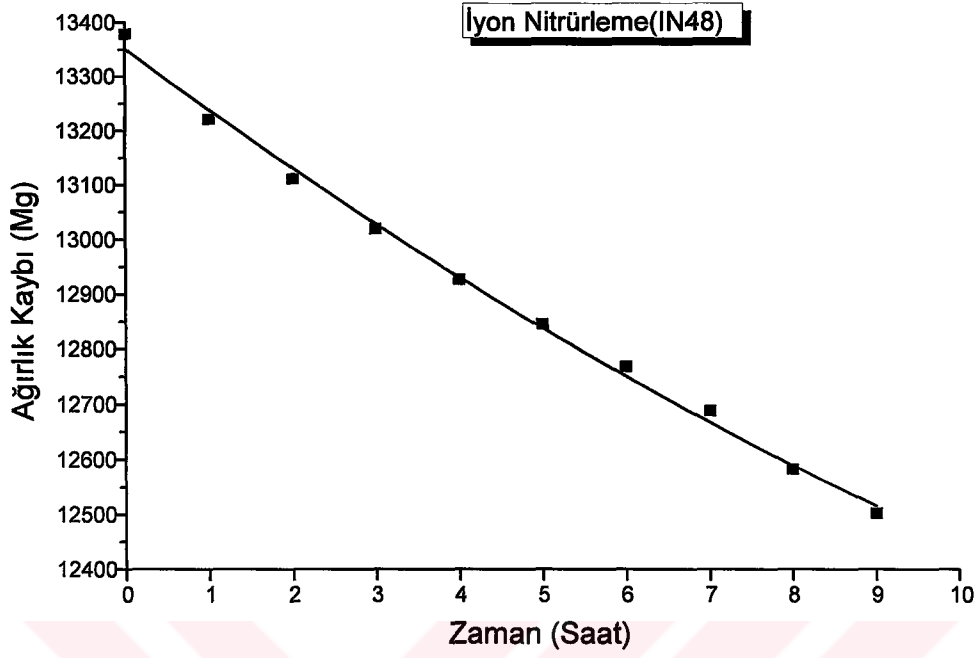
Şekil 7.24 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN12) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



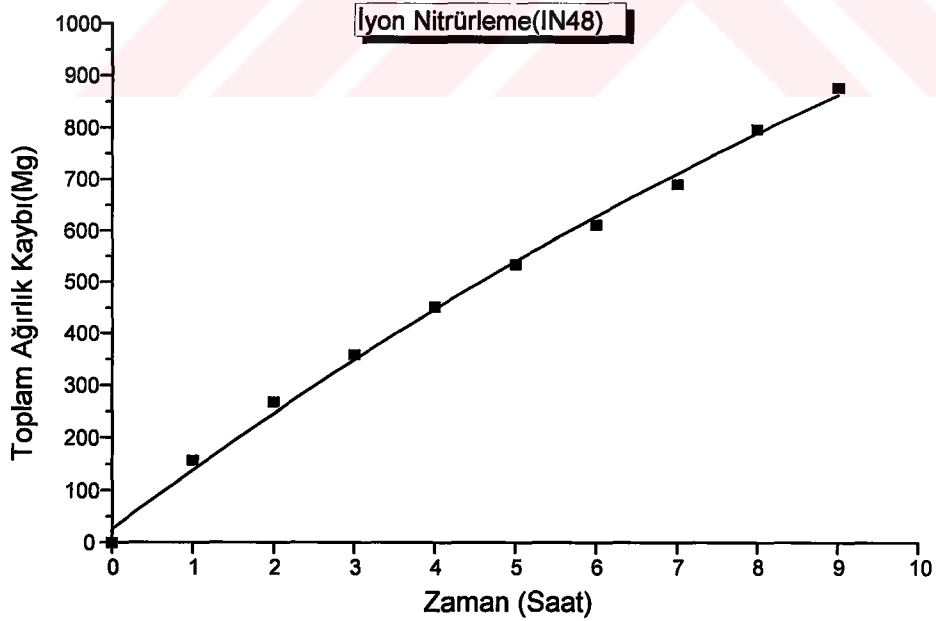
Şekil 7.25 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN24) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



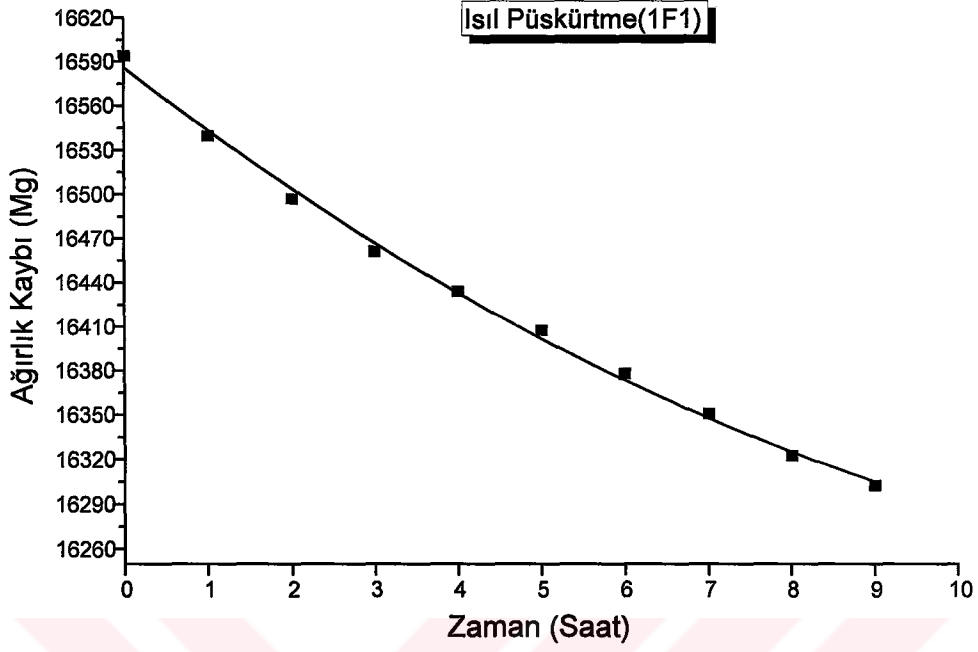
Şekil 7.26 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN24) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



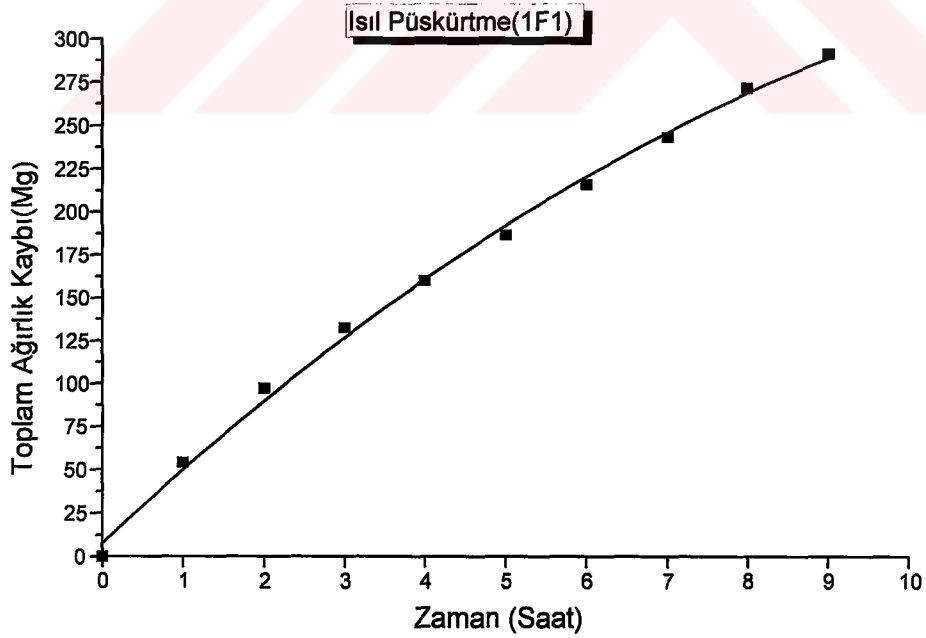
Şekil 7.27 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN48) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



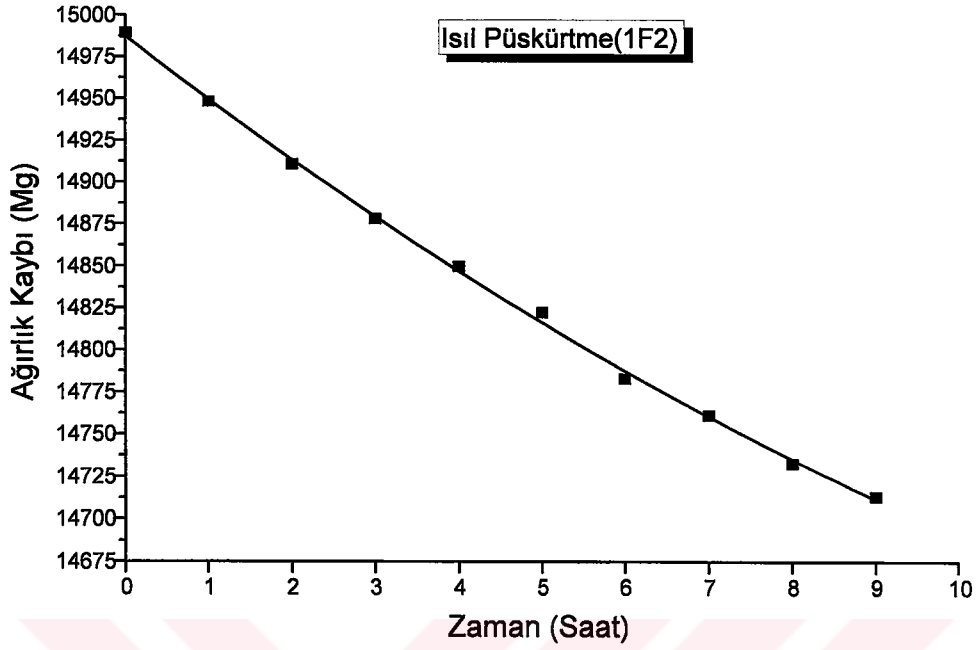
Şekil 7.28 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN48) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



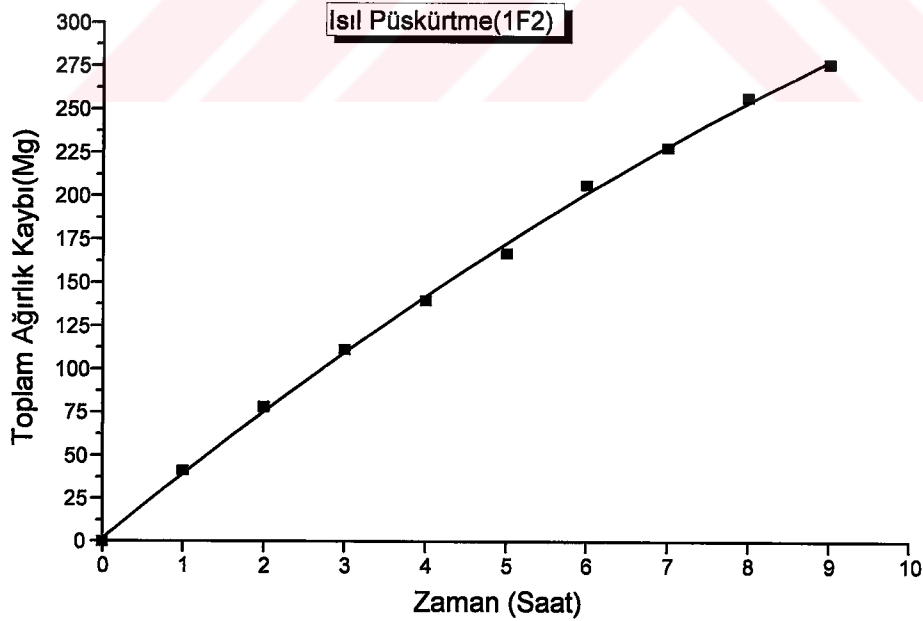
Şekil 7.29 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F1) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



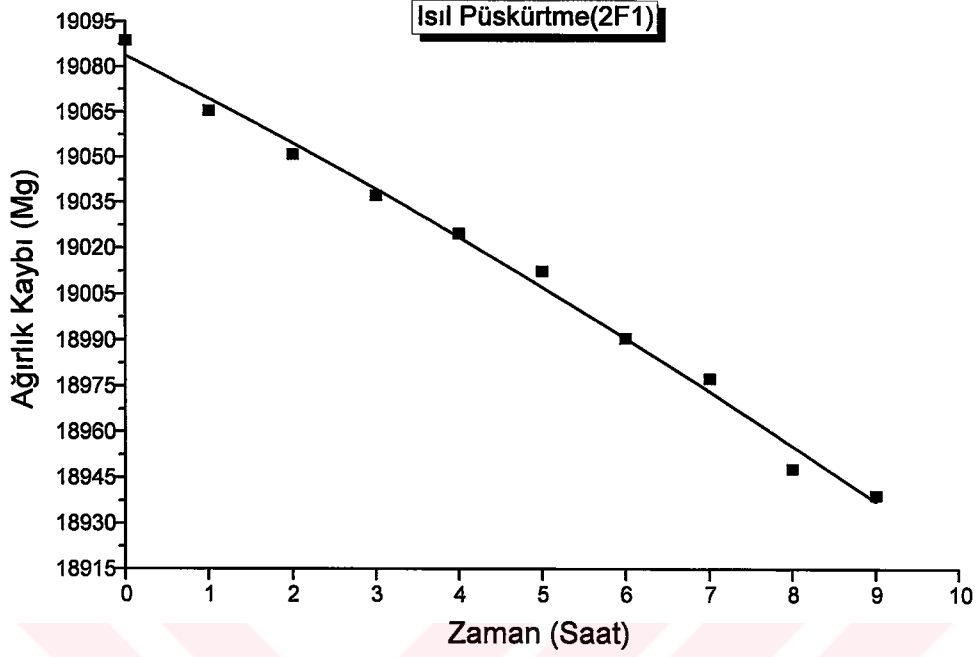
Şekil 7.30 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F1) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



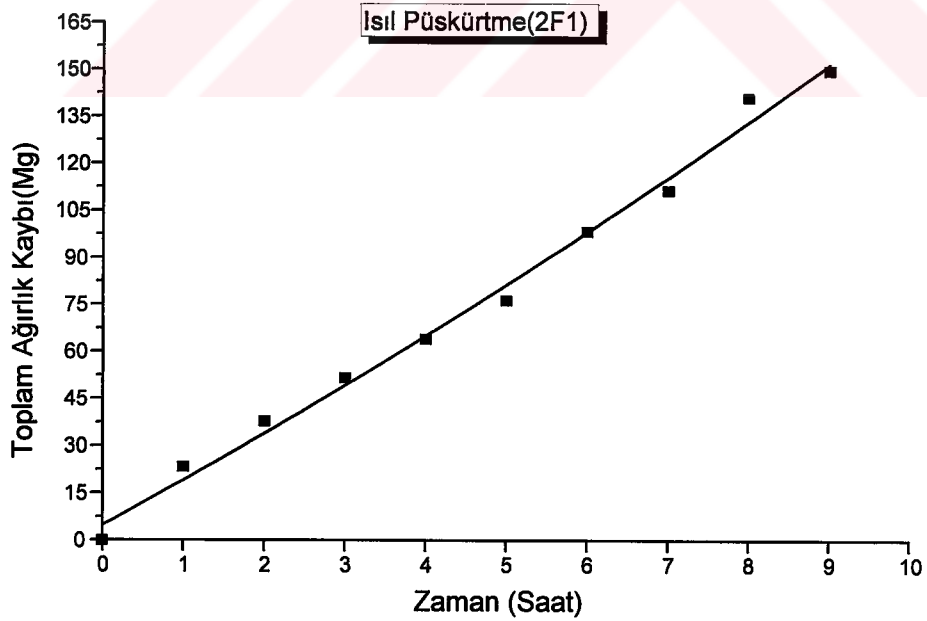
Şekil 7.31 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F2) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



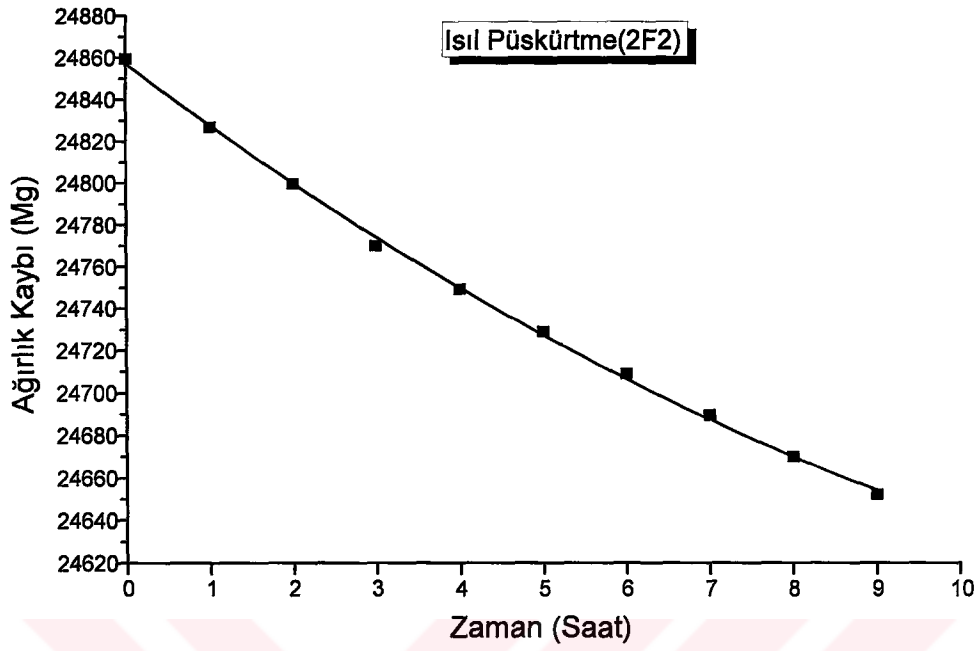
Şekil 7.32 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F2) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



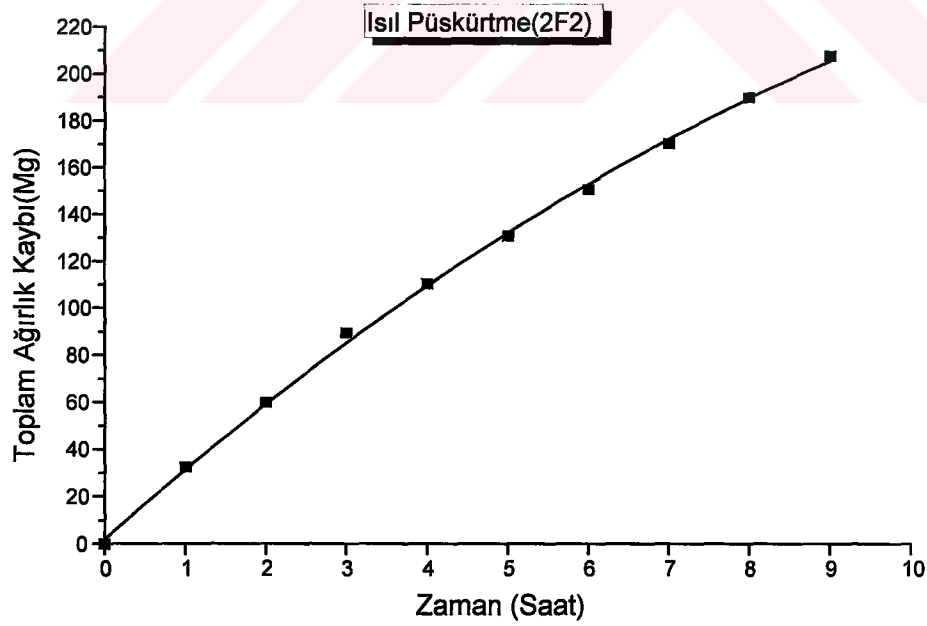
Şekil 7.33 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F1) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



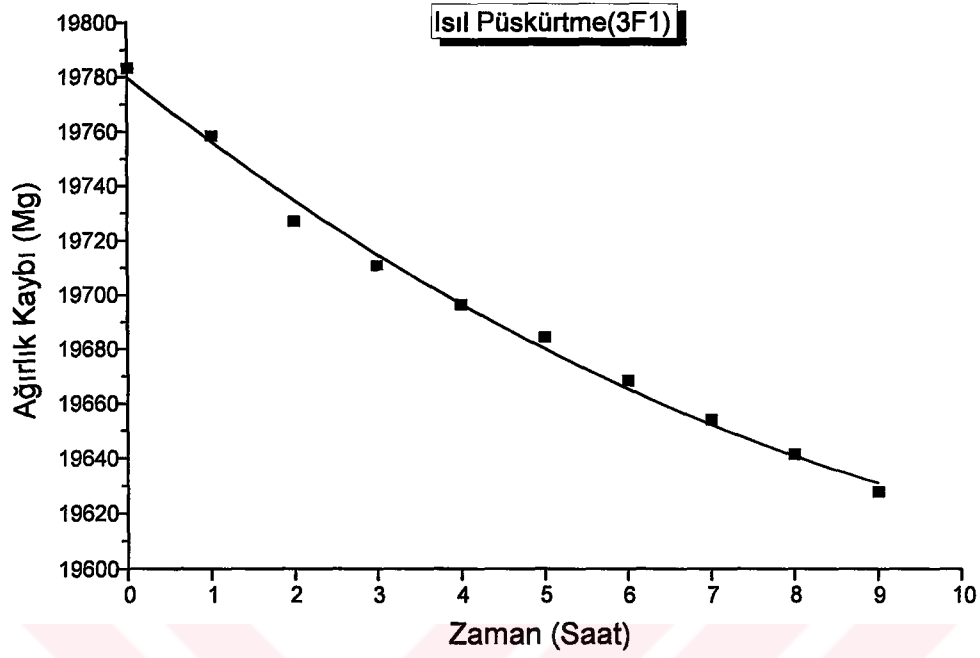
Şekil 7.34 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F1) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



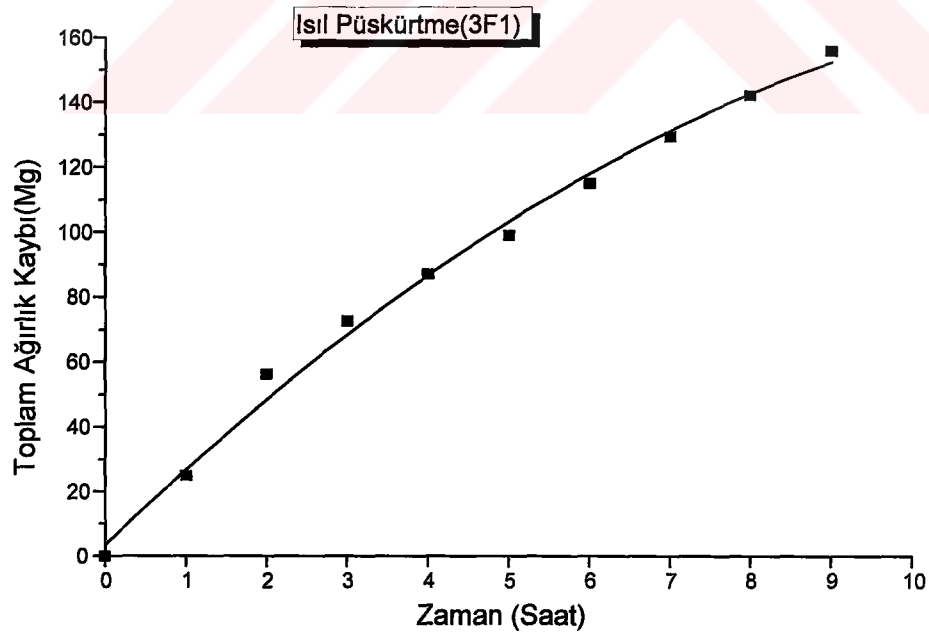
Şekil 7.35 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F2) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



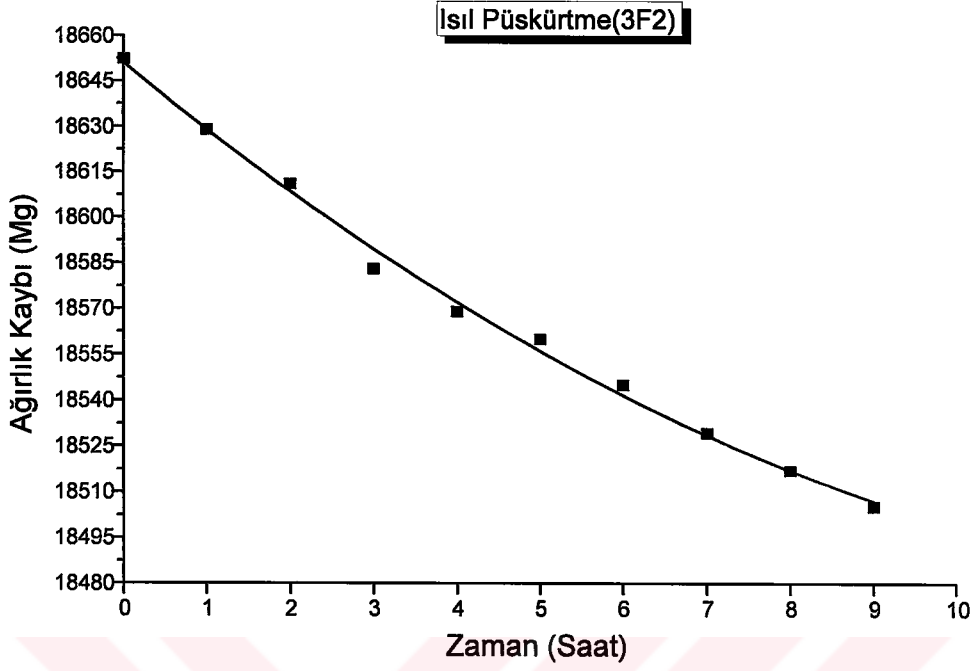
Şekil 7.36 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F2) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



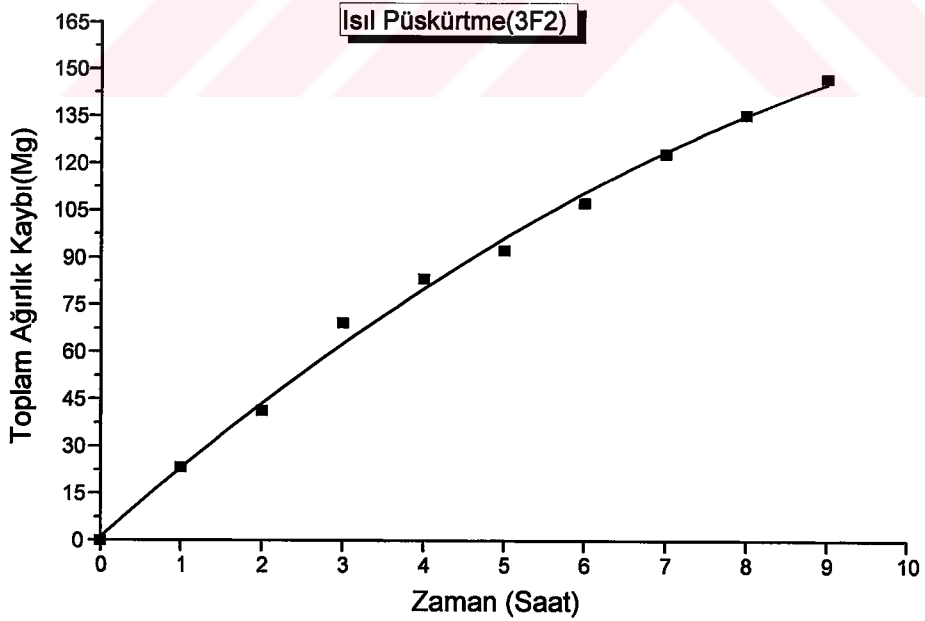
Şekil 7.37 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F1) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



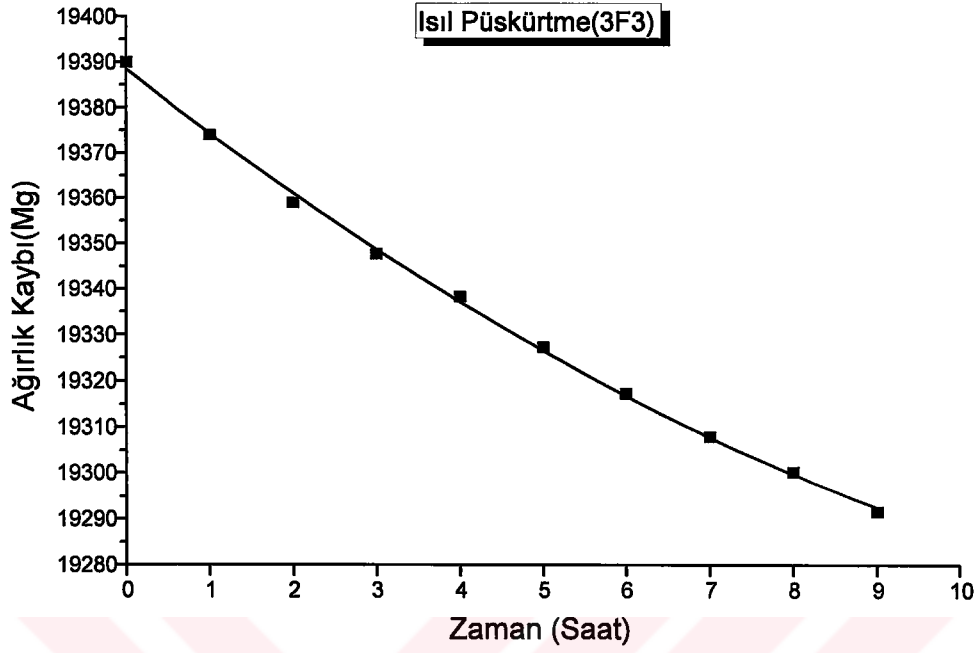
Şekil 7.38 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F1) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



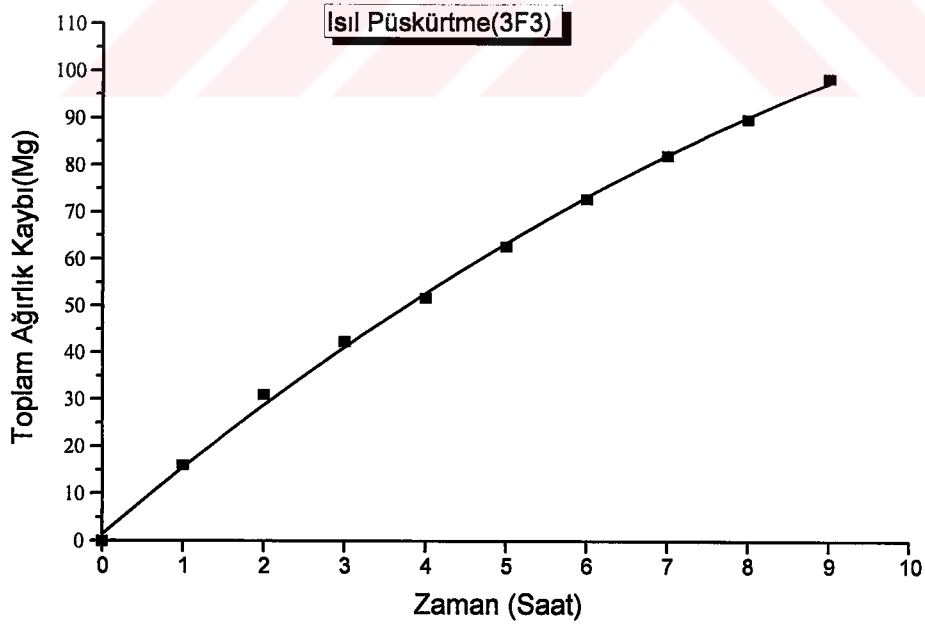
Şekil 7.39 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F2) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



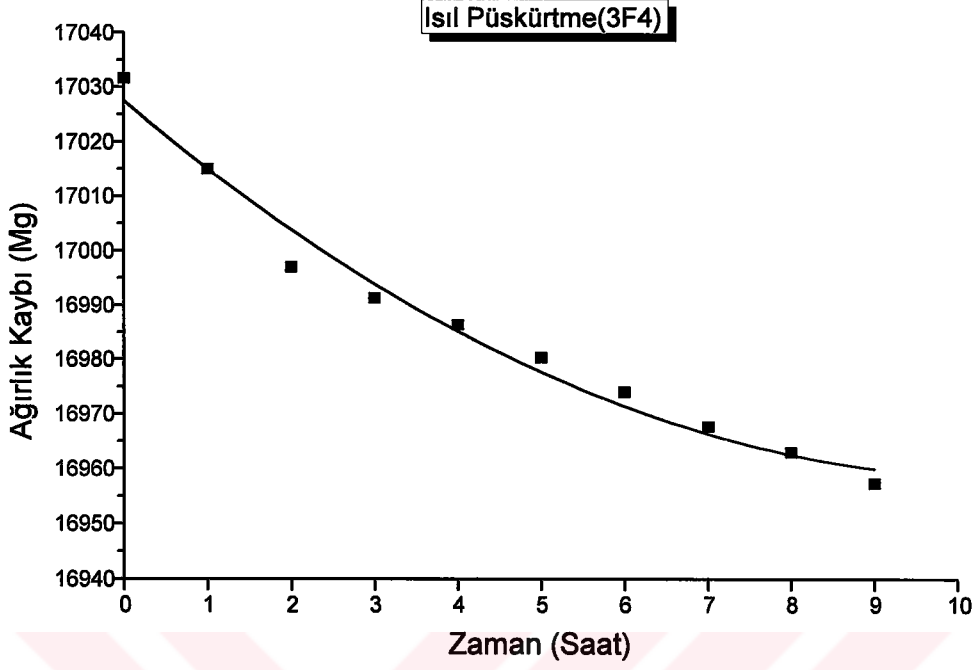
Şekil 7.40 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F2) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



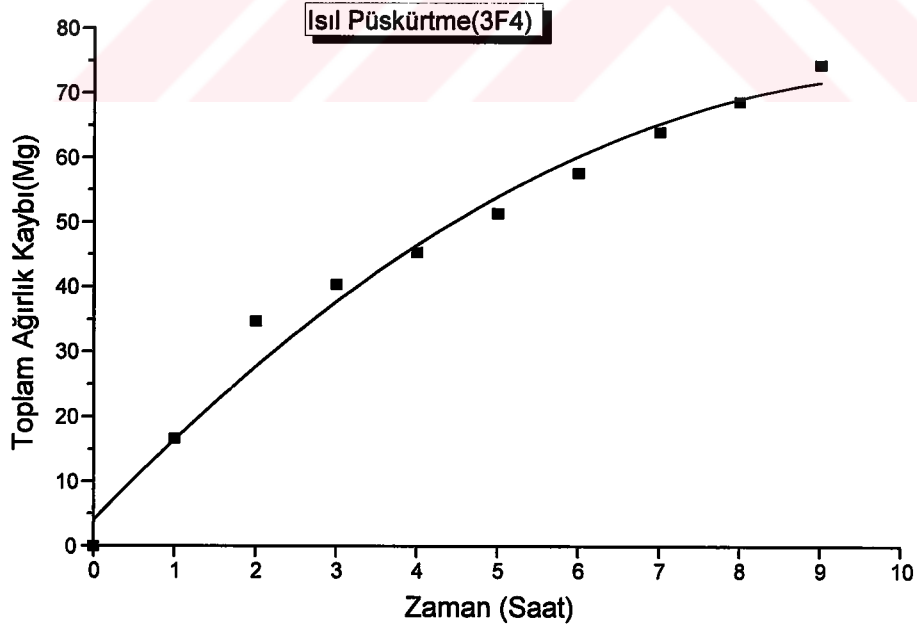
Şekil 7.41 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F3) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



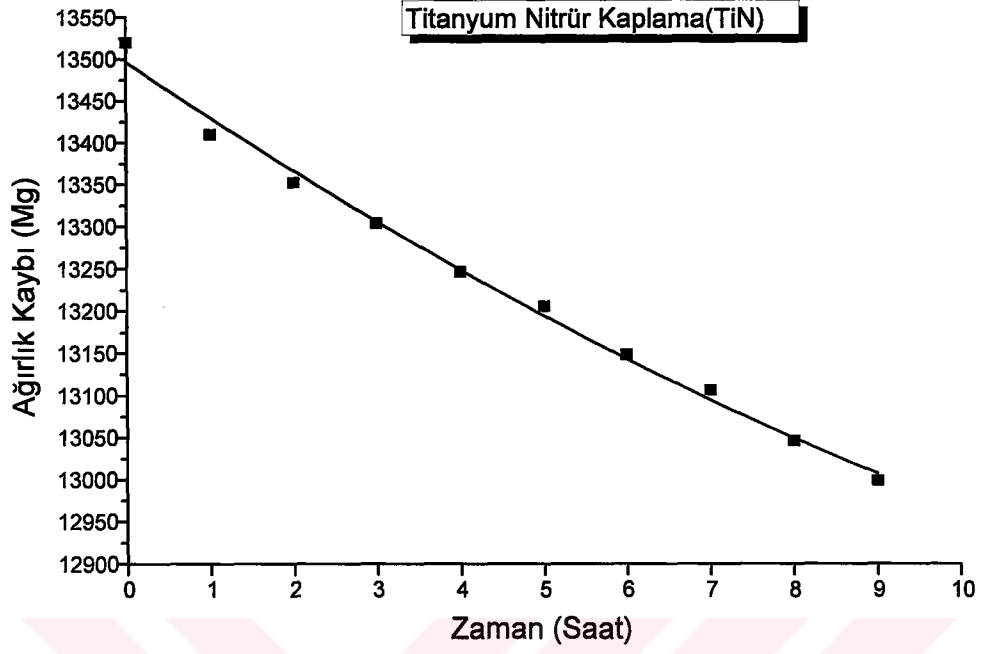
Şekil 7.42 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F3) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



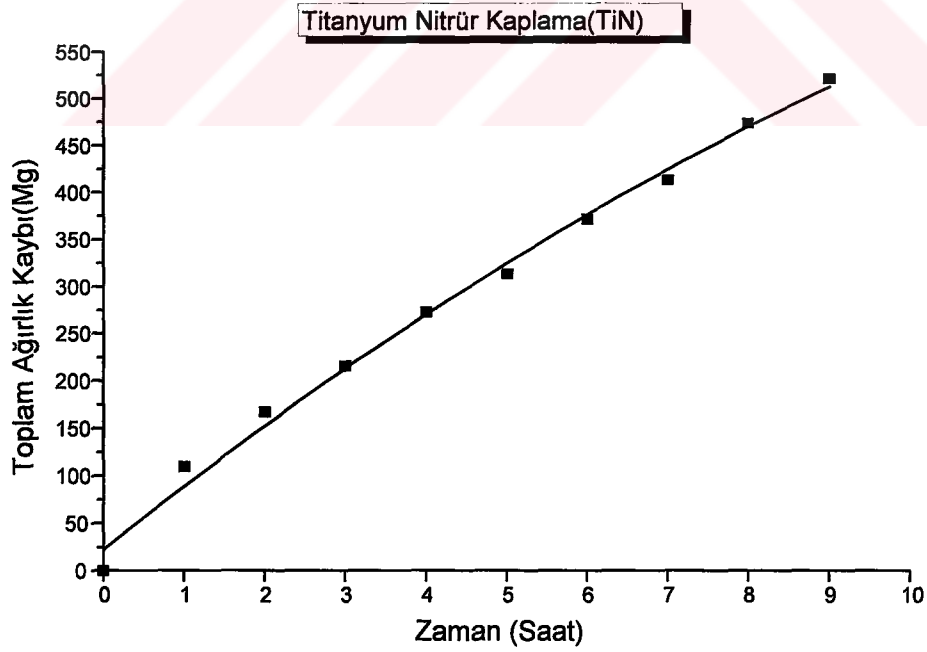
Şekil 7.43 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F4) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



Şekil 7.44 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F4) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.



Şekil 7.45 Titanyum nitrür kaplı (TiN) numuneye ait ağırlık kaybı-zaman değişimi.



Şekil 7.46 Titanyum nitrür kaplı (TiN) numuneye ait toplam ağırlık kaybı-zaman değişimi.

Şekil 7.1-7.46' daki ağırlık kaybı-zaman ve toplam ağırlık kaybı-zaman eğrilerinde, her bir zamana karşılık gelen ağırlık kaybı veya toplam ağırlık kaybı değerleri, her bir numune için aynı şartlarda aşındırılmış olan toplam dört adet numuneden elde edilen ağırlık kaybı veya toplam ağırlık kaybı değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında numunenin kırılarak hasara uğradığı bazı gruplarda ise kalan diğer numunelerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Şekil 7.1-7.46' daki eğrilerin tamamında ortak olan özellik, numunelerin zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarında bir azalmanın olduğu ve toplam ağırlık kayıplarında ise sürekli bir artışın olduğu görülmektedir. Ancak, ağırlık kayıplarındaki azalma veya toplam ağırlık kayıplarındaki artma deney süresinin ilk zamanlarında hızlı bir şekilde meydana gelmekte buna karşılık, deney süresinin sonlarına doğru artış veya azalma hızında bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni; malzeme yüzeyinde aşınma sonucu meydana gelen soğuk sertleşme etkisi ile aşındırıcı taneciklerin deney süresi boyunca kendi aralarında birbirleri ile olan etkileşimi sonucu tane boyutunun azalması etkisine dayandırılabilir.

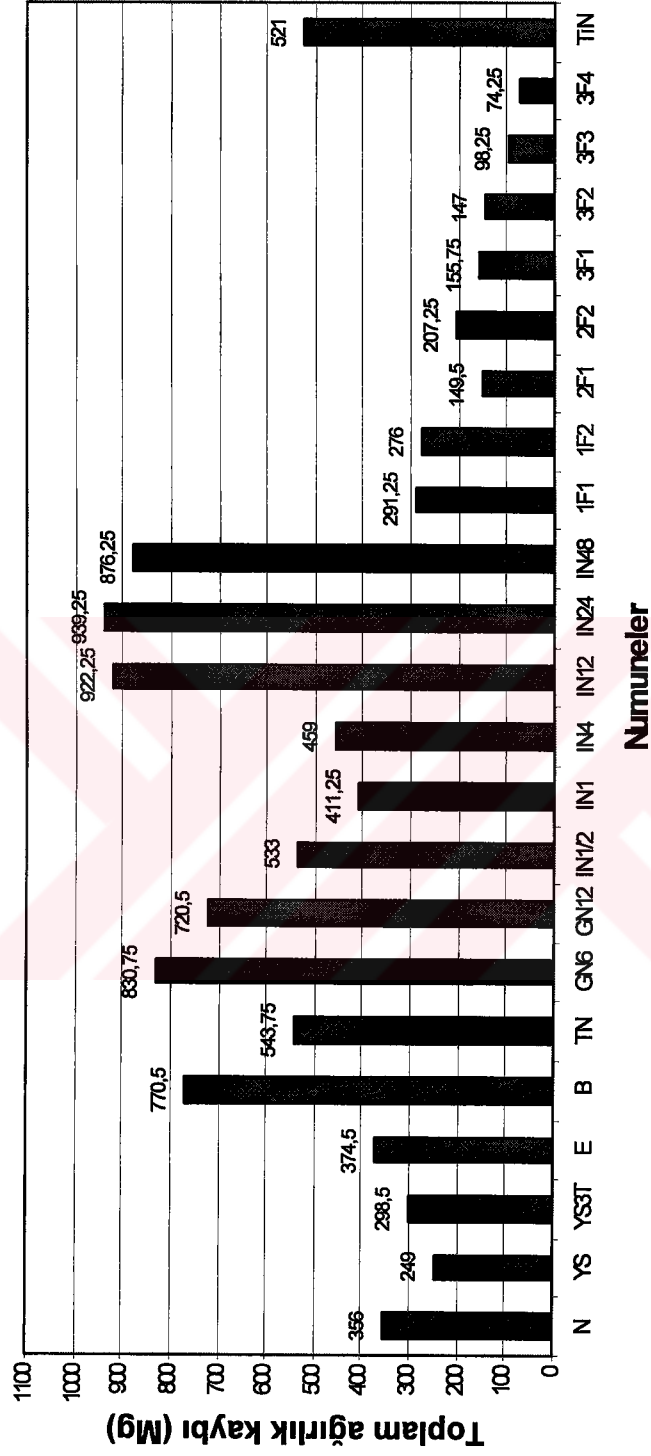
Bölüm 5' de de belirtildiği gibi esas metale (ana malzemeye) uygulanan işlemler 4 gruba ayrılmaktadır. Bu işlemler; yağda soğutma, yağda soğutma ve 300°C'de temperleme gibi bilinen ısı işlemler, kimyasal bileşim değiştirilmeksizin malzeme yüzeyinin mikroyapısının değiştirildiği endüksiyon sertleştirme, kimyasal bileşim ve mikroyapının her ikisinin de değiştirildiği nitrürleme ve borlama işlemleri (termokimyasal işlemler) ile yüzeye ilave kaplamanın yapıldığı ısıl püskürtme ve PVD kaplama şeklinde gruplandırılabilir. Bütün bu işlemlerin 10. saat sonundaki toplam ağırlık kayıpları toplu halde Şekil 7.47' de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere; bilinen ısı işlemler olan yağda soğutulmuş (YS), yağda soğutulma+300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneler ve ısıl püskürtme ile kaplama yapılmış (1F1, 1F2, 2F1, 2F2, 3F1, 3F2, 3F3, 3F4) numuneler esas metalden daha düşük aşınma göstermişlerdir. Bu numunelerden özellikle HVOF ve HVOF+ergitme işlemi uygulanmış numuneler esas

metale göre oldukça düşük aşınma miktarı göstermişlerdir. Buna karşın, termokimyasal yüzey işlemi uygulanmış numuneler (B, GN6, GN12, TN, IN1/2, IN1, IN4, IN12, IN24, IN48) ile fiziksel buhar çökelme (PVD) ile titanyum nitrür kaplı numune (TiN) ve endüksiyon sertleştirme işlemi yapılmış numune esas metalden daha fazla aşınma göstermiştir.

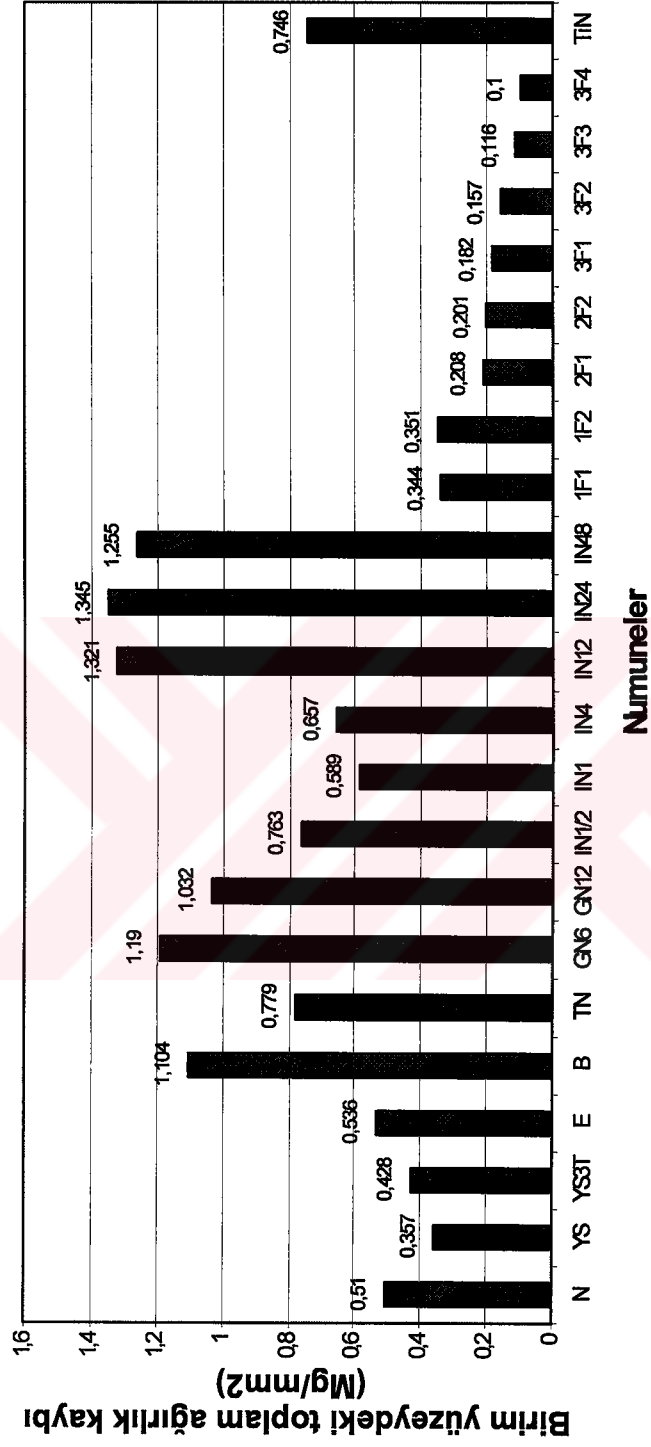
Özellikle ısı püskürtme ile kaplama yapılmış numunelerdeki aşınma yüzeyi alanı, diğer numunelerdeki aşınma yüzeyi alanından farklı olduğundan ve bu durumun Şekil 7.47' deki karşılaştırma işleminin hassasiyetini etkileyebileceği düşünülerek esas metal ve diğer bütün işlem uygulanmış numunelerin 10. saat sonundaki toplam ağırlık kayıpları, birim yüzey alanına bölünerek elde edilen mg/mm^2 şeklindeki toplam ağırlık kayıpları bütün numuneler için toplu halde Şekil 7.48' de gösterilmiştir.

Şekil 7.48' den de görüleceği gibi toplam ağırlık kaybı miktarı birim yüzey alanına bölündüğünde sadece ısı püskürtme ile kaplama yapılmış yüzey işlemi grubundaki numunelerin göstermiş olduğu aşınma miktarlarında değişiklik görülmektedir. Diğer gruplarda ise yüzey alanında farklılık olmadığı için aşınma miktarlarında da herhangi bir farklılık görülmemektedir.

Şekil 7.47 incelendiğinde; yağda soğutma ısı işlemi yapılmış numunenin (YS), ısı püskürtme ile kaplama yapılmış 1F1 ve 1F2 deney kodlu numunelerden daha az aşınma miktarı gösterdiği ayrıca, 1F1 numunesinin 1F2 numunesinden ve 2F2 numunesinin de 2F1 numunesinden daha fazla aşındığı görülmektedir. Ancak, aşınma miktarı birim yüzey alanına bölündüğünde (Şekil 7.48), yağda soğutma ısı işlemi yapılmış numunenin 1F1 ve 1F2 numunesinden daha çok aşınma miktarı gösterdiği, 1F1 numunesinin 1F2 numunesinden ve 2F2 numunesinin de 2F1 numunesinden daha az aşındığı görülmektedir. Esas metalin aşınma miktarını azaltmak amacı ile uygulanan işlemlerin arasında en etkili olanı ısı püskürtme ile kaplama tabakası oluşturma işlemidir. Yine Şekil 7.48' den görüleceği gibi, esas metalin gösterdiği birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı, yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme (HVOF) işlemi uygulanmış numune (3F3)



Şekil 7.47 Aşınmış numunelerin 10. saat sonundaki toplam ağırlık kayıpları.



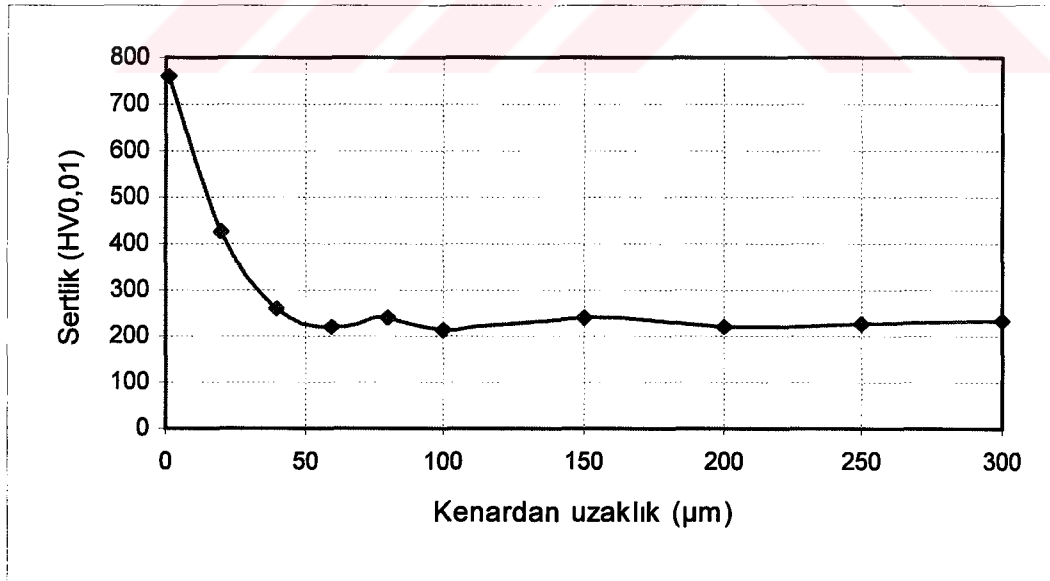
Şekil 7.48 Aşınmış numunelerin 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kayıpları.

ile %76 oranında, HVOF+ergitme işlemi uygulanmış numune (3F4) ile de %80 oranında azalmıştır. Ayrıca, ısıl püskürtme yöntemleri içinde esas metalin aşınma miktarını azatmada etkili yöntemler olarak HVOF+ ergitme işlemi ilk sırada yer alırken bu yöntemi HVOF, alev ile püskürtme+ ergitme ve alev ile püskürtme yöntemleri izlemektedir.

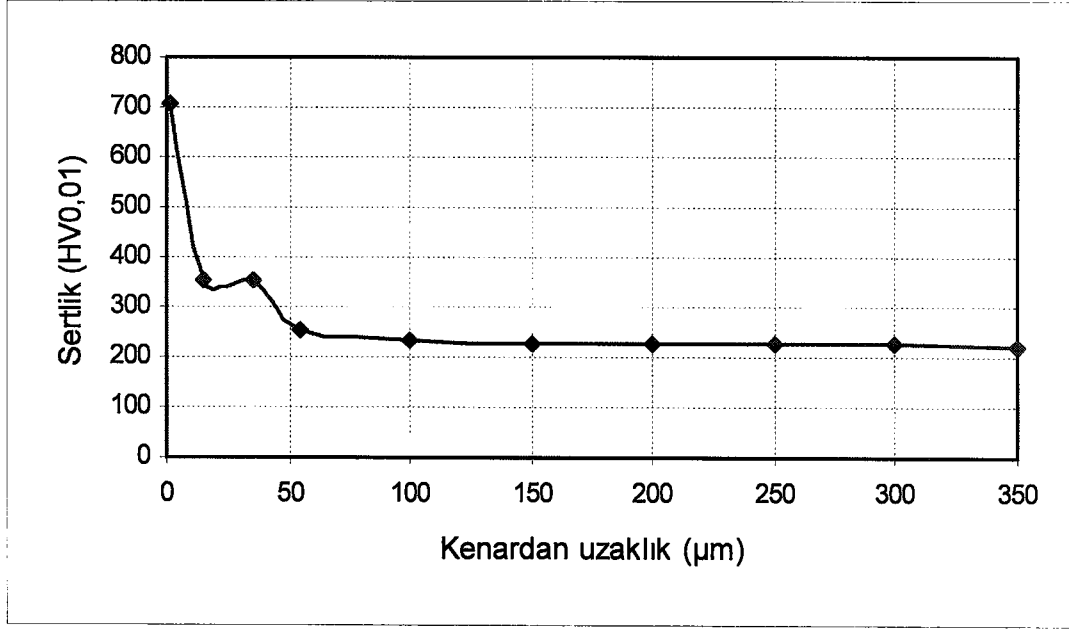
7.2 Sertlik Deneyleri Sonuçları

Numunelerin sertlik değerleri belirlenirken; IN1/2, IN1, IN4, IN12, IN24, IN48, GN6, GN12, TN, B ve TiN kodlu deney parçalarında en dış kenardan merkeze doğru belirli aralıklarla sertlik ölçümleri yapılırken N, YS, YS3T, E, 1F1, 1F2, 2F1, 2F2, 3F1, 3F2, 3F3, 3F4 deney kodlu numunelerde ise deney parçasının sadece yüzey sertlik değeri belirlenmiştir.

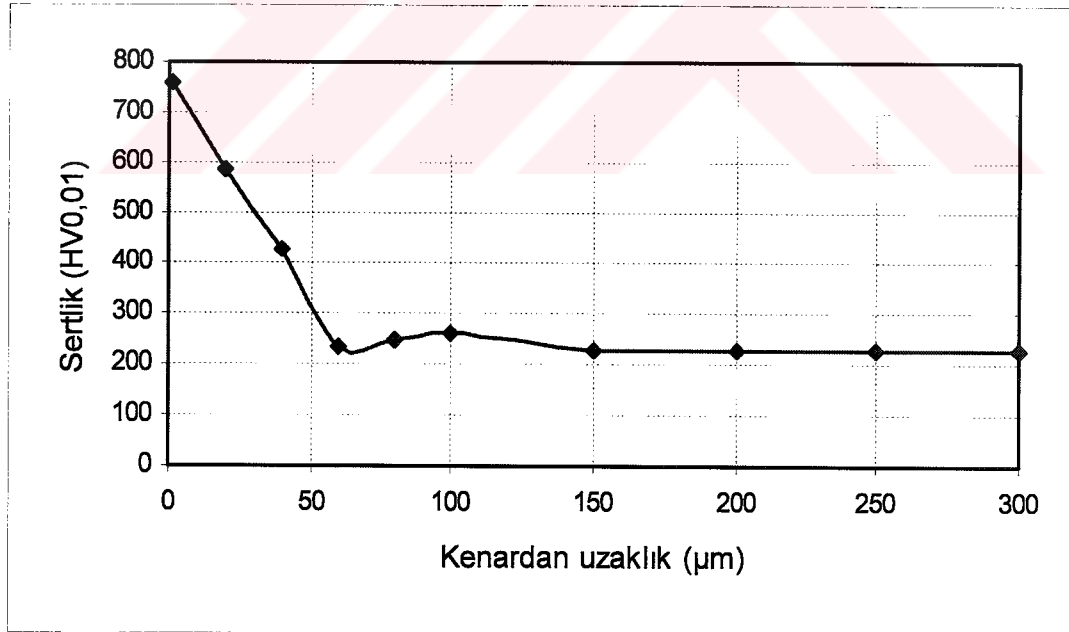
Aşınma deneyi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri Ek B' de Tablo B1 ve Tablo B2' de görülmektedir. Sertlik taraması sonuçları ise Şekil 7.49 – Şekil 7.59' da görülmektedir. Şekil 7.60' da da bütün numuneler yüzey sertliklerine göre birarada gösterilmiştir.



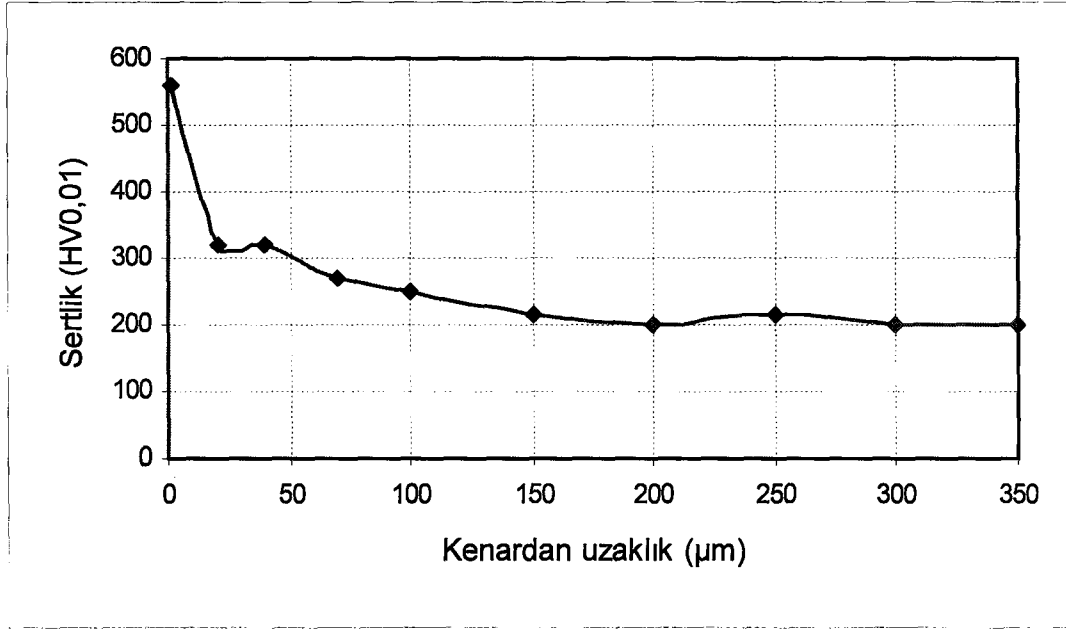
Şekil 7.49 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1/2) numuneye ait sertlik taraması.



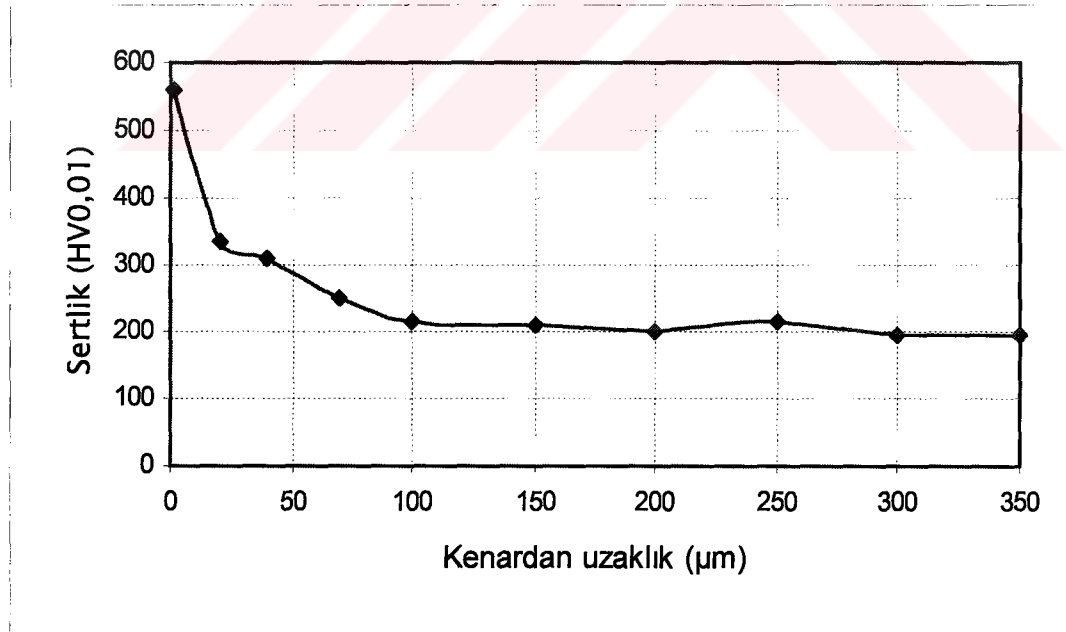
Şekil 7.50 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1) numuneye ait sertlik taraması.



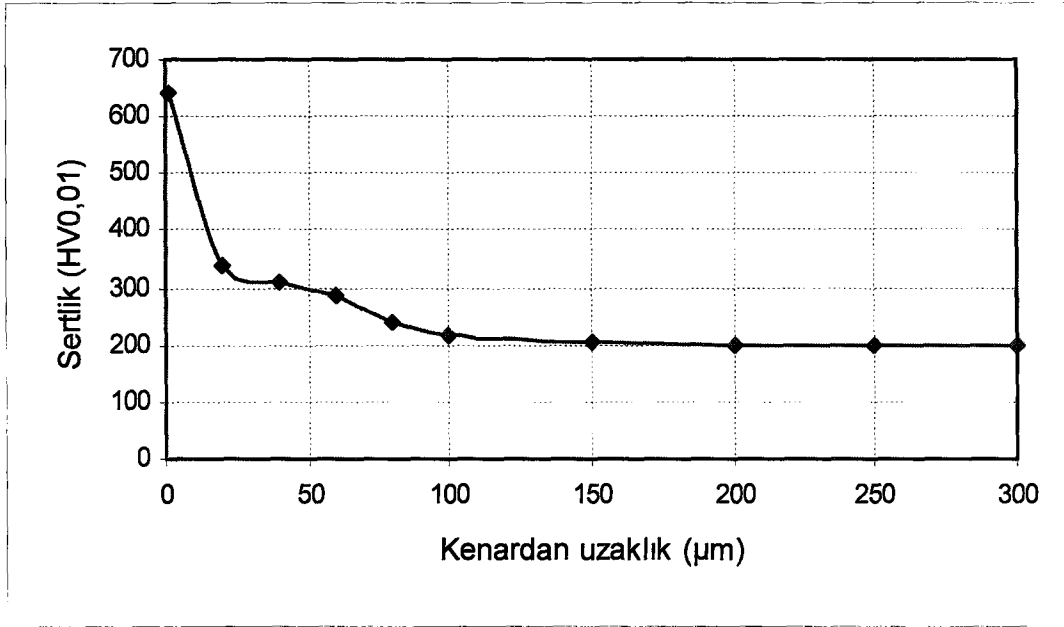
Şekil 7.51 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN4) numuneye ait sertlik taraması.



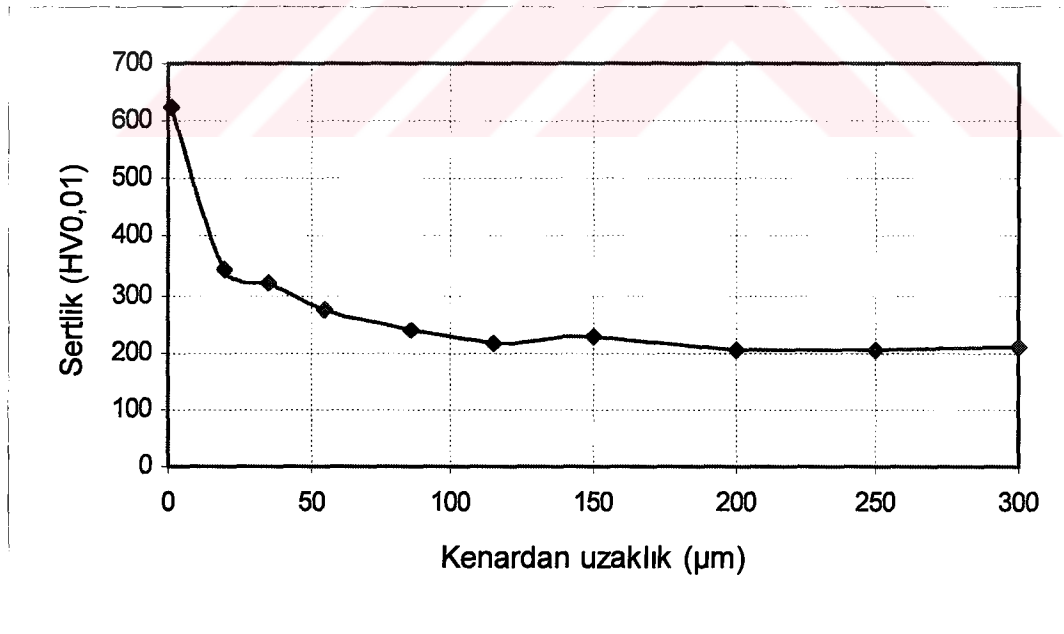
Şekil 7.52 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN12) numuneye ait sertlik taraması.



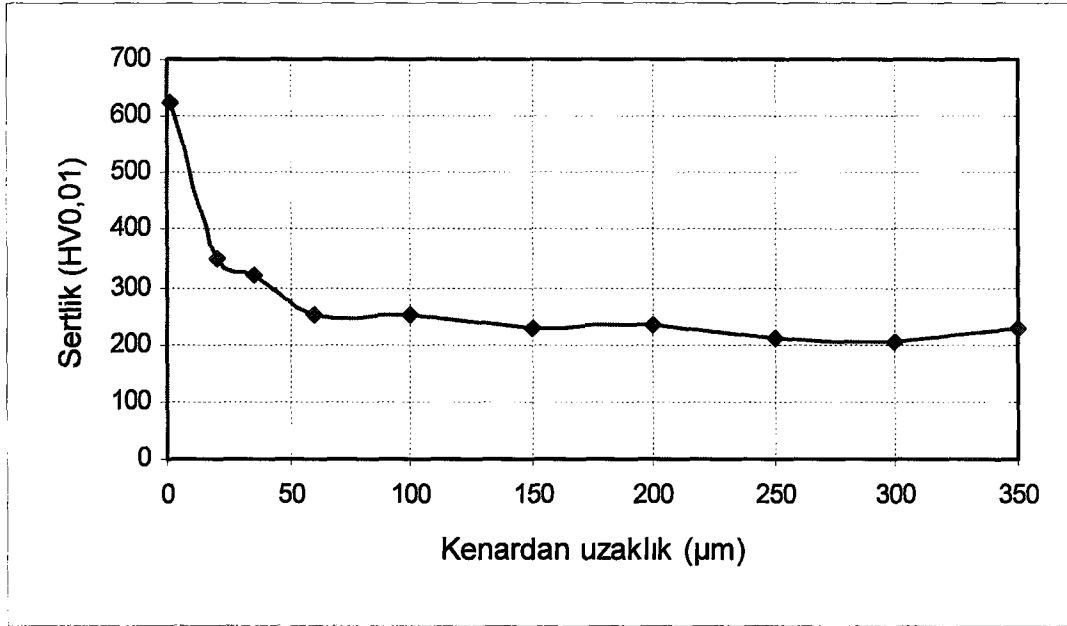
Şekil 7.53 Plazma(iyon) nitrürlenmiş (IN24) numuneye ait sertlik taraması.



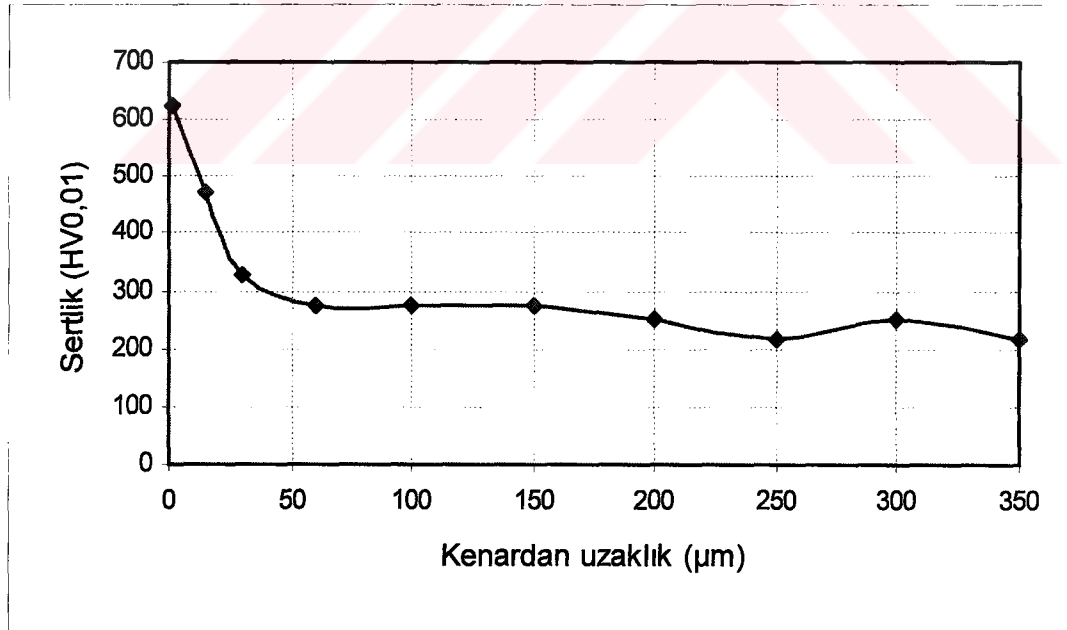
Şekil 7.54 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN48) numuneye ait sertlik taraması.



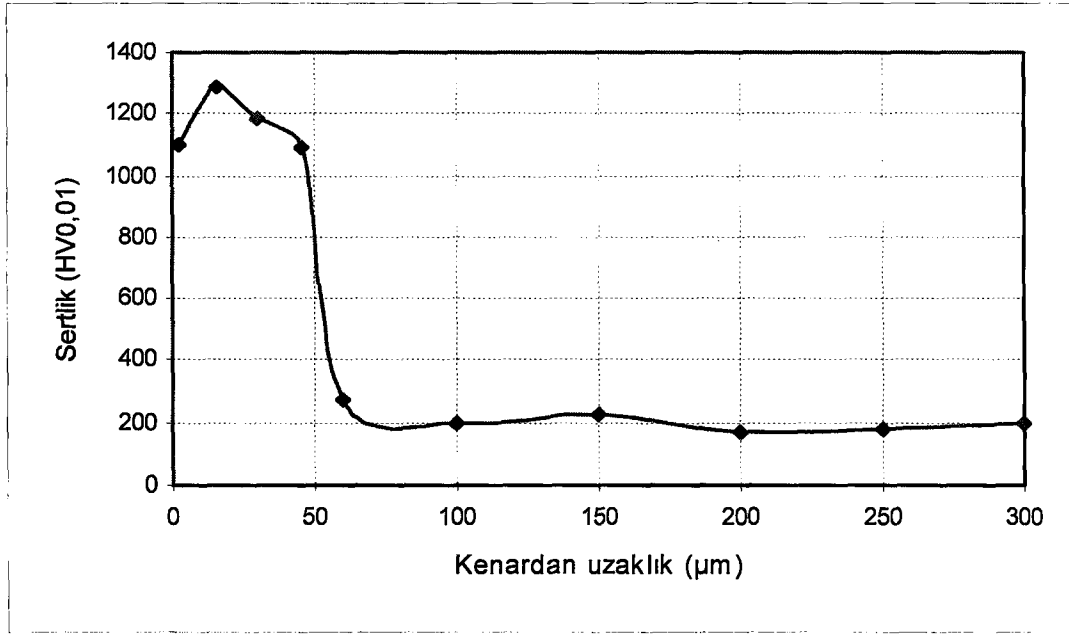
Şekil 7.55 Gaz ortamında nitrülenmiş (GN6) numuneye ait sertlik taraması.



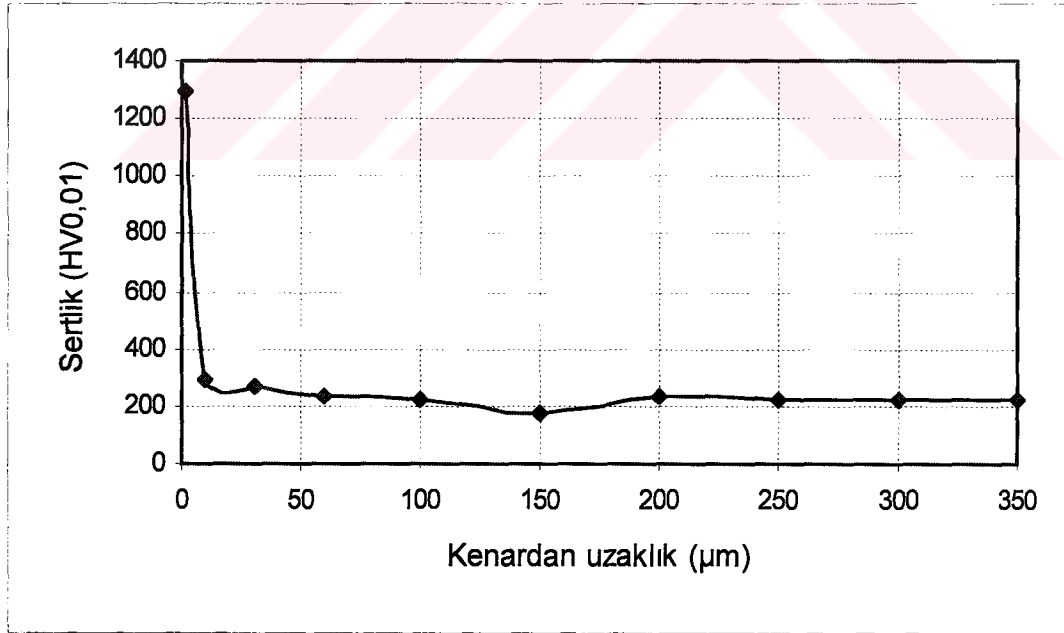
Şekil 7.56 Gaz ortamında nitrülenmiş (GN12) numuneye ait sertlik taraması.



Şekil 7.57 Tuz banyosunda nitrülenmiş (TN) numuneye ait sertlik taraması.



Şekil 7.58 Borlanmış(B) numuneye ait sertlik taraması.

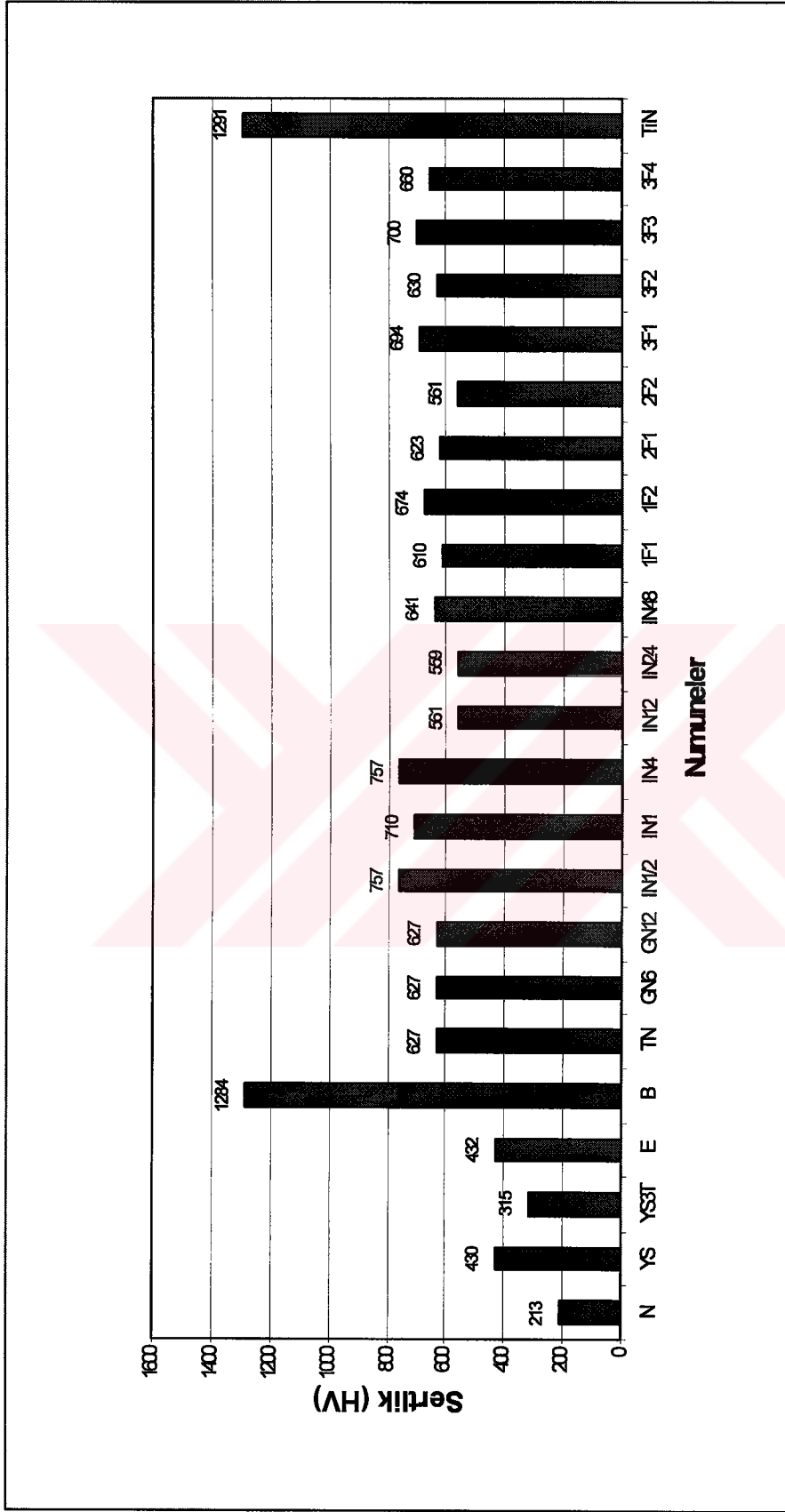


Şekil 7.59 Titanyum nitrür kaplanmış (TiN) numuneye ait sertlik taraması.

Yapılan sertlik taraması sonuçlarından da görüleceği gibi; plazma nitrürleme işlemi uygulanmış numunelerde, en az sertlik derinliğinin ($\sim 20\mu\text{m}$) 30 dakika süre ile plazma nitrürlenmiş numunede (IN1/2), en fazla sertlik derinliğinin ($\sim 40\mu\text{m}$) ise 12, 24 ve 48 saat süre ile plazma nitrürlenmiş (IN12, IN24, IN48) numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 7.49-7.54). Gaz ortamında nitrürlenmiş her iki numunede (GN6 ve GN12) de elde edilen sertlik derinliği aynı olup yaklaşık $35\mu\text{m}$ ' dir (Şekil 7.55-7.56). Tuz banyosunda nitrürlenmiş numunede meydana gelen sertlik derinliği ise yaklaşık $30\mu\text{m}$ ' dir (Şekil 7.57).

Borlama işlemi uygulanmış numunede ise en fazla sertlik derinliği elde edilmiş olup yaklaşık $50\mu\text{m}$ ' dir (Şekil 7.58). Aslında, her üç nitrürleme yönteminde ve borlama işleminde elde edilen sertlik derinliği değerleri düşük olup bunun nedeni malzemenin kimyasal bileşimi ile yakından ilgilidir. Deneylerin tamamında kullanılan ve aşınması incelenen ana malzeme yalın karbonlu (%0,5C) olduğundan ve alaşım elementi içermediğinden elde edilen sertlik derinliği de düşük olmaktadır.

Deneylerde kullanılan bütün malzemeler, yüzey sertliklerine göre birarada Şekil 7.60' da görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi bütün numunelerin yüzey sertlikleri aşınması incelenecek malzemeden yani esas metalden daha yüksektir. PVD yöntemi ile titanyum nitrür kaplanmış numune ile borlama işlemi uygulanmış numune en fazla yüzey sertliğine sahiptir. Isıl püskürtme ile kaplama yapılmış numuneler arasında yüzey sertliği bakımından büyük bir farklılık bulunmamaktadır. Yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme ve endüksiyon sertleştirme şeklinde ısıtılma işlemi uygulanmış numuneler ise diğer gruplara göre yani borlama, nitrürleme, ısıtılma püskürtme gibi yöntemler ile karşılaştırıldığında daha düşük yüzey sertliğine sahiptir. Bilinen ısıtılma işlemi uygulanmış numuneler, kesitleri boyunca tamamen sertleştiklerinden ayrıca sertlik taraması yapılmamıştır.



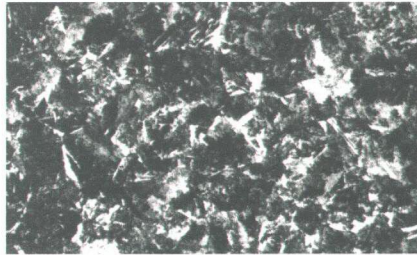
Şekil 7.60 Deneylerde kullanılan bütün numunelerin sertlik değerleri.

480°C' de 12, 24 ve 48 saat süre ile plazma nitrülenmiş numuneler, 500°C' de 1/2, 1 ve 4 saat süre ile plazma nitrüleme işlemi uygulanmış numunelerden daha düşük sertlik değeri göstermiştir. Bunun nedeni ise işlem sıcaklığı ile ilgili olup literatürle de uyumluluk göstermiştir. Plazma nitrüleme işleminde elde edilen yüzey sertliği, 500°C' ye kadar yapılan işlem sıcaklıklarında, işlem sıcaklığındaki artış ile birlikte artarken bu sıcaklıktan sonra işlem sıcaklığındaki artış ile birlikte yüzey sertliğinde düşüş görülmektedir[122, s48]. Buna ek olarak 12, 24 ve 48 saat gibi uzun süreli plazma nitrüleme işlemi sonrasında da malzemede temperleme etkisi ile beraber sertlik düşüşü görülmektedir.

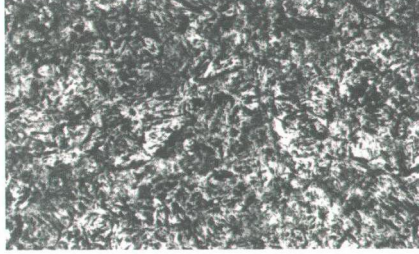
7.3 Metalografi Sonuçları

Sertlik taraması işlemleri için metalografik olarak hazırlanmış numunelerde, işlem özeliğine bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal değişiklikleri belirlemek amacı ile yapılan metalografik hazırlıklardan sonra çekilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.61-7.75' de verilmiştir. Isıl püskürtme ile kaplama yapılmış numunelerde ise çekilen makrofotoğraflar Şekil 7.76-7.83'de verilmiştir.

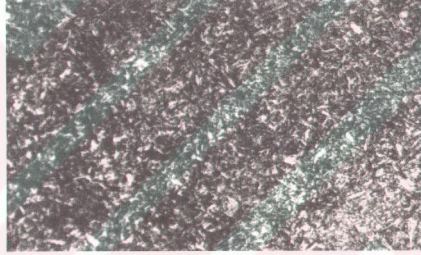
Mikroyapı fotoğraflarından da görülebileceği gibi nitrüleme işlemi uygulanmış numunelerde, işlemin özeliği sonucu malzeme yüzeyinde pullanma biçiminde aşınmaya yol açan son derece gevrek beyaz tabaka



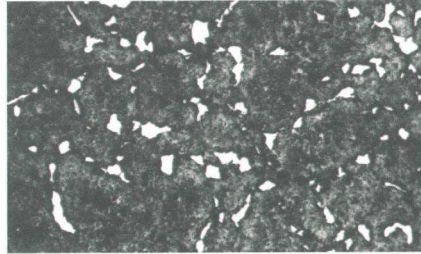
Şekil 7.61 Esas metale (N) ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



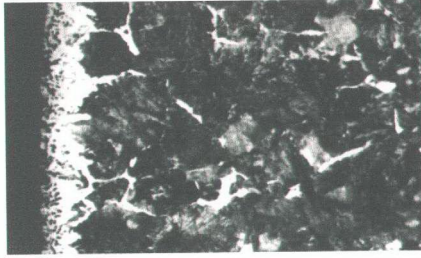
Şekil 7.62 Yağda soğutulmuş (YS) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



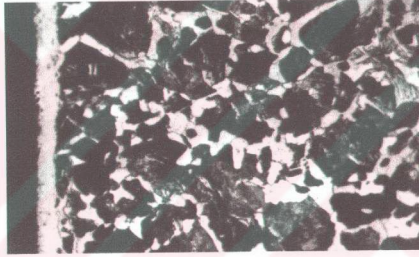
Şekil 7.63 Yağda soğutulmuş ve 300°C' de temperlenmiş (YS3T) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



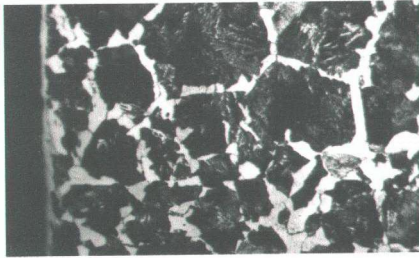
Şekil 7.64 Endüksiyon ile sertleştirilmiş (E) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



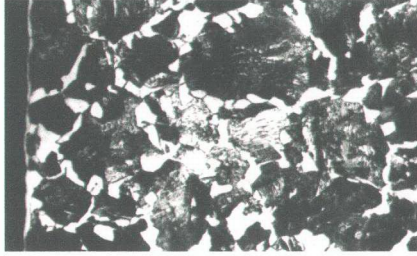
Şekil 7.65 Borlanmış (B) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



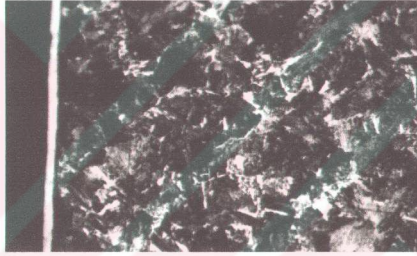
Şekil 7.66 Tuz banyosunda nitrülenmiş (TN) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



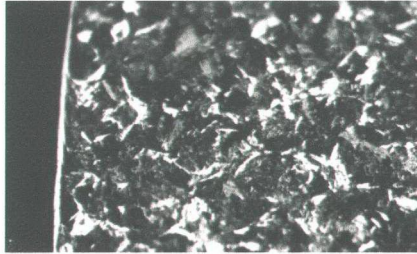
Şekil 7.67 Gaz ortamında nitrülenmiş (GN6) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



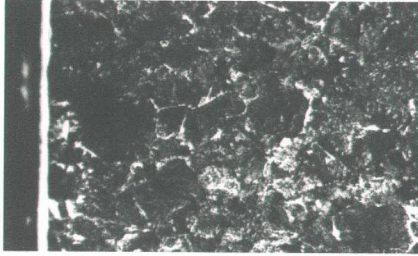
Şekil 7.68 Gaz ortamında nitrülenmiş (GN12) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



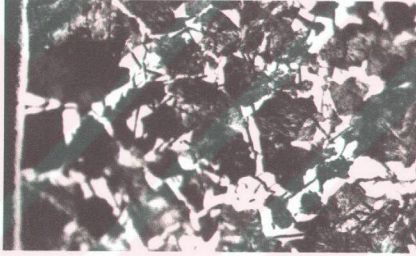
Şekil 7.69 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1/2) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



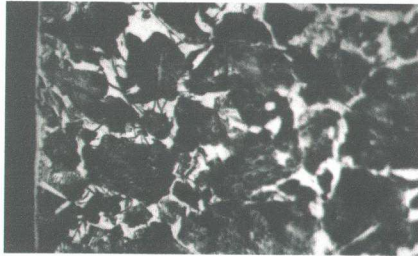
Şekil 7.70 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN1) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



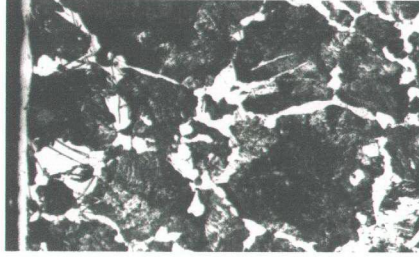
Şekil 7.71 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN4) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



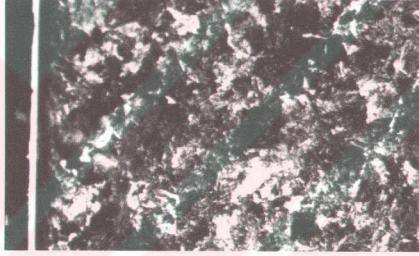
Şekil 7.72 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN12) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).



Şekil 7.73 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN24) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).

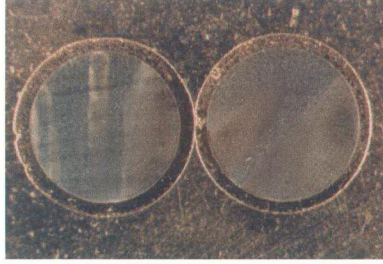


Şekil 7.74 Plazma (iyon) nitrülenmiş (IN48) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).

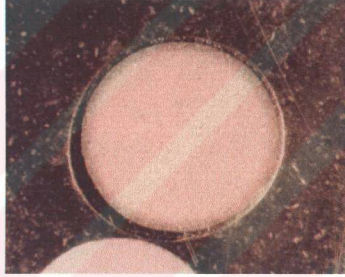


Şekil 7.75 Titanyum nitrür kaplı (TiN) numuneye ait mikroyapı fotoğrafı (325X).

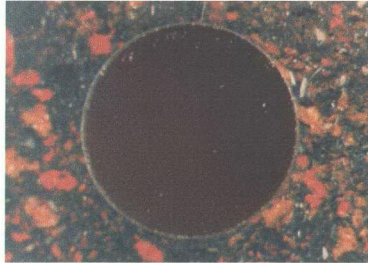
oluşmuştur. Beyaz tabakanın numune kesitinde eşit kalınlıkta olmamasından dolayı tabaka kalınlığının tam olarak hassas bir şekilde ölçümü mümkün olamamıştır. Bu nedenle beyaz tabaka kalınlığının belirli sınırlar arasında yaklaşık olarak belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Tuz banyosunda yapılan nitrüleme işleminde meydana gelen beyaz tabaka kalınlığının (10-12 μ m) gaz ortamında 6 ve 12 saat nitrüleme yapılmış numunelerde meydana gelen beyaz tabakadan (8-9 μ m) daha kalın olduğu belirlenmiştir. 1/2, 1 ve 4 saat süre ile plazma plazma nitrülenmiş numunelerde elde edilen beyaz tabaka kalınlığı 3-4 μ m iken 12, 24 ve 48 saat süre ile plazma nitrülenmiş numunelerde ise biraz daha kalın olmakla birlikte yaklaşık olarak 6-7 μ m ' dir.



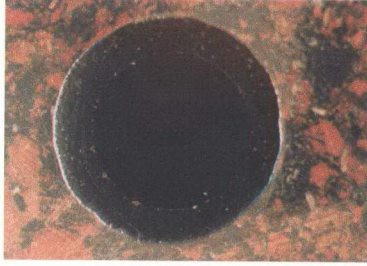
Şekil 7.76 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: $\sim 700\mu\text{m}$).



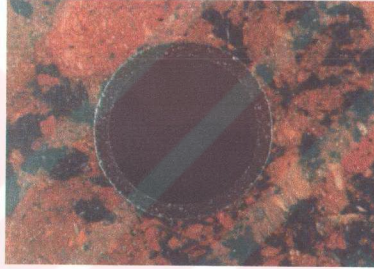
Şekil 7.77 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: $\sim 420\mu\text{m}$).



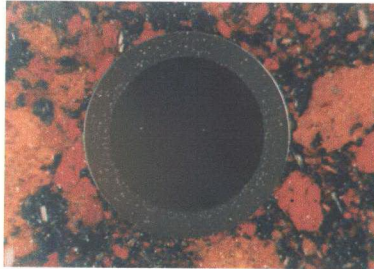
Şekil 7.78 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: $\sim 105\mu\text{m}$).



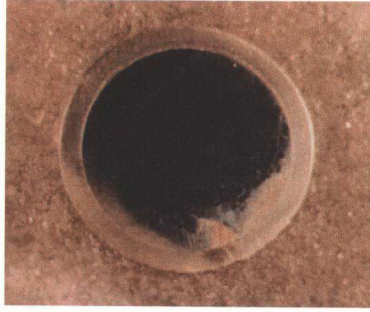
Şekil 7.79 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: ~1550 μ m).



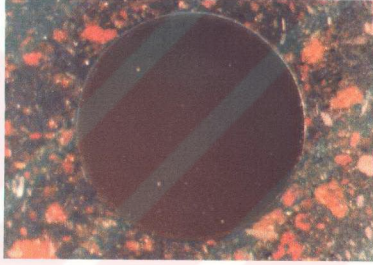
Şekil 7.80 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F1) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: ~750 μ m).



Şekil 7.81 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F2) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: ~1100 μ m).



Şekil 7.82 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F3) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: ~700 μ m).



Şekil 7.83 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F4) numuneye ait makroyapı fotoğrafı (kaplama kalınlığı: ~200 μ m).

Bunun aksine borlama işleminde ise malzeme yüzeyinde meydana gelen demir borür tabakası kalınlığı her üç nitrürleme yöntemlerinde meydana gelen beyaz tabaka ile karşılaştırıldığında oldukça kalın olup yaklaşık olarak 70-90 μ m kalınlığındadır. PVD yöntemi ile titanyum nitrür kaplanmış numunede ise malzeme yüzeyinde meydana gelen TiN tabakası kalınlığı ise çok az olup yaklaşık olarak 1 μ m dir. Isıl püskürtme yöntemi ile kaplama tabakası yapılmış numunelerdeki kaplama kalınlığı, numune kesitinde eşit kalınlıkta olmadığından birkaç yerden ölçülen kaplama kalınlığının ortalaması alınarak belirlenmiştir. Isıl püskürtme yöntemleri kullanılarak kaplama tabakası yapılmış numunelerde oluşturulan tabaka kalınlığı 105 μ m-1.55 mm aralığında değişmektedir.

Esas metale ait mikroyapı fotoğrafı ile (Şekil 7.61) termokimyasal yüzey işlemlerinin uygulanmış olduğu numunelere ait mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında (Şekil 7.65-7.74) dikkati çeken en önemli nokta tane boyutundaki artıştır. Esas metalin tane boyutu; tuz banyosunda nitrürleme (TN), PVD yöntemi ile TiN kaplama ve kısa süreli plazma nitrürleme (IN1/2, IN1, IN4) işlemleri ile daha az artarken borlama (B), gaz ortamında nitrürleme (GN6, GN12) ve uzun süreli plazma nitrürleme (IN12, IN24, IN48) işlemleri ile daha da fazla artmıştır. Dolayısı ile ortaya çıkan iri taneli yapı numunelerin aşınma miktarını olumsuz yönde etkilemiştir.

Deneylerde kullanılan her bir numunenin yüzey sertliği değerine bakıldığında (Şekil 7.60), borlama işlemi ve PVD ile TiN kaplama işlemi sonucunda elde edilen yüzey sertliği diğer işlemlerle elde edilen yüzey sertliğinden daha yüksektir. Ancak, borlama ve TiN kaplama işlemlerindeki bu yüksek yüzey sertliklerine karşın aşınma miktarı da yüksek olmaktadır (Şekil 7.48). Özellikle borlama işleminin uygulandığı numunedeki toplam ağırlık kaybı miktarının; esas metal, yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme, endüksiyon ile sertleştirme, kısa süreli plazma nitrürleme (IN1/2, IN1, IN4), tuz banyosunda nitrürleme ve ısı püskürtme ile kaplama yapılmış numuneler ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 7.48). Bu durum, malzeme yüzeyindeki aşırı sert ve gevrek olan demir borür tabakası ile borlama işlemi sonucunda ortaya çıkan tane büyümesinin etkisine dayanır. En yüksek yüzey sertliğine sahip olan borlama işlemi uygulanmış numune ile TiN kaplı numune birbirleri ile karşılaştırıldığında borlama işlemi uygulanmış numunenin daha fazla aşındığı görülmektedir (Şekil 7.48). Bu durum, yine tane boyutu ile ilgili olup esas metalin tane boyutu TiN kaplama işlemine göre borlama işlemi sonucunda daha fazla artmıştır. Dolayısı ile de borlama işlemi uygulanmış numune TiN kaplanmış numuneye göre daha fazla aşınmıştır.

Plazma nitrürleme işlemleri kendi aralarında karşılaştırıldığında; 30 dakika, 1 saat ve 4 saat gibi kısa süreli plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertlikleri yaklaşık olarak aynı olup 12, 24 ve 48 saat gibi uzun süreli plazma

görmüş (YS ve YS3T) numuneler esas metalin toplam ağırlık kaybı miktarını azaltmıştır (Şekil 7.48). Esas metalin toplam ağırlık kaybı; yağda soğutma ile %30, yağda soğutma+temperleme ile %16 oranında azalmıştır.

Endüksiyon ile sertleştirme işleminde ise yüzey sertliği değeri yağda soğutma ile elde sertlik değerine hemen hemen eşit olmasına karşın bu sertlik değerinin malzemenin tüm kesiti boyunca aynı değerde olmamasından dolayı esas metalin aşınma miktarını azaltamamıştır. Endüksiyon ile sertleştirme işleminde elde edilen sertlik derinliği borlama ve nitrürleme işlemleri ile elde edilen sertlik derinliğinden daha yüksek ve tane irileşmesi de ortaya çıkmamaktadır. Dolayısı ile endüksiyon sertleştirme işlemi uygulanmış numunenin toplam ağırlık kaybı miktarı, termokimyasal işlemlerin uygulandığı numunelerden daha az ancak yağda soğutma ve yağda soğutma+temperleme yapılmış numuneden daha fazladır.

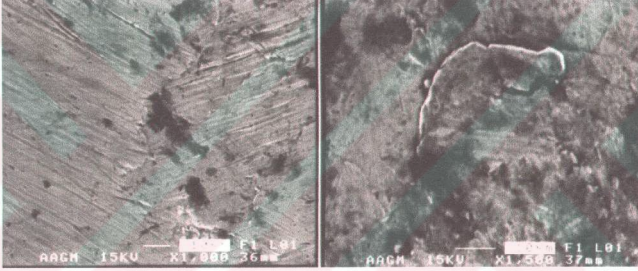
Toplam ağırlık kaybı miktarı bakımından termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış numunelerin kendi aralarında farklılık göstermesine karşın genel olarak tamamının gösterdiği toplam ağırlık kaybı miktarı esas metalden daha fazladır. Termokimyasal yüzey işlemlerinin numunelerde meydana getirdiği tane irileşmesi ve abrazif+erozif aşınma etkisi gösteren deney sisteminin tribolojik yapısından dolayı bu tür yüzey sertleştirme işlemi yapılmış numuneler uygun sonuç vermemiştir.

Ayrıca, ısıl püskürtme işlemli numuneler haricindeki deney parçalarının her 1 saatlik süreler sonunda gösterdikleri ağırlık kaybı miktarları EK C' de Şekil C.1-C.9' da çizilmiştir. Şekillere bakıldığında, termokimyasal işlem görmüş numunelerdeki aşınma miktarının hiç bir işlem uygulanmamış esas metalden daima fazla olduğu görülmektedir. Bu durum gösteriyor ki, termokimyasal işlem görmüş numunelerdeki beyaz tabaka ile belirli derinlikteki sertlik bölgesi aşındığında geriye kalan iri taneli ana malzeme sürekli aşınarak hiç bir işlemin uygulanmadığı esas metalden (N) daha fazla aşınma miktarı göstermektedir. Dolayısı ile, mikroyapı fotoğraflarından da görülebilen tane irileşmesi bu durumu desteklemektedir.

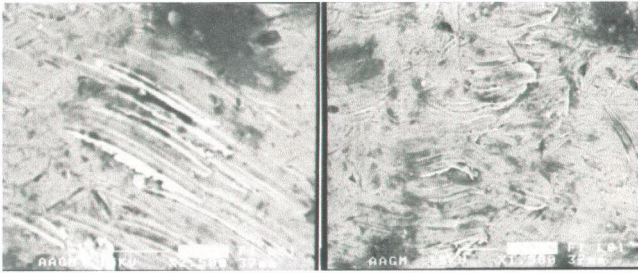
Isıl püskürtme yöntemleri ile kaplanmış numunelerin tamamı diğer yüzey sertleştirme işlemleri, TiN kaplama, yağda soğutma ve yağda soğutma+temperleme ve endüksiyon sertleştirme şeklinde bütün işlem gruplarından ve esas metalden daha düşük aşınma miktarı göstermiştir.

7.4 Tarama Elektron Mikroskopisi Sonuçları

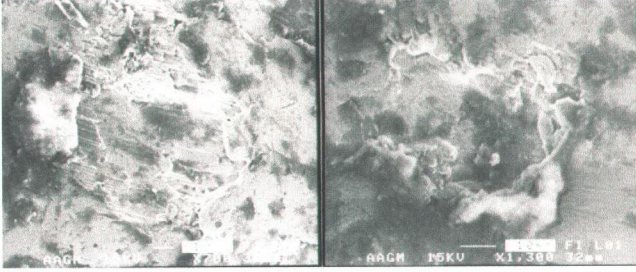
Aşınmış olan her bir deney numunesinin aşınma yüzeyi üzerinde yapılan tarama elektron mikroskopisi sonuçlarına ait fotoğraflar Şekil 7.84-7.106' da verilmiştir.



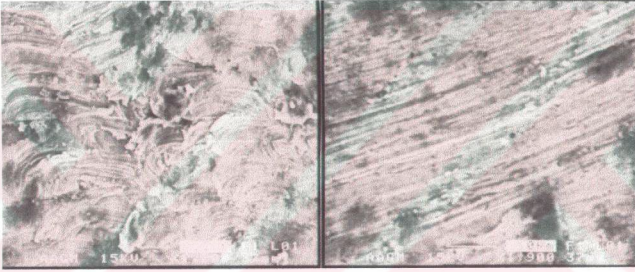
Şekil 7.84 Esas metale (N) ait SEM fotoğrafı.



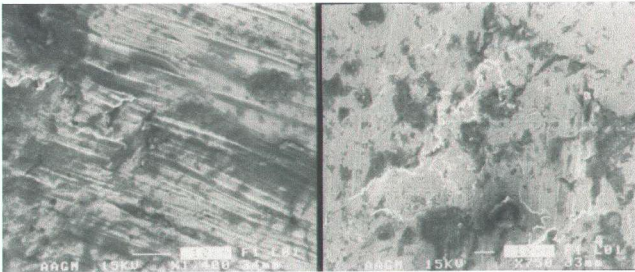
Şekil 7.85 Yağda soğutulmuş (YS) numuneye ait SEM fotoğrafı



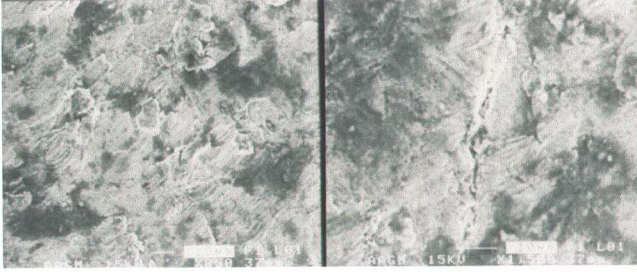
Şekil 7.86 Yağda soğutulmuş ve temperlenmiş (YS3T) numuneeye ait SEM fotoğrafı



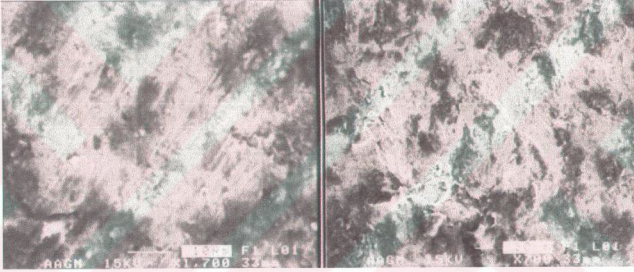
Şekil 7.87 Endüksiyon sertleştirilmiş (E) numuneeye ait SEM fotoğrafı.



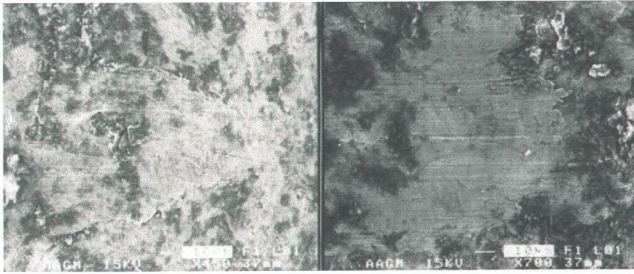
Şekil 7.88 Borlanmış (B) numuneeye ait SEM fotoğrafı.



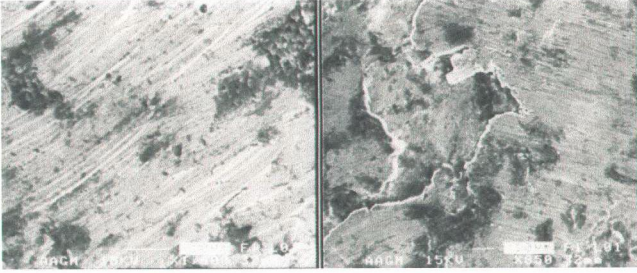
Şekil 7.89 Tuz banyosunda nitrülenmiş (TN) numuneye ait SEM fotoğrafı.



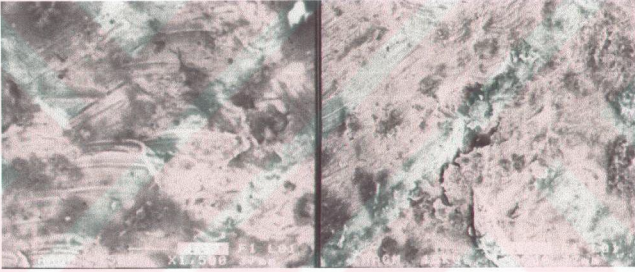
Şekil 7.90 Gaz nitrülenmiş (GN6) numuneye ait SEM fotoğrafı.



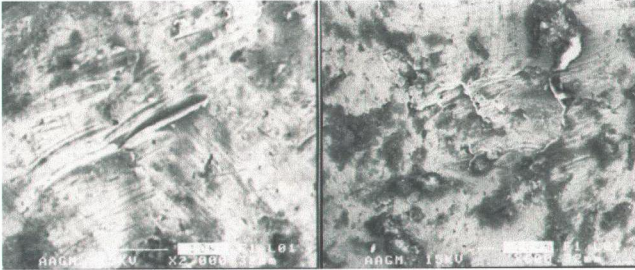
Şekil 7.91 Gaz nitrülenmiş (GN12) numuneye ait SEM fotoğrafı



Şekil 7.92 Plazma nitrülenmiş (IN1/2) numuneye ait SEM fotoğrafı.



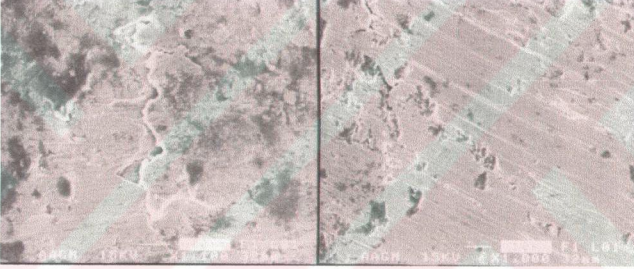
Şekil 7.93 Plazma nitrülenmiş (IN1) numuneye ait SEM fotoğrafı.



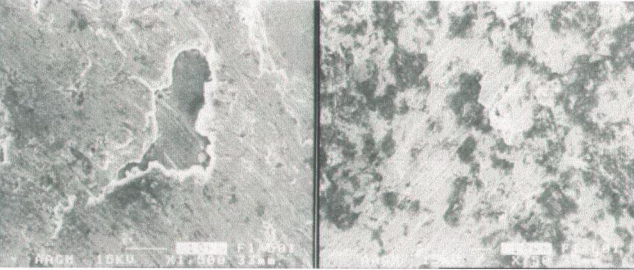
Şekil 7.94 Plazma nitrülenmiş (IN4) numuneye ait SEM fotoğrafı.



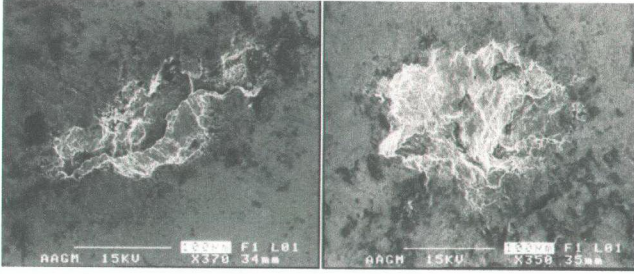
Şekil 7.95 Plazma nitrürlenmiş (IN12) numuneye ait SEM fotoğrafı.



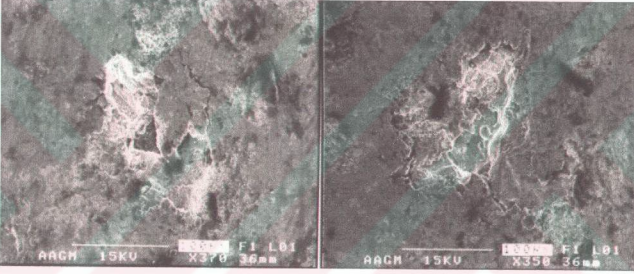
Şekil 7.96 Plazma nitrürlenmiş (IN24) numuneye ait SEM fotoğrafı.



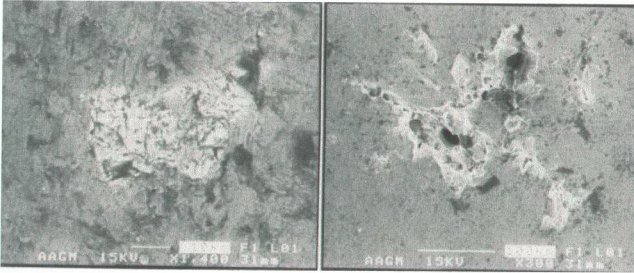
Şekil 7.97 Plazma nitrürlenmiş (IN48) numuneye ait SEM fotoğrafı.



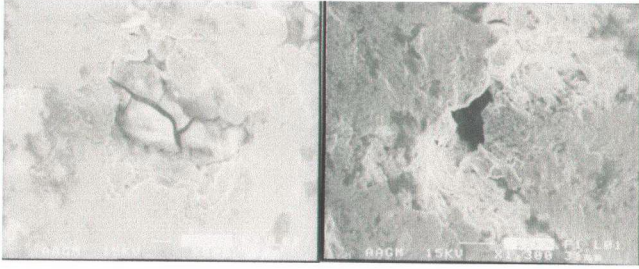
Şekil 7.98 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F1) numuneye ait SEM fotoğrafı.



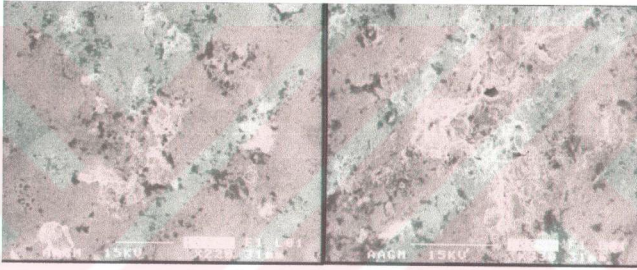
Şekil 7.99 Isıl püskürtme ile kaplanmış (1F2) numuneye ait SEM fotoğrafı.



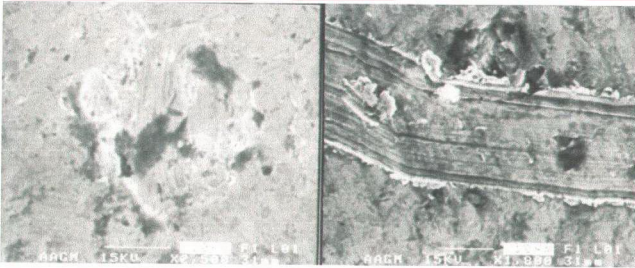
Şekil 7.100 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F1) numuneye ait SEM fotoğrafı.



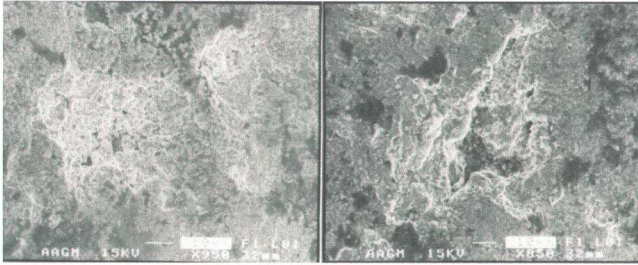
Şekil 7.101 Isıl püskürtme ile kaplanmış (2F2) numuneye ait SEM fotoğrafı.



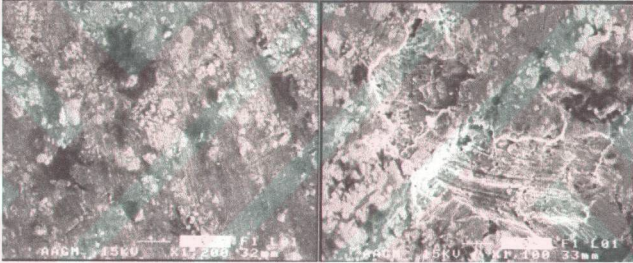
Şekil 7.102 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F1) numuneye ait SEM fotoğrafı.



Şekil 7.103 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F2) numuneye ait SEM fotoğrafı.



Şekil 7.104 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F3) numuneye ait SEM fotoğrafı.



Şekil 7.105 Isıl püskürtme ile kaplanmış (3F4) numuneye ait SEM fotoğrafı.



Şekil 7.106 PVD ile Titanyum Nitrid (TiN) numuneye ait SEM fotoğrafı.

Hiçbir yüzey işleminin uygulanmadığı ve numuneler arasında en düşük sertlik değerine sahip olan esas metalin (N) aşınma yüzeyine ait elektron mikroskobu fotoğrafından (Şekil 7.84), numune yüzeyinde aşındırıcı taneciklerin etkisi ile oldukça fazla olan abrazif aşınma izlerinin olduğu hatta numunenin bazı bölgelerinde malzemenin hasara uğrayarak kaldırılmaya zorlandığı görülmektedir.

Yağda soğutma ve yağda soğutma+temperleme şeklinde bilinen ısı işlemler sonucunda da numune yüzeyinde derin ve sığ olmak üzere abrazif aşınma izlerinin olduğu hatta yağda soğutma ve daha sonra temperleme işleminin yapıldığı numunede, az da olsa bazı bölgelerde yüzeysel hasarların varlığı görülmektedir (Şekil 7.85 ve 7.86). Endüksiyon ile sertleştirilmiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma, yaklaşık olarak aynı sertlik değerindeki yağda su verilmiş numune ile benzerlik göstermekte ancak bu numunede meydana gelen abrazif aşınma izlerinin yağda su verilmiş numuneye göre daha derin olduğu görülmektedir(Şekil 7.87).

Termokimyasal yüzey işlemi uygulanmış numunelerin tamamının benzer aşınma yüzeyleri gösterdiği, çekilen tarama elektron mikroskobu fotoğraflarından da görülebilmektedir (Şekil 7.88-7.97). Bu tür numunelerin aşınma yüzeyi, oldukça fazla miktarda abrazif aşınma izleri ile beraber yüzey hasarları da göstermektedir. Meydana gelen yüzey hasarları, termokimyasal işlemlerin numunelerde ortaya çıkardığı tane irileşmesi etkisinden dolayıdır. Tane boyutundaki artış sonucunda; çatlak, tabaka kalkması veya soyulması şeklinde yüzey hasarları meydana gelmektedir. Tane boyutundaki artış, numunenin göstereceği aşınma miktarını olumsuz yönde etkilemekte olup daha iri tanelere sahip numune daha fazla aşınmaktadır.

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri; deney sisteminin tribolojik yapısının yanı sıra malzeme yüzeyi üzerinde meydana getirdiği ana malzemedan (matristen) daha sert ve gevrek olan olan yüzey tabakası, son derece düşük sertlik derinliği, tane irileşmesi ve temperleme etkisinin yol

açtığı sertlik düşüşü gibi nedenlerden dolayı ana malzemenin aşınma miktarını azaltmada etkili olamamıştır. Hatta aşınmanın ilk zamanlarında sert ve gevrek olan tabaka ile düşük sertlik derinliğindeki difüzyon bölgesi hızlı bir şekilde ortadan kalkmakta ve geriye kalan iri taneli malzeme aşınarak ana malzemedan daha fazla aşınma miktarı göstermektedir.

Esas metal ile bilinen ısıt işlemler ve endüksiyon sertleştirme işlemlerinin uygulandığı numunelerin tamamında etkili olan aşınma mekanizması mikrokesmedir. Termokimyasal işlemlerin uygulandığı numunelerde ise aşınma mekanizması; mikrokesme, mikroçatlama ve tabaka kalkması veya soyulması ile bölgesel yüzey hasarları şeklinde etkisini gösteren mikroyorulmadır.

PVD ile titanyum nitrür kaplanmış olan numunenin aşınma yüzeyinde, oldukça fazla miktarda abrazif aşınma izlerinin olduğu hatta şiddetli olmamakla beraber bazı bölgelerde yüzey hasarının da meydana geldiği tarama elektron mikroskobu fotoğrafından görülmektedir (Şekil 7.106).

Esas metalin aşınmasını en iyi bir şekilde iyileştiren ısıt püskürtme yöntemleri ile kaplanmış olan numunelerin aşınma yüzeyleri (Şekil 7.98-7.105) üzerinde, diğer numunelerde görülen şiddetli abrazif aşınma izlerine sıkça rastlanılmamaktadır.

Isıt püskürtme yöntemlerinden alev püskürtme ile kaplama tabakası yapılmış olan numunelerin tarama elektron mikroskobu fotoğraflarına bakıldığında (Şekil 7.98- 7.101), bu numunelerin aşınma yüzeylerinde bölgesel olarak şiddetli yüzeysel hasarlarının olduğu görülmektedir. Hatta, kaplama tabakasında bulunan WC' ün çatlama sonucu hasara uğraması ve/veya matrinden ayrılması da (Şekil 7.101) ortaya çıkmaktadır.

Alev ile püskürtme ve daha sonra eritme işlemi uygulanmış olan numunelerin fotoğraflarından ise (Şekil 7.102-7.103), karbürlerin hasara uğraması ve/veya matrinden çıkması yerine derin olmayan abrazif aşınma

izleri, bölgesel yüzey hasarları ve fazla derin olmayan çukurlar şeklinde alev ile püskürtme yöntemine göre daha az şiddette aşınmanın olduğu görülmektedir.

Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi ile kaplama işleminin gerçekleştirildiği numunenin aşınma yüzeyinde azda olsa derin olmamakla birlikte yüzeysel çukurlar ve çok az şiddette yüzey hasarı görülmektedir (Şekil 7.104). Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme ve daha sonra ergitme işlemi ile kaplama işleminin gerçekleştirildiği numune ise (Şekil 7.105), çukur içermeyen kazıma şeklinde abrazif aşınma izleri göstermektedir.

Isıl püskürtme yöntemleri ile kaplama tabakası yapılan numunelerin göstermiş oldukları farklı aşınma yüzeylerinin nedeni kaplama işleminin gerçekleştirildiği yöntem ile ilgili olmaktadır. Numunelerin kaplanması için kullanılan ısı püskürtme yöntemleri dikkate alındığında, kaplama tabakasının birbirine ve ana malzemeye (altlık) bağlanması en iyi yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme+ergitme yönteminde gerçekleşmektedir. Bunu yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme, alev ile püskürtme+ergitme ve alev ile püskürtme yöntemleri izlemektedir. HVOF ile kaplama yönteminde oldukça yüksek hızda ve basınçta kaplanacak malzeme yüzeyine (altlık) çarpan tanecikler, birbirine ve kaplanacak malzemeye daha iyi yapışan kaplama tabakaları oluşturmaktadır. Ayrıca, kaplama işleminden sonra numune yüzeyi üzerine uygulanan ergitme işlemi ile de kaplama tabakasında var olan boşluklar azalmakta ve ergiyen kaplama tabakası birbirine daha iyi bağlanarak karbürlerin matris içinde daha iyi tutulması sağlanmaktadır. Dolayısıyla esas metalin aşınması azaltan ısı püskürtme yöntemlerinin başında yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme+ergitme işlemi gelmekte olup bu yöntemi yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme, alev ile püskürtme+ergitme ve alev ile püskürtme yöntemleri izlemektedir.

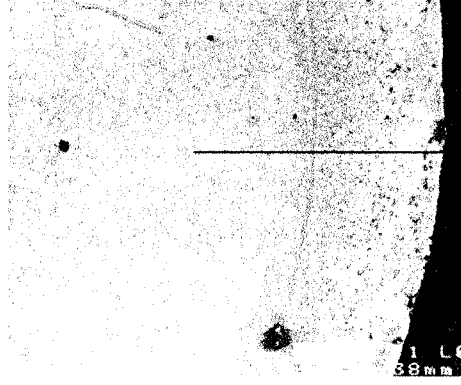
Kaplama malzemesinin ergiyerek kaplama tabakasını meydana getirmek üzere birbirleri ile iyi bir şekilde bağlanması, ısı püskürtme yöntemlerine göre değişiklik göstermesine rağmen bu yöntemlerin herbiri esas metalin

aşınmasını azaltmıştır. Bu durum, Şekil 7.48' deki 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı miktarları sıralamasından görüldüğü gibi aşınmış olan yüzeylerin tarama elektron mikroskopunda çekilen fotoğrafları ile de görülmektedir. Isıl püskürtme işleminde, kaplama tabakasını oluşturan kaplama malzemesinin birbirleri ile iyi bir şekilde bağlanmasının yanında kaplama tabakasının esas metal üzerine bağlanması da önemlidir.

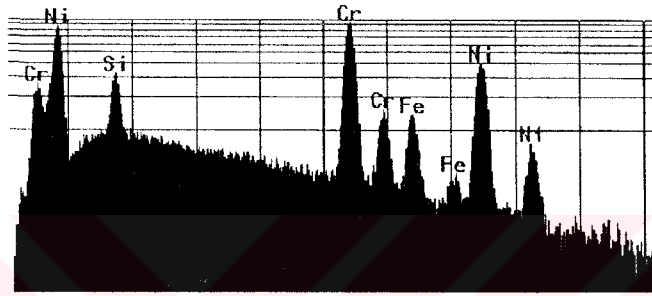
Kaplama tabakasının esas metale ne şekilde bağlandığını belirlemek amacı ile EDX analizi yapılmıştır (Şekil 7.107-7.130). Öncelikle, nokta EDX analizi ile kaplama tabakasını meydana getiren elementler belirlenmiştir. Daha sonra da belirlenen hat üzerinde hat EDX analizi ile bu elementlerin esas metale doğru yayınıp yayınmadığı (difüzyon) belirlenmiştir.

Isıl püskürtme yöntemlerinde kaplama tabakası ana malzeme üzerine mekanik kilitleme ile bağlanabileceği gibi bağlantı difüzyon ile de gerçekleşebilmektedir. Özellikle kaplama işleminden sonra yüzeye uygulanan ergitme işlemi ile kaplama tabakasının esas metal üzerine difüzyon ile bağlanması sağlanır. Bunun yanında vakum plazma veya yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (HVOF) gibi kaplama işleminin çok yüksek hızda gerçekleştirildiği yöntemlerde de kaplama tabakası esas metal üzerine difüzyon ile bağlanabilmektedir.

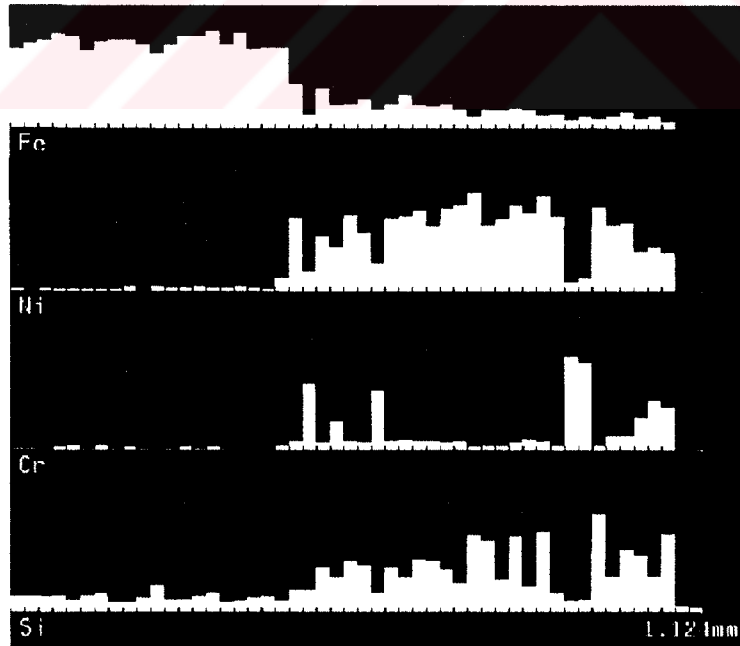
Alev ile püskürtme yöntemi ile kaplama işlemi yapılmış olan numunelerdeki (1F1, 1F2, 2F1 ve 2F2) hat EDX sonuçlarına bakıldığında, kaplama tabakasındaki hiç bir elementin esas metale doğru yayınmadığı görülmektedir. Alev ile püskürtme işleminde işlem hızının düşük olması (100 m/sn) dikkate alındığında bu durumun normal olduğu ortaya çıkmaktadır. Ancak, alev püskürtme ve daha sonra ergitme işlemi uygulanmış 3F1 deney kodlu numunedeki hat EDX analizi (Şekil 7.121) sonucuna bakıldığında, özellikle kobalt (Co) ve tungsten (W) elementinin esas metale doğru yayındığı görülmektedir. Bu durum, kaplama işleminden sonra uygulanan ergitme işlemi ile Co elementinin Fe' e karşı yüksek olan ilgisinden ve W elementinin yüksek olan difüzyon kabiliyetine bağlıdır.



Şekil 7.107 EDX analizi yapılan 1F1 numunesi.



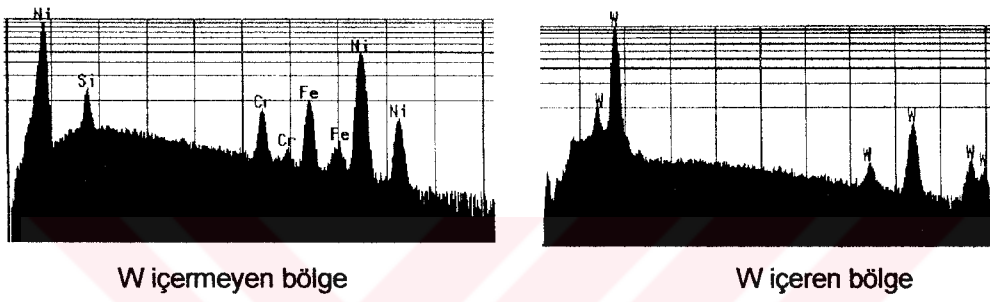
Şekil 7.108 1F1 numunesinde nokta EDX analizi.



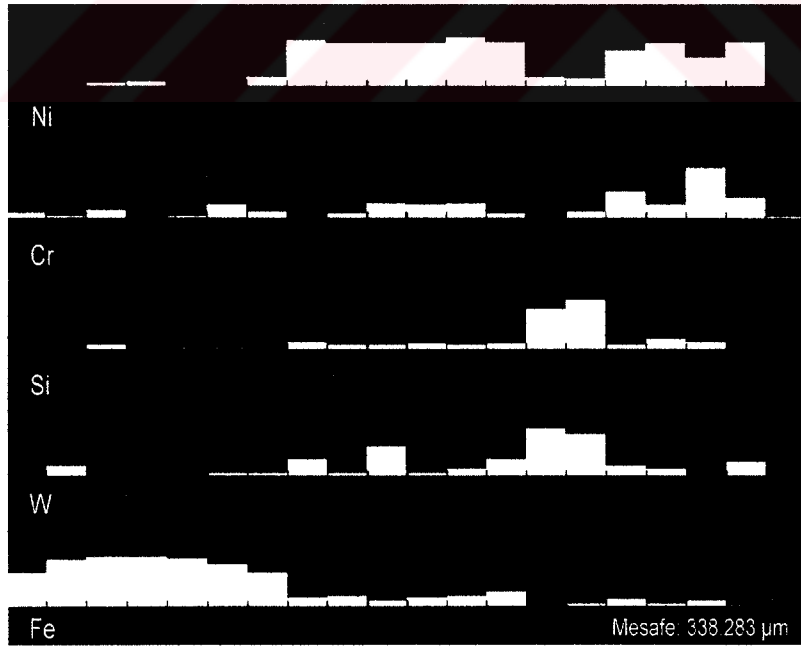
Şekil 7.109 1F1 numunesinde hat EDX analizi.



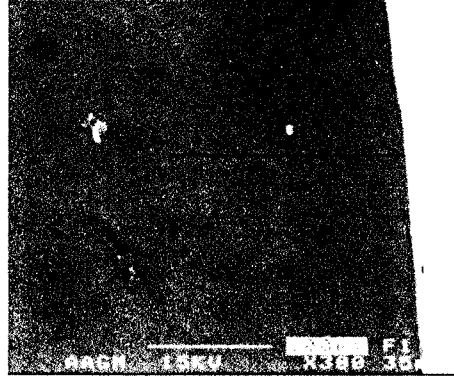
Şekil 7.110 EDX analizi yapılan 1F2 numunesi.



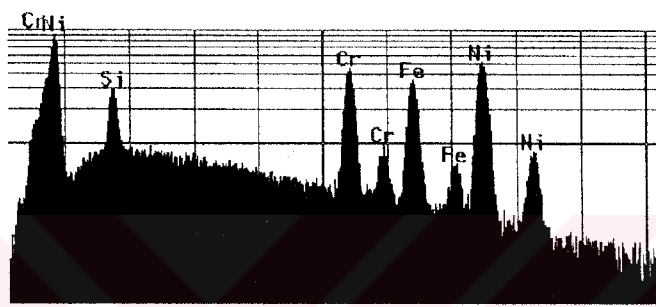
Şekil 7.111 1F2 numunesinde nokta EDX analizi.



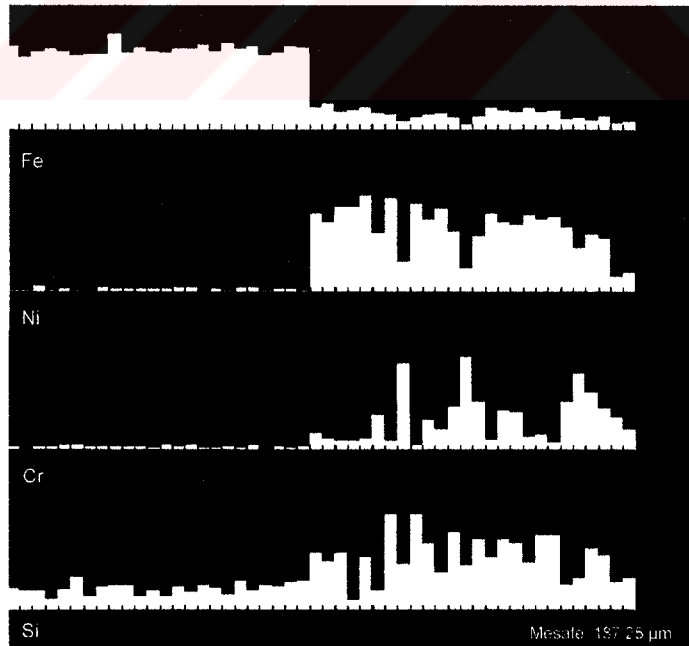
Şekil 7.112 1F2 numunesinde hat EDX analizi.



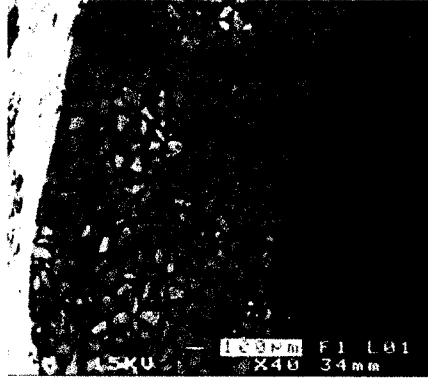
Şekil 7.113 EDX analizi yapılan 2F1 numunesi.



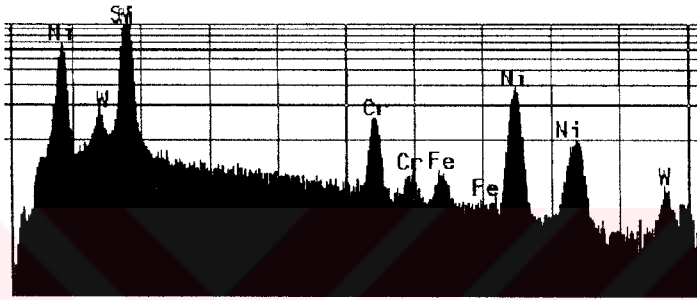
Şekil 7.114 2F1 numunesinde nokta EDX analizi.



Şekil 7.115 2F1 numunesinde hat EDX analizi.



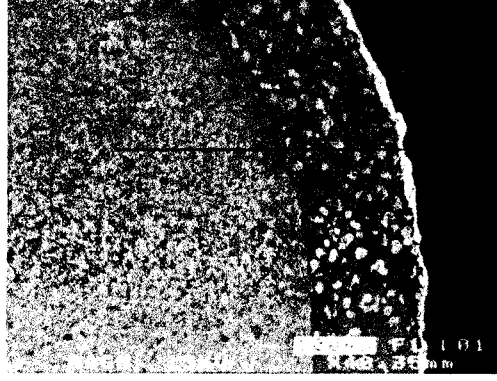
Şekil 7.116 EDX analizi yapılan 2F2 numunesi.



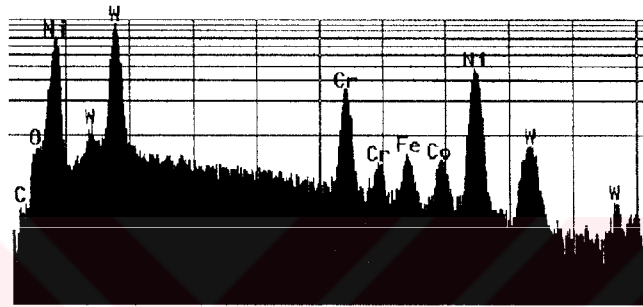
Şekil 7.117 2F2 numunesinde nokta EDX analizi.



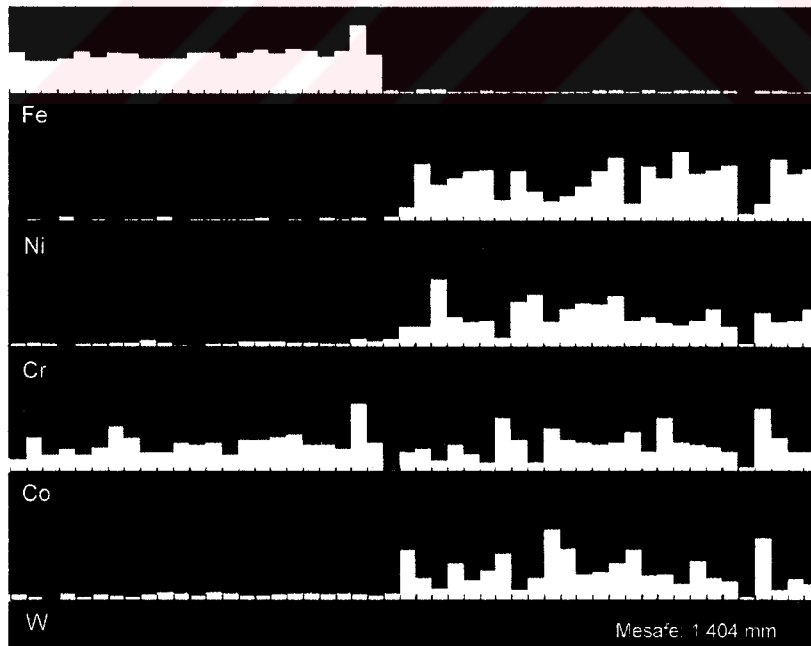
Şekil 7.118 2F2 numunesinde hat EDX analizi.



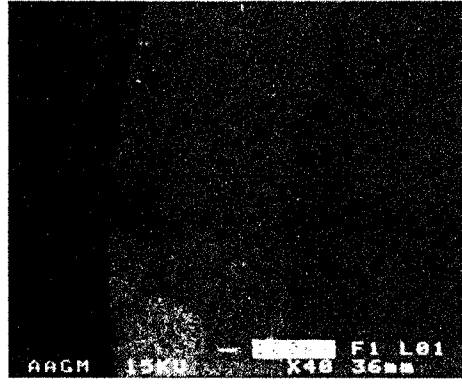
Şekil 7.119 EDX analizi yapılan 3F1 numunesi.



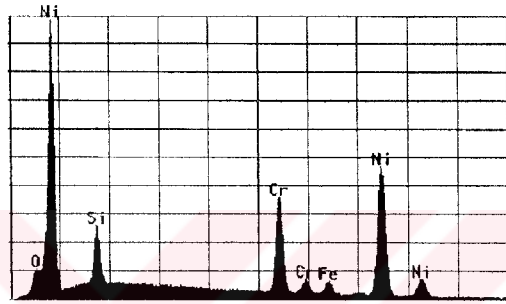
Şekil 7.120 3F1 numunesinde nokta EDX analizi.



Şekil 7.121 3F1 numunesinde hat EDX analizi.



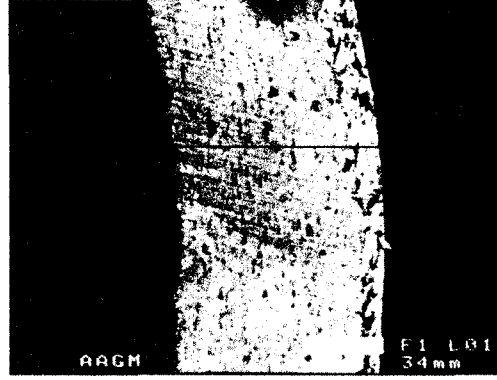
Şekil 7.122 EDX analizi yapılan 3F2 numunesi.



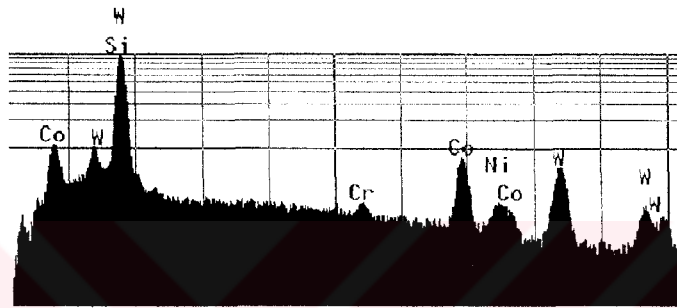
Şekil 7.123 3F2 numunesinde nokta EDX analizi.



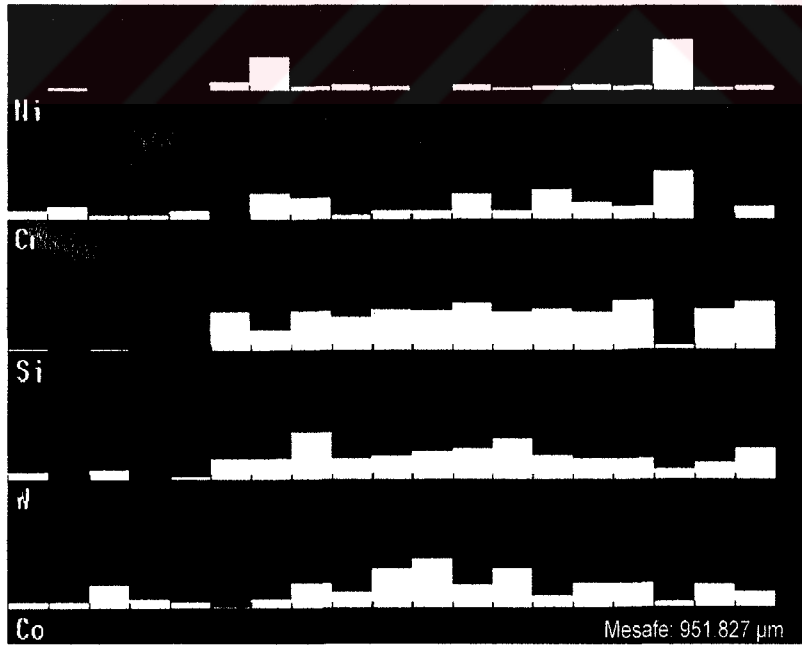
Şekil 7.124 3F2 numunesinde hat EDX analizi.



Şekil 7.125 EDX analizi yapılan 3F3 numunesi.



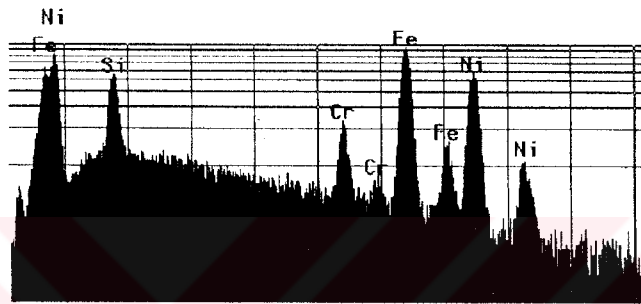
Şekil 7.126 3F3 numunesinde nokta EDX analizi.



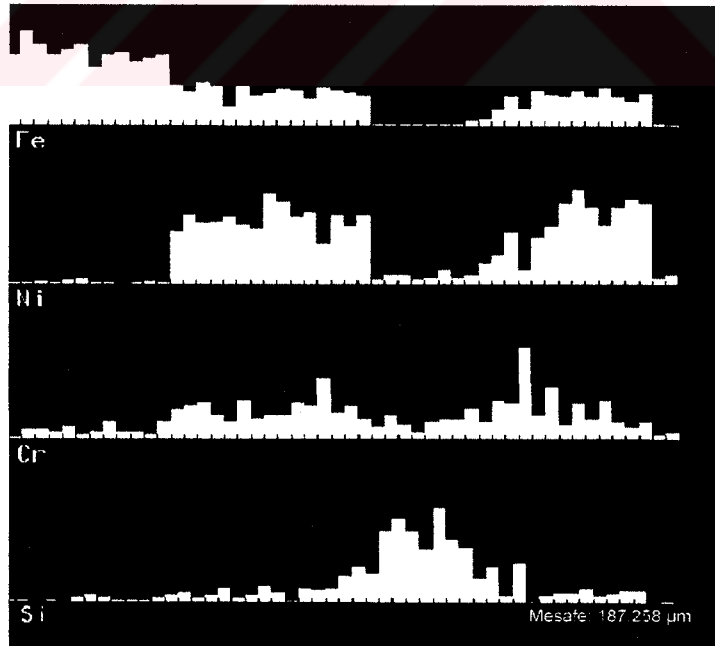
Şekil 7.127 3F3 numunesinde hat EDX analizi.



Şekil 7.128 EDX analizi yapılan 3F4 numunesi.



Şekil 7.129 3F4 numunesinde nokta EDX analizi.



Şekil 7.130 3F4 numunesinde hat EDX analizi.

Tablo 7.1 Bazı malzemelerin difüzyon sabiti[154, s. 169].

Malzeme Sınıfı	Difüzyon sabiti (D_0) (m^2/s^{-1})	Q / RT
Kübik hacim merkezli metaller (KHM) (911 °C' nin altında W, Mo, Fe, vb)	1.6×10^{-4}	17.8
Sıkı düzenli hegzagonal metaller (SDH) (Zn, Mg, Ti, vb)	5×10^{-5}	17.3
Kübik yüzey merkezli metaller (KYM) (911 °C' nin üzerinde Cu, Al, Ni, Fe, vb)	5×10^{-5}	18.4
Tuzlar (NaCl, LiF vb)	$2,5 \times 10^{-5}$	22.5
Oksitler (MgO, FeO, Al_2O_3 vb)	3.8×10^{-4}	23.4

Tablo 7.1 incelendiğinde, tungsten (W) elementinin difüzyon sabitinin yüksek olduğu görülmektedir. 3F1 numunesindeki kaplama tabakasında bulunan Cr ve Ni elementlerinin ise difüzyona uğramadıkları görülmektedir. Bu durum muhtemelen, düşük hızda gerçekleştirilen alev ile püskürtme yönteminde Cr ve Ni elementlerinin yüksek derecede reaktif elementler olması nedeni ile bu tozların işlem sırasında oksitlenmesi sonucudur. Yapılan EDX analizi sonucunda da oksit tabakasının parçalanmadığı anlaşılmaktadır.

Yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme yöntemi ile kaplama tabakası yapılmış 3F3 numunesine ait hat EDX analizi incelendiğinde yine Fe' e karşı ilgisi yüksek olan Co elementinin esas metale doğru yayındığı görülmektedir. Bunun yanında yine W elementinin de yayındığı görülmektedir.

Yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme (HVOF) ve daha sonra ergitme işlemi uygulanmış olan 3F4 numunesine ait hat EDX analizi (Şekil 7.130) incelendiğinde, Ni ve Cr elementlerinde esas metale doğru yayınmanın olduğu görülmektedir. Bu durum muhtemelen, yüksek hızda gerçekleştirilen HVOF yönteminde reaktif olan bu elementlerin oksitlenememesi, bunun yanında HVOF işleminde ergiyen kaplama malzemesinin esas metale büyük

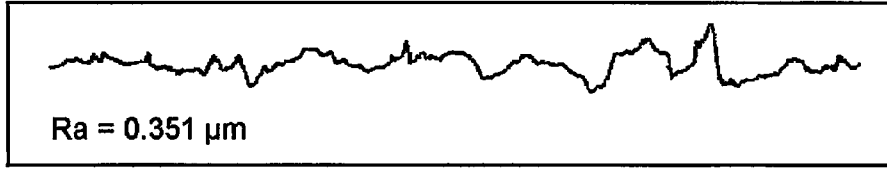
bir darbe altında çarpması sonucunda oksit tabakasının kırılması ile HVOF işlemini takiben sonradan uygulanan ergitme işleminin etkisine dayandırılabilir.

7.5. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

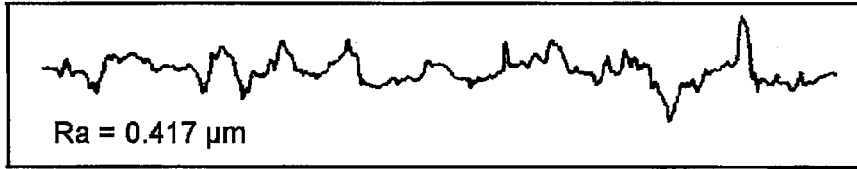
Aşınmış olan numunelerde, aşınma miktarı ile yüzey pürüzlülüğü (Ra) arasında ilişki kurabilmek için yüzey pürüzlülük profilleri çıkartılmıştır. Ancak, ısıl püskürtme işlemli numunelerin yüzeyleri işlem sonrasında taşlanmadıklarından yüzey pürüzlülüğü ölçülmemiştir.

Aşınma deneyi uygulanan numunelerin tamamı Ç1050 (C45E) çeliğinden tornalanarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçülen numunelerden esas metal, aşınma deneyinden önce ve sonra sadece yüzeyindeki yağ, kir, toz vs gibi yabancı maddelerden temizlenmiştir. Aynı şekilde diğer numunelere de uygulandıkları işlem öncesi ve sonrası temizleme işlemi uygulanmıştır. Dolayısı ile numunelere uygulandıkları işlem ve/veya aşınma haricinde yüzey pürüzlülüğüne etki edebilecek herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Isıl püskürtme işlemli numuneler hariç olmak üzere diğer numunelere ait yüzey pürüzlülük profilleri her bir numune için Şekil 7.131-7.145' de ve toplu halde ise Şekil 7.146' da görülmektedir.

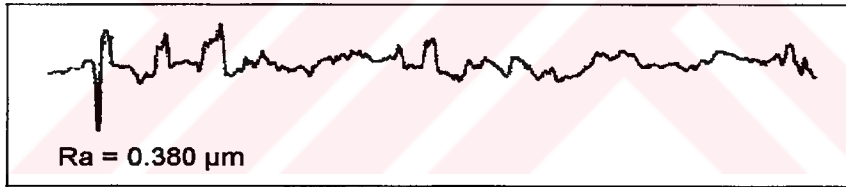
Mühendislik malzemelerinde tornalama işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değeri (Ra), 0.4-6 μm arasında değişmektedir[3, s 14]. Esas metalin yüzey pürüzlülüğü 0.351 μm olarak ölçülmüştür. Dolayısı ile esas metalin yüzey pürüzlülüğü aşınma sonucunda azalmıştır. Yüzey pürüzlülük profili çıkartılan numunelerden esas metal, yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme ve endüksiyon ile sertleştirilmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri karşılaştırıldığında, aşınma miktarı esas metalden daha az olan numunenin yüzey pürüzlülük değerinin esas metalden daha fazla olduğu buna karşılık esas metalden daha fazla aşınan numunenin (E) ise daha az olduğu görülmektedir (Şekil 7.146).



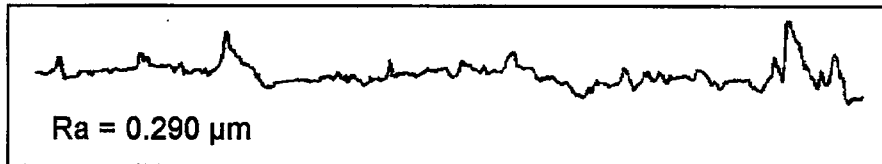
Şekil 7.131 Esas metalin (N) yüzey pürüzlülük profili.



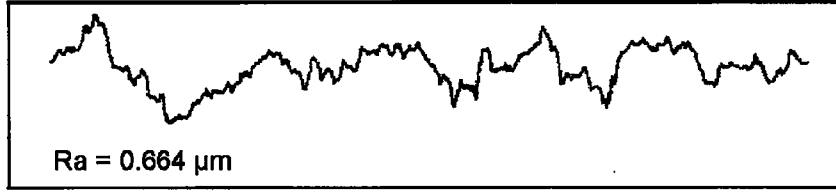
Şekil 7.132 Yağda su verilmiş (YS) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



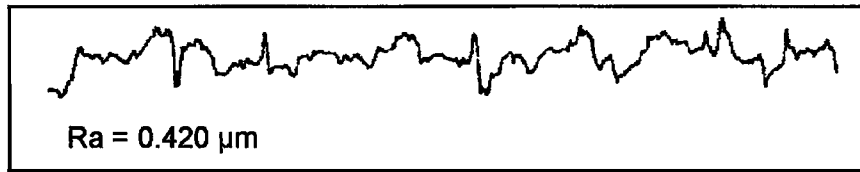
Şekil 7.133 Yağda su verilmiş+temperlenmiş (YS3T) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



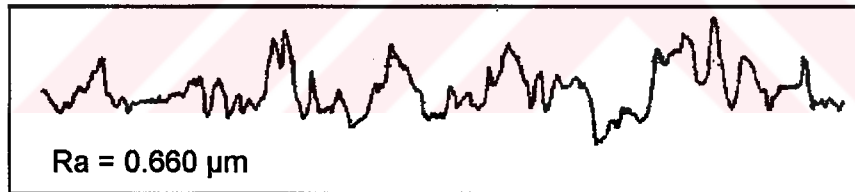
Şekil 7.134 Endüksiyon ile sertleştirilmiş (E) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.135 Barlama işlemi uygulanmış (B) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.136 Tuz banyosunda nitrürlenmiş (TN) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.137 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN6) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



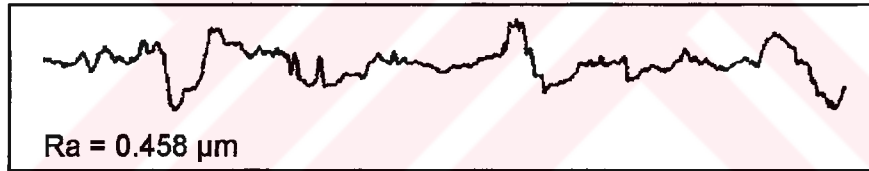
Şekil 7.138 Gaz ortamında nitrürlenmiş (GN12) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



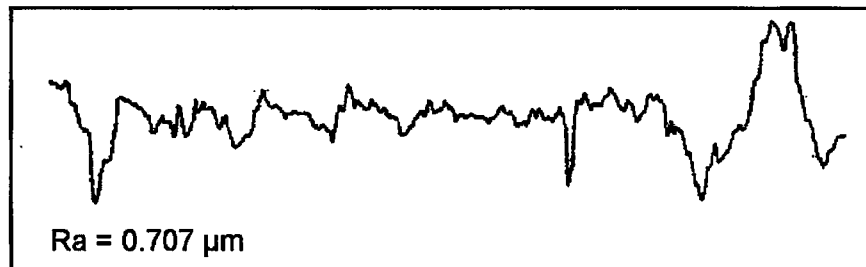
Şekil 7.139 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN1/2) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.140 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN1) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.141 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN4) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.142 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN12) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.143 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN24) numunenin yüzey pürüzlülük profili.

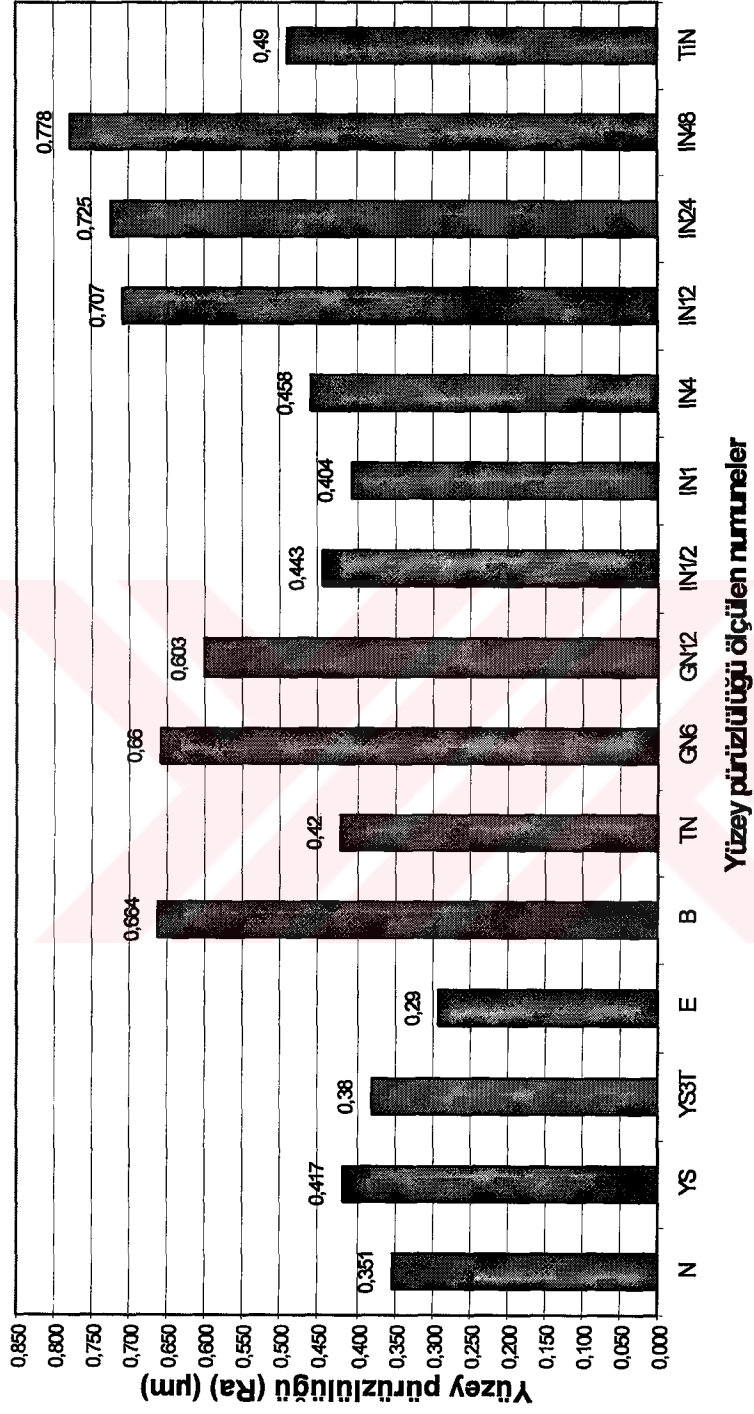


Şekil 7.144 Plazma (iyon) nitrürlenmiş (IN48) numunenin yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 7.145 TiN kaplı (TiN) numunenin yüzey pürüzlülük profili.

Termokimyasal yüzey işlemleri numunelerin yüzey pürüzlülüğü değeri esas metalden bir hayli yüksektir. Termokimyasal yüzey işlemleri numunelerin aşınma miktarı esas metalden daha fazla olmasına karşın yüzey pürüzlülük değerinin daha fazla olmasının nedeni bu tür numunelerin aşınma mekanizması ile ilgilidir. Metalografi sonuçlarında termokimyasal yüzey işlemleri numunelerin, tane büyüklüğünde artış olduğu belirtilmiştir. Dolayısı ile



Şekil 7.146 Aşınma deneyi uygulanmış bazı numunelerin yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri.

bu iri tanelerin kopması ile hem aşınma miktarı hem de yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Sonuçta, bu tür numunelerde tane boyutundaki artış ile aşınma miktarının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılabilmektedir.

7.6 İstatistik Sonuçları

Esas metal ile esas metale uygulanan işlemlerin tamamı arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olup olmadığı t-testi uygulanarak araştırılmıştır. Bu amaçla bütün işlemler ikişer ikişer gruplandırılmış ve %5 anlamlılık düzeyinde t-testi uygulanmıştır. İstatistik sonuçları Ek C' deki tablolarda (Tablo C.1 ve C2) verilmiştir.

Tablo C1' de yüzey işlemlerinin 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kayıpları aritmetik ortalamalarının ($\bar{X}$) ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen anlamlılık (P) değerleri görülmektedir. Tablo C1' e bakıldığında bazı bölgelerin gölgeli bazı bölgelerin ise gölgesiz olduğu olduğu görülecektir. Gölgesiz olan yerler, karşılaştırılan iki işlem arasında %95 güvenilirlilikle anlamlı farkın bulunduğu işaret etmektedir. Bunun aksine gölgeli olan yerler ise, söz konusu karşılaştırılan iki işlem arasında %95 güvenilirlilikle anlamlı farkın bulunmadığını belirtmektedir.

Tablo C2' de ise, yüzey işlemlerinin 10. saat sonundaki birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı aritmetik ortalamalarının ($\bar{X}$) ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen standard sapma (SS), t ve anlamlılık (P) değerleri görülmektedir. Tablo C2' ye bakıldığında görülen $t_{\text{tablo}} = 3,182$ değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir. Buna göre, karşılaştırılan iki işlemin 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kayıplarının aritmetik ortalamalarının t-testi' nde karşılaştırılması sonucunda elde edilen "t" değerinin " t_{tablo} " değerinden büyük olması ($P < 0.05$) durumunda iki işlemin aritmetik ortalamaları arasında anlamlı farklılığın olduğu ve ağırlık kaybı aritmetik ortalaması daha az olan işlemin daha az aşındığı %95 güvenilirlilikle söylenebilmektedir (gölgesiz bölgeler). Bunun aksine, iki işlemin 10. saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık

kayıplarının aritmetik ortalamalarının t-testi'nde karşılaştırılması sonucunda elde edilen "t" değerinin " t_{tablo} " değerinden küçük olması ($P>0.05$) durumunda iki işlemin aritmetik ortalamaları arasında anlamlı farklılığın bulunmadığı ve iki işlemin aşınma kaybı aritmetik ortalaması arasındaki farkın tesadüfi olduğu söylenebilmektedir (gölge bölgeler).

İstatistik sonuçlarına göre, özellikle termokimyasal işlemlerin uygulandığı birçok numune arasında herhangi bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Gaz ortamında 6 ve 12 saat süre ile nitrürleme işlemi uygulanmış numunelerin (GN 6 ve GN 12) hem kendi aralarında hem de borlama işlemi (B) ile aşınma miktarları bakımından istatistiksel olarak herhangi bir farklılık görülmemiştir. Benzer şekilde, 12, 24 ve 48 saat süreli plazma nitrürlenmiş numunelerin de hem kendi aralarında (IN12, IN 24, IN48) hem de borlama işlemi ile aşınma miktarları bakımından herhangi bir farklılık görülmemiştir. Bu sonuçlara göre, gaz ve uzun süreli plazma nitrürleme işlemleri ile borlama işlemleri sonucunda azda olsa aşınma miktarları arasında meydana gelen farklılığın tesadüfi olduğu kabul edilmektedir. Bu durum, söz konusu numunelerin; tarama elektron mikroskopunda benzer aşınma yüzeyleri göstermesi ve mikroyapı fotoğraflarından da görüleceği gibi benzer tane boyutu göstermesi ile doğrulanmaktadır. Buna karşılık, daha düşük süre ile plazma nitrürlenmiş numuneler arasında (IN1/2, IN1 ve IN4) ise anlamlı farklılık bulunmuştur. Zira, kısa süreli plazma nitrürleme işlemlerinde tane irileşmesi süredeki artışa bağlı olarak artmaktadır. Dolayısı ile, farklı tane boyutunda olduklarından farklı aşınma miktarı göstermişlerdir. Ayrıca, kısa süreli plazma nitrürleme işlemleri ile farklı tane boyutuna sahip borlama, gaz ortamında nitrürleme ve uzun süreli plazma nitrürleme işlemleri arasında anlamlı farklılık bulunmuştur. Yine, bu numuneler arasında tane boyutu ve aşınma miktarları bakımından belirgin farklıklar bulunmaktadır.

Termokimyasal işlemler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların olmamasına karşın, ısı püskürtme ile kaplama tabakası yapılmış numuneler ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış diğer işlemler arasında ise anlamlı

farklılıkların olduğu görülmektedir. Gerçekten de ısı püskürtme ile kaplama tabakası yapılmış numunelerin, 10 saat sonunda birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı miktarının düşük oluşu ve tarama elektron mikroskobunda da şiddetli abrazif aşınma izleri göstermemesi nedeni ile diğer numunelerden farklı olmaktadır. Isı püskürtme işlemli numunelerdeki istatistik sonuçlarına bakıldığında; aynı firmadan sağlanan iki değişik karakterdeki tozun aynı ısı püskürtme yöntemi kullanılarak püskürtülmesi ile elde edilen numunelerin gösterdikleri aşınma miktarları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olmadığı söylenebilmektedir. Buna ek olarak; HVOF ve HVOF+ergitme yönteminin alev püskürtme ve alev püskürtme+ergitme yöntemine göre ayrıca, alev püskürtme+ergitme yöntemi ile de alev püskürtme yöntemi arasında anlamlı farklılıkların olduğu söylenebilmektedir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz endüstrisinde iş gücü, para ve hammadde kaybı olarak kendini gösteren aşınma, tarım ve madencilik başta olmak üzere endüstrinin hemen hemen her alanında kendini göstermektedir. Bu neden ile aşınmanın öneminin ve aşınma türlerinin bilinmesi ve önlenmesi teknik ve ekonomik olarak büyük bir ihtiyaç olmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli ısıt işlemler ile bir seri modern yüzey işlemleri uygulanmış %0,5 karbonlu Ç1050 (C45E) çeliğinin, düşük basınçlı ve iri taneli aşındırıcıların kullanıldığı abrazif-erozif deney koşullarında aşınması incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Aşınma deneyi uygulanmış numunelerde, ağırlık kayıplarındaki azalmanın veya toplam ağırlık kayıplarındaki artışın, deney süresinin başlangıcında hızlı bir şekilde meydana geldiği daha sonra azalma veya artış hızında bir düşüşün olduğu görülmüştür.
2. Esas metalin yüzey sertliği, bilinen ısıt işlemler ile termokimyasal işlemler ve yüzeye ilave kaplamanın yapıldığı ısıt püskürtme ve PVD yöntemi ile artırılmıştır.
3. Yüzey sertliği bakımından esas metal en düşük sertlik değeri (213 HV) gösterirken borlama (1284 HV) ve TiN (1291 HV) kaplama işlemleri ile en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.
4. Sertlik ölçümleri sonucunda; 500°C' de 1/2, 1 ve 4 saat süre ile yapılan plazma nitrüleme işlemleri ile 480°C' de 12, 24 ve 48 süre ile yapılan plazma nitrüleme işlemlerinden daha yüksek yüzey sertliği elde edilmesine karşın bu işlemler sonucu ortaya çıkan nitrüleme derinliği bakımından önemli bir farklılığın ortaya çıkmadığı saptanmıştır.

5. Aşınma deneyi sonucunda, düşük sıcaklıkta uzun süreli plazma nitrürleme işlemi uygulanmış deney parçaları (480°C - IN12, IN 24, IN48), yüksek sıcaklıkta kısa süreli plazma nitrürleme işlemi yapılmış deney parçalarından (500°C - IN1/2, IN1, IN4) daha fazla aşınmıştır.
6. En düşük yüzey sertliğine sahip olan esas metal, endüksiyon ile sertleştirme, borlama, tuz banyosunda nitrürleme, gaz ortamında nitrürleme, plazma nitrürleme ve PVD ile TiN kaplama gibi işlemler sonucu yüzey sertliği yükseltilmiş olan numunelere nazaran daha az aşınmıştır. Bunun tersine, borlama ve PVD ile TiN kaplama gibi işlemler ile en yüksek yüzey sertliğine sahip olan numuneler de daha düşük yüzey sertliğine sahip numunelerden daha fazla aşınmıştır. Dolayısı ile sertlik-aşınma miktarı arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı görülmemiştir. Bu durum, deney parçalarında oluşan tane irileşmesi ile bu çalışmada iri taneli aşındırıcının (aşındırıcının tane çap dağılımı aritmetik ortalaması: 7.370 mm) kullanıldığı deney sisteminin tribolojik yapısı ile ilgili olup sonuçta, aşınmanın bir sistem özeliği olduğu ilkesi doğrulanmaktadır.
7. Metalografik çalışmalar sonucunda, termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış deney parçalarının yüzeyinde oluşan sert ve gevrek tabakanın altında kalan esas metal tanelerinin irileşme eğilimi gösterdiği ve çekirdeğe doğru iri taneli bir yapının oluştuğu görülmüştür. Kısa sürelerde yapılan plazma nitrürleme (30dak., 1 ve 4 saat) işlemleri ile ortaya çıkan tane irileşmesi borlama, gaz ortamında nitrürleme ve uzun süreli yapılan (12, 24 ve 48 saat) plazma nitrürleme işlemlerine göre daha azdır. Benzer tane boyutuna sahip numunelerde aşınma miktarı hemen hemen aynı olduğu, aşınma miktarının tane boyutundaki artış ile arttığı belirlenmiştir.
8. Isıl püskürtme yöntemleri uygulanarak aşınmaya dirençli yüzey tabakaları oluşturulmuş deney parçalarındaki aşınma miktarı, ısıl işlem ve termokimyasal yüzey işlemleri uygulanmış deney parçalarına göre oldukça düşüktür.

9. Uygulanan ısıp püskürtme işlemleri yöntemleri bazında ele alındığında, yüksek hızlı oksi yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi alev ile püskürtme yöntemine nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir. Hatta, yöntemek olarak uygulanan yeniden ergitme işlemi (HVOF+ergitme ve alev ile püskürtme+ergitme) aşınmanın azalmasında daha da etkin rol oynamaktadır.
10. Bu çalışmada, aşınmanın azaltılması amacı ile yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme ve ısıp püskürtme yöntemleri dışındaki termokimyasal işlemler ile doyurucu sonuçlar alınamamıştır.
11. Aşındırma deneyi sonrası parçaların yüzeylerinde yapılan SEM incelemelerinde; esas metalin, yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme ve endüksiyon sertleştirme işlemi uygulanmış numunelerin yüzeylerinde şiddetli abrazif aşınma izleri ile az miktarda bölgesel yüzey hasarı görülmektedir. Termokimyasal yüzey işlemi uygulanmış numunelerin aşınma yüzeylerinde şiddetli abrazif aşınma izleri olmakla beraber bu tür numunelerin aşınma yüzeylerinde tane iriliğinin olumsuz etkisi sonucunda şiddetli hasarlar da meydana geldiği görülmüştür. Buna karşın, ısıp püskürtme yöntemi uygulanmış numunelerde derin olmayan abrazif aşınma izleri ve kaplama tabakasında bulunan WC' ün hasara uğraması ve/veya matrısten ayrılması şeklinde bölgesel yüzey hasarı meydana geldiği görülmüştür.
12. Tarama elektron mikroskobunda yapılan EDX çalışmaları sonucunda, ısıp püskürtme işlemi uygulanmış numunelerde kaplama tabakasının ana metale, püskürtme işlemi sonrası ergitme işleminin uygulandığı HVOF+ergitme ve alev ile püskürtme+ergitme yöntemlerinde difüzyon ile bağlandığı belirlenmiştir.
13. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucunda; esas metal ile yağda soğutma, yağda soğutma+temperleme ve endüksiyon sertleştirme işlemi

uygulanmış numunelerde, aşınma miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğünün (Ra) azaldığı, aşınma miktarının azalması ile de arttığı saptanmıştır. Buna ek olarak, termokimyasal yüzey işlemi uygulanmış numunelerde ise aşınma miktarının artmasına karşın yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı belirlenmiştir.

14. İstatistiksel analiz sonucunda, benzer tane boyutuna sahip olan termokimyasal işlemlerin uygulandığı çoğu numunelerin aşınma miktarları arasında göze çarpan bir farklılığın olmadığı belirlenmiştir. Uzun süreli plazma nitrüleme işleminin yapıldığı numuneler (IN12, IN24 ve IN48), hem kendi aralarında hem de borlama (B) ve gaz ortamında 6 ve 12 saat nitrülenmiş (GN6 ve GN12) numuneler ile karşılaştırıldığında, aşınma miktarları bakımından istatistiksel olarak bir farklılık görülmemiştir. Aynı şekilde, GN6 ve GN12 kodlu numuneler de hem kendi aralarında hem de borlama işlemi ile karşılaştırıldığında istatistiksel bir farklılık göstermemişlerdir. Buna karşın, ısıl püskürtme yöntemleri ile diğer işlemlerin tamamının arasında ve bu yöntemlerin kendi aralarında istatistiksel farklılıkların olduğu görülmüştür.

Aşınmanın önlenmesi için herşeyden önce aşınmanın gerçekleştiği ortamın ve şartların iyi analiz edilmesi gerekmektedir yani aşınmanın bir sistem özeliği olduğu ilkesi daima hatırdan çıkartılmamalıdır. Bunun yanında aşınma olayının ve aşınma türlerinin yeterince bilinmesi de önemli olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ANIK, S., DİKİCİOĞLU, A., VURAL, M. Bakım ve Tamir İşlerinde Kaynak ve Metal Püskürtme, Metal ve Kaynak, Sayı: 49, s. 21-25, Kasım (1993)
- [2] OĞUZ, B. Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayii A.Ş., İstanbul, s 150, (1993)
- [3] HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear Engineering Materials, Edward Arnold, Landon, p. 273, (1992)
- [4] RAMESH, C. S., SESHADRI, S. K., IYER, K. J. L. A Survey of Aspects of Wear of Metals, Indian Journal of Technology, 29(4), pp. 179-185, (1991).
- [5] YU, H. J., Bhole, S. D. Development of a Prototype Abrasive Wear Tester for Tillage Tool Materials, Tribology International, Vol 23, No 5, pp. 309-316, (1989)
- [6] ULUSOY, E. Bazı Toprak İşleme Alet ve Makinalarında İş Organlarının Aşınması Üzerinde Araştırmalar, Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları, No 390, İzmir, s. 11, (1981)
- [7] KARAMIŞ, M. B. Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, F.B.E., (1985)
- [8] MISRA, A., FINNIE, I. A Review of The Abrasive Wear of Metals, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol 104, pp. 94-101, April (1982)
- [9] GÜRLEYİK, M. Y. Soğuk Deforme Edilen Metalik Malzemelerin Aşınma Dirençleri Artmaktadır, 1. Otomotiv ve Yan Sanayii Sempozyumu, Bursa, 4-8 Kasım (1985)
- [10] ZUM GAHR, K. H. Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, No 10, Elsevier, p. 560, (1987)
- [11] ODABAŞ, D., TOPAL, E. S. 100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında DeneySEL Araştırılması, PA. Ü., Mühendislik Fakültesi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, s. 396-405, 12-14 Nisan (1995)

- [12] **WUTRICH, N.** Materials Science and Wear, Sulzer Technical Review, 3, pp. 37-40, (1986)
- [13] **BAYER, G.** Mechanical Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, p 1-215 (1994)
- [14] **EYRE, T. S.** Wear Characteristics of Metals, Tribology International, Vol 9, pp. 203-212, October (1976)
- [15] **PRICE, L. H.** Fighting Wear in Agricultural and Off-Road Equipment, Metal Progress, pp. 21-27, August (1983)
- [16] **BUDINSKI, K. G.** Hardfacing III: The Wear Processes, Welding Design and Fabrication, pp. 40-47, December (1986)
- [17] **BISSON, E. E.** Various Modes of Wear and Their Controlling Factors, Seventy-first Annual Meeting, American Society for Testing and Materials, San Francisco, California, pp. 1-22, June (1968)
- [18] **N.N.** Abrasive Wear-J965, Society of Automotive Engineers, Inc., Printed in USA, (1966)
- [19] **N.N.** The Role of Molybdenum in Abrasion-Resistance Materials, Climax Molybdenum Company, New York, (1962)
- [20] **ZOLLINGER, O., BECKHAM, J. E., MONROE, C.** What to Know Before Selecting Hardfacing Electrodes, Welding Journal, Vol. 77, Number 2, pp. 39-43, February (1998)
- [21] **MURRAY, M. J., MUTTON, P. J., WATSON, J. D.** Abrasive Wear Mechanisms in Steels, Journal of Lubrication Technology, Vol. 104, pp. 9-15, January (1982)
- [22] **SULH, N. P., SIN, H. C., SAKA, N.** Fundamental Aspects of Abrasive Wear, Proceedings of The International Conference on The Fundamentals of Tribology, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 493-517, June (1978)
- [23] **SOEMANTRI, S.** The Mechanisms of Abrasive Wear in Steels, Bulk Solids Handling, Volume 14, Number 2, pp. 361-363, April / June (1994)
- [24] **GÜRLEYİK, M. Y.** Makina Mühendisliğinde Aşınma Olayları, Mühendis ve Makina, Cilt: 27, Sayı: 23, s. 3-14, Aralık (1986)
- [25] **AKKURT, M.** Makina Elemanları-Cilt II, İ.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Sayı: 134, (1980)

- [26] **ÖZDAŞ. N.** Sürtünme ve Aşınma Teorileri, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı: 388, (1958)
- [27] **GÜRLEYİK, M. Y.** Aşınmanın Azaltılması İçin Soğuk Deformasyondan Yararlanma, K.T.Ü., Trabzon, (1978)
- [28] **ZUM GAHR, K. H.** How Microstructure Affect Abrasive Wear, Metal Progress, Vol. 116, n. 4, pp. 46-52, September (1979)
- [29] **TSUKIZOE, T.** The Effects of Surface Topography on Wear, Proceedings of The International Conference on The Fundamentals of Tribology, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 53-65, June (1978)
- [30] **HIRANO, H. H., LEVY, A. V.** An Investigation of Two-Body Abrasive Wear, Proceedings of The International Conference on The Fundamentals of Tribology, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 519-541, June (1978)
- [31] **MOORE, M.A.** A Review of Two-Body Abrasive Wear, Wear, Vol. 27, pp. 1-17, (1974)
- [32] **MISRA, A., FINNIE, I.,** An Experimental Study of Three-Body Abrasive Wear, Wear, Vol. 85, pp. 57-68, (1983)
- [33] **SIN, N., SAKA, N., SUH, N.P.** Abrasive Wear Mechanisms and The Grit Size Effect, Wear, Vol. 55, pp. 163-190, (1979)
- [34] **KANTARCI, M.S.** Toprak İşleme Aletlerinde Aşınma, Doktora Tezi, İ.T.Ü., F.B.E., İstanbul, (1982)
- [35] **LIPSON, C.** Wear Considerations in Design, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA, (1967)
- [36] **ARGON, A. S.** Mechanical Properties of Near-Surface Material in Friction and Wear, Proceedings of the International Conference on the Fundamentals of Tribology, MIT, pp. 103-117, June (1978)
- [37] **BASSE, J. L.** Abrasion Mechanisms-Delamination to Machining, Proceedings of the International Conference on the Fundamentals of Tribology, MIT, pp. 679-689, June (1978)
- [38] **SCHAEFFLER, O., ALLEN, C.** The Abrasive Wear of Steels in South African Soils, Tribology International, Vol. 21, No. 3, pp. 127-135, June (1988)
- [39] **FANG, L., KONG, X., ZHOU, Q.** A Wear Tester Capable of Monitoring and Evaluating The Movement Pattern of Abrasive Particles in Three-Body Abrasion, Wear, Vol. 159, pp. 115-120, (1992)

- [40] **MISRA, A., FINNIE, I.** On The Size Effect in Abrasive and Erosive Wear, Vol. 65, pp. 359-373, (1981)
- [41] **KHRUSCHOV, M. M.** Principles of Abrasive Wear, Wear, Vol. 28, pp-69-88, (1974)
- [42] **XU, L., KENNON, N. F.** A Study of The Abrasive Wear of Carbon Steels, Wear, Vol. 148, pp. 101-112, (1991)
- [43] **DAS, S., PARASAD, A. K., MODI, O. P., YEGNESWARAN, A. H.** Three-Body Abrasive Wear of 0.98% Carbon Steel, Wear, Vol. 162-164, pp. 802-810, (1993)
- [44] **BHANSALI, K. J., SILENCE, W. L.** Metallurgical Factors Affecting Wear Resistance of Metals, Metal Progress, pp. 39-43, November (1977)
- [45] **EL-GHAZALY, S. A., SHASH, Y., SAMI, M. K., ABBAS, M.** Effects of Chromium on The Temper Embrittlement and Wear Resistance of 0.25%C Low Alloy Cast Steel, Steel Research, Vol. 64, No. 10, pp. 517-521, (1993)
- [46] **METWALLY, W. A., SAMY, M. K.** Evaluation of Abrasive Wear and Erosion-Corrosion Resistance of High-Cr Cast Steel, Steel Research, Vol. 65, No. 10, pp. 455-458, (1994)
- [47] **MILLER, A. E.** Wear in Steels, Journal of Metals, Vol. 35, pp. 56-62, (1985)
- [48] **LARSEN-BADSE, J., MATHEW, K. G.** Influence of Structure on The Abrasion Resistance of a 1040 Steel, Wear, Vol. 14, pp. 199-206, (1969)
- [49] **MUTTON, P. J., WATSON, J. D.** Some Effects of Microstructure on The Abrasion Resistance of Metals, Wear, Vol. 48, pp. 385-398, (1978)
- [50] **LARSEN-BADSE, J.** The Abrasion Resistance of Some Hardened and Tempered Carbon Steels, Trans. Met. Soc., AIME, Vol. 236, pp. 1461-1466, (1966)
- [51] **MOORE, M. A.** The Relationship Between The Abrasive Wear Resistance Hardness and Microstructure of Ferritic Materials, Wear, Vol. 28, pp. 59-68, (1974)
- [52] **HOKKIRIGAWA, K., KATO, K., LI, Z. Z.** The Effect of Hardness on The Transition of The Abrasive Wear Mechanism of Steels, Wear, Vol. 123, pp. 241-251, (1988)

- [53] UETZ, U., FÖHL, J. Wear as an Energy Transformation Process, Wear, Vol. 49, pp. 253-264, (1978)
- [54] BAYER, G.R. Wear Testing, Metals Handbook, Vol.8, p. 601-608, (1985)
- [55] DEĞERLİ, B. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Deney Düzenekleri, Mühendis ve Makina, Cilt. 37, Sayı. 432, s. 36-38, Ocak (1996)
- [56] SWANSON, P. A. Comparision of Laboratory Abrasion Tests and Field Tests of Materials Used in Tillage Equipment, ASTM Special Technical Publication, No. 1199, Philadelphia, PA, USA, pp. 80-99, (1993)
- [57] PETERSON, M. B. Wear Testing Objectives and Approaches, Source Book on Wear Control Technology, ASM, pp. 40-48, (1978)
- [58] BORIK, F. Using Tests to Define The Influence of Metallurgical Variables on Abrasion, Metals Engineering Quarterly, Vol. 12, pp. 33-39, May (1972)
- [59] MOURITZ, A. P., HUTCHINGS, I. M. The Abrasive Wear of Steel During Rolling-Sliding Contact With Rock Counterfaces, International Conference on Wear of Materails, Denver Co., USA, pp. 99-113, April 8-14 (1989)
- [60] ZHANG, D., BEELEY, P. R., BAKER, A. J. The Design of an Impact Abrasion Testing Machine, Wear, Vol. 173, pp. 59-64, (1994)
- [61] SALOMON, G., DE GEE, A.W.J. Wear Research in Europe, Seventy-first Annual Meeting, ASTM, San Francisco, California, pp. 23-39 23-28 June (1968)
- [62] SCIEZKA, S. F. Tribological Problems of Mineral Comminution, Tribotest Journal, Vol. 2-3, pp. 235-255, March (1996)
- [63] SCİEZKA, S. F. Method of Abrasive Wear Testing in Comminution Processes" Tribotest Journal, Vol. 2-3, pp. 257-266, March (1996)
- [64] ODABAŞ, D. Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, F.B.E., Eylül (1991)
- [65] MARATRAY, F. J., NORMAN, T. E. Contribution to The Study of The Improvement of The Abrasion Resistance of Manganese Austenitic Steels, Revue de Métallurgie, Vol. 58, pp. 489-506, June (1961)

- [66] **MARATRAY, F.** Improvement of and Research into New Abrasion-Resistant Materials, AFS International Cast Metals Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 55-61, December (1981)
- [67] **MELLO, J. D. B., DURAND-CHARRE, M.** Abrasion Mechanisms of White Cast Iron-I: Influence of The Metallurgical Structure of Molybdenum White Cast Irons, Materials Science and Engineering, Vol. 73, pp. 203-213, (1985)
- [68] **NORMAN, T. E.** Abrasion Resistant Cast Materials, Status and Outlook, Amax, American Metal Climax, Inc., Climax Molybdenum Company, October (1970)
- [69] **LULA, R. A.** High Manganese Austenitic Steels: Past, Present and Future, ASM' s Materials Week' 87, Cincinnati, Ohio, pp. 1-12, 10-15 October (1987)
- [70] **DODD, J.** Further Progress in The Development and Utilization of Abrasion Resistant Alloys in The USA, International Abrasion Colloquium, Grenoble, pp. 11-1/11-7, May (1979)
- [71] **LAMBERT, B., POYET, P., DANCOISNE, P. L.** Wear-resistant Manganese Cast Iron, British Foundry, Vol. 68, pp. 179-183, July (1975)
- [72] **QICHUAN, J., ZHENMING, H., DONGHUAN, C., SHOUSHI, W., JIULIN, Y.** Abrasion Resistant as Cast Manganese Steel with Nodular Carbide Modified by Calcium, Journal of Materials Science Letters, Vol. 9, pp. 616-617, (1990)
- [73] **DEGARMO, E. P., BLACK, J.T., KOHSER, R.A.** Materials and Processes in Manufacturing, Macmillan Publishing Company, p. 132, (1988)
- [74] **TÜLBENTÇİ, K., KALUÇ, E., SARI, N. Y.** Talaşlı Şekil verme(İmal Usulleri-IV) , Ders Notları, Kocaeli Üniversitesi, s. 14, (1998)
- [75] **ZEYTİN, S., ÖKTEM, Z., TEPECİK, M., ÇEP, H.** Yüksek Karbonlu Çeliklerin Aşınma Özelliklerine Kalıntı Ostenitin Etkileri, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: 2, s. 1045-1054, 4-8 Mayıs (1993)
- [76] **BAUMEISTER, T., AVALLONE, E. A., BAUMEISTER III, T.** Marks Standard Handbook for Mechanical Engineers, Eight Edition, McGraw-Hill Book Company, p. 6-25, (1976)
- [77] **ÖZENBAŞ, M.** Sert Kaplama Teknolojisindeki Gelişmeler ve Elmas Filmler, PA. Ü., Mühendislik Fakültesi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, s. 162-171, 12-14 Nisan (1995)

- [78] **BLOYCE, A.** How Surface Treatments Can Help The Designer, Design Engineering, pp. 32-34, September (1995)
- [79] **KEMPTON, K.** Where Thermal Spray Coatings Are Most Cost Effective, Welding Journal, pp. 41-44, August (1991)
- [80] **THORPE, M.L.** Thermal Spray Applications Grow, Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress, Vol. 10, pp. 69-76, (1988)
- [81] **SMITH, R. W., FAST, R.D.** The Future of Thermal Spray Technology, Welding Journal, 73(8), pp. 43-50, (1994)
- [82] **BALLARD, W. E.** Metal Spraying and The Flame Deposition of Ceramics and Plastics, Charles Griffin and Company Limited, p. 2, (1963)
- [83] **N.N.** Thermal Spraying, Welding Handbook-Welding Processes, Ninth Edition, AWS, p. 864-889, (1991)
- [84] **HARVEY, D.** Spray for Today, Welding and Joining, pp. 20-23, April (1997)
- [85] **HOWES, C. P.** Thermal Spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications, Welding Journal, 73(4), pp. 47-51, (1994)
- [86] **VILLAT, M.** Functionally Effective Coatings Using Plasma Spraying, Sulzer Technical Review, 3, pp. 41-45, (1986)
- [87] **N.N.** Thermal Spray: Advances in Coatings Technology, Edited by Houck, D.L., Proceeding of the National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, Published by ASM, p. 367, 14-17 September (1987)
- [88] **SMITH, R.W., KNIGHT, R.** Thermal Spraying I: Powder Consolidation-From Coating to Forming, JOM, 47(8), pp. 32-39, (1995)
- [89] **KUTNER, G. L.** Thermal Spray by Design, Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress, Vol. 134, pp. 63-68, December (1988)
- [90] **HOFF, I. H.** Thermal Spraying and its Application, Welding and Metal Fabrication, 63(7), pp. 266-269, July (1995)
- [91] **CLARE, J. H., CRAWMER, D. E.** Thermal Spray Coatings, Metals Handbook, Vol. 5, pp. 361-375, (1982)
- [92] **N.N.** Thermal Spraying, Welding Journal, Data sheet 207a, p. 69-70, Vol. 76, No. 8, August (1997)

- [93] **KADYROV, E., KADYROV, V.** Gas Detonation Gun, Advanced Materials and Processes, pp. 21-24, August (1995)
- [94] **d'ANGELO, C., JOUNDI, H. E.** Reliable Coatings Via Plasma Arc Spraying, Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress, pp. 41-44, December (1988)
- [95] **KUBEL, E. J.** Thermal Spraying Technology: From Art to Science, Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress, pp. 69-80, December (1987)
- [96] **DUCOS, M., REITZ, V.** Settings Parameters for Plasma Coating, Welding Design and Fabrication, pp. 41-43, June (1987)
- [97] **LUGSCHEIDER, E.** Plasma Spraying for Wear Applications, Proceedings of The National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, Published by ASM, pp. 105-122, 14-17 September (1987)
- [98] **LONGO, F. N.** Plasma Spray System, One-step Composite Coating Win Awards, Advanced Materials and Processes, pp. 22-23, December (1995)
- [99] **SMITH, R. W.** Reactive Plasma Spray Forming for Advanced Materials Synthesis, Powder Metallurgy Int.(PMI), Vol. 25, n.1, pp. 9-16, (1993)
- [100] **SMITH, R. W., MUTASIM, Z. Z.** Reactive Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 1, n. 1, pp. 57-63, March (1992)
- [101] **DAVIES, G., BREITSAMETER, M.** Advances in HVOF Surfacing Technology, Welding and Metal Fabrication, Vol. 63, No. 7, pp. 271-272, July(1995)
- [102] **PARKER, D. W., KUTNER, G. L.** HVOF-Spray Technology-Poised for Growth, Advanced Materials and Processes, Vol. 139, No. 4, pp. 68-72, April (1992)
- [103] **BRANDT, O. C.** Mechanical Properties of HVOF Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 4(2), pp. 147-152, June (1995)
- [104] **IRONS, G.** Higher Velocity Thermal Spray Processes Produce Better Aircraft Engine Coatings, SAE, 28 th Annual Aerospace / Airline Plating and Metal Finishing Forum and Exposition, San Diego, California, pp. 1-17, 20-23 April, (1988)

- [105] **KAY, A.** Successful Hypersonic Spray Applications in The Steel Industry, Proceedings of The National Thermal Spray Conference, Cincinnati, Ohio, USA, pp. 443-448, 24-27 October, (1988)
- [106] **COVE, E., COLE, R.** Hypervelocity Application of Tribological Coatings, Proceedings of The National Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, USA, Published by ASM, pp. 123-130, 14-17 September (1987)
- [107] **SWANK, W. D., FINCKE, J. R., HAGGARD, D. C., IRONS, G., BULLOCK, R.** HVOF Particle Flow Field Characteristics, Proceedings of The 7th National Thermal Spray Conference, Boston, Massachusetts, pp. 319-324, 20-24 June (1994)
- [108] **N.N.** Hardfacing, Metals Handbook, ASM, 9th Edition, Vol. 6, p. 771, (1983)
- [109] **ZAHNER, B., MENON, R.** Selecting Filler Metals for Hardfacing, Welding Design and Fabrication, pp. 16-18, August (1995)
- [110] **MENON, R.** New Developments in Hardfacing Alloys, Welding Journal, Vol. 75, No. 2, pp. 43-49, February (1996)
- [111] **ÇELİK, H.** Kaynak Edilebilen Kobalt ve Demir Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıklardaki Aşınma Davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü., F.B.E., Aralık (1991)
- [112] **ANIK, S.** Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Holding Yayını, s. 171, (1994)
- [113] **LAMPMAN, S.** Introduction to Surface Hardening of Steels, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, p. 259, (1991)
- [114] **BUDINSKI, K.G.** The Wear Resistance of Diffusion Treated Surfaces", Wear, Vol. 162-164, pp. 757-762, (1993)
- [115] **KARAGÖZ, Ş.** Takım Çeliklerinin Isıl İşlemi, Seminer Notları, Metalurji Mühendisleri Odası, Denizli, 23-25 Aralık, (1991)
- [116] **TOPBAŞ, M. A.** Çeliğin Isıl İşlemi, Yıldız Üniversitesi Yayınları, Sayı: 250, s. 48, İstanbul (1992)
- [117] **ÇİMEN, Ö., ÇAPAN, L., ÇEP, H., ÖKTEM, Z.** Nitrürleme İle Yüzey Sertleştirme, Metal Dünyası, Sayı: 13, s. 25-33, Mayıs (1994)
- [118] **MEHRKAM, Q. D., EASTERDAY, J. R., PAYNE, B. R., FOREMAN, R. W., VUKOVICH, D., GODDING, A. D.** Liquid Nitriding, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, p. 410, (1991)

- [119] **KNERR, C. H., ROSE, T. C., FILKOWSKI, J. H.** Gas Nitriding, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, p. 387, (1991)
- [120] **EDENHOFER, B.** Section V: Production Ionitriding, Metal Progress, pp. 181-185, March (1976)
- [121] **STAINES, A. M., HART, S.** Industrial Aspects of Heat Treatment in A Glow Discharge System, Surface Engineering, Vol. 5, No: 4, pp. 285-291, (1991)
- [122] **ÇELİK, A.** Effect of Ion Nitriding Parameters on Fatigue Strength of AISI 4140 Steel, PhD Thesis, Dokuz Eylül University, October, (1993)
- [123] **KALUÇ, E., TÜLBENTÇİ, K.** Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği Seminer Notları, s. 99, 19-20 Mart Kocaeli, (1998)
- [124] **KARADENİZ, S.** Plazma ve Endüstrideki Yeri, 1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, s. 421-427, 19-21 Eylül (1984)
- [125] **KARADENİZ, S., YAZGAN, E.** Bir İyonitürasyon Ünitesinin Kurulması ve Uygulanması, Araştırma Raporları, Dokuz Eylül Üniversitesi, F.B.E., İzmir, (1989)
- [126] **BRADING, H. J., MORTON, P. H., BELL, T., EARWAKER, L. G.** Plasma Nitriding With Nitrogen, Hydrogen and Argon Gas Mixtures: Structure and Composition of Coatings on Titanium, Surface Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 206-211, (1992)
- [127] **O' BRIEN, J. M.** Plasma (Ion) Nitriding, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, p. 421, (1991)
- [128] **ÇİMEN, Ö. ÇAPAN, L., ÇEP, H., ÖKTEM, Z.** M2 Çeliğinin İyon Nitürasyonu, Metal Dünyası, Sayı 13, s. 34-42, Mayıs (1994)
- [129] **JONES, C. K., MARTIN, S. W., STURGES, D. J., HUDIS, M.** Ion Nitriding, Metal Society, pp. 71-77, (1975)
- [130] **SCOTT, D.** Introduction to Tribology, Proceedings of The International Conference on The Fundamentals of Tribology, MIT, pp. 1-13, June (1978)
- [131] **ÜRGEN, M.** Modern Yüzey İşlem Teknolojileri ve Türkiye' deki Gelişmeler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, s. 333-350, 11-15 Haziran (1995)

- [132] **KIM, H. J., KWEON, Y. G.** The Improvement of Three Body Abrasive Wear of Plain Carbon Steel by Thermochemical Treatments, *Wear*, Vol. 174, pp. 201-208, (1994)
- [133] **PENG, Q. F.** Improving Abrasion Wear by Surface Treatments, *Wear*, Vol. 129, pp. 195-203, (1989)
- [134] **SU, Y. L., LIN, J. S.** Wear Mechanisms and Improvement in Tribological Performance of Steels after Surface Treatments for Machine Element Application, *Wear*, Vol. 160, pp. 139-151, (1993)
- [135] **BELL, T., ZHANG, Z. L., LANAGAN, J., STAINES, A. M.** Coatings and Treatment for Corrosion and Wear Resistance, Ed. K.N. Stafford et al, 164, Chichester, Ellis Harwood, (1984)
- [136] **BELL, T., SUN, Y.** Load Bearing Capacity of Plasma Nitrided Steel Under Rolling-Sliding Contact, *Surface Engineering*, Vol. 6, No.2, pp. 133-139, (1990)
- [137] **KARAMIŞ, M. B.** Experimental Study of the Abrasive Wear Behaviour of Plasma Nitrided Gearing Steel, *Wear*, Vol. 161, pp. 199-206, (1993)
- [138] **KRISHNAMURTHY, S., RAMAMOZHANA, R. A.** A Comparative Study on The Performance of Differently Treated Plain Carbon Steel Gears, *Wear*, Vol. 142, pp. 239-252, (1991)
- [139] **AHMED, M. M. I., EL-KARIM, A., EL-RAGHY, S. M., EL-REFAIE, F. A., EL-MEHAIRY, A. E.** Wear Resistance of Plasma Coatings on Mild Steel, *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 517-522, (1991)
- [140] **NIEMI, K., VUORISTO, P., MÄNTYLÄ, T.** On The Properties of Thermally Sprayed Oxide Ceramic Coating, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: 2, s. 1283-1294, 4-8 Mayıs (1993)
- [141] **VUORISTO, P., NIEMI, K., MÄKELÄ, A., MÄNTYLÄ, T.** Abrasion Wear Resistance of Detonation Gun Sprayed Carbide Coatings, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: 2, s. 1295-1302, 4-8 Mayıs (1993)
- [142] **SOYKAN, Ş., ÜSTEL, F., ÇELİK, E., AVCI, E.** Plazma Sprey Yöntemi ile Üretilen Seramik Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Davranışları, *Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, Cilt. 21, Sayı. 417-423, (1997)

- [143] DALLAIRE, S., LEGOUX, J. G., LEVERT, H. Abrasion Wear Resistance of Arc Sprayed Stainless Steel and Composite Stainless Steel and Composite Stainless Steel Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 4(2), pp. 163-168, June (1995)
- [144] KIM, H. J., KWEON, Y. G., CHANG, R. W. Wear and Erosion Behaviour of Plasma-Sprayed WC-Co Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 3(2), pp. 169-178, June (1994)
- [145] BAHADUR, S., YANG, C. N. Friction and Wear Behavior of Tungsten and Titanium Carbide Coatings, Wear, Vol. 196, pp. 156-163, (1996)
- [146] MOHANTY, M., SMITH, R. W., BONTE, M., CELIS, J. P., LUGSCHEIDER Sliding Wear Behavior of Thermally Sprayed 75/25 Cr₃C₂/NiCr Wear Resistant Coatings, Wear, Vol. 198, pp. 251-266, (1996)
- [147] WOOD, R. J. K., MELLOR, B. G., BINFIELD, M. L. Sand Erosion Performance of Detonation Gun Applied Tungsten carbide / Cobalt - Chromium Coatings, Wear, Vol. 211, pp. 70-83, (1997)
- [148] LI, J. F., DING, C. X., HUANG, J. Q., ZHANG, P. Y. Wear Mechanism of Plasma-Sprayed Cr₃C₂ - NiCr Against TiO₂ Coating, Wear, Vol. 211, pp. 177-184, (1997)
- [149] ILGAZ, A. Demir-Çelik Sanayiinin Geleceği ve Araştırma-Geliştirme Faaliyetleri, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt: 1, s. 75-80, 4-8 Mayıs (1993)
- [150] <http://www.die.gov.tr> Devlet İstatistik Enstitüsü Tarafından Hesaplanan 1992 yılı Türkiye İmalat Sanayiinde Yoğunlaşma
- [151] ÖNEM, Y. Sanayi Madenleri, Kazan Ofset Matbaacılık San. Ve Tic. Ltd. Şti., Ankara, Mart (1997)
- [152] ERGÜN, M. Bilimsel Araştırmalarda Bilgisayarla İstatistik Uygulamaları, Ocak Yayınları, Ankara, s. 8, (1995)
- [153] BAYKUL, Y. İstatistik Metodlar ve Uygulamalar, Lazer Ofset Ltd. Şti. Ankara, s. 472, (1996)
- [154] ASHBY, M. F., JONES, D. R. H. Engineering Materials, Pergamon Press, U.K., p. 169, (1987)

Tablo A.1 Esas metalin (N) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi.

A Ğ İ R L İ K (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm* 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
N1	14394	14262	14203	14150	14115	14073	14046	14010	13974	13939	13901
N2	14527	14406	14346	14315	14258	14216	14188	14151	14122	14088	14048
N3	14139	14011	13955	13905	13858	13821	13793	13762	13729	13693	13660
N4	14455	14350	14294	14242	14192	14155	14125	14093	14067	14030	13996

* 1.Saat sonundaki ağırlıklıklar başlangıç değeri olarak alınmıştır.

T O P L A M A Ğ İ R L İ K K A Y B İ (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm** 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
N1	0	132	59	112	147	189	216	252	288	323	361
N2	0	121	60	91	148	190	218	255	284	318	358
N3	0	128	56	106	153	190	218	249	282	318	351
N4	0	105	56	108	158	195	225	257	283	320	354

** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Numune hızı: 1.35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Ortalama hız: 1,25 m/sn. Toplam yol: 150 d/dak. Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km. Çalışma derinliği 55 mm.

Tablo A.6 Tuz banyosunda nitrülenmiş numunenin (TN) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi.

A Ğ I R L I K (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm* 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
TN1	13615	13525	13460	13394	13352	13321	13241	13188	13141	13093	13018
TN2	14952	14864	14797	14729	14686	14653	14579	14528	14482	14434	14361
TN3	13548	13450	13377	13301	13257	13211	13128	13058	13007	12939	12869
TN4	13493	13392	13317	13236	13190	13141	13064	12998	12947	12879	12808
* 1. Saat sonundaki ağırlıklıklar başlangıç değeri olarak alınmıştır.											
T O P L A M A Ğ I R L I K K A Y B I (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm** 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
TN1	0	90	65	131	173	204	284	337	384	432	507
TN2	0	88	67	135	178	211	285	336	382	430	503
TN3	0	98	73	149	193	239	322	392	443	511	581
TN4	0	101	75	156	202	251	328	394	445	513	584
** 1. Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.											
Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.											

[illegible]

**** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.**

Numune hızı: 1,35 m/sn. Ana mill devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

**** 1 Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.**

Nüme hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir nümnenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Yol uzunluğu: 125 m/cm; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak · Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

A Ğ İ R L İ K (M ²)					
İçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	6	İçüm	6
Saat	4.Saat	5.Saat		Saat	
691	12606	12526		12526	
202	13116	13038		13038	
281	13180	13066		13066	
269	13177	13078		13078	
K alınmıştır.					
A Ğ İ R L İ K					
İçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	6	İçüm	6
Saat	4.Saat	5.Saat		Saat	
58	343	423		423	
61	347	425		425	
88	389	503		503	
65	357	456		456	
K alınmıştır.					
Her bir numunenin 10 saat son					

**** 1 Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.**

Numune hızı: 1.35 m/sn; Ana mill devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5.364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

A Ğ İ R L İ K (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm* 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
1F1/1	16812	16533	16486	16448	16409	16388	16363	16338	16315	16293	16271
1F1/2	16498	16268	16233	16203	16170	16149	16127	16106	16086	16067	Kırıldı
1F1/3	17012	16817	16764	16717	16686	16655	16628	16597	16568	16536	16525
1F1/4	16680	16432	16369	16325	16289	16259	16231	16199	16169	16139	16112

* 1.Saat sonundaki ağırlıklıklar başlangıç değeri olarak alınmıştır.

T O P L A M A Ğ İ R L İ K K A Y B İ (Mg)											
Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm** 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
1F1/1	0	279	47	85	124	145	170	195	218	240	262
1F1/2	0	230	35	65	98	119	141	162	182	201	Kırıldı
1F1/3	0	195	53	100	131	162	189	220	249	281	292
1F1/4	0	248	63	107	143	173	201	233	263	293	320

** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yoi: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

**** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.**

**** 1 Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.**

“... Çalışma derinliği 55 mm.

**** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları diikkate alınmamıştır.**

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Tablo A.22 Isıl püskürtme ile kaplanmış numunenin (3F4) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi.

A Ğ İ R L İ K (Mg)

Numune No	0. Ölçüm 0.Saat	1. Ölçüm* 1.Saat	2. Ölçüm 2.Saat	3. Ölçüm 3.Saat	4. Ölçüm 4.Saat	5. Ölçüm 5.Saat	6. Ölçüm 6.Saat	7. Ölçüm 7.Saat	8. Ölçüm 8.Saat	9. Ölçüm 9.Saat	10. Ölçüm 10.Saat
3F4/1	15036	14942	14894	14849	14817	14777	14735	14690	14653	14610	14568
3F4/2	16649	16614	16595	16578	16572	16567	19561	16554	16548	16542	16535
3F4/3	17646	17623	17609	17590	17587	17582	17576	17569	17562	17558	17554
3F4/4	16875	16858	16841	16823	16815	16810	16804	16799	16793	16789	16783

* 1.Saat sonundaki ağırlıklıklar başlangıç değeri olarak alınmıştır.

T O P L A M A Ğ İ R L İ K K A Y B İ (Mg)

Numune No	0. Ölçüm 0.Saat	1. Ölçüm** 1.Saat	2. Ölçüm 2.Saat	3. Ölçüm 3.Saat	4. Ölçüm 4.Saat	5. Ölçüm 5.Saat	6. Ölçüm 6.Saat	7. Ölçüm 7.Saat	8. Ölçüm 8.Saat	9. Ölçüm 9.Saat	10. Ölçüm 10.Saat
3F4/1	0	94	48	93	125	165	207	252	289	332	374
3F4/2	0	35	19	36	42	47	53	60	66	72	79
3F4/3	0	23	14	33	36	41	47	54	61	65	69
3F4/4	0	17	17	35	43	48	54	59	65	69	75

** 1.Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yoli: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

Tablo A.23 Titanyum nitrür kaplanmış numunenin (TiN) ağırlık ve toplam ağırlık kaybı miktarı değişimi.

A Ğ İ R L İ K (Mg)

Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm* 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
TiN1	13848	13675	13554	13501	13452	13396	13361	13307	13270	13212	13159
TiN2	13744	13567	13439	13383	13332	13267	13229	13170	13123	13053	12989
TiN3	13548	13399	13305	13245	13202	13150	13106	13049	13009	12955	12920
TiN4	13592	13438	13342	13280	13230	13174	13128	13068	13025	12966	12927

* 1. Saat sonundaki ağırlıklıklar başlangıç değeri olarak alınmıştır.

T O P L A M A Ğ İ R L İ K K A Y B İ (Mg)

Numune No	0.Ölçüm 0.Saat	1.Ölçüm** 1.Saat	2.Ölçüm 2.Saat	3.Ölçüm 3.Saat	4.Ölçüm 4.Saat	5.Ölçüm 5.Saat	6.Ölçüm 6.Saat	7.Ölçüm 7.Saat	8.Ölçüm 8.Saat	9.Ölçüm 9.Saat	10.Ölçüm 10.Saat
TiN1	0	173	121	174	223	279	314	368	405	463	516
TiN2	0	177	128	184	235	300	338	397	444	514	578
TiN3	0	149	94	154	197	249	293	350	390	444	479
TiN4	0	154	96	158	208	264	310	370	413	472	511

** 1. Saat sonundaki ağırlık kayıpları dikkate alınmamıştır.

Numune hızı: 1,35 m/sn; Ana mil devir sayısı: 150 d/dak.; Her bir numunenin 10 saat sonunda aldığı toplam yol: 5,364 km; Çalışma derinliği 55 mm.

EK B

Tablo B1 Numune kenarından merkeze doğru yapılan sertlik taramaları değerleri.

Numune kodu	Kenardan uzaklık (µm)	Sertlik (HV0.01)	Numune kodu	Kenardan uzaklık (µm)	Sertlik (HV0.01)	Numune kodu	Kenardan uzaklık (µm)	Sertlik (HV0.01)
IN1/2	0	757	IN1	0	710	IN4	0	757
	20	426		15	352		20	589
	40	263		35	352		35	426
	60	220		55	252		60	234
	80	239		100	234		80	250
	100	212		150	227		100	262
	150	243		200	225		150	227
	200	217		250	227		200	227
	250	227		300	228		250	230
	300	232		350	222		300	225
IN12	0	561	IN24	0	559	IN48	0	641
	20	322		20	337		20	337
	40	322		40	309		40	309
	70	272		70	252		60	284
	100	248		100	217		80	239
	150	217		150	208		100	217
	200	202		200	202		150	202
	250	217		250	217		200	202
	300	198		300	195		250	198
	350	201		350	195		300	196
GN6	0	627	GN12	0	627	TN	0	627
	20	343		20	352		15	472
	35	322		35	322		30	325
	55	272		60	252		60	272
	85	237		100	252		100	272
	115	217		150	227		150	272
	150	227		200	235		200	252
	200	202		250	212		250	217
	250	205		300	202		300	252
	300	212		350	225		350	217
B	0	1100	TiN	0	1291			
	15	1284		10	296			
	30	1183		30	272			
	45	1092		60	234			
	60	272		100	217			
	100	202		150	178			
	150	225		200	233			
	200	168		250	217			
	250	175		300	217			
	300	202		350	225			

Tablo C.1 Yüzey işlemlerinin birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı aritmetik ortalamalarının ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen anlamlılık düzeyleri.

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlik Kaybı (Mg/mm ²)										
1. Numune	0,517	-	0,390	0,477	0,852	0,726	1,056			
2. Numune	0,518	0,351	0,411	0,576	1,235	0,720	1,189			
3. Numune	0,503	0,338	0,458	0,509	-	0,832	1,256			
4. Numune	0,507	0,381	0,451	0,583	1,225	0,836	1,259			
Aritmetik Ortalama	0,510	0,357	0,428	0,536	1,104	0,779	1,190			
Numune Kodu	N	YS	YS3T	E	B	TN	GN6			
N										
YS	0,000									
YS3T	0,024	0,030								
E	0,400	0,004	0,022							
B	0,007	0,003	0,004	0,003						
TN	0,005	0,001	0,000	0,007	0,029					
GN6	0,001	0,000	0,000	0,000	0,226	0,001				

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlik Kaybı (Mg/mm ²)							
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama			
0,517	0,513	0,503	0,507	0,510			
-	0,351	0,338	0,381	0,357			
0,390	0,411	0,458	0,451	0,428			
0,477	0,576	0,509	0,583	0,536			
0,852	1,235	1,104	1,225	1,104			
0,726	0,720	0,832	0,836	0,779			
1,056	1,189	1,256	1,259	1,190			

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)												
1. Numune	0,517	-	0,390	0,477	0,852	0,726	1,056					
2. Numune	0,518	0,351	0,411	0,576	1,235	0,720	1,189					
3. Numune	0,503	0,338	0,458	0,509	-	0,832	1,256					
4. Numune	0,507	0,381	0,451	0,583	1,225	0,836	1,259					
Aritmetik Ortalama	0,510	0,357	0,428	0,536	1,104	0,779	1,190					
10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)												
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama	Numune Kodu	N	YS	YS3T	E	B	TN	GN6
1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	GN12	0,001	0,000	0,002	0,002	0,545	0,038	0,148
0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	IN1/2	0,004	0,001	0,000	0,001	0,013	0,584	0,000
0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	IN1	0,008	0,000	0,002	0,003	0,008	0,008	0,001
0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	IN4	0,016	0,001	0,001	0,004	0,007	0,017	0,000
1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	IN12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,125	0,002	0,134
1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	IN24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,000	0,039
1,202	1,210	936	1,268	1,255	IN48	0,000	0,000	0,000	0,000	0,178	0,000	0,131

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)											
1. Numune	0,517	-	0,390	0,477	0,852	0,726	1,056				
2. Numune	0,518	0,351	0,411	0,576	1,235	0,720	1,189				
3. Numune	0,503	0,338	0,458	0,509	-	0,832	1,256				
4. Numune	0,507	0,381	0,451	0,583	1,225	0,836	1,259				
Aritmetik Ortalama	0,510	0,357	0,428	0,536	1,104	0,779	1,190				
10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)											
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama	N	YS	YS3T	E	B	TN	GN6
0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,002	0,370	0,004	0,001	0,002	0,000	0,000
0,258	0,345	-	0,423	0,351	0,022	0,862	0,056	0,001	0,001	0,001	0,000
0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000
0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,000	0,001	0,003	0,000	0,002	0,001	0,000
0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,000	0,000	0,002	0,001	0,002	0,001	0,000
0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000
0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)										
1.	0,517	-	0,390	0,477	0,852	0,726	1,056			
Numune										
2.	0,518	0,351	0,411	0,576	1,235	0,720	1,189			
Numune										
3.	0,503	0,338	0,458	0,509	-	0,832	1,256			
Numune										
4.	0,507	0,381	0,451	0,583	1,225	0,836	1,259			
Numune										
Aritmetik Ortalama	0,510	0,357	0,428	0,536	1,104	0,779	1,190			
Numune Kodu	N	YS	YS3T	E	B	TN	GN6			
3F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000			
TIN	0,003	0,001	0,004	0,005	0,029	0,615	0,006			

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1.	2.	3.	4.	Aritmetik Ortalama
Numune	Numune	Numune	Numune	
-	0,107	0,093	0,101	0,100
0,739	0,828	0,686	0,732	0,746

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)												
1. Numune	1,089	0,686	0,576	0,593	1,358	1,329	1,202					
2. Numune	1,109	0,773	0,587	0,657	1,341	1,348	1,210					
3. Numune	0,940	0,770	0,570	0,649	1,321	1,318	936					
4. Numune	0,991	0,824	0,623	0,730	1,265	1,386	1,268					
Aritmetik Ortalama	1,032	0,763	0,589	0,657	1,321	1,345	1,255					
Numune Kodu	GN12	IN1/2	IN1	IN4	IN12	IN24	IN48					
GN12												
IN1/2	0,020											
IN1	0,002	0,004										
IN4	0,008	0,001	0,036									
IN12	0,003	0,001	0,000	0,001								
IN24	0,005	0,000	0,000	0,000	0,522							
IN48	0,053	0,001	0,000	0,000	0,240	0,098						

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)							
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama			
1,089	1,109	0,940	0,991	1,032			
0,686	0,773	0,770	0,824	0,763			
0,576	0,587	0,570	0,623	0,589			
0,593	0,657	0,649	0,730	0,657			
1,358	1,341	1,321	1,265	1,321			
1,329	1,348	1,318	1,386	1,345			
1,202	1,210	936	1,268	1,255			

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)										
1. Numune	1,089	0,686	0,576	0,593	1,358	1,329	1,202			
2. Numune	1,109	0,773	0,587	0,657	1,341	1,348	1,210			
3. Numune	0,940	0,770	0,570	0,649	1,321	1,318	936			
4. Numune	0,991	0,824	0,623	0,730	1,265	1,386	1,268			
Aritmetik Ortalama	1,032	0,763	0,589	0,657	1,321	1,345	1,255			
10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)										
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama						
0,309	-	0,345	0,378	0,344	GN12	IN1/2	IN1			
0,258	0,345	-	0,423	0,351	1F1	0,000	0,000			
0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	1F2	0,002	0,003			
0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	2F1	0,000	0,000			
0,207	0,181	0,156	-	0,182	2F2	0,000	0,000			
0,152	0,168	0,152	-	0,157	3F1	0,000	0,000			
0,129	0,116	-	0,104	0,116	3F2	0,000	0,000			
					3F3	0,000	0,000			

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)									
1. Numune	1,089	0,686	0,576	0,593	1,358	1,329	1,202		
2. Numune	1,109	0,773	0,587	0,657	1,341	1,348	1,210		
3. Numune	0,940	0,770	0,570	0,649	1,321	1,318	936		
4. Numune	0,991	0,824	0,623	0,730	1,265	1,386	1,268		
Aritmetik Ortalama	1,032	0,763	0,589	0,657	1,321	1,345	1,255		
Numune Kodu	GN12	IN1/2	IN1	IN4	IN12	IN24	IN48		
3F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
TIN	0,001	0,706	0,014	0,119	0,000	0,000	0,003		

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama
-	0,107	0,093	0,101	0,100
0,739	0,828	0,686	0,732	0,746

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)												
1. Numune		0,309	0,258	0,196	0,198	0,207	0,152	0,129				
2. Numune		-	0,345	0,217	0,233	0,181	0,168	0,116				
3. Numune		0,345	-	0,199	0,163	0,156	0,152	-				
4. Numune		0,378	0,423	0,219	0,210	-	-	0,104				
Aritmetik Ortalama		0,344	0,351	0,208	0,201	0,182	0,157	0,116				
Numune Kodu		1F1	1F2	2F1	2F2	3F1	3F2	3F3				
1F1												
1F2		0,767										
2F1		0,001	0,017									
2F2		0,005	0,021	0,593								
3F1		0,005	0,026	0,127	0,237							
3F2		0,001	0,010	0,001	0,033	0,117						
3F3		0,001	0,010	0,003	0,014	0,005	0,011					

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama
0,309	-	0,345	0,378	0,344
0,258	0,371	-	0,423	0,351
0,196	0,217	0,199	0,219	0,208
0,198	0,233	0,163	0,210	0,201
0,207	0,181	0,156	-	0,182
0,152	0,168	0,152	-	0,157
0,129	0,116	-	0,104	0,116

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)												
1. Numune		0,309	0,258	0,196	0,198	0,207	0,152	0,129				
2. Numune		-	0,371	0,217	0,233	0,181	0,168	0,116				
3. Numune		0,345	-	0,199	0,163	0,156	0,152	-				
4. Numune		0,378	0,423	0,219	0,210	-	-	0,104				
Aritmetik Ortalama		0,344	0,351	0,208	0,201	0,182	0,157	0,116				
Numune Kodu		1F1	1F2	2F1	2F2	3F1	3F2	3F3				
3F4		0,000	0,005	0,000	0,003	0,003	0,000	0,077				
TIN		0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama
-	0,107	0,093	0,101	0,100
0,739	0,828	0,686	0,732	0,746

Tablo C.1' in devamı

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1. Numune	-	0,739		
2. Numune	0,107	0,828		
3. Numune	0,093	0,686		
4. Numune	0,101	0,732		
Aritmetik Ortalama	0,100	0,746		
Numune Kodu	3F4	TIN		
3F4				
TIN	0,000			

10. Saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Aritmetik Ortalama
-	0,107	0,093	0,101	0,100
0,739	0,828	0,686	0,732	0,746

Tablo C.2 Yüzey işlemlerinin birim yüzeydeki toplam ağırlık kaybı aritmetik ortalamalarının ($\bar{X}$) ikili t-testi ile karşılaştırılması sonucu elde edilen, standard sapma (SS), t ve anlamlılık (P) değerleri.

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	16,76	0,000
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	4,28	0,024
YS3T	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	0,98	0,400
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	6,54	0,007
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	7,69	0,005
TN	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	13,51	0,001
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	14,02	0,001
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	8,22	0,004
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	6,22	0,008
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	4,89	0,016
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırılık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*		Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune			t	P	
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	44,18	0,000	
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	54,06	0,000	
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	21,21	0,000	
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	10,16	0,002	
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	4,37	0,022	
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	42,86	0,000	
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	23,66	0,000	
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	42,74	0,000	
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	82,24	0,000	
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008			
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	103,18	0,000	
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010			

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
Kodu	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	$\bar{X}$	SS	t	P
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	157,96	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
N	0,517	0,513	0,503	0,507	0,510	0,006	8,46	0,003
TiN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	3,89	0,030
YS3T	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	7,90	0,004
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	8,53	0,003
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	13,41	0,001
TN	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	17,49	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	16,68	0,000
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	15,52	0,001
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	47,68	0,000
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	12,77	0,001
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	35,61	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	130,45	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	25,02	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	1,05	0,370
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	0,19	0,862
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	20,43	0,000
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	11,95	0,001
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	17,00	0,000
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
YS	-	0,351	0,338	0,381	0,357	0,018	20,98	0,000
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
YS3T IN4	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	11,30	0,001
	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		
YS3T IN12	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	26,04	0,000
	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
YS3T IN24	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	47,63	0,000
	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
YS3T IN48	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	44,02	0,000
	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
YS3T 1F1	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	8,15	0,004
	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
YS3T 1F2	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	3,03	0,056
	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		
YS3T 2F1	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	13,86	0,001
	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
YS3T 2F2	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	8,54	0,003
	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
YS3T 3F1	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	9,59	0,002
	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
YS3T 3F2	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	15,55	0,001
	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo:} 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
YS3T	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	15,23	0,001
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
YS3T	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	18,22	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
YS3T	0,390	0,411	0,458	0,451	0,428	0,032	7,76	0,004
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	8,65	0,003
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	6,57	0,007
TN	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,084		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	17,66	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	10,50	0,002
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	15,49	0,001
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	2,85	0,065
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	8,12	0,004
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}		Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune			t	P	
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	18,79	0,000	
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	49,13	0,000	
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	17,11	0,000	
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	11,91	0,001	
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	11,91	0,001	
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	16,44	0,000	
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	16,82	0,000	
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	11,75	0,001	
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	16,35	0,000	
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008			
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	13,88	0,001	
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010			

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	17,94	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
E	0,477	0,576	0,509	0,583	0,536	0,052	7,55	0,005
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	3,92	0,029
TN	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	1,52	0,226
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	0,68	0,545
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	5,34	0,013
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	6,20	0,008
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	6,61	0,007
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	2,11	0,125
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	2,97	0,059
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
B IN48	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	1,75	0,178
	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	9,82	0,002
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	13,05	0,001
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	10,67	0,002
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	10,68	0,002
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	9,66	0,002
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	10,93	0,002
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	10,56	0,002
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	11,38	0,001
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
B	0,852	1,235	-	1,225	1,104	0,178	4,27	0,024
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
GN6 TN	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095	14,09	0,001
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
GN12 TN	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080	3,55	0,038
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN1/2 TN	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	0,61	0,584
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN1 TN	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	6,39	0,008
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN4 TN	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	4,82	0,017
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN12 TN	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040	10,87	0,002
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN24 TN	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030	18,02	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
IN48 TN	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064	29,11	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
1F1 TN	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	17,94	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
1F2 TN	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	14,21	0,001
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
2F1 TN	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012	17,85	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
2F2 TN	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	13,69	0,001
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
3F1 TN	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	15,03	0,001
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
3F2 TN	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	18,31	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
3F3 TN	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010	18,48	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
3F4 TN	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	19,93	0,000
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
TIN TN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	0,56	0,615
	0,726	0,720	0,832	0,836	0,779	0,064		
GN6 GN12	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095	1,94	0,148
	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
IN1/2 GN6	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	17,78	0,000
	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
IN1 GN6	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	13,70	0,001
	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	18,10	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095	2,04	0,134
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095	3,52	0,039
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095	2,06	0,131
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	23,73	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	36,10	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012	21,98	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	18,96	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	17,80	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	21,94	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ³)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010	20,62	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	22,57	0,000
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
TiN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	7,18	0,006
GN6	1,056	1,189	1,256	1,259	1,190	0,095		
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	4,51	0,020
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	10,33	0,002
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	6,45	0,008
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080	9,01	0,003
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080	7,35	0,005
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080	3,11	0,053
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	14,08	0,001
GN12	1,089	1,109	0,940	0,991	1,032	0,080		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}		Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune			t	P	
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	11,80	0,001	
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	27,63	0,000	
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	15,46	0,001	
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	28,33	0,000	
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	62,36	0,000	
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	23,03	0,000	
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	18,84	0,000	
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	16,27	0,001	
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	22,07	0,000	
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008			
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	19,23	0,000	
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010			

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	$t_{\text{tablo}}: 3,182^*$	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	23,28	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
IN1/2	0,686	0,773	0,770	0,824	0,763	0,057	0,41	0,706
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	3,63	0,036
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	23,71	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	216,26	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	18,90	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	28,48	0,000
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	8,85	0,003
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	48,20	0,000
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	28,39	0,000
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	27,43	0,000
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	37,57	0,000
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	29,15	0,000
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	43,97	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
IN1	0,576	0,587	0,570	0,623	0,589	0,024	5,18	0,014
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	13,92	0,001
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	39,19	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	17,10	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	21,96	0,000
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	19,01	0,000
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	$t_{\text{tablo}}: 3,182^*$	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	19,12	0,000
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	16,01	0,001
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	14,15	0,001
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	18,32	0,000
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	16,30	0,001
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	19,98	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
IN4	0,593	0,657	0,649	0,730	0,657	0,056	2,16	0,119
TiN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059		
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040	0,72	0,522
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040	1,46	0,240
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,084		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	28,94	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	18,43	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012	45,81	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	45,07	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	59,56	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	56,99	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010	77,35	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	60,82	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	18,87	0,000
IN12	1,358	1,341	1,321	1,265	1,321	0,040		
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030	2,38	0,098
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	100,01	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	38,74	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012	110,35	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	85,39	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	69,37	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	84,89	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010	64,27	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	90,48	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
TiN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	20,31	0,000
IN24	1,329	1,348	1,318	1,386	1,345	0,030		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	31,54	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	24,25	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ³)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012	31,09	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	23,66	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	25,83	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	32,27	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010	32,88	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	33,45	0,000
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	8,78	0,003
IN48	1,202	1,210	1,341	1,268	1,255	0,064		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	0,32	0,767
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	13,41	0,001
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	7,65	0,005
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		

(*) t_{tablo değeri} [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	7,60	0,005
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	13,75	0,001
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	11,87	0,001
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028	17,14	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
TiN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	11,98	0,001
1F1	0,309	-	0,345	0,378	0,344	0,028		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	4,84	0,017
2F1	0,196	0,217	0,199	0,219	0,208	0,012		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	4,44	0,021
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	4,12	0,026
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	5,87	0,010
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		
1F2	0,258	0,371	-	0,423	0,351	0,069	5,94	0,010
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

Tablo C.2' nin devamı

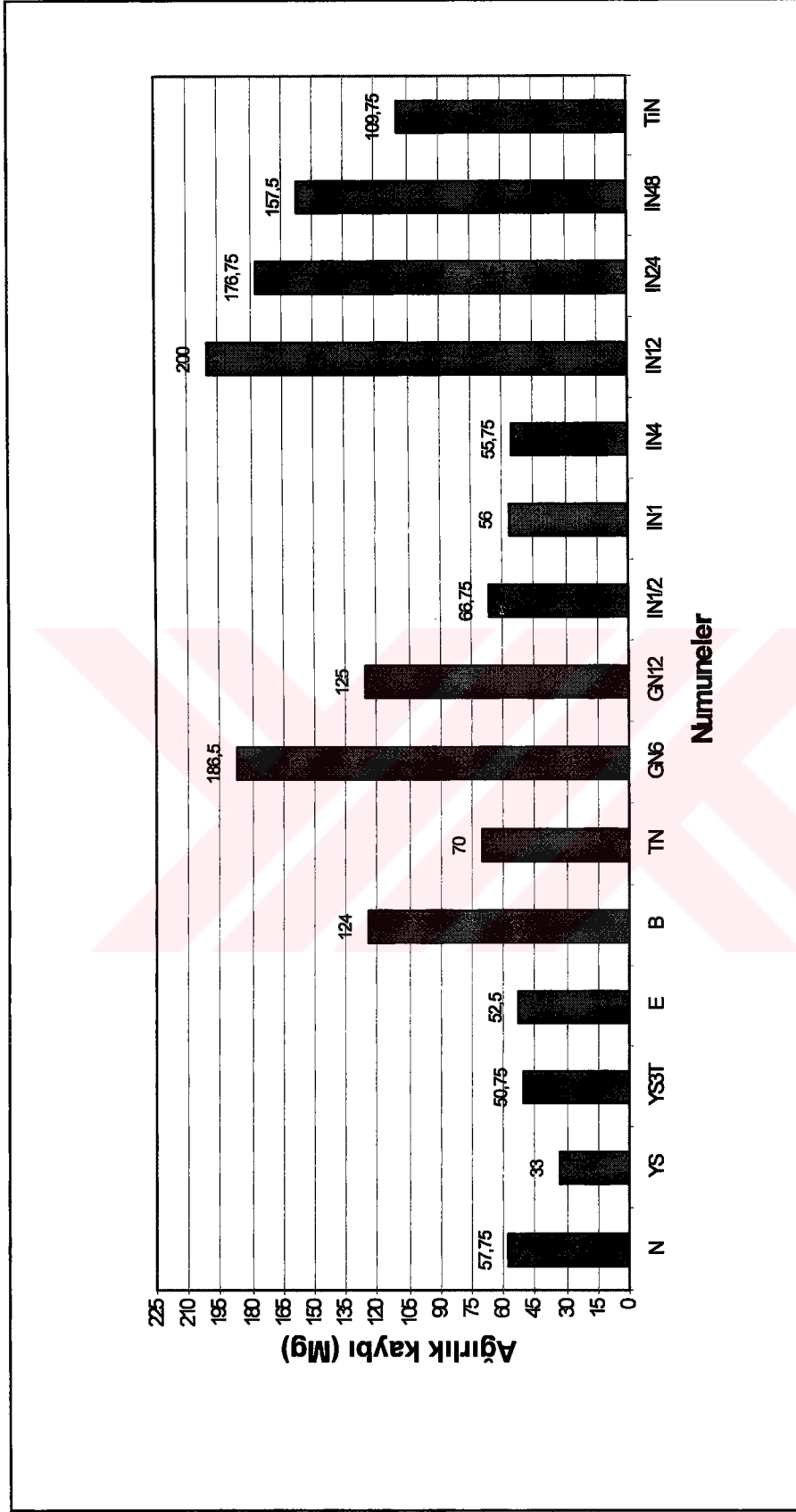
Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo: 3,182*}	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	5,22	0,014
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029	8,57	0,003
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	31,80	0,000
2F2	0,198	0,233	0,163	0,210	0,201	0,029		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	2,18	0,117
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	7,28	0,005
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021	8,69	0,003
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	20,33	0,000
3F1	0,207	0,181	0,156	-	0,182	0,021		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	5,73	0,011
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008	29,11	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		
TIN	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	22,44	0,000
3F2	0,152	0,168	0,152	-	0,157	0,008		

(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.

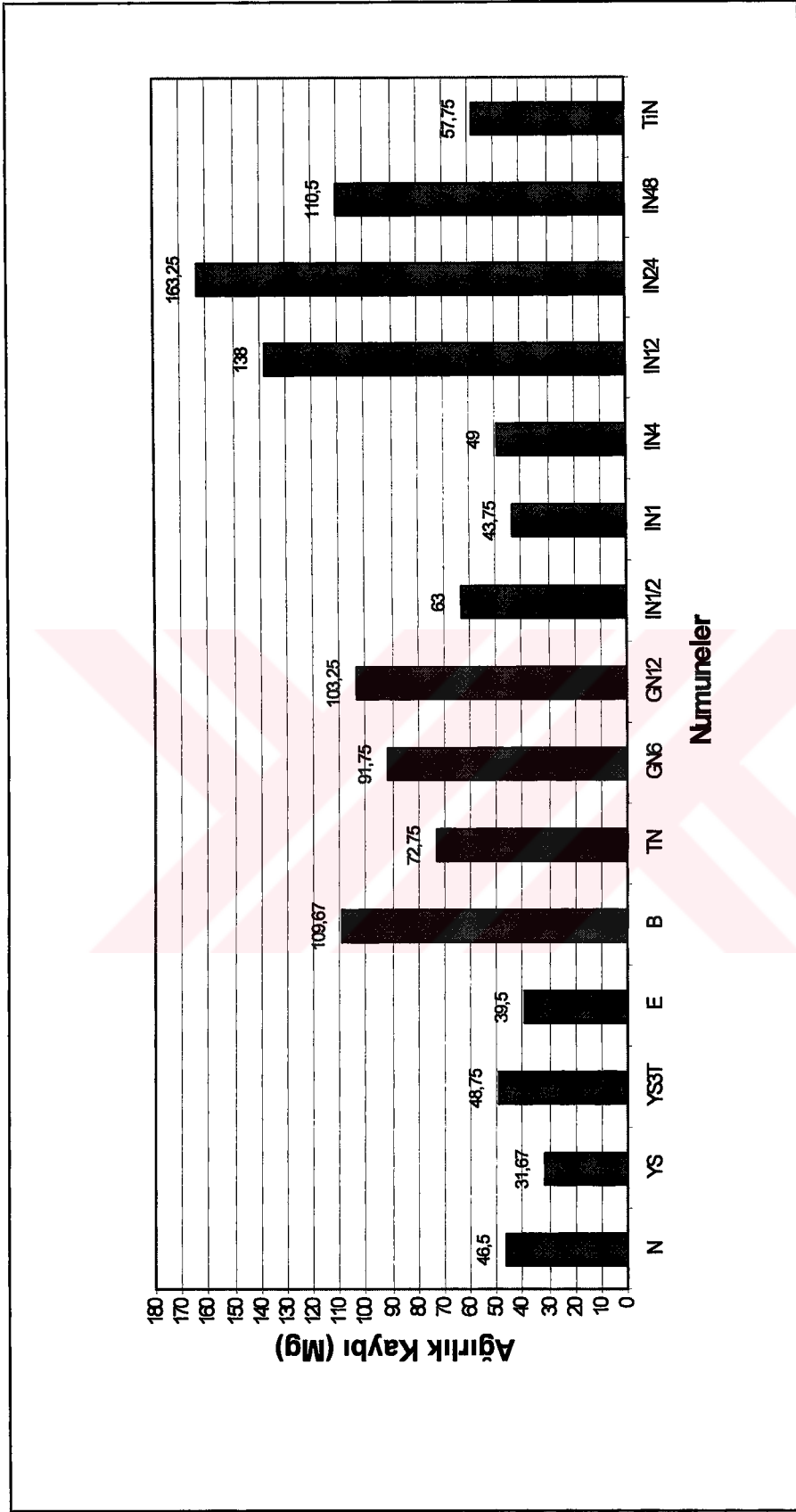
Tablo C.2' nin devamı

Deney Kodu	10. saat Sonundaki Toplam Ağırlık Kaybı (Mg/ mm ²)				Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	t _{tablo} : 3,182*	Anlamlılık Değeri
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune				
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006	2,65	0,077
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
T1N	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	21,07	0,000
3F3	0,129	0,116	-	0,104	0,116	0,010		
T1N	0,739	0,828	0,686	0,732	0,746	0,059	23,98	0,000
3F4	-	0,107	0,093	0,101	0,100	0,006		

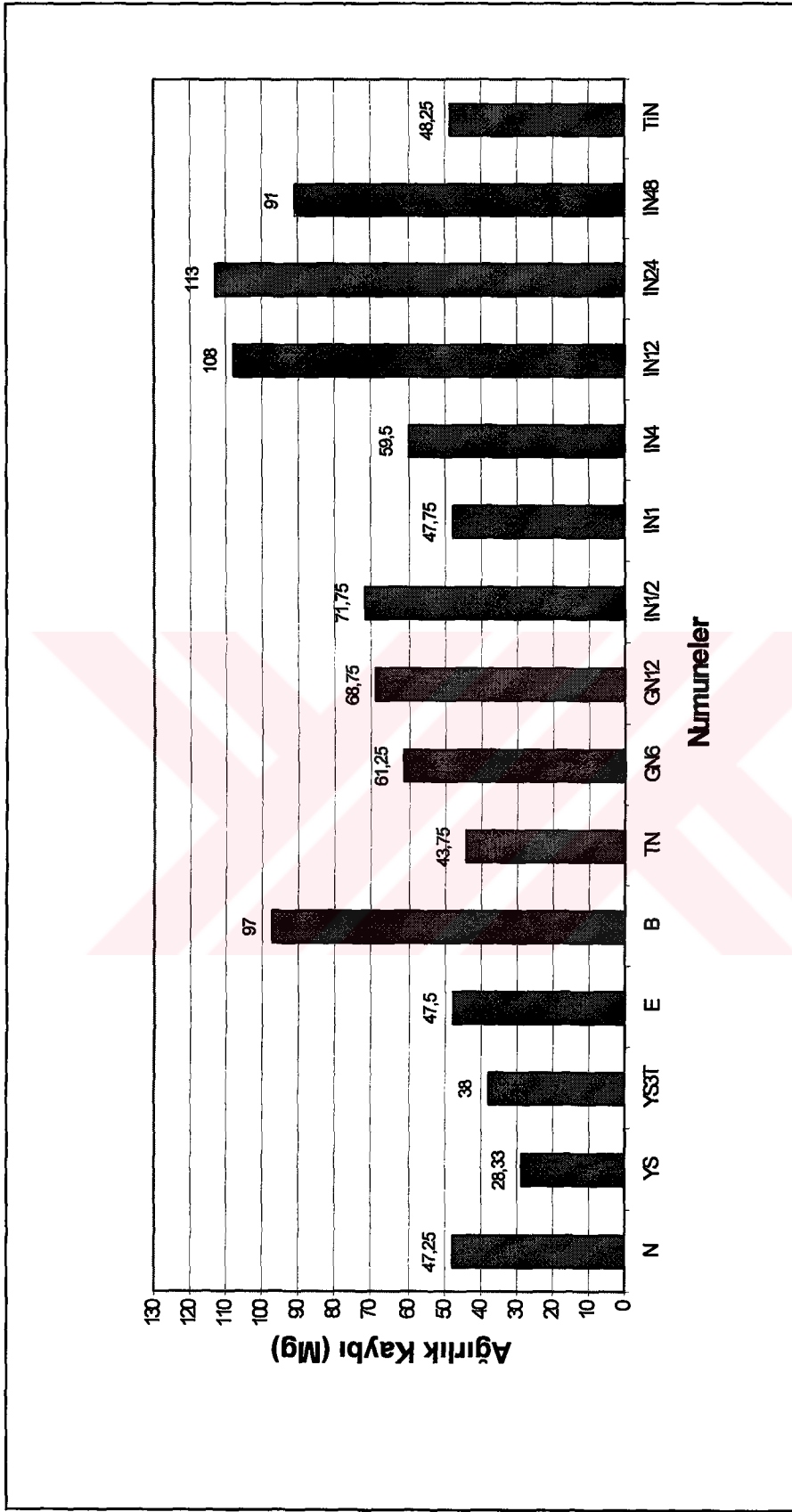
(*) t_{tablo} değeri [153] nolu kaynaktan faydalanılarak belirlenmiştir.



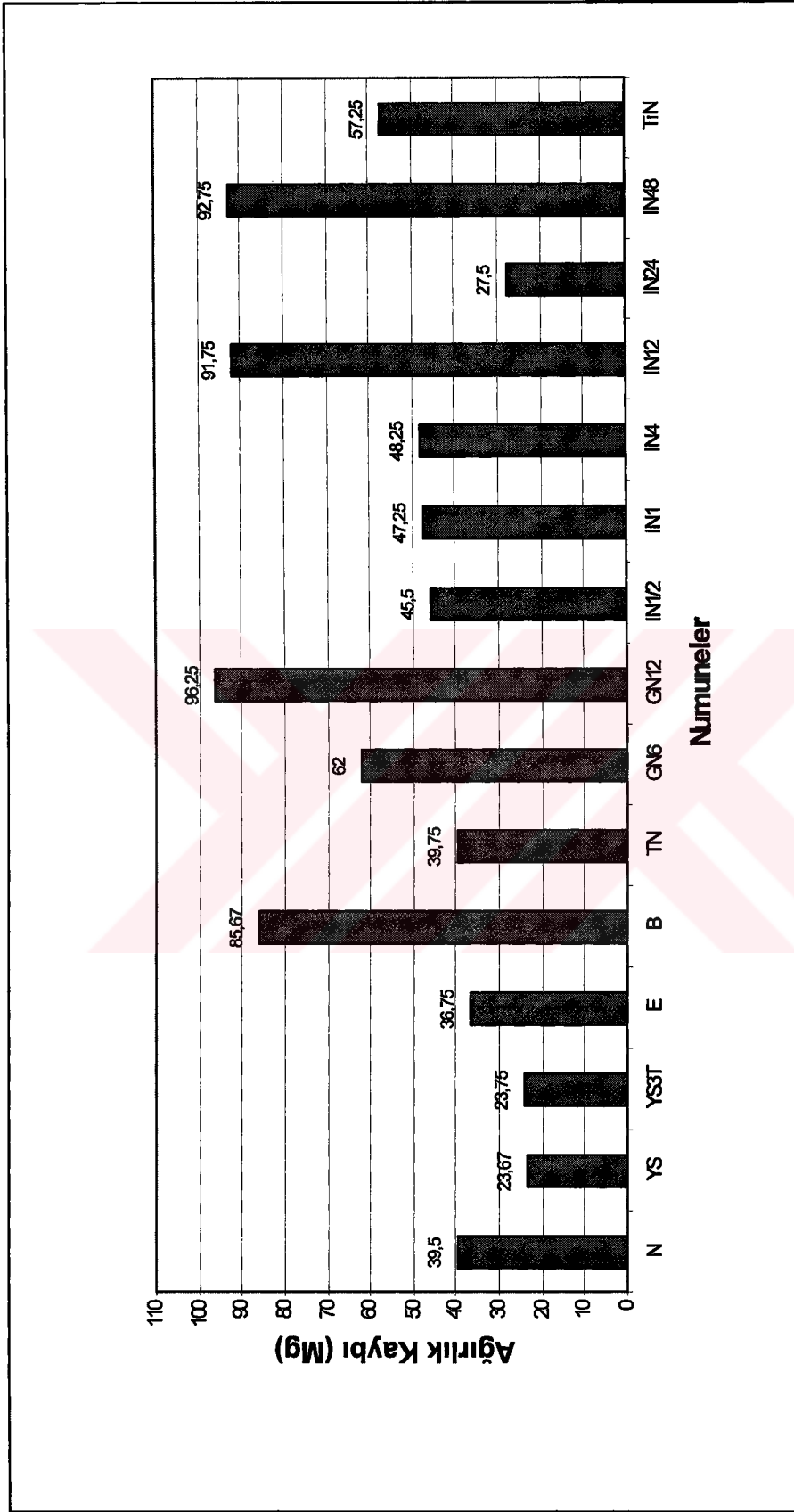
Şekil C.1 Bazı numunelerin 1. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



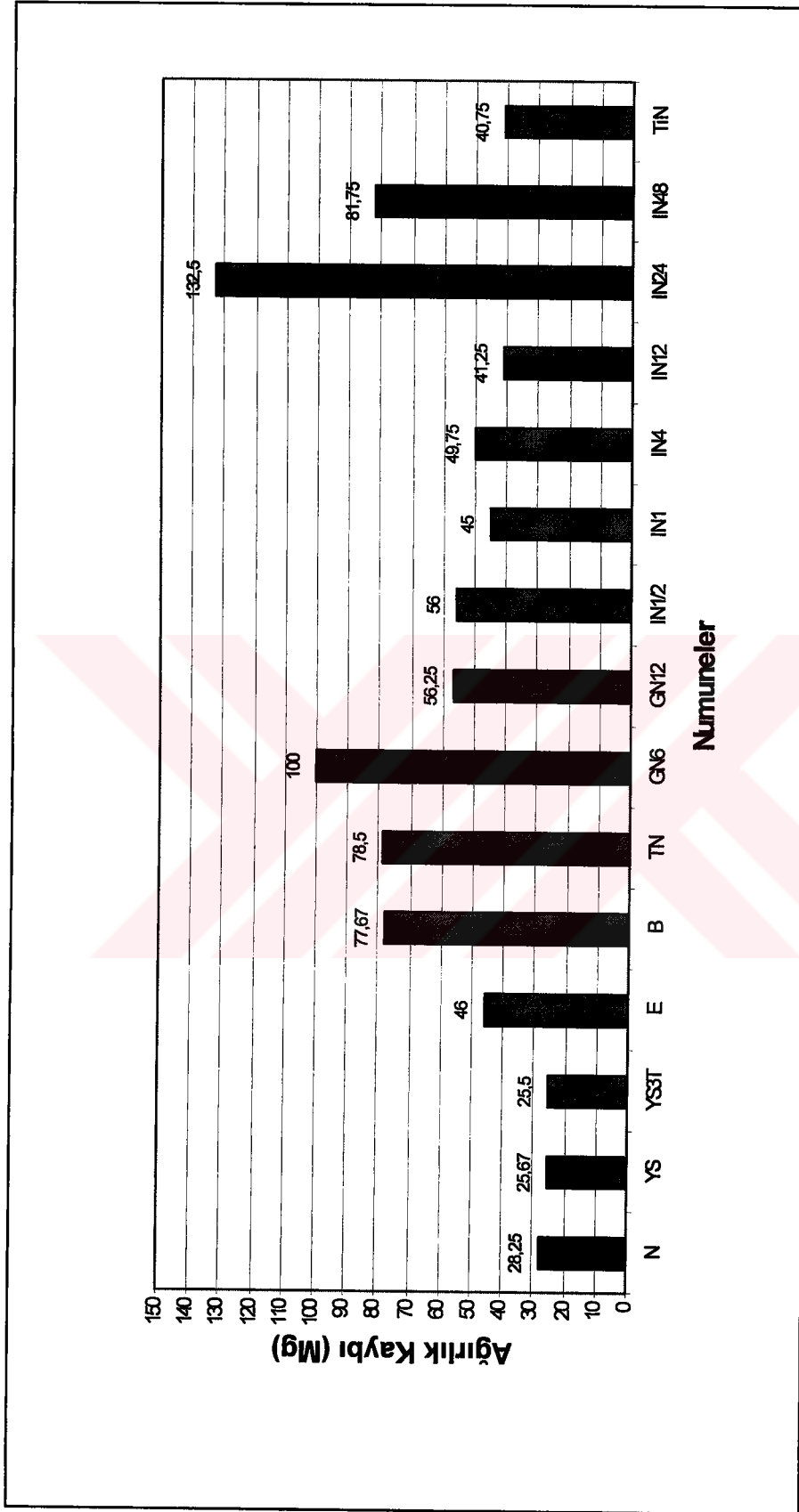
Şekil C.2 Bazı numunelerin 2. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



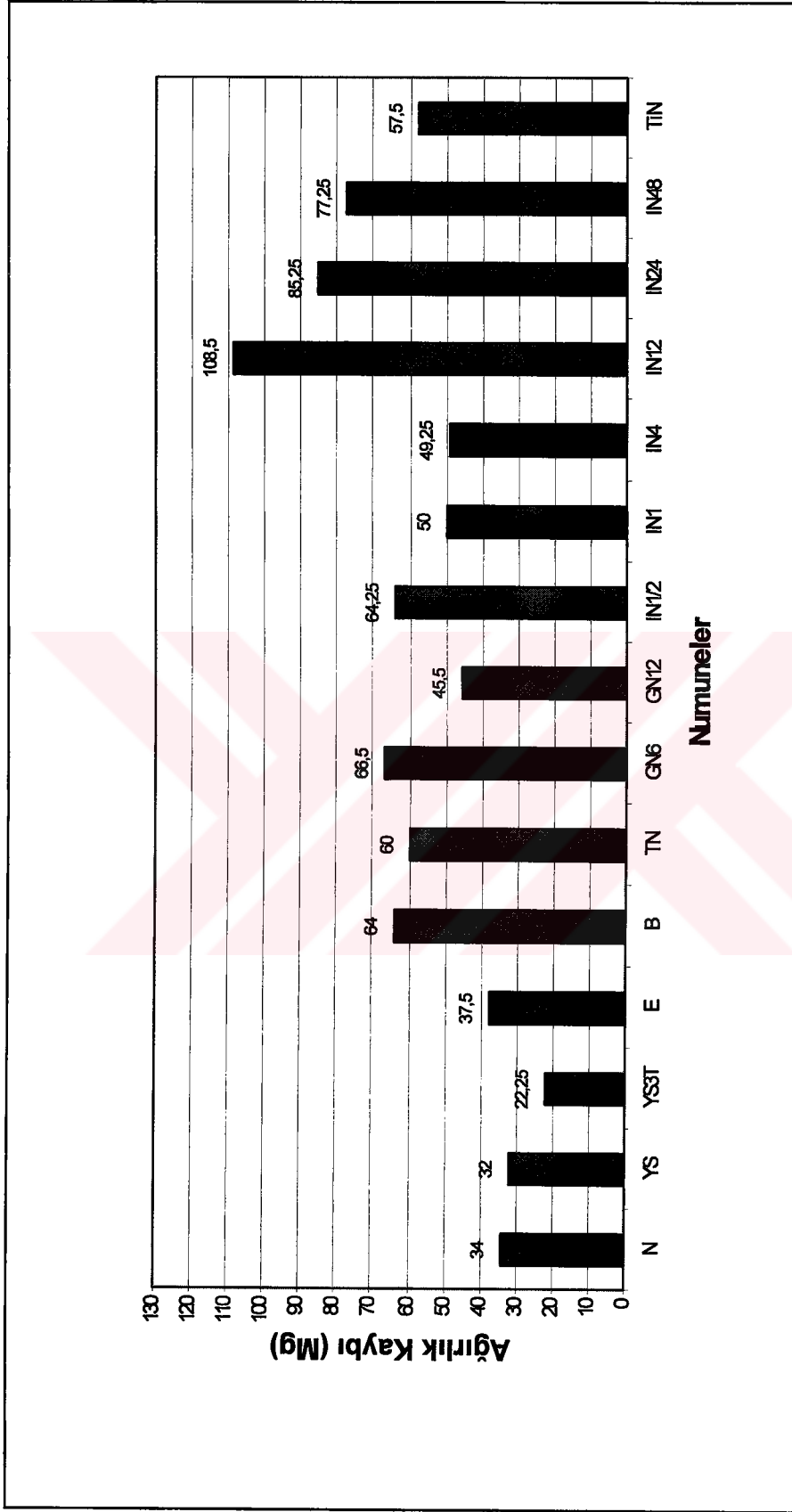
Şekil C.3 Bazı numunelerin 3. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



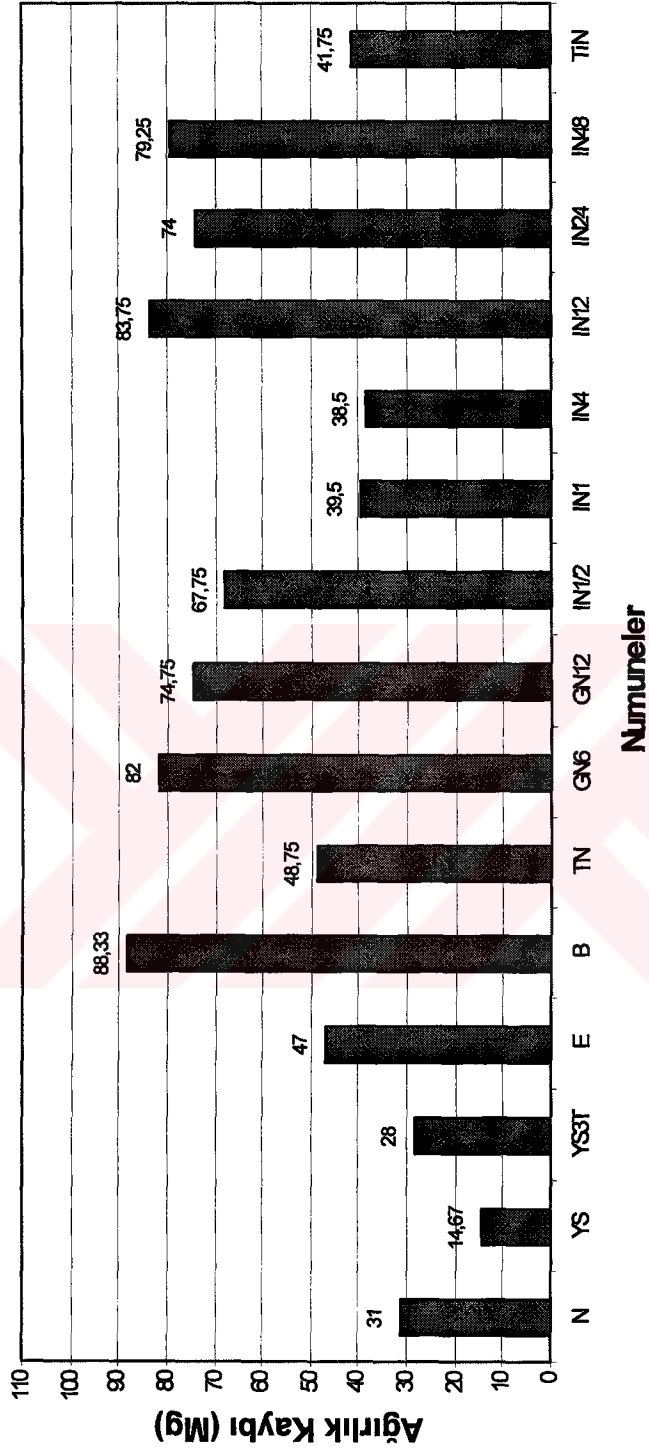
Şekil C.4 Bazı numunelerin 4. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



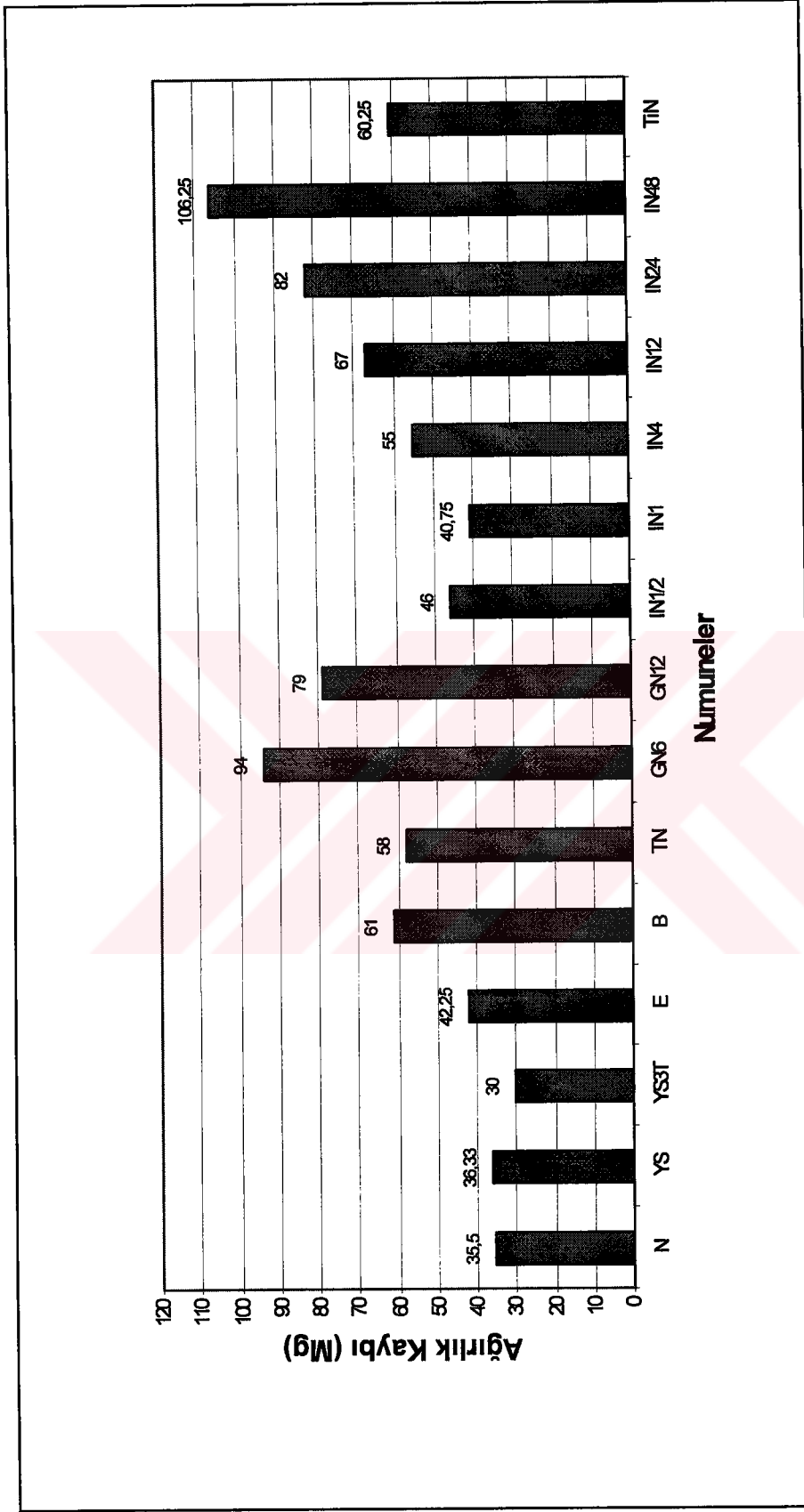
Şekil C.5 Bazı numunelerin 5. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



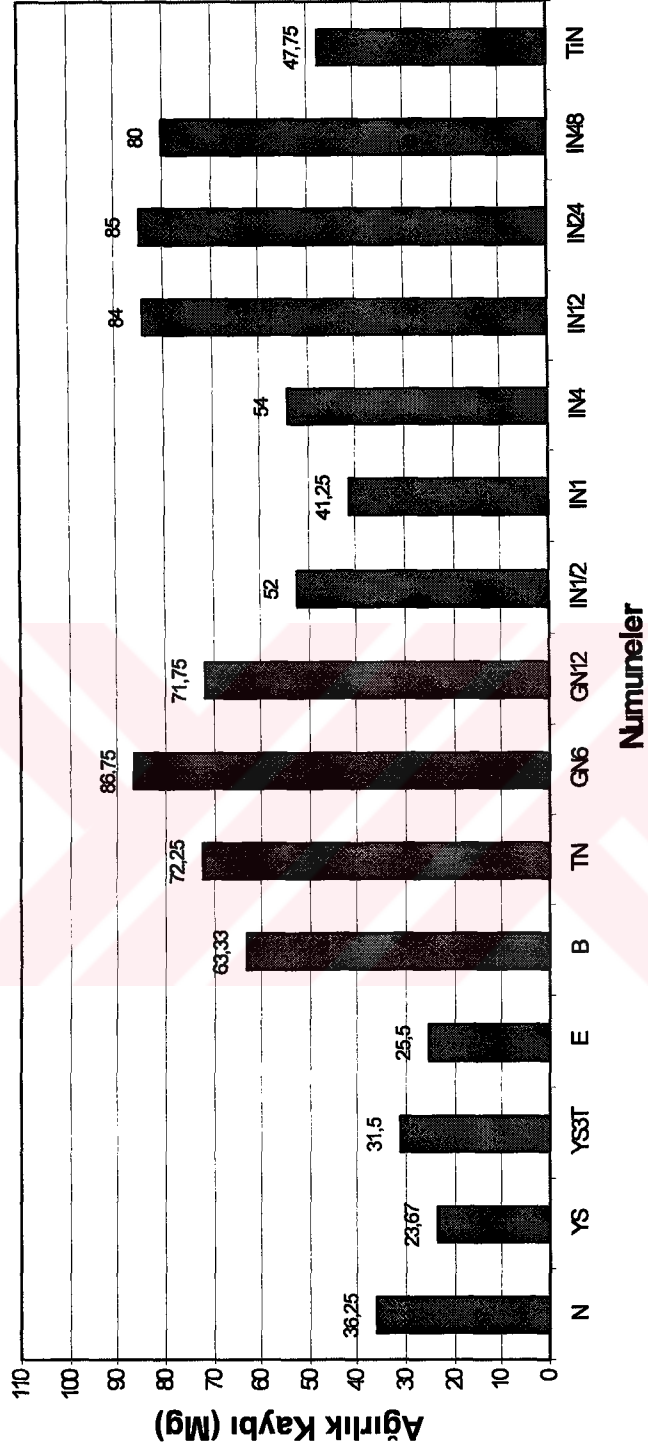
Şekil C.6 Bazı numunelerin 6. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



Şekil C.7 Bazı numunelerin 7. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



Şekil C.8 Bazı numunelerin 8. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.



Şekil C.9 Bazı numunelerin 9. saat sonundaki ağırlık kaybı miktarı.

ÖZGEÇMİŞ

1966' da Kocaeli-Gölcük' te doğdu. Orta öğrenimini 1983 yılında İzmit Mimar Sinan Sinan Lisesi' nde tamamladı. 1987 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü' nden Makina Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 1992 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' nden Makina Yüksek Mühendisi ünvanı alan Nejat SARI halen Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü' nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Arş. Gör. Nejat SARI' nın Aşınma Konusunda Seçilmiş Bilimsel Yayınları

1. SARI, N. Y., KALUÇ, E., Karbonlu Çeliklerin Abrasif Aşınması, Mühendis ve Makina, Sayı: 443, s. 19-26, Aralık (1996).
2. SARI, N.Y., KALUÇ, E., Endüstride Aşınma Problemleri, Makina ve Metal Teknolojisi, Sayı: 50, s. 64-68, Şubat (1996).
3. SARI, N.Y., TÜLBENTÇİ, K., Modern Yüzey İşlemleri ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, s. 370-377, 2-3-4 Nisan (1997).
4. SARI, N.Y., AKAY, S., KALUÇ, E., Aşınmayı Önlemede Etkili Yöntemler: Bölüm-I : Isıl Püskürtme, Mühendis ve Makina, Sayı: 448, Cilt: 38, s. 19-25, Mayıs (1997).
5. SARI, N.Y., ŞİRİN, Ş.Y., KALUÇ, E., TÜLBENTÇİ, K., Makina Parçalarının Aşınmasına Karşı Modern Yüzey İşlemleri, Makina Magazin, Sayı: 14-15, s. 48-51,38-45, Haziran-Temmuz (1997).
6. SARI, N.Y., AKAY, S., KALUÇ, E., Aşınmayı Önlemede Etkili Yöntemler: Bölüm-II : Plazma (Iyon) Nitrürleme, Mühendis ve Makina, Sayı: 450, Cilt: 38, s. 16-23, Temmuz (1997).
7. SARI, N.Y., KALUÇ, E., Isıl Püskürtme Yöntemleri ile Oluşturulan Kaplama Tabakalarının Karakterizasyonu, Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongresi, Ankara, s. 221-236, 13-14-15 Kasım (1997).
8. SARI, N.Y., AKAY, S., KALUÇ, E., Aşınmayı Önlemede Etkili Yöntemler: Bölüm-III : Dolgu Kaynağı, Mühendis ve Makina, Sayı: 456, Cilt: 39, s. 17-21, Ocak (1998).