

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HARDOX 400 ÇELİK YÜZEYİNİN PLAZMA TRANSFERLİ ARK
KAYNAK YÖNTEMİYLE ALAŞIMLANDIRILMASI VE
TAGUCHİ METODUYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Muhammet Hulusi CENGİZ

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Metalurji Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Programı
Programı: Malzeme
Danışman: Doç. Dr. Ali Kaya GÜR

ELAZIĞ-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARDOX 400 ÇELİK YÜZEYİNİN PLAZMA TRANSFERLİ ARK KAYNAK
YÖNTEMİYLE ALAŞIMLANDIRILMASI VE TAGUCHİ METODUYLA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMET HULUSİ CENGİZ
(151140102)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21.11.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.12.2017

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali Kaya GÜR (F.Ü.) 

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Tülay YILDIZ (F.Ü.) 

Doç. Dr. Yahya Hışman Çelik (B.Ü) 

KASIM-2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında, tüm konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, değerli zamanını bizlere ayıran danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali Kaya GÜR' e ve bu seviyeye gelmemde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkür ve minnetimi belirtmek istiyorum.

Deney çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen Müh. Semih TAŞKAYA'ya, Fevzi Atman BİLEN'e, Necmettin YİĞİTTÜRK'e, Müh. Fatmanur YILMAZ'a, Arş. Gör. Turan GÜRGEÇ'e, Uzman Dr. Burak BİRCAN'a ve Savaş BİLEN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) idarecileri ve personellerine gösterdikleri ilgi ve alakadan dolayı teşekkür ederim.

Bu tezi her zaman yanımda olan, anlayış gösteren, desteklerini ve sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen, bu günümü borçlu olduğum canım aileme ithaf ediyorum.

Not: Bu tez çalışması proje numarası TEKF. 1622 ile Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) birimi tarafından desteklenmiştir.

Muhammet Hulusi CENGİZ

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	XVI
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİKLER	3
2.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması	3
2.1.1. Düşük-Karbonlu Çelikler	3
2.1.2. Orta-Karbonlu Çelikler	5
2.1.3. Yüksek-Karbonlu Çelikler	7
2.2. Çeliklerin kimyasal bileşimine göre sınıflandırılması	7
2.2.1. Mikroalaşımli Çelikler	8
2.2.1.1. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Üretimi	12
2.2.1.1.1. Bessemer Usulü Çelik Üretimi	12
2.2.1.1.2. Siemens-Martin Prosesi	13
2.2.1.1.3. Elektrik Ark Fırınları	15
2.2.1.1.4. Oksijen Üfleme Usulü Çelik Üretimi	16
2.2.1.2. Aşınmaya dayanıklı mikro-çeliklerin mekanik özellikleri	18
2.2.1.3. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Talaş Kaldırılarak İşlenmesi	19
2.2.1.4. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Uygulama Alanları	20
3. SÜRTÜNME VE AŞINMA	21
3.1. İzafi Hareketler	21
3.1.1. Statik Sürtünme.....	21
3.1.2. Dinamik Sürtünme	21
3.1.2.1. Kuru Sürtünme.....	21
3.1.2.2. Sıvı Sürtünme.....	22
3.1.2.3. Sınır Sürtünmesi.....	22
3.2. Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar	23

3.3.	Aşınmayı Etkileyen Faktörler	24
3.4.	Aşınma Çeşitleri.....	24
3.4.1.	Abrasiv Aşınma	25
3.4.1.1.	Abrasiv Aşınma Mekanizması	25
3.4.1.2.	Abrasiv Aşınmaya Sıcaklığın Etkisi	26
3.4.1.3.	Abrasiv Aşınmaya Nemin Etkisi.....	26
3.4.2.	Adhezif Aşınma	27
3.4.3.	Korozif Aşınma.....	28
3.4.4.	Yorulma Aşınması	29
3.5.	Aşınma Deneyleri	29
4.	YÜZEY İŞLEMLERİ VE ALAŞIMLAMA	32
4.1.	Ergitme Esaslı Yöntemler	34
4.1.1.	Elektrik Ark Kaynağı.....	34
4.1.2.	Gazaltı Kaynağı	35
4.1.2.1.	Oksi-Gaz Kaynağı.....	36
4.1.3.	Gaz Tungsten Ark Kaynağı (TIG)	37
4.1.4.	Gaz Metal Ark Kaynağı	39
4.1.5.	Lazer Işın Kaynağı	40
4.1.6.	Tozaltı Kaynağı.....	41
4.1.7.	Elektron ışını ile kaynak	44
4.1.8.	Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi	45
4.1.8.1.	Plazma.....	45
4.1.8.1.1.	Plazma Arkının Tarihi Gelişimi.....	48
4.1.8.2.	Plazma Kaynak Yöntemi	51
4.1.8.2.1.	Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Teller	53
4.1.8.2.2.	Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Torçlar	53
4.1.8.2.3.	Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Gaz Nozulu.....	53
4.1.8.2.4.	PTA kaynağında ark boyu mesafesi	54
4.1.8.2.5.	PTA Kaynağında Plazmanın Oluşumu.....	55
4.1.8.2.6.	PTA kaynağında Kullanılan Elektrodlar	57
4.1.8.2.7.	Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Gazlar	58
4.1.8.2.8.	Yüksek Frekans Dalga Ünitesi ve Donanımları	59
4.1.8.2.9.	Uygulama Özellikleri	61

4.1.8.2.10. Ergitme Tekniği	62
4.1.8.2.11. Anahtar Deliği Tekniği	62
4.1.8.2.12. Plazma Kaynağı İle Tig Kaynağı Arasındaki Fark.....	63
4.1.8.2.13. Plazma Ark Kaynağının Avantajları.....	64
4.1.8.2.14. Plazma Ark Kaynağının Dezavantajları	66
5. DENEY TASARIMI VE MODELLEME TEKNİKLERİ.....	67
5.1. Taguchi Metodu	70
5.2. Taguchi Metodunun Gelişimi	71
5.3. Taguchi Felsefesi	72
5.4. Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi.....	72
5.4.1. Sistem Tasarımı	74
5.4.2. Parametre Tasarımı	74
5.4.3. Tolerans Tasarımı	75
5.4.3.1. En Büyük En İyi.....	75
5.4.3.2. En Küçük En İyi.....	75
5.4.3.3. Hedef Değer En İyi	75
5.5. Taguchi Metodunda Parametre Tasarımı.....	76
5.5.1. Temel Çalışma Biçimi	76
5.5.2. Deney Tasarımı	78
5.5.2.1. Statik Sonuçlu Tasarım	78
5.5.2.2. Dinamik Sonuçlu Tasarım	80
5.5.3. Uygulama İşlemleri.....	80
5.5.3.1. Problemin Belirlenmesi	81
5.5.3.2. Hedeflerin Belirlenmesi	81
5.5.3.3. Kalite Değişkenleri ve Ölçüm Sisteminin Belirlenmesi	82
5.5.3.4. Kalite Değişkenlerini Etkileyen Faktörlerin Seçimi ve Seviyelerinin Tespit Edilmesi	82
5.5.3.5. Faktörlerin Kontrol Edilebilen Ve Kontrol Edilemeyen Faktörler Olarak Ayrılması.....	82
5.5.3.6. Etkileşimlerin Belirlenmesi	83
5.5.3.7. Uygun Ortogonal Dizin Seçimi	83
5.5.3.7.1. Ortogonal Diziler	83
5.5.3.7.2. Ortogonal Dizi Seçimi	85

5.5.3.8.	Kontrol Faktörleri ve Etkileşimlerin Sütunlara Atanması	85
5.5.3.9.	Deneylerin Yapılması ve Sonuçların Kaydedilmesi	86
5.5.3.9.1.	Deneylerin Yapılış Sırası	86
5.5.3.9.2.	Deneylerin Tekrarlanma Sayısı.....	86
5.5.3.10.	Veri Analizi ve Kontrol Edilebilen Değişkenlerin En İyi Değerlerinin Belirlenmesi	87
5.5.3.11.	Doğrulama Deneyinin Yapılması	87
5.5.4.	Varyans Analizi	87
5.5.4.1.	Kareler Toplamı	89
5.5.4.2.	Serbestlik Derecesi.....	89
5.5.4.3.	Varyans	90
5.5.4.4.	F Testi	91
6.	ÇELİKLERDE ISIL İŞLEM.....	92
6.1.	Su Verme	92
6.1.1.	Suda Su Verme İşlemi	93
6.1.2.	Yağda Su Verme İşlemi	93
6.1.3.	Hava-Fırın Ortamında Su Verme İşlemi.....	93
7.	LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	94
8.	DENEYSEL YÖNTEM.....	97
8.1.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	98
8.2.	Yüzey Alaşımlama İşlemi İçin Numunelerin Hazırlanması	98
8.3.	PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımlama İşlemi	101
8.4.	PTA Yönteminde Isı girdisi ve Enerji Girdisinin Hesaplanması.....	104
8.5.	Mikroyapı ve Mikrosertlik İncelemeleri.....	105
8.6.	SEM, EDS ve XRD İncelemeleri.....	106
8.7.	Abrasiv Aşınma ve Taguchi Deneysel Tasarım.....	107
9.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	109
9.1.	PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımlama İşlemi Yapılan Numunelerin Mikroyapı ve Mikrosertlik İncelemeleri.....	112
9.1.1.	B ₄ C Genel Sonuçlar	112
9.1.2.	FeCrC Genel Sonuçlar	117
9.1.3.	SiC Genel Sonuçlar.....	122
9.1.4.	TiC Genel Sonuçlar.....	126

9.2.	Hardox 400 Mikroalaşımli Çeliğın, Isıl İşlem Sonrası Mikro Sertliğinin İncelenmesi	130
9.3.	PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımrama İşlemi Yapılan Numunelerin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Taguchi Metoduyla Analizi.....	131
9.3.1.	Y1-Y4 Numunelerin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi	132
9.3.1.1.	Y1-Y4 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı.....	133
9.3.2.	Y5-Y8 Numunelerinin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi	137
9.3.2.1.	Y5-Y8 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı.....	138
9.3.3.	Y9-Y12 Numunelerin Abrasiv aşınma Dirençlerinin Analizi	143
9.3.3.1.	Y9-Y12 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı.....	144
9.4.	Mikroalaşımli Hardox 400 Çeliğın Isıl İşlemlerden Sonrası Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi	148
9.4.1.	Isıl İşlem Uygulanmış Numuneler İçin Taguchi Dizaynı	149
9.5.	Y13 Numunesinin Abrasiv Aşınma Dirençleri Sonuçları	154
10.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	156
10.1.	Sonuçlar	156
10.2.	Öneriler	158
	KAYNAKLAR	159
	ÖZGEÇMİŞ.....	173

ÖZET

Bu çalışmada; Hardox 400 mikroalaşımli çeliğin yüzeyi B_4C - TiC - $FeCrC$ - SiC tozları kullanılarak plazma transfer ark (PTA) kaynak metoduyla alaşımlandırılmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının abrasiv aşınma davranışı incelenip ve Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Kaplama tabakası; optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışın difraktogramı (XRD) ve X ışını enerji dağılım spektrometresinden (EDS) faydalanılarak incelenmiştir. Optik mikroskop ve mikroyapı incelemeleri neticesinde, kaplama tabakası ile alt tabakanın birbirlerine metalurjik olarak bağlandığı ve yapıda MK (metal karbür) ve Me-B (metal borür) ve intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Abrasiv aşınma işlemi 120-180 aşındırıcı tane boyutundaki aşındırıcıda 6-16 N yük ve 10-20-30-40 metre kayma mesafelerindeki kütle kaybına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca; alaşımlama yapılmamış mikroalaşımli Hardox 400 çelik malzeme farklı soğutma ortamlarında ısıtma işlemleri yapılmıştır. Elde edilen bu numunelere de benzer şekilde aşınma testleri uygulanmıştır. Daha sonra veriler Taguchi metoduyla değerlendirilmiştir. Aşınma davranışının belirlenmesinde önemli bir ölçüt olan en düşük aşınma davranışına etkileri Taguchi metodunun en düşük-en iyi kontrol karakteristiği ile optimize edilmiş olup sonuçlar grafiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Isıtma işlem sonucu ısıtma işlemi, su, yağ ve fırın ortamında soğutmayla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Taguchi, ANNOVA, Hardox 400, PTA Alaşımlama

SUMMARY

The Evaluation with Taguchi Method and Alloyed By Plasma Transferred Arc Welding Method of Surface Hardox 400 Steel

In this study; The Hardox 400 microalloyed steel surface was alloyed by plasma transfer arc (PTA) welding method using B₄C-TiC-FeCrC-SiC powders. The abrasive wear behavior of the obtained coating layers are examined and optimized by the Taguchi method. The coating layer was analysed using optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractogram (XRD) and X-ray energy dispersive spectrometer (EDS). As a result of optical microscope and microstructure analyses, it was determined that the coating layer and the sub-layer were connected to each other metallurgical and there were MC (metal carbide) and Me-B (metal boride) and intermetallic phases in the structure. Abrasive wear behavior has been evaluated to be due to mass loss in the abrasive grain size of 120-180 abrasive grain size 6-16 N load and 10-20-30-40 meters shifting distance. Also; untreated microalloyed Hardox 400 steel material was heat treated in different cooling environments. Wear tests were similarly applied to these samples. Then datas were evaluated by the Taguchi method. The effect of wear loss on the lowest wear behavior, which is a most important criterion in determining the wear behavior, was optimized with the lowest-the best control characteristics of the Taguchi method and the results were analyzed with graphical methods. The result of the heat treatment, the tempering was carried out by cooling in water, oil and oven.

Key Words: Taguchi, ANNOVA, Hardox 400, PTA Surface Alloying

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Bazı basit karbonlu çelik ve YDDA çeliğine ait çeliklerin kimyasal bileşimi.....	4
Tablo 2.2. Sıcak haddelenmiş muhtelif düşük karbonlu çelikler ile yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklere ait malzeme özellikleri ve kullanımlarına ait örnekler.....	5
Tablo 2.3. AISI/SAE ve UNS (metal ve alaşımların birleştirilmiş kodlama sistemi) kodlama sistemi ile basit karbonlu çelikler ve bazı düşük alaşımlı çelikler için kimyasal bileşim aralıkları.....	6
Tablo 2.4. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin ticari adları.....	10
Tablo 2.5. Mekanik değerler.....	19
Tablo 3.1. Malzeme ve testler için American Society tarafından geliştirilmiş önemli bazı test metotları	30
Tablo 5.1. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar	77
Tablo 5.2 Taguchi'nin Sinyal/Gürültü oranları	80
Tablo 5.3. 2^k ve Taguchi dizaynı deney planları	84
Tablo 8.1 AISI 430 paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi	98
Tablo 8.2. PTA Kaplamada üretim parametreleri.....	102
Tablo 8.3. PTA Kaplamada deney numunelerinin parametreleri	103
Tablo 8.4. Kaynakta verimlilik katsayıları (η) değerleri	105
Tablo 9.1. PTA Kaplama işleminde uygulanan parametreler.....	109
Tablo 9.2. PTA Kaplamada deney numuneleri Taguchi parametreleri	131
Tablo 9.3. PTA Kaplamada Y1-Y4 deney numuneleri parametreleri	132
Tablo 9.4. Y1-Y4 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri.....	133
Tablo 9.5. Y1-Y4 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması	134
Tablo 9.6. Y1-Y4 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu	134
Tablo 9.7. Y1-Y4 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları.....	136
Tablo 9.8. PTA Kaplamada Y5-Y8 deney numuneleri parametreleri	138
Tablo 9.9. Y5-Y8 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri.....	139
Tablo 9.10. Y5-Y8 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması.....	139
Tablo 9.11. Y5-Y8 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu	140

Tablo 9.12. Y5-Y8 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları.....	142
Tablo 9.13. PTA Kaplamada Y9-Y12 deney numuneleri parametreleri	143
Tablo 9.14. Y9-Y12 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri	144
Tablo 9.15. Y5-Y8 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması.....	145
Tablo 9.16. Y9-Y12 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu	145
Tablo 9.17. Y9-Y12 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları.....	147
Tablo 9.18. Isıl işlem deney numuneleri parametreleri	149
Tablo 9.19. Isıl işlem numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri.....	150
Tablo 9.20. Isıl işlem numunelerinin kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması	150
Tablo 9.21. Isıl işlem numunelerinin S/N oranları tablosu.....	151
Tablo 9.22. Isıl işlem numuneleri kütle kaybı için varyans analizi sonuçları	153
Tablo 9.23. PTA Alaşımlamada Y13 deney numunesinin aşınma parametreleri.....	154

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çeliklerin sınıflandırılması	8
Şekil 2.2. Hardox 400 mikroalaşımli çeliği ve sıradan yüksek dayanımlı konstrüksiyon arasındaki levhasının mukavvemeti.....	11
Şekil 2.3. İlk Bessemer-Thomas usulü fırın	13
Şekil 2.4. Siemens Marthin çelik üretim fırını	15
Şekil 2.5. Basit bir LD çelik üretim yöntemi	17
Şekil 2.6. Üretim hattındaki Hardox 400 çeliği.....	18
Şekil 2.7. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin uygulama alanları	20
Şekil 3.1. DIN 50320' e göre tribolojik sistem	23
Şekil 3.2. Aşınma mekanizmaları a) Adhezif aşınma b)Abrasive aşınma c)Korozyon aşınması d) Yorulma aşınması.....	25
Şekil 3.3. Abrasive aşınma mekanizması.....	26
Şekil 3.4. Adhezif aşınma mekanizması a)Yüzeyde kaynaklanma b) A'dan B'ye parça transferi c) Malzemeden kopan parçaların serbest hali	28
Şekil 3.5. Koroziv aşınmanın şematik gösterimi	28
Şekil 3.6. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi	29
Şekil 4.1. Yüzey modifikasyon yöntemleri	33
Şekil 4.2. Gaz boşalmaları tipleri ve bölgelerinin akım-gerilim karakteristikleri.....	34
Şekil 4.3. Benardos kaynak yöntemi	35
Şekil 4.4. TIG kaynağı prosesi örnek uygulaması şeması.....	37
Şekil 4.5. TIG kaynak donanımı prensip şeması.....	38
Şekil 4.6. Gaz metal ark kaynağı prosesi şeması	39
Şekil 4.7. MIG-MAG kaynak donanımı şeması.....	40
Şekil 4.8. Lazer ışını kaynağı prosesi.....	41
Şekil 4.9. Tozaltı kaynağının prensibi.....	42
Şekil 4.10. Elektron ışın kaynağı prosesi.	44
Şekil 4.11. Magnetik alan içerisinde hareketli bir elektrona ve iyonaya etkiyen Lorentz kuvveti	46

Şekil 4.12. Plazmanın kendi magnetik alanının plazma içindeki bir elektrona (N : negatif yük) ve bir iyon (P :pozitif yük) etki ettirdiği Lorentz kuvveti ve bu sayede oluşan plazmanın kendi kendini sıkıştırması	46
Şekil 4.13. Maddenin dördüncü hali plazma	48
Şekil 4.14. PTA Kaynağının şematik görünüşü	52
Şekil 4.15. Plazma arkının transfer tipleri	52
Şekil 4.16. Plazma ark kaynak nozulu	54
Şekil 4.17. Çalışma parçasıyla nozul mesafesi ve elektrot geri dönüşü.....	55
Şekil 4.18. Maddenin plazma haline geçişi	55
Şekil 4.19. Plazma alevi	56
Şekil 4.20. PTA kaynağında nozul ve elektrod	56
Şekil 4.21. PTA kaynak torcunda gaz akış yolları	57
Şekil 4.22. Plazma kaynak torcu ve elektrod bağlantısının şematik görünümü.....	58
Şekil 4.23. Plazma transfer ark kaynağının şematik görünüşü.....	59
Şekil 4.24. PTA kaynak makinesi ve donanımları	59
Şekil 4.25. DC Güç kaynağı	60
Şekil 4.26. Soğutma sistemi	60
Şekil 4.27. Kaynak arabası konsolu ve güç kaynağı	61
Şekil 4.28. TIG ve plazma arkı oluşumundaki erimeyen elektrodun konumu ve ark büzülmesinin ark sıcaklık-gerilim üzerine etkisi	64
Şekil 5.1. Deney tasarım prosesi modeli	67
Şekil 5.2. Aşınmaya etki eden faktörlerin balık kılçığı diyagramı.....	68
Şekil 5.3. Taguchi kalite kontrol sistemi prosesi	73
Şekil 5.4. Taguchi metodunun sistematik şekli.....	73
Şekil 8.1. Alaşımlamada kullanılan tozların morfolojisi (a. B ₄ C Tozu, b. FeCrC Tozu, c. SiC Tozu, d. TiC Tozu).....	98
Şekil 8.2. Tel erezyon makinesi	99
Şekil 8.3. Yatay testere dişli freze makinesi	99
Şekil 8.4. Numunenin freze işlemi sonrası kanal boyutları.....	99
Şekil 8.5. Numunenin kaplama öncesi dijital resmi.....	100
Şekil 8.6. Tozlar için karıştırma aparatı	100
Şekil 8.7. Alaşımlanacak olan Hardox 400 numunenin PTA kaplama işlemine hazırlanmasının şematik görüntüsü	101

Şekil 8.8. Kurutma fırını	101
Şekil 8.9. a. Alaşımlama işlemi dijital resmi b. İşlemin şematik görüntüsü ve torcun kısımları	102
Şekil 8.10. Plazma kaynak makinesi genel görünümü ve donanımı	104
Şekil 8.11. Hassas kesme makinesi, parlatma cihazı, optik mikroskop ve mikrosertlik ölçüm cihazı.....	105
Şekil 8.12. Optik mikroskop, abrasiv aşınma, mikrosertlik ve XRD numunesinin alınması.....	106
Şekil 8.13. SEM ve XRD analiz cihazları	106
Şekil 8.14. Aşınma numunesinin alınışının şematik görüntüsü ve boyutları	107
Şekil 8.15. Abrasiv aşınma mekanizması ve freze tezgahı	108
Şekil 9.1. PTA kaplama işlemi numune, torch ve bakır altlık	109
Şekil 9.2. Fe-C-B ikili ve üçlü, Fe-Cr-C üçlü denge diyagramı.....	112
Şekil 9.3. Ni-Ti-Fe Üçlü Faz Diyagramı (900 °C)	112
Şekil 9.4. B ₄ C Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri	113
Şekil 9.5. B ₄ C toz karışımıyla elde edilen alaşımlanmış kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri	114
Şekil 9.6. B ₄ C toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerinin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri	115
Şekil 9.7. N1 ve N4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	116
Şekil 9.8. B ₄ C toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri	117
Şekil 9.9. FeCrC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri	117
Şekil 9.10. FeCrC toz karışımıyla elde edilen alaşımlanmış kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri.....	118
Şekil 9.11. FeCrC ile alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri	120
Şekil 9.12. N5 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	121
Şekil 9.13. FeCrC toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri	121
Şekil 9.14. SiC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri.....	122
Şekil 9.15. SiC toz karışımıyla elde edilen kompozit kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri	123

Şekil 9.16. SiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri	124
Şekil 9.17. N9 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	125
Şekil 9.18. SiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri	126
Şekil 9.19. TiC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri	127
Şekil 9.20. TiC toz karışımıyla elde edilen kompozit kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri	127
Şekil 9.21. TiC toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM görüntüleri.....	128
Şekil 9.22. N13 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	128
Şekil 9.23. TiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri	129
Şekil 9.24. Isıl işlem uygulanmış numunelerin mikro sertlik işlemleri	130
Şekil 9.25. Y1-Y4 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)	135
Şekil 9.26. Y1-Y4 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği	135
Şekil 9.27. Y1-Y4 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği.....	136
Şekil 9.28. Y1-Y4 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri	137
Şekil 9.29. Y5-Y8 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)	140
Şekil 9.30. Y5-Y8 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği	141
Şekil 9.31. Y5-Y8 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği.....	141
Şekil 9.32. Y5-Y8 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri	142
Şekil 9.33. Y9-Y12 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)	146
Şekil 9.34. Y9-Y12 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği	146
Şekil 9.35. Y9-Y12 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği.....	147
Şekil 9.36. Y9-Y12 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri	148
Şekil 9.37. Isıl işlem numuneleri S / N oranları için ana etki grafiği (dB).....	151
Şekil 9.38. Isıl işlem numuneleri ana ağırlık kütle kaybı grafiği	152
Şekil 9.39. Isıl işlem numuneleri kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği.....	152
Şekil 9.40. Isıl işlem kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri	153

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

$\text{\AA}$	: Angström
kA	: A faktörünün kademe sayısı.
MPa	: Megapascal
μ	: Mikron
N	: Elde edilen toplam veri sayısı
nA	: A faktörü için veri sayısı
PTA	: Plazma Transferli Ark
SS_o	: Hata kareleri toplamı
SST	: Tüm değerlerin kareleri toplamı
T	: Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması
V_T	: Toplam Serbestlik derecesi
V_A	: A'nın serbestlik derecesi
V_{AXB}	: A ve B interaksiyonunu serbestlik derecesi
V_o	: Hata varyansı
V_T	: Toplam serbestlik derecesi
y_i	: Gözlenmiş değer
N	: Newton

1. GİRİŞ

Yüzey mühendisliği konusundaki çalışmaların temeli insanoğlunun malzemeleri kullanmasına kadar gitmektedir. Ancak çok eskiden, bilim adamları yüzey mühendisliğini bir kavram olarak bilmemelerine rağmen; bu konuda önemli geliştirici çalışmalarda bulunmuşlardır. Metal yüzeylerinin dış ortamda maruz kaldıkları; yorulma, sürtünme ve aşınmalar yıkıcı sonuçlar oluşturmaktadır. Bunları tamamen ya da minimuma indirmek için farklı yüzey işlemlerine büyük ihtiyaç duyulmaktadır [1-4]. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerini geliştirmenin en basit ve ekonomik yolu, yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmeden yapılan yüzey işlemleridir. Bunların başında son yıllarda kullanılmaya başlanan plazma transfer ark kaynak yöntemi gelmektedir. PTA tekniği, homojen şekilde kaplamalar, yüksek derecede tekrarlanabilirlik, lazer ve termal spreylere kıyasla maliyet etkinliği, endüstride kolay bulanabilirliği, 6mm kalınlığına kadar kolay kaplamalar, kullanımının kolaylığı, nispi kayıplarla güçlü metalürjik bağ meydana getirmesi, ergime bölgesinde oluşan lokal yüksek ısı, kaplanan numunelerde çarpılmanın oluşmaması, genellikle otomatik sistemlerle çalışıyor olması, insan faktörünü ortadan kaldırması ve oluşabilecek hataları minimuma indirmesinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [5-8]. PTA yönteminde alaşım tozu ya da tozlarının alt tabaka malzemesinin yüzeyi ile bütünleşmesi bir birleştirme yöntemini oluşturmaktadır. Ergime işlemi, her iki malzemede de aynı anda gerçekleşmektedir. Sıvılaştıran bölge hızla katılaşıp, modifikasyon yapılan ana malzeme ve kaplama malzemesinin birbirlerine karşı metalürjik olarak bağlanır [9].

Günümüzde, gelişmiş ülkelerde kullanılmakta olan deney tasarım teknikleri tasarım ve konstrüksiyon için arzulanan istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması neticesinde, ürünün maliyeti artar ve hızlı bir şekilde sonuca ulaşılamaması neticesinde uygulanabilirliğini tamamen kaybetmektedir. Fakat Japon Mühendis Genichi Taguchi tarafından uzun yıllar sonucu yaptığı çalışmalarla, çok az deneyle çok iyi sonuçlar veren ortogonal dizileri geliştirilerek kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerde ve maliyet ve zaman açısından etkin ve bununla birlikte kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler üretmektedir.

Bu çalışmada, Hardox 400 mikroyaşımli çelik yüzeyine B_4C , TiC , $FeCrC$ ve SiC tozu PTA kaynak yöntemiyle alaşımlandırılmıştır. Yüzey dört farklı karbürle kaplanmıştır.

Bununla birlikte işlemsiz Hardox 400 mikroalaşım çeliği 900°C’de 30dk süre ısıtılarak ısıtıl işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlem soğutma ortamları olarak su, yağ ve fırın ortamı kullanılmıştır. Alaşımlanmış Hardox 400 çeliğin kaplama tabakaları ve ısıtıl işlem uygulanmış Hardox 400 numunelerin yüzeyleri, 6-16 N yük, 120-180 aşındırıcı tane boyutu ve 10-20-30-40 metre kayma mesafelerindeki, abrasiv aşınma davranışları kütle kayıplarına bağlı olarak Taguchi dizayn metoduyla analiz edilmiştir. Abrasiv aşınma test sonuçları Taguchi metod yönteminin en düşük-en iyi kontrol karakteriği ile optimize edilmiş olup sonuçlar grafiksel yöntemlerle incelenmiştir.



2. ÇELİKLER

Çelikler demir-karbon alaşımlarıdır. Demir, karbon dışında bazı alaşım elementlerini de yapısına alabilirler. Farklı bileşim ve/veya farklı ısıtılma maruz bırakılmış birçok çelik türü bulunmaktadır. Bir çeliğin mekanik özellikleri yapısında bulunan karbon miktarıyla büyük ölçüde bilinmektedir. Genel anlamda çelikler, düşük, orta ve yüksek karbonlu çelikler olarak 3 başlık altında toplanır ve her grubun kendine ait alt başlıkları bulunmaktadır. Benzer şekilde içerdikleri diğer alaşım elementleri miktarıyla alakalı bazı kendine ait alt gruplandırmalar söz konusudur. Örneğin basit karbonlu çelikler, içerisinde bir miktar karbon ve az oranda manganez içerirken bunun yanında alaşımlı çelikler, bünyesinde belirli miktarlarda ilave edilmiş farklı alaşım elementlerini de içermektedirler [10].

2.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

2.1.1. Düşük-Karbonlu Çelikler

Tüm çelik türleri ele alınırsa en çok üretimi mevcut ve en geniş kullanım alanına sahip çelik grubunu düşük karbonlu çelikler oluşturmaktadır. Bu çelik grubu genelde yüzde karbon oranı ağırlıkça %0,25'den daha az oranlarda karbon içermektedir. Fakat martenzitik dönüşüm arzulanan ısıtılma işlemlere tepki vermemektedir. Bu sebeple düşük karbonlu çelikler genellikle soğuk şekillendirme yöntemleriyle dayanımları artırılır. Düşük karbonlu çeliklerin mikroyapıları ferrit ve perlitden oluşmaktadır. Dolayısıyla, nispeten yumuşaklık, düşük dayanımıyla birlikte, yüksek süneklik ve tokluk özellikleri barındırırlar. Bununla birlikte düşük karbonlu çelikler talaşlı imalat ve kaynaklı birleştirmeler için uygun özellikler sergiler. Ayrıca diğer tüm çeliklerle kıyaslandığında daha düşük maliyetlerde üretilebilir. Örnek vermek gerekirse otomotiv sektörü içinde araç gövdesi ve parçalarının üretiminde I-U gibi profillerin muhtelif kesitlerdeki yapı çelikleri şeklinde kullanılmaktadır. Mühendislik yapılarının imalatında, sac ve levha gibi şekillerde ise boru hatları, köprüler, binalar ve içecek kutlarının üretimi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Düşük alaşımlı çeliklerin başka bir grubu ise, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (YDDA) çelik grublarıdır. Düşük alaşımlı çelikler yapılarında Cu, V, Ni ve Mo gibi diğer alaşım elementlerini, ağırlıkça toplam maximum %1 oranına kadar ihtiva ederler. Düşük

karbonlu çeliklere kıyasla dayanımları daha fazladır. Düşük alaşımlı çelik gruplarının çoğu ısıtıl işlem uygulamaları tarafından sertleştirilebilir. Bunun sayesinde çekme dayanımları 480 MPa'nın üzerine çıkartılabilirler. Ayrıca Tablo (2.1)'de görüldüğü üzere, bu tür çeliklerin sünekliği oldukça yüksek olup kolay işlenebilir ve şekillendirilebilirler. Normal atmosfer koşullarında yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler, karbon çeliklerine kıyasla daha yüksek korozyon direncine sahiptirler. Bu sebeple kuleler, köprüler ve yüksek binaların kolonlarında, bununla birlikte yüksek dayanımın arzulandığı birçok uygulamada karbon çelikleri kullanılmaktadır. Tablo 2.2'de çeliklere ait bazı özelliklerdir.

Tablo 2.1. Bazı basit karbonlu çelik ve YDDA çeliğine ait çeliklerin kimyasal bileşimi [11].

Kodu ^a		Bileşim (ağ%) ^b		
ASTM ya da AISI/SAE Numaraları	UNS Kodu	Mn	C	Diğer
Basit Düşük Karbonlu Çelikler				
1020	G10200	0.45	0.20	
1010	G10100	0.45	0.10	
A516 Grade 70	K02700	1.00	0.31	0.25 Si
A36	K02600	1.00	0.29	En az 0.20 Cu
Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşım Çelikler				
4656 Grade I	K11804	1.60	0.18	0.60 Si; 0.1V; 0.20 Al; 0.015 N
A633 Grade E	K12002	1.35	0.22	0.30 Si; 0.08V; 0.02 N; 0.03 Nb
A440	K12810	1.35	0.28	0.30 Si (en fazla); 0.20 Cu(en az)

^aAISI, SAE, UNS ve ASTM Kodlama Sistemine ilişkin bilgi ilgili bölümlerde verilmiştir.

^bAksi belirtilmedikçe en çok %0.05 S, %0.04 P ve %0.30 Si içerir.

Tablo 2.2. Sıcak haddelenmiş muhtelif düşük karbonlu çelikler ile yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklere ait malzeme özellikleri ve kullanımlarına ait örnekler [10].

AISI/SAE veya ASTM Numarası	Çekme Dayanımı [MPa]	Dayanımı Akma [MPa]	50 mm Ölçü Boyunda % Uzama Cinsinden Süneklik	Örnek Uygulamaları
Düşük Karbonlu Basit Çelikler				
1010	325	180	28	Araç kaportaları, çivi ve tel
1020	380	205	25	Boru, yapı çelikleri ve saçları
A36	400	220	23	Yapı (küprü, bina) çelikleri
A516 Grade 70	485	260	21	Düşük sıcaklıkta çalışan basınçlı kaplar
Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşım Çelikler				
A440	435	290	21	Cıvalı veya perçinli bağlantı kullanılan yapılar
A633 Grade E	520	380	23	Düşük sıcaklıklarda çalışan donanım
4656 Grade I	655	552	15	Kamyon kasaları ve tren vagonları

2.1.2. Orta-Karbonlu Çelikler

Orta karbonlu çeliklerin karbon oranı ağırlıkça % 0.25 ile %0.6 arasında bulunmaktadır. Orta karbonlu çeliklerin mekanik özellikleri, östenitleme, su verme ve akabinde temperleme ısı işlemi sayesinde iyileştirme yapılabilir. Orta karbonlu çelikler çoğunlukla temperlenmiş durumdadır. Dolayısıyla içyapısı temperlenmiş martenzit olarak kullanılır. Bu çelikler düşük sertleşebilme kabiliyeti yüzünden, ince kesitli parçalarda, su verme işlemi sırasında oldukça yüksek soğutma hızları sayesinde sertleştirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Cr, Mo, Ni gibi elementlerin kimyasal bileşime katılması sonucu, orta karbonlu çeliklerin ısı işlem kapasiteleri geliştirilebilir. Bu sayede farklı dayanım-süneklik bileşimleri elde edilmesi de olası olabilir. Bu tür ısı işleme maruz bırakılmış çelikler, düşük karbonlu çeliklerden daha dayanıklıdır. Fakat orta karbonlu çelikler daha az süneklik ve

tokluk özellikleri barındırırlar. Bu çeliklere ait uygulama örnekleri verilmek gerekirse raylar, raylı araçlara ait tekerlekler, krank milleri, dişliler ve uygulanacak yerde arzulan aşınma dayanımı, yüksek dayanım ve tokluk özelliklerinin gerekli olduğu diğer makine parçaları örnek olarak verilmektedir. Çeşitli alaşımlı orta karbonlu çeliklere ait kimyasal bileşim aralıkları, çeliklerin kodlanmasına ait esaslarla birlikte Tablo 2.3'de verilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Otomotiv Mühendisleri Odası (SAE), Demir-Çelik Enstitüsü (AISI). Malzeme ve Testleri Kuruluşu (ASTM) diğer alaşımlarda olduğu gibi, bu tür çeliklerin de sistematik olarak kodlanıp tanımlanmasında yetkili olan kuruluşlardır. AISI/SAE sistemine göre, bu tür karbon ve düşük alaşımlı çeliklerin kodlanmasında dört haneli sayılardan yararlanılır. Son iki hanede yer alan çeliğin sahip olduğu karbon oranını belirtir. Basit karbonlu çeliklerde ilk iki hane 1 ve 0 sayılarından, alaşımlı çeliklerde ise ilk iki hane, diğer sayıların değişik kombinasyonlarından (13,41,43 gibi) oluşur. Üçüncü ve dördüncü hane, çeliğin karbon oranının 100 ile çarpılmasıyla elde edilen sayıyı gösterir. Örneğin 1060 kodu ile ifade edilen çeliğin karbon oranı ağırlıkça %0.60'dır.

Tablo 2.3. AISI/SAE ve UNS (metal ve alaşımların birleştirilmiş kodlama sistemi) kodlama sistemi ile basit karbonlu çelikler ve bazı düşük alaşımlı çelikler için kimyasal bileşim aralıkları [10]

		Bileşim Aralığı (Karbona ek olarak bulunan alaşım elementlerin ağırlıkça yüzdesi) ^b			
AISI/SAE Numarası ^a	UNS Numarası	Nikel	Krom	Molibden	Diğer
10xx, 11xx, Otomat 12xx, Otomat	G10xx0 G11xx0 G12xx0				0.08-0.33 S 0.10-0.035 S 0.04-0.12 P 1.6-1.90 MN
13xx 40xx 41xx 43xx 46xx 48xx 51xx 61xx 86xx 92xx	G13xx0 G40xx0 G41xx0 G43xx0 G46xx0 G48xx0 G51xx0 G61xx0 G86xx0 G92xx0	1.65-2.00 0.70-2.00 3.25-3.75 0.40-0.70	0.80-1.10 0.40-0.90 0.70-1.10 0.50-1.10 0.40-0.60	0.20-0.30 0.15-0.25 0.20-0.30 0.5-0.30 0.20-0.30 0.15-0.25	0.10-0.15 V 1.80-2.20 Si

^aher çelik için "xx" ile gösterilen yerde ağırlıkça C yüzdesinin 100 ile çarpılmış değeri vardır.

^b13xx çeliklerinin dışında Mn oranı ağırlıkça %1'in altındadır.

12xx çeliklerinin dışında P oranı ağırlıkça %0.035'in altındadır.

11xx ve 12xx çeliklerinin dışında S oranı ağırlıkça %0.04'ün altındadır.

92xx çeliklerinin dışında Si oranı ağırlıkça %0.15-0.35 arasında değişir.

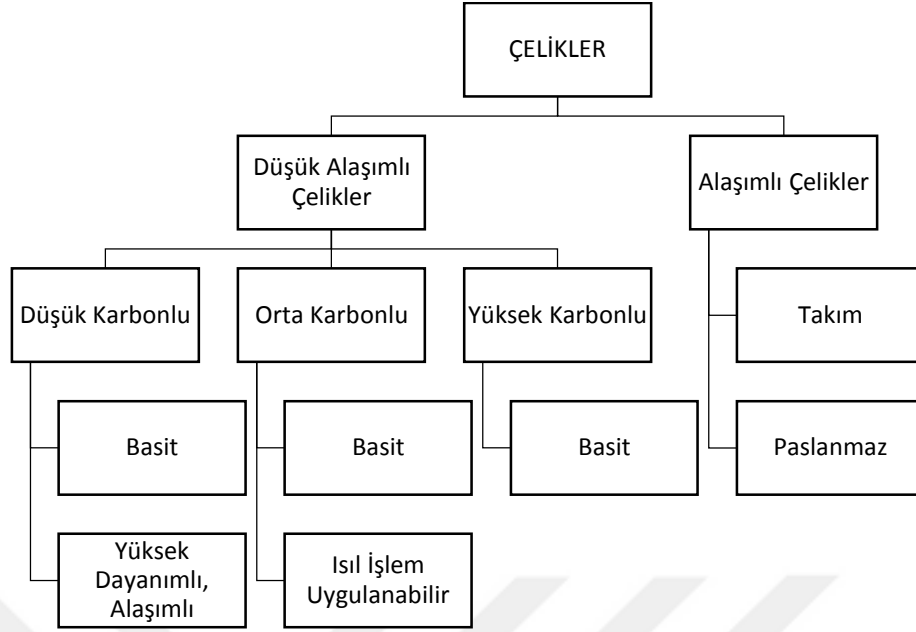
Hem demir esaslı hem de demir dışı alaşımlar için geçerli olan birleştirilmiş bir kodlama sisteminden (UNS) yararlanılır. Her bir UNS kodu tek bir ön ek harfiyle başlar ve bunu beş haneli bir sayı takip eder. Kodun başında yer alan harf alaşım ailesinin ait olduğu metali işaret eder. Karbon çelikleriyle düşük alaşımlı çelikler için UNS kodlaması G harfi başlar, AISI/SAE kodu ile devam eder ve beşinci hane ise 0 olarak yazılır.

2.1.3. Yüksek-Karbonlu Çelikler

Yüksek karbonlu çeliklerde genel olarak karbon oranları ağırlıkça %0,60 ile 1,4 aralığında değişmektedir. Bu çelik grubu karbon çelik içerisinde en dayanıklı, en sert, fakat en düşük süneklik özelliği gösterirler. Yüksek karbonlu çelikler, çoğu zaman su verilip temperlenmiş halde kullanılırlar. Söz konusu olan bu çelikler genellikle aşınma direnci gerektiren, sert ve aynı zamanda keskin kenarların olması arzulanan uygulamalarda kullanılır. Soğuk iş takım ve kalıp çelikleri bünyesinde yüksek C dışında, Cr, V, W ve Mo gibi bazı alaşım elementlerinden oluşmaktadır. Bünyesindeki bu alaşım elementleri karbonla bileşik oluşturarak çeliğin yapısında $Cr_{23}C_6V_4C_3$, WC gibi aşınmaya dayanıklı ve sert karbür bileşiklerini meydana getirir. Bu tür çelikler; kesici takımlarda, şekillendirme kalıplarının imalatında, jilet, bıçak, yay, testere ve yüksek dayanım istenen tellerin üretiminde de kullanılmaktadır. [10]

2.2. Çeliklerin kimyasal bileşimine göre sınıflandırılması

Çelikler kimyasal bileşimine göre alaşımsız ve alaşımlı çelikler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu ayrımın yapılmasında çeliğin içerisindeki alaşım elementlerinin miktarlarına bakılarak yapılmaktadır. Şekil 2.1’ de Çeliklerin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.1. Çeliklerin sınıflandırılması [10].

2.2.1. Mikroalaşımlı Çelikler

Mikroyapıcı çelik gurubu, yüksek karbür ya da nitrür yapıcı elementlerden çok az miktarlarda ilave edilmesi sonucu mekanik özellikleri iyileştirek, geliştirilmiş çelik grubu olarak tanımlanır [12].

Mikroalaşımlı çelikler ısıtıl işlem gerektirmeyişi, işleme kolaylığı, maliyet avantajı ve diğer birçok özelliği nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır [13]. Mikroalaşımlı çeliklerin başlıca üstün özellikleri olarak; rahatlıkla termomekanik işlemlerinin uygulanması, birden fazla sertleştirme mekanizmalarının varlığı ve yapısında düşük karbon ihtiva etmesi mukavemet özelliklerini artırır. Ayrıca tokluk özelliklerinin yüksek olması gevrek kırılmaya dayanımını artırır. Bununla birlikte içerdiği alaşım elementlerinin sayesinde kaynak edilebilirlik ve korozyon dayanımı yüksektir [14].

Mikroalaşımlı çeliklerin özelliklerini belirleyen çeliğin mikroyapısı ve içerdiği kimyasal bileşimdir. Çeliğin mikroyapısı başlıca; bileşimine, uygulanan ısıtıl işlem sıcaklığına ve haddeme işleminin sonucundaki dönüşüme bağlıdır. Mikroalaşımlı çeliklerde alaşım ve ısıtıl işlem ile kontrol edilen tane boyutu, mekanik özellikleri büyük oranda etkiler. Bu çeliklerde elementlerin östenit fazındaki çözünürlüğü ve çözünme süresi tane yapısının oluşum şeklini belirler [15].

Mikroalaşımlı çeliklerin dayanım artırıcı mekanizması olarak tanenin küçülmesi, katı çözelti sertleşmesi, gerinim sertleşmesi ve çökelme sertleşmesi arzulanan özellikler kullanılabilir [16].

Mikroalaşımlı çelikler, çelik pazarında birçok parçanın üretimi için temel olup yüksek dayanım gerektiren yerler içinde özellikle aşınmaya dayanıklı çelikler gurubunun çoğunu oluşturmaktadır. İngilizce’de “wear resistance steels” olarak adlandırılan bu türler, farklı ülkelerde değişik firmalarca üretilmekte ve aynı zamanda ticari olarak değişik isimlerle kodlanmaktadır. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin, piyasada kullanılan en tanınmış isimleri Tablo 2.4’de verilmiştir [17].

Günümüzde İsveç firması olan ve dünyada aşınma parçaları ve aşınma hizmetlerinin önde gelen üreticisi SSAB tarafından üretilen HARDOX, Avusturya firması olan Voestalpine Grobblech GmbH tarafından üretilen DUROSTAT, Finlandiya firması olan RUUKKI tarafından üretilen RAEX AR, Almanya firması olan Dillinger Hütte GTS tarafından üretilen Dillidur, Fransa firması olan INDUSTRIEL tarafından üretilen FORA, Almanya firması olan Salzgitter tarafından üretilen BRINAR, Almanya firması olan Thyssen Krupp Stahl tarafından üretilen XAR, İngiltere firması olan Corus tarafından üretilen ABRAZO ve Avustralya firması olan Sandvik tarafından üretilen CREUSABRO serisi aşınmaya dayanıklı çelikler yaygın olarak satılmaktadır [18].

Tablo 2.4. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin ticari adları [5]

Üretici Ülke	Üretici Firma	Ticari Adı
Avusturya	Voestalpine Grobblech GmbH	Durostat 400 Durostat 500
İsveç	SSAB	Hardox HiTuf -Extreme Hardox 600 Hardox 550 Hardox 500 Hardox 450 Hardox 400
Almanya	Dillinger Hütte GTS	Dillidur 400-450-500
Finlandiya	RUUKKI	Raex Ar400 Raex Ar500
Fransa	INDUST EEL	FORA 400 FORA 450 FORA 500
İngiltere	Corus	ABRAZO 400 ABRAZO 500
Avustralya	Sandvik	CREUSABRO 4800 CREUSABRO 8000
Almanya	Salzgitter	BRINAR 400
Almanya	ThyssenKrupp Stahl	XAR 400 XAR 450 XAR 500

Bu çelik grubunda Hardox dirençli dış yapı plakası, değişik sertlik oranlarında bulunmaktadır. Bunlar; Hardox HiTuf, Hardox 600, Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450 ve Hardox 400 seviyeleridir. Bu sayede, özel kullanım alanı için arzulanan yerlerde Hardox sertlik sınıfını istediğimiz zaman kolayca seçme imkanı sunar.

Hardox 400: Hardox 400 genel olarak 400 HBW sertliğine sahip aşınmaya dayanıklı çelikdir. Mükemmel kaynak kabiliyeti, darbe dayanımı ve bükülebilirlik özelliğiyle diğerlerinden ayrılan özelliklere sahiptir [19].

Hardox çelik plakaları ve dönüştürülme teknolojileri sınıflandırma topluluklarının kabul edilmiş prosedürleri arasında verilmiştir. Hardox çeliklerinin yüksek sertliği kesintisiz bir ısıtma işlemi sağlanmaktadır. Hardox çeliğinin sertliği aşınma direncinin iyi

bir ölçüsüdür. Bu malzeme ile yapılan ürünlerin uzun ömürlü olmasını sağlayan Hardox 400 çeliklerinin en önemli özelliği Hardox 400 plakalarının tam sertleştirilmiş olmasıdır. Hardox 400 çeliklerinin çarpma mukavemeti ve plastic esnekliği çok yüksektir [20, 21].

Hardox 400, 400 HBW brinell sertliğe sahip aşınmaya dirençli, iyi soğuk bükülme özellikleri ile birlikte talep edilen uygulamalar için tasarlanmıştır. HARDOX 400 çok iyi kaynaklanabilirlik sunar. Bu çelikler kepçelerde, konkasörlerde, damperli kamyonlarda, oluklarda, dozerlerde, burgularda, kazıcılarda, besleme hunileride, taraklı makinelerde, besleyicilerde, pülverizatörlerde, öğütücülerde, kovanlarda, biçerdöverlerde, tamburlar ve daha birçok aşınmaya dirençli makina aksamlarında kullanılmaktadır [22].

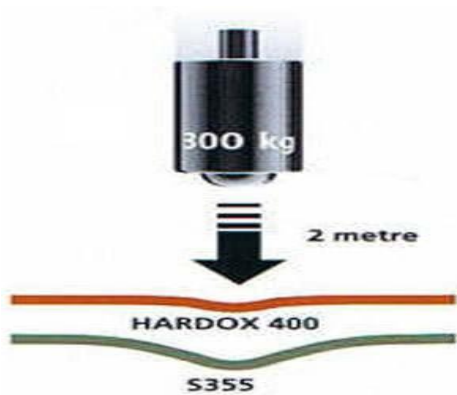
Hardox çeliği, aşınma direnci yüksek olan bir malzemedir. Bu çeliklerden Hardox 400 mikroyaşımlı çeliği aynı cins malzeme ile kırılabilir, bozulabilir ve aynı malzeme ile kaynaklama yapılabilir [23].

Hardox 400 ve sıradan bir yüksek dayanımlı konstrüksiyon levhası, geniş kapsamlı düşme testleri ile karşılaştırılmıştır. 150-800 kg arasında değişen ağırlıklar 3 metreye kadar yüksekliklerden bırakılmıştır.

Hardox levhasındaki orta dereceli deformasyon, mukavemetinin iyi bir göstergesidir.

Hardox 450: Hardox 450 mikroyaşımlı çelik, aşınma çeliği plakalarından 450 HBW'lik sertlik düzeyine sahip ve bir çok amaç için kullanılan bir dış yapı çelik sınıfındandır. Bu çelik sınıfına özgü özellik olarak Hardox, işleme kolaylığı, sıklığı ve sertliğe sahip olmasıdır.

Şekil 2.2' de sıradan bir yapı çeliği ve Hardox 400 çeliğine 2 metre yükseklikten, 300kg yük bırakılmıştır. Çeliklerin ağırlığa karşı gösterdiği direnç ortaya konulmuştur.



Şekil 2.2. Hardox 400 mikroyaşımlı çeliği ve sıradan yüksek dayanımlı konstrüksiyon arasındaki levhasının mukavemeti [24].

Hardox 500: Bu plaka, aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kaynak edilebilirliği yüksek tokluk ve bükülebilen bir aşınma levhası olarak bilinmektedir. Bununla birlikte yüksek taşlama direncine sahip olmasıyla birlikte daha da yüksek oranda dış yapı direnci talep eden çalışma ortamlarında kullanılmaktadır.

Hardox 600: Bu plaka ise özel durumlar için üretilmiş dünyada en sert aşınma levhalarından biridir. Sert döküm olan Ni-hard, Yüksek kromlu beyaz dökümler ve kaynak dolgu gibi malzemelerle rekabet etmektedir. Aşınma plakası saf, dirençli bir dış yapı plakası olduğundan, çok yüksek seviyede dirence sahiptir [25].

Hardox HiTuf: Hardox Hituf ise yoğun aşınmaya maruz kalan makina parçaları ve uygulamalar için üretilen çatlamalara karşı yüksek direnç oluşturmak amacıyla üretilmektedir. Örnek olarak; kesici kenarlı makineler, kalın kırma makineleri verilebilir [24, 26, 27].

2.2.1.1. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Üretimi

Çelik üretim yöntemlerinin hemen hemen hepsinde pik demiri çeliğe dönüştürme esas olarak alınır. Herhangi bir araç yardımıyla metale verilen oksijenle ya da özel bir şekilde üretilmiş olan saf oksijen istenmeyen C, Mn, P gibi elemanlarla birleşir. Bununla birlikte esen miktarda Fe oksitlenir. Ayrıca S bazık bir cüruflla giderilebilir. Banyoda meydana gelen oksitlerin bir kısmı gaz halindeyken bacaya giderek uzaklaşır. Sıvı halde bulunan diğer oksitler ise ilave edilen tozlarla birleşerek curufu şeklinde yapıdan uzaklaştırılır. Pik demirin arınması sonucu, banyonun erime noktası da aynı oranda artar. Arınma işlemi sonucunda hala çeliğin içinde bulunan demiroksitin redüklenmesi gerekmektedir. Bunun için erimiş halde bulunan banyodaki çeliğe alüminyum, terro-silisyum vb. deoksidasyon maddeleri ilave edilerek redükleme işlemi gerçekleştirilir [28].

2.2.1.1.1.Bessemer Usulü Çelik Üretimi

Henry Bessemer tarafından ilk defa İlk defa 1856 kullanılmıştır. Bu yöntemde ham demiri ergitip içinden hava geçiti sağlayarak metali kırılğan yapan maddeleri bağlayarak yakmayı başarmıştır. Yanma işlemi sonucu ortaya çıkanmış olan enerji, çeliği sıvılaştırmıştır. Bu işlemin akabinde Bessemer usulünün temellerini atılmış oldu.

2.2.1.1.1. Bessemer - Thomas Usülü Çelik Üretimi

Daha önce Bessemer usulüyle çelik üretilmiş fakat yapı içerisinde bir miktar fosfor ve kükürt yanmadan kalması söz konusudur. Çeliğin içindeki kükürt ve fosfor ise çeliğin gevrekleşmesine sebep oluyordu. Bu sebeple, Thomas Gillchrist İlk defa 1856 yılında Bessemer'in, kullandığı asit astar yerine bazik dolomit astar kullanarak yakma işlemini başardı. Bu yöntem (1876) daha sonra Bessemer - Thomas olarak adlandırıldı (Şekil 2.3). Bunun sayesinde iyi bir kaliteli çelik elde edilmiş oldu. Bununla birlikte bu teknik sonucu endüstriyel üretimin %4-5 ya da daha fazlası fire olarak atılmak zorunda kalıyordu. Bu da her yıl milyonlarca parçasının hurdaya çıkmasına sebep olması hurdaların kullanılması gerektiğini ortaya çıkardı. Piklerden çelik imal edilebilirmek için geliştirilen ergitme ocağı olarak yüksek fırınlar üretildi [29].



Şekil 2.3. İlk Bessemer-Thomas usulü fırın [29].

2.2.1.1.2. Siemens-Martin Prosesi

Bu yöntem, Bessemer metodunun keşfedilmesinin akabinde fırın temperaturünü arttıran iyileştirerek 1860'lı yıllarda bu sistemi çelik fırınlarına uygulayarak gerçekleştirmiştir. Bu sistemde Rejaneratif, gaz yakıtı ve hava fırında karşışarak önce içi refrakter tuğlalarla örtü arasında ısınır ardından fırında yanan gazlar bacaya gitmeden hemen önce fırının diğer tarafındaki bölümlere geçerek bunları ısıtır. Bu sistemde çelik yapmak üretmek için fırında ilk başta çelik hurdaları eriterek kullanmıştır. İlerleyen zamanlarda

Fransız Martin ise pik demiri ve demir cevheri kullanarak çelik üretimini gerçekleştirmiş ve adını Siemens prosesi olarak değiştirmiştir. Ve bu proses fırının ocak kısmının örtü refraktörün cinsine bağlı olarak bazik ve asit olarak ayrılmıştır.

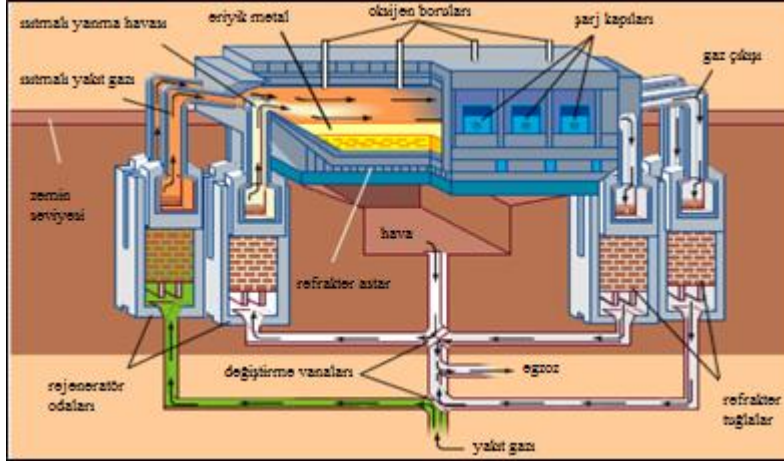
Bazik Siemens-Martin Prosesi;

Pik demiri yüksek oranda fosfor ihtiva ettiği durumlarda bu yöntem uygulanır. Yavaş bir işlemdir. Arzulanan bileşim tamperatürüne erişilinceye kadar çeliğin fırında tutabilmesi sayesinde daha kaliteli çelik imalatı imkanı sunmaktadır. Öte yandan istenildiği kadar hurda kullanılabilmesi bu metodu avantajlı kılar.

Bazik Siemens-Martin Fırını;

Refraktör tuğlalardan örülü bir halde yatay konumda çalışan, değişik boyutlarda üretilen ve farklı metalurjik işlemlerde kullanılabilen fırın tipidir. Fırının dış kısmını dört bir tarafı çevrili çelik kontsrüksyon ile üretilmiştir. 350 tona kadar üretim sağlanabilecek büyüklükte inşa edilebilir. Ancak genelde en fazla 100-125 tonluk fırınlar tercih edilmektedir. Fırının ocağı tabandan başlamak üzere yalıtkan ısı tuğlalar kullanılmıştır. Bunlar magnesit ya da krom tuğlası veya dövülmüş magnesitten yapılmaktadır. Bununla birlikte curufu temas eden her nokta krom refraktörle ya da magnesit tuğlayla örülüdür. Bazik simens martin fırının tavanı kemer gibidir. Çoğu zaman askı sistemine göre silika veya magnesit tuğlalardan üretilir. Tavan duvarları sık sık bakımı yapılır. Rejenaratör olarak söylenen şarj bölümü seviyesinin altında havayı ve gaz yakıtını ısıtan bölüm bulunmaktadır. Bu bölümlerin içi petek şeklinde refraktör tuğlalarla kaplanmıştır. Bazik simens martin fırının her iki tarafında iki bölüm mevcuttur. Bunlardan biri havayı diğeri gazı ısıtmak için yapılmıştır. Fırının kamaralardan verilen gaz ve hava bu odalardan geçerken sıcak refraktörlerle temas kurar ve 1200°C sıcaklık dolaylarında ısı elde edilir. Bu ısıda gaz ve hava fırına geldiğinde birleşerek yanma tepkimesi verir. Bu yanma neticesinde 1700°C civarında bir ısı oluşur. Bu sıcakta yanma gazları banyo yüzeyine temas ederek diğer taraftaki bölüme geçer ve burayı ısıttıktan sonra bacaya iletilir. Ve daha sonra gaz ve hava geçtiği bölümler soğuyup yanma gazlarının geçtiği bölümler ısınacağından gazın ve havanın akım yönü değiştirilir. Böylece bu bölümler sırasıyla kullanılır. Bu fırının ön tarafında şarj kapıları bulunmaktadır. Burdaki kapıların sayısı fırının büyüklüğüne göre değişmektedir. Modern fırınlarda genellikle beş tane kapı bulunur. Mekanik veya hidrolik olarak açılıp kapanan bu kapılar ateş tuğlasıyla örülüdür. Ayrıca bu kapılar su ile soğutulur, orta bölümlere gelince bir gözetleme deliği bulunmaktadır. Döküm deliği ağız ise fırının arka kısmına konumlandırılmıştır. Yine sıcak metal bir yolluk aracılığıyla potadan fırına alınır.

Bu tür fırınlarda yakıt olarak ise kok gazı, tabii gaz, pülverize kömür, yüksek fırın gazı, katran, suni gaz ve fuel-oil, kullanılabilir. Kullanılan bu gaz mümkün olduğunca temiz olması gerekir. Aynı zamanda az miktarda kükürt içermesi istenilen bir durumdur. Şekil 2.4’de sıradan bir Siemens Martin çelik fırınının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.4. Siemens Marthin çelik üretim fırını [29].

Asit Siemens-Martin Yöntemi;

Asit Siemens-Martin Fırını yapılış bakımında ve işletme sistemi bazik fırına çok benzerdir. Ancak bu fırının ocak bölümü silis kumuna benzer asit bir refraktörle kaplanır. Bu yöntemde ocak kısmının asit bir karaktere sahip olması bazik curuf oluşumunu önlemektedir. Asit curufta P ve S giderilmediğinden bu metotta çelik üretiminde şarjın P ve S yüzdesi oranının düşük olması gerekmektedir. Bu sebepten daha yüksek kaliteli ham maddeler uygulanır. Curufun içinde FeO ile SiO₂’nin birleşmesi sonucunda asit bir curuf, içinde denk miktarda FeO bulunan bazik bir curufa kıyasla daha az oksitleyici özellik göstermektedir. Bu sebeptendir ki, banyoda bazik işlem prosesine oranla daha az O bulunur. Dökümün sonunda çok daha az deoksidasyon maddesi ilave edilir. İşte bu sebepler ışığında asit proseste daha temiz ve kaliteli çelik üretildiği kabul edilir.

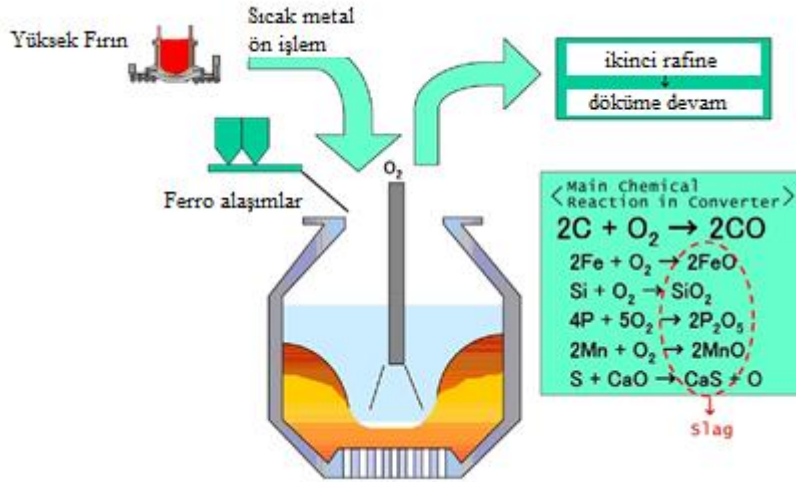
2.2.1.1.3. Elektrik Ark Fırınları

Ergitme işlemi sırasında elde edilecek çelikte gerekli kimyasal bileşim sağlayacak şekilde diğer demir esaslı metaller tatbik edilir. Benzer şekilde bazik oksijen fırınlarında olduğu üzere çeliği saflaştırmak amacıyla fırın içerisine oksijen ilave edilir. Bununla birlikte yapıda bulunan demir dışı atıkları bünyesine alarak cüruf oluşturacak katkı maddeler tatbik

edilir. Bu kimyasal işlemi kontrol etmek üzere bir miktar numune alımından sonra ilk olarak sıvı ergiyik üzerinde bulunan cüruf alınır. Akabinde fırındanana malzeme olan çelik alınarak ya ikinci bir arıtma ya da sürekli döküm ünitesine gönderilir. Modern elektrik ark ocaklarında bu işlem hem daha kısalmış hem de her ergitmede 150 tona yakın çelik elde edilebilmiştir. Elektrik ark fırınlarının en büyük avantajı içeri katkı maddesi vermeden kaliteli, temiz bir ısıtma sağlanabilmesidir. Bu metot genellikle elektriğin bol ve ucuz olduğu ülkelerde tercih edilmektedir.

2.2.1.1.4. Oksijen Üfleme Usülü Çelik Üretimi

Bu prosesinde, Thomas ve Siemens Martin fırınlarının üstünlükleri bir arada toplanmıştır. Oksijen üfleme usulünde ham demir içinde bulunan istenmeyen elemanları yakmak suretiyle uzaklaştırabilmek için teknik saflıkta oksijen üflenmektedir. Bu yüzden reaksiyonlar oksijen sayesinde daha çabuk meydana oluşmaktadır. %79 oranında hava içinde bulunan azot, gereksiz yere ısıtılır. Ancak daha önemlisi bu sistemde azotu düşük olan çelik üretilir. Böyle bir üretimde ki sebep azotun çeliğin plastik şekil değişim kabiliyetini zora soktuğundandır. Bu sebepten dolayı ham demire, içinde azot bulunan hava yerine saf oksijen üfleme yöntemleri üretilmiştir. Bu sistemde saf oksijen varlığında oluşan reaksiyonlar daha hızlıdır. Ayrıca demirden istenmeyen refakat elamanları azalarak azotun ayrıştırılması daha kolay bir şekilde gerçekleştirilmiş olur. Oksijen üfleme yöntemi sayesinde oldukça düşük kaliteli ve maliyetli çelikler üretilmektedir. Bunun dışında ham demirle birlikte hurda malzemeler de işlenebilme imkanı sunmaktadır. Bir çelik üretiminde kullanılan oksijen üfleme yöntemleri başlıca LD, LDAC, Kaldo yöntemidir. Şekil 2.5’de basit bir LD çelik fırını ve üretim yöntemi görüntülenmektedir.



Şekil 2.5. Basit bir LD çelik üretim yöntemi [29].

LD (Linz-Donawitz) yöntemi;

Bu yöntemde oksijeni boruyla üflenerek banyo oluşturma yöntemi Avusturya'da ki bir Linz çelik fabrikalarında ve ayrıca Steiermark bölgesinde Leoben'deki Donawitz fabrikasında uygulandığı için bu ismi almıştır. LD yöntemi % 0,2-0,4 fosfor ihtiva eden dökme demirleri işleme gibi bir avantaj içermektedir. Bu fosfor oranı, Bessemer yöntemi ile kıyaslandığında yüksek, Thomas yöntemine kıyaslarsak ise onun kadar verimli değildir. Saflık oranı en az % 98 olan oksijen, 10 barlık basınç altında dibi dolu dönüştürücü içine, su dolaşımı sayesinde soğutulan bir boru yardımıyla üfleme işlemi yapılır. Burada oksijen, erimiş dökme demir banyosunun yüzeyine çıkarak bir girdap oluştururur busayede dökme demir karbonunu bağlayarak çeliğe dönüşmesini sağlamaktadır. Elde edilmiş olan çeliğin kalitesini kıyaslarsak; Martin çeliklerine eşdeğer ya da yüksektir. Fakat Bessemer ve ya Thomas yöntemlerine oranla refrakterik astarın dayanıklılığı daha azdır. Fakat diğer yandan gerekli yatırım maliyet açısından Bessemer ve Thomas yöntemiyle kıyaslandığında çok daha fazladır. Bunanla birlikte LD yöntemi toz giderme tesisinin kurma ihtiyacı duyar [17, 20]. Şekil 2.6'da üretim hattında Hardox 400 çeliği görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 2.6. Üretim hattındaki Hardox 400 çeliği [19].

2.2.1.2. Aşınmaya dayanıklı mikro-çeliklerin mekanik özellikleri

Malzemeler kullanıldığı yerdeki koşullar gereği ve kendisine değişik şekillerde etki eden çeşitli zorlamalara dayanmak zorundadır. Aksi durumunda o malzemenin kısmi kaybı ya da tamamının kaybına sebep olmaktadır. Diğer bir deyişle bu yapının maruz kaldığı kuvvetlere ve yüke karşı koyması ancak kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle gerçekleşir. Mekanik özellikler değişik değerler almaktadır. Bu değişik değerlerin ilki zorlama şeklinin etkisidir. Bir zorlama şeklinin değişmesiyle aynı malzemenin diğer özellikleri farklı değerler almaktadır. Bir diğer değişik malzemenin bulunmasıdır, farklı zorlama şekli için mekanik özellikler, her malzemede ayrı bir özellik gösterir. Bir malzemenin mekanik özellikleri, kırılan bir malzeme, sünek bir malzeme, malzemenin kırılma şekilleri, mukavemet halleri, burulma, kayma kuvvetleri ve eğilme zorlamaları altında malzemenin durumu, malzemenin sertliği, malzemenin sünmesi, malzemenin yorulması, malzemenin aşınması, malzemenin kırılması ve deformasyonu gibi özellikler yer alır. Aşınmaya karşı dayanıklı Hardox çeliklerinin mekanik özellikleri hardox çeliğinin kimliğini oluşturan brinel sertlik değerlerine göre değişiklik göstermektedir [30]. Hardox 400'den Hardox 600'e doğru gidildikçe, sertik ve tokluk arttığı görülür bu da mekanik değerlerin artışını göstermektedir. Bu oranlar çekme, darbe ve sertik testlerinde açık bir şekilde Tablo 2.5'de görülmektedir.

Tablo 2.5. Mekanik değerler [31].

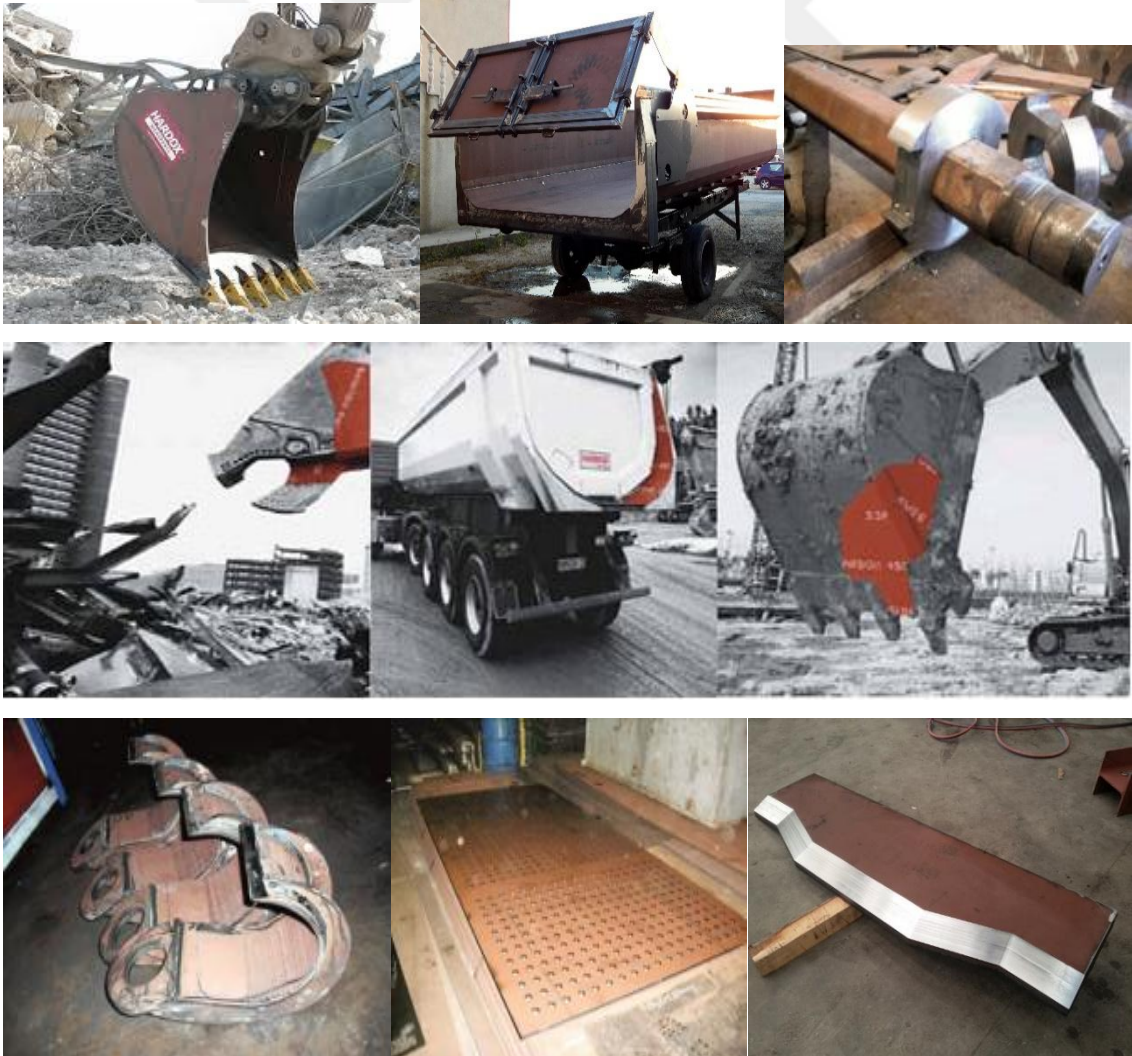
Mekanik Özellikler					
Çelik türü	Sertlik [HBW] Max-Min	Darbe tokluğu t=20mm	Kalınlık (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama A _s ¹ (%)
HardoxExtreme	63 ³ -57	<15j-40°C	8-20		
Hardox 600	640-570	20j-40°C	8-51		
Hardox 550	575-525	30j-40°C	10-50		
Hardox 500	540-450	35j-40°C	4-80	1250	
Hardox 450	475-425	50j-40°C	3-130	1100-1300	10
Hardox 450	475-425	50j-40°C	0.7-2.10	1300	3 ²
Hardox 400	430-370	45j-40°C	3-130	1000	10
HardoxHiTuf	370-310	95j-40°C	40-160	850	14

2.2.1.3. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Talaş Kaldırılarak İşlenmesi

Talaşlı imalat önceden tasaralan ve konstrüksiyon, üretim süreci belirlenen makine parçalarının, üretim sürecine uygun talaşlı imalat tezgahında, daha önce tasarlanmış kesici takımlar sayesinde kesme işlemi yapılarak şekillendirilmesini içeren üretim yöntemidir. Bu imalat sisteminde, iş parçası ve kesici takımın birbirlerine göre izafi hareketiyle iş parçası üzerinde, gerilim oluşturarak talaşlı imalat yapılır [32]. Günümüzde ilerleyen teknolojiyle birlikte aşınmaya dayanıklı ürünlerin geliştirilmesiyle birlikte bu aşınmaya dayanıklı ürünlerin yüksek mukavemet ve sertliğine bağlı olarak, donanımlı atölye teknikleri kullanıldığında işlenmeleri mümkün olmaktadır. İmalatçıların ve bıçaklarda kesme sıvılarını üretici firmaların talimatlarına ve verilen dizayn değerlerine bağlı kalınmalıdır. Talaş kaldırma işlemi yapılacak malzeme sıkı bir şekilde ve işlenecek noktaya en yakın şekilde oturtulmalı, talaş kaldırmanın hiçbir aşamasında malzemeye zarar verebilecek titreşimler minimize edilmelidir. Kesme işlemine başlamadan önce özel önlemler alınmalıdır. İlk kesimin yapıldığı noktada, alevle kesilmiş yüzeylerin düzgün olmasına dikkat edilmelidir. Kesme derinliği randımanlı bir şekilde kullanılmalıdır. Uygun kesme sıvısı kullanılmalı ve bol miktarda uygulanmalıdır. Kurutma işlemi için düşük kesme hızı gereklidir. Eğer aşınmaya dayanıklı çeliklerin işlenmesi düzenli bir sistem kullanılarak yapılacaksa, imalatçının belirlediği bilgiler kullanılarak yapılmalıdır [20].

2.2.1.4. Aşınmaya Dayanıklı Çeliklerin Uygulama Alanları

Damperli kamyonların kasaları, ekskavatör ve buldozer kepçelerinde, ızgara plakaları, kesici ağızlar, kırıcılar, toprak kaldırma ve yükleme makinaları, kenar plakalarında, küreme kenarlarında, besleyicilerde, kovalarda, konteyner yan ve alt kısımlarında, maden ekipmanlarının aşınan parçalarında, budama bıçaklarında, konveyör ruloları ve tezgahlarında, hafif ve tok yapıda olan su atık borularında, ağaç kesim makinelerinin aşınan parçalarında, ağaç işleme makinelerinin aşınan parçalarında, değirmenler, kaldırma aparatları, elekler, hidrolik çekiçlerin korunmasında, toz arındıran fan pervanelerinde, kömür değirmenlerinde, silolarda, parçalama bıçaklarında, beton santrali için havşalı karıştırıcı plakalar, bıçaklar gibi aşınmaya müsait hareketli ya da hareketsiz makine parça ve aparatlarında (Şekil 2.7) kullanılmaktadır [33].



Şekil 2.7. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin uygulama alanları [33].

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA

Sürtünme, genellikle birbirine göre izafi hareket eden temas halindeki iki yüzeyin temas noktalarında harekete karşı oluşan dirence denir [34].

İzafi hareket BS ISO 4378-2 2009 standardında maksimum statik, sürtünme statik ve dinamik sürtünme olarak üç kısımda incelenmektedir.

3.1. İzafi Hareketler

3.1.1. Statik Sürtünme

İzafi hareket başlamadan önce, artan dış kuvvet sayesinde temas halindeki iki cismin yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünmeye “Statik Sürtünme” denir [34].

Maksimum Statik Sürtünme

İzafi hareket başlamadan hemen önce yavaş yavaş artan dış kuvvet altında temas halindeki iki cismin yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünmedir [35].

3.1.2. Dinamik Sürtünme

İzafi hareket yapan iki cisim arasındaki sürtünmedir [34]. İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı cisim tatbik edilmesi ya da edilmemesi bakımından sürtünme sıvı, kuru ve sınır sürtünmesi olarak üç halde incelenmektedir.

3.1.2.1. Kuru Sürtünme

Temas eden veya kendi aralarında etkileşimde olan iki yüzey arasında yağlayıcı bulunmadan meydana gelen sürtünme olarak adlandırılır. Bu nedenden normal bir kuvvetin etkisi altında olan ve izafi hareket yapan bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında hareketin zıttında $F_s = \mu \cdot F_n$ değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. F_s = Sürtünme kuvvetini gösterirken, F_n ise cisme uygulanan normal kuvvet, μ sürtünme katsayısı olarak bilinmektedir.

3.1.2.2. Sıvı Sürtünme

İzafi hareket yapan veya birbirini etkileyen iki yüzey arasında yağlayıcı varlığında meydana gelen sürtünmedir [34, 35]. Sıvı sürtünme dolaysız yağlama yağının tabakaları arasında meydana gelir.

3.1.2.3. Sınır Sürtünmesi

Sıvı sürtünme hali oluşmadığı durumda yüzeyler arasında bulunan yağlayıcı madde olmasına rağmen sınır sürtünmesi ortaya çıkmaktadır.

Aşınma; iki cismin arasında bağıl hareketler neticesinde malzemelerde mekanik yüzey enerji açığa çıkar, açığa çıkan bu enerji sonucunda yüzey hasarını meydana gelir. Bu hasarla, yüzeylerin ilk şekilleri değişir, parçalar arasındaki boşluklar büyüyerek arzulanan işlem istenilen şekilde yerine getirilmez. İşte bu şekilde zamanla meydana gelen malzeme kaybı “aşınma” olarak adlandırılır.

Sürtünmenin söz konusu olduğu çoğu makine parçalarında kaçınılmaz olan ve karmaşık bir sistem özelliği gösteren aşınma, uygulamada birçok tribolojik sistemlerde görülen yorulma ve korozyon gibi önlem alınmadığında çok ciddi sorunlar oluşturacak önemli bir konudur. Dolayısıyla günümüzde araştırmalar, aşınmayı azaltmak ve kontrol altına almak için çeşitli çalışmalar üzerine odaklanılmıştır. Aşınmanın azaltılması ile malzeme kaybının önüne geçilecek, boyut hassasiyetinin korunmasıyla da zaman ve enerji kayıpları telafi edilebilecek oranda önlenecektir.

Malzemede meydana gelen hasarın aşınma olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

1. Mekanik bir etkinin olması,
2. Sürtünmenin olması (izafi hareket),
3. Yavaş, fakat devamlı olması,
4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5. İstenmediği halde oluşması.

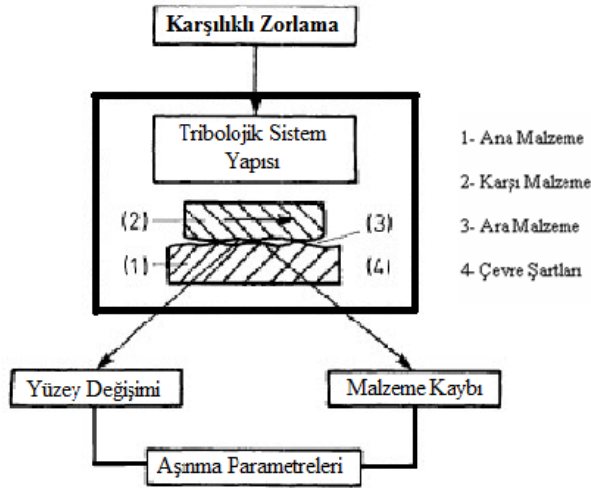
Belirlitlen bu etkilerin dışında herhangi bir sebepten dolayı hasar oluşuyor ise, yıpranma olayını aşınma olarak değerlendirmemelidir [36].

3.2. Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar

Bir aşınma sisteminde temel olarak:

1. Aşınan ana malzeme,
2. Aşındıran karşı malzeme,
3. Temas kuvveti (yük),
4. Ara malzeme,
5. İzafi hareket,
6. Çevre temel unsurları oluşturmaktadır.

Bu aşınma sistemindeki temel unsurların tümüne, “Tribolojik Sistem” denilmektedir. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. DIN 50320' e göre tribolojik sistem

1. Ana Malzeme (Aşınan): Aşınma özelliği incelenen, fiziksel ve kimyasal özellikleri belli olan cisimdir.
2. Karşı malzeme (Aşındırılan): Aşınmanın oluşumuna büyük etki eden karşı sürünme elemanıdır. Bunlar; gaz, sıvı veya katı bir cisim olabilir.
3. Temas kuvveti (yük): Sistem içinde etki eden kuvvetin büyüklüğü, doğrultusu, cinsi (dinamik, statik, darbeli ya da titreşimli) ve zamana göre değişimi temas kuvvetinin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.
4. Ara Malzeme: Aşındıran ve aşınan elemanlar arasında katı, sıvı, gaz, buhar ve ya bunların herbirinin birbirleriyle olan kombinasyonu şeklinde bulunan maddedir.

5. İzafi Hareket: Temel sürtünme elemanını, karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin büyüklüğü, cinsi ve doğrultusu ile ölçülür.
- 6- Çevre: Sistemi oluşturan ve çoğunlukla sıvı ya da gaz halinde bulunan ortam olarak tanımlanır. Hava, Su ve gazlar teknikte en çok rastlanılan çevre ortamlarındandır.

3.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Sistemde Aşınmayı etkileyen faktörler genel olarak 4 bölümden oluşur. Bu bölümler başlıca, aşağıda verilmiştir:

1- Ana malzemeye bağlı etkenler;

- a. Malzemenin sertliği,
- b. Malzemenin kristal yapısı,
- c. Yüzey pürüzlülüğü,
- d. Elastisite modülü,
- e. Malzemenin boyutu,
- f. Deformasyon davranışı,

2-Karşı malzemeye bağlı etmenler ve aşındırıcı etkisi

3- Ortam faktörü;

- a. Atmosfer,
- b. Nem,
- c. Sıcaklık,

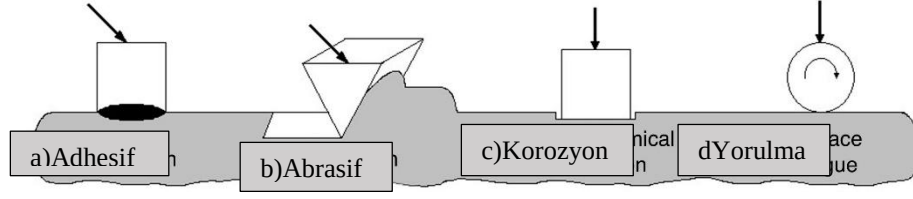
4- Servis koşulları ise;

- a. Hız
- b. Basınç
- c. Kayma yolu [37].

3.4. Aşınma Çeşitleri

Aşınma türleri 4 ana başlıkta (Şekil 3.2) ele alınır:

- 1-Abrasiv aşınma,
- 2-Adhezif aşınma,
- 3- Korozyon aşınma,
- 4- Yorulma aşınmasıdır.



Şekil 3.2. Aşınma mekanizmaları a) Adhezif aşınma b) Abrasif aşınma c) Korozyon aşınması d) Yorulma aşınması

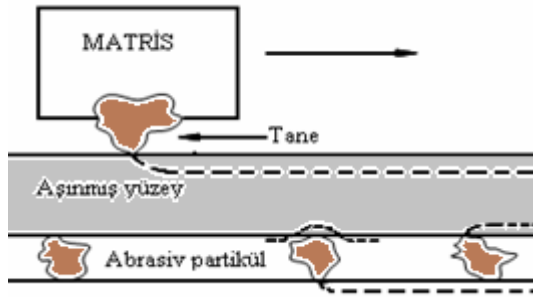
3.4.1. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma; temas eden iki yüzey arasında, temas bölgesinin eğri veya eğimli oluşu nedeniyle yüzeylerde malzeme kaybına neden olan mekanik aşınma yöntemlerinden biri olarak adlandırılır. Bu aşınma türü, diğer aşınma türleri içerisinde maliyetin yaklaşık % 60'ını oluşturmaktadır. Sözü geçen aşınma türü, sert partiküllerin katı bir yüzey boyunca hareket etmesinden oluşur [38, 39]. Metalleri şekillendirmede yaygın olarak kullanan talaşlı imalat yöntemleri, esasen abrasiv aşınma mekanizmasına dayanmaktadır. Sert parçacıklar yumuşak metale batması sonucunda abrasiv aşınmaya neden olabilir. Örnek vermek gerekirse; bir sisteme dışarıdan gelen kum, taş v.b. parçacıklar veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma olabilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutunda talaş kaldırma meydana getirebilir [40].

Bazı durumlarda, temas eden yüzeylerin birinde veya her ikisinde gömülü olan aşındırıcı parçacıklar, benzer bir durum oluşturabilir [41].

3.4.1.1. Abrasiv Aşınma Mekanizması

Abrasiv aşınma mekanizmasında malzemenin diğer malzeme tarafından abrasiv aşınmaya oluşturabilmesi için genel olarak, sürtünme sırasında aşındıran malzemenin sertliğinin aşınan malzemenin sertliğine oranla daha fazla olması gerekmektedir. Örnek olarak toprak kaldırmaya çalışan kepçe verilebilir. Şekil 3.3'de abrasiv aşınma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir [42].



Şekil 3.3. Abrasiv aşınma mekanizması [42].

3.4.1.2. Abrasiv Aşınmaya Sıcaklığın Etkisi

Aşınmaya maruz kalan malzemelerde aşınmaya; malzemenin cinsi, kimyasal içeriği, elastik modülü, sertlik, uygulanan ısıtma işlemleri, yüzey pürüzlülüğü, aşındırıcının tane boyutu, şekli ve bulunduğu ortam aşınmayı etkiler. Anlaşılacağı üzere sürtünen cisimlerde temas yüzeylerinin ısınması mekanik, sürtünme özelliklerinde ve de kimyasal yapılarında değişimlere sebep olacaktır. Bu sebeple sıcaklık-aşınma ilişkisinde, malzemelerin özellikleri ve sıcaklık arasında ilişki çerçevesi içinde incelenmesi gerekir. Her malzemenin kendine has özelliklere sahip olduğundan dolayı değişen koşullara farklı tepkiler vermesi söz konusudur. Genel olarak aşınma bölgesinde artan sıcaklık, yüzeyin sertliğini düşürdüğü, plastik deformasyonu kolaylaştırdığı ve oksidasyona yol açtığı için aşınma miktarını artırmaktadır. Şiddetli aşınmada ise artan çevre sıcaklığının aşınmaya katkısı, yüzeyin özelliğini iyileştirdiği için olumlu yönde olmaktadır.

3.4.1.3. Abrasiv Aşınmaya Nemin Etkisi

Nemin etkisi sonucu örneğin seramik malzeme olarak çok kullanım alanı olan alümina, uygulama sonucu yüzeyden tane kopması şeklinde bir aşınma davranışı göstermektedir. Bu durum, farklı yönlerdeki kristallerin termal genleşmelerinde anizotropik yönlerde farklı özellikler sergilemesinden kaynaklanır. Bu ani farklı yönlerde farklı özellikler göstermesinde özellikler tane sıraları boyunca çatlak oluşumlarına sebep olduğundan, iri taneli yapılarda daha etkili olmaktadır. İri taneli yapılarda mikro çatlaklar tane içlerine doğru ilerlerler [43]. Atmosferdeki bağıl nem oranı aşınmayı etkilemektedir. Sistemde bağıl nem oranı arttıkça sürtünme katsayısı azaltıcak ve aşınma miktarı bununla paralel azalması söz konusu olacaktır.

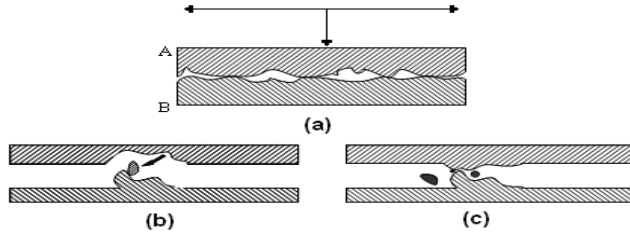
3.4.2. Adhezif Aşınma

Adhezyon genel olarak, birbirinden farklı maddeler arasında görülen ve bu maddelerin atomu ile diğer bir maddenin atomu arasında birbirlerine yapışmasını sağlayan molekülerin çekim kuvvetidir. Bir birleyle belirli bir mesafe içinde bulunan iki atom çekme kuvveti etkisi altındadır. Bu iki atom, belirli bir mesafe içine girince çekme kuvvetinin etkisiyle birbirine daha fazla yaklaşması sonucu bu sefer birbirlerine itme kuvveti oluştururlar. İtme ve çekme kuvvetlerinin dengelendiği mesafede atomlar en kararlı konumlarında bulunur.

Adhezyon oluşumu iki metal bir kuvvet etkisi altında birbirine sürtünürken, yüzeyleri oluşturan küçük tepecikler geçici olarak birbirlerine yapışarak kompaktlanırlar. Bu tepecikler iki metalin hareketlerine devam etmesiyle belirli bir süre sonunda koparlar ve küçük parçacıklar ana malzemeden uzaklaşır. Bu sisteme adhezyon oluşumu denir. Bu büyük bir ölçekte (yırtılma olarak bilinen bir işlem) meydana geldiğinde metal sıvanarak ciddi yüzey hasar oluşur. Düzgün çalışırken bir ekipman kullanıldığında bile, bu tür aşınma mikroskobik ölçekte yapışma meydana getirebilir. Yapışkanlı yıpranma olarak adlandırılan yapışkanlı aşınmanın orta şekli, yırtılmadan daha az tahrip edici olmakla birlikte yine de anormal derecede metal koparma oranına sebep olur [41].

Kuru ve sınırlı yağlanmış kaymalı yataklarında, dişlilerde, kesme takımlarında, kam mekanizmalarında, tel çekmede kalıplarda ve pistonlarda, adhesiv aşınma meydana gelmektedir. Bu aşınmada birbirine göre hareket eden iki yüzey arasında oluşmaktadır. Kayan yüzeylerde temas eden pürüzlülüklerdeki yüksek basınç sonucu adhezyona, plastik Şekil değişimine ve yerel birleşmelere sebep olur. Bu yüzeyler arasındaki rölatif kayma bu birleşmelerin kopmasına ve sıklıkla bir yüzeyden diğerine geçmesine sebep olur [44].

Adhezif aşınma da genel olarak birbiriyle temasta bulunan aynı kafes yapılı iki metalik yüzey arasında oluşur. Adhezif aşınma oluşumu için yüzeyler arasında bir pürüz, malzemenin kendi ağırlığı ya da bir dış kuvvet neticesinde moleküller birbirine çok yaklaşarak küçük temas tepecikleri oluşturur akabinde artan basınç sayesinde bu kuvveti taşımayan pürüzler plastik deformasyon oluşturur. Fakat malzemenin plastik deformasyon kabiliyeti (Şekil 3.4) yüksekse adhezyon oluşumu geniş temas yüzeyi oluşturarak aşınma meydana gelmektedir [44].

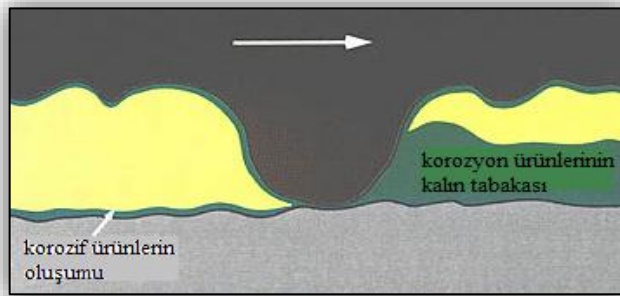


Şekil 3.4. Adheziv aşınma mekanizması a)Yüzeyde kaynaklanma b) A'dan B'ye parça transferi c) Malzemenin kopan parçaların serbest hali

3.4.3. Koroziyel Aşınma

Koroziyel aşınma, kimyasal maddelerin, katı maddelerin yüzeylerine kimyasal etkililişime girmesi sonucu kütle kaybına neden olmasıdır. Adhesive ve abrasiv aşınmayı, çevre kimyasal olaylarla birleştiren özel bir aşınma çeşididir. Koroziyel aşınma neticesinde kayıp kolay bir şekilde önlenemez [41].

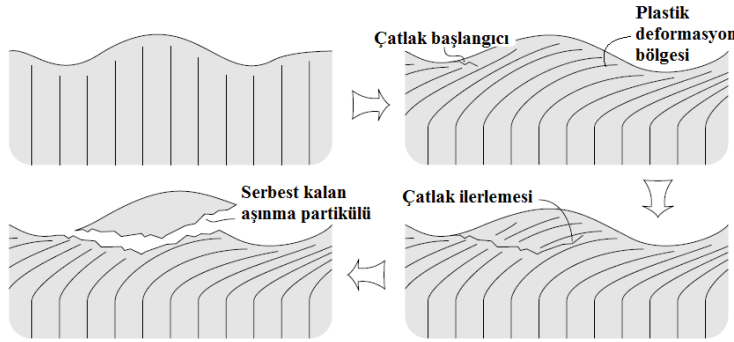
Tribolojik sistemde değışen zorlanmalar sırasında malzemelerin temas yüzeyleri arasında küçük genlikli titreşimlerin sebep olduğu bazı kimyasal reaksiyonlar (ör: oksit tabakası, vb.) meydana gelebilir. Malzemenin yüzeyinde absorbe edilmiş bazı maddelerin reaksiyonu sonunda oluşan bu oksit tabakasına tribooksidasyon olarak adlandırılır. Oluşan tribooksidasyon tabakası, sürtünme ile parçalanarak abrasiv yani yapışma etkisi göstererek aşınma hızını artırır. Koroziyel aşınma sonucu parçalanmayla aktif duruma geçen oksit parçacıkları bölgede tekrar oksitlenme meydana getirir ve olay devam eder. Tribooksidasyon aşınması olarak isimlendirilen bu aşınma türünde, matris malzemesiyle karşı malzeme arasında tribolojik zorlamalardan meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Şekil3.5'de bu olay görüntülenmektedir.



Şekil 3.5. Koroziyel aşınmanın şematik gösterimi

3.4.4. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, temel olarak tekrarlı ve değişken yüklemeler sebebiyle çatlak oluşması ve malzemeden parça kaybı olarak nitelendirilir. Yorulma aşınmasının meydana gelmesi için esas olan temas ve tekrarlarının belirli bir miktarda olması gerekir. Malzemede temas dönüşlerinin sayısı yüksek olduğunda, yüksek dönüşlü kırılma mekanizmasını düşük olduğunda ise düşük dönüşlü kırılma mekanizmasının meydana gelmesi beklenmektedir. Diğer bir deyişle yorulma aşınması bir yüzey üzerinde tekrarlanan gerilmeler sonucunda yüzey altı çatlaklarının oluşumu ve ilerlemesi ile yüzeyden parçaların uzaklaşması olarak değerlendirilir. Çatlak başlangıcı zayıf yüzeylerde oluşmaya başlar, dislokasyonlar veya kayma düzlemleri gibi zayıf düzlemler boyunca aşağıya doğru ilerler. Oluşan birincil çatlak kendisi ilerleyebildiği gibi yüzey altındaki ikinci bir çatlak ile de birleşerek büyüyebilir. Büyüyen çatlak (Şekil 3.6) tekrar yüzeye eriştiği zaman aşınma partikülü serbest kalır ve aşınma gerçekleşmiş olur [45]. Geliştirilmiş tokluk ve yüksek sertlik yorulma aşınmasına uygulanan en yaygın metalurjik çözümlerdir [46].



Şekil 3.6. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [45].

3.5. Aşınma Deneyleri

Aşınma işlemleri ana malzemeden alınan küçük bir numuneyle laboratuvar ortamında ya da hali hazır bir işletme şartlarında da gerçekleştirilebilmektedir. Aşınma işlemleri işletmelerde, bizzat aşınmaya maruz kalan elemanın üzerinde belli süre boyunca gözlem yapılmakta ya da o şartlarda kullanılabilecek benzer özelliklere sahip başka bir malzemelerin aşınması incelenebilmektedir. Aşınma işlemleri işletme koşulları göz önüne alınırsa, bu tür denemelerin tekrarlanabilirliği oldukça düşüktür. Bu sebepten dolayı

deneyler, işletme koşullarına benzerlik gösteren laboratuarlarda işlemler ele alınarak, değişkenlerin aşınmayı nasıl etkilediğinin tespitiyle, elde edilen sonuçlar uygulamaya tatbik edilir.

Makine parçaları için problem olan aşınmada birçok farklı durum ve aşınmanın birçok tipi olduğu için aşınma test metotları geliştirilmiştir. ASTM (American Society for Testing and Materials) ve ASLE (American Society of Lubrication Engineers) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Bunlardan Tablo 3.1’ de bazıları şunlardır; [47]

Tablo 3.1. Malzeme ve testler için American Society tarafından geliştirilmiş önemli bazı test metotları [47, 48].

Test kodu	Test tipi
D-4172	Yağlayıcı sıvıların aşınma önleme özelliklerinin testi
D-4170	Yağlayıcı greslerle yıpratma aşınmasının önlenmesi testi
G-32	Titreşimli kavitasyon erozyon testi
G-65	Kuru kumlu plastik tekerlekli abrasyon testi
G-73	Sıvı vuruşlu erozyon testi
G-76	Gaz jeti kullanılarak katı parçacık çarptırılmasıyla meydana getirilen erozyon testi
G-77	Yüksek dirençli malzemeler için blok-on-ring aşınma testi
G-81	Çene ezicili öğütücülerin abrasyon testi
G-99	Pin-on-disk testi
G-105	Islak kumlu plastik tekerlekli abrasyon testi
G-132	Pin abrasyon test metodu
G-133	İleri geri kaymalı aşınma testi

Aşınmanın azaltılması için gereken önlemler;

a) Aşınmanın meydana geleceği ortam koşullarını dikkate alarak malzeme seçimi gerçekleştirilmelidir.

b) Aşınmayı en az orana indirecek şekilde uygulanacak yerin koşullarına uygun geometrik tasarımı yapılarak tasarılmalıdır.

c) Aşındırıcı ortamda temas halinde bulunan yüzeyler veya malzemenin tüm yüzey alanı, ana malzemenin özelliklerinden daha mukavemetli bir malzemeyle kaplama işlemi yapılmalıdır.

d) Ana malzeme üretilirken bu aşamada meydana gelebilecek gözenekler, cüruf kalıntıları, çatlaklar, çekme işlemi sonucu meydana gelecek gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü gibi hatalardan kaçınılmalıdır.

e) Maliyet açısından külfet getiren malzeminin tamamı aşınmaya dayanıklı olarak üretilmesi yerine, aşınmaya maruz kalan yerleri daha dirençli malzemelerden üretilmesi veya kaplanması daha uygun olacaktır.

f)  retilen malzeme yüksek basınç, yüksek hız ve yüksek sıcaklık gibi dayanım limitlerini aşan değişken koşullarda kullanılmamalıdır.

g) Yağın vizkozitesi sıcaklığa göre değiştiiği için vizkozite indeksi bu koşullara uygun olan (fosfor ve kükürt katkılı) yağlar tercih edilmelidir.

h) Soğutucu ve yağlayıcılarla birlikte gelen bazı aşındırıcı partiküller kullanılırken filtreleme işlemi dikkatli yapılarak önüne geçilmelidir.

ı) Soğutucu seçimi yaparken ekstra işlem gerektirmemesi için, parçanın çalışma ortamına uygun olarak seçilmelidir.

i) Malzeme açısından sürtünme elemanları bir uyumlu olmalıdır.

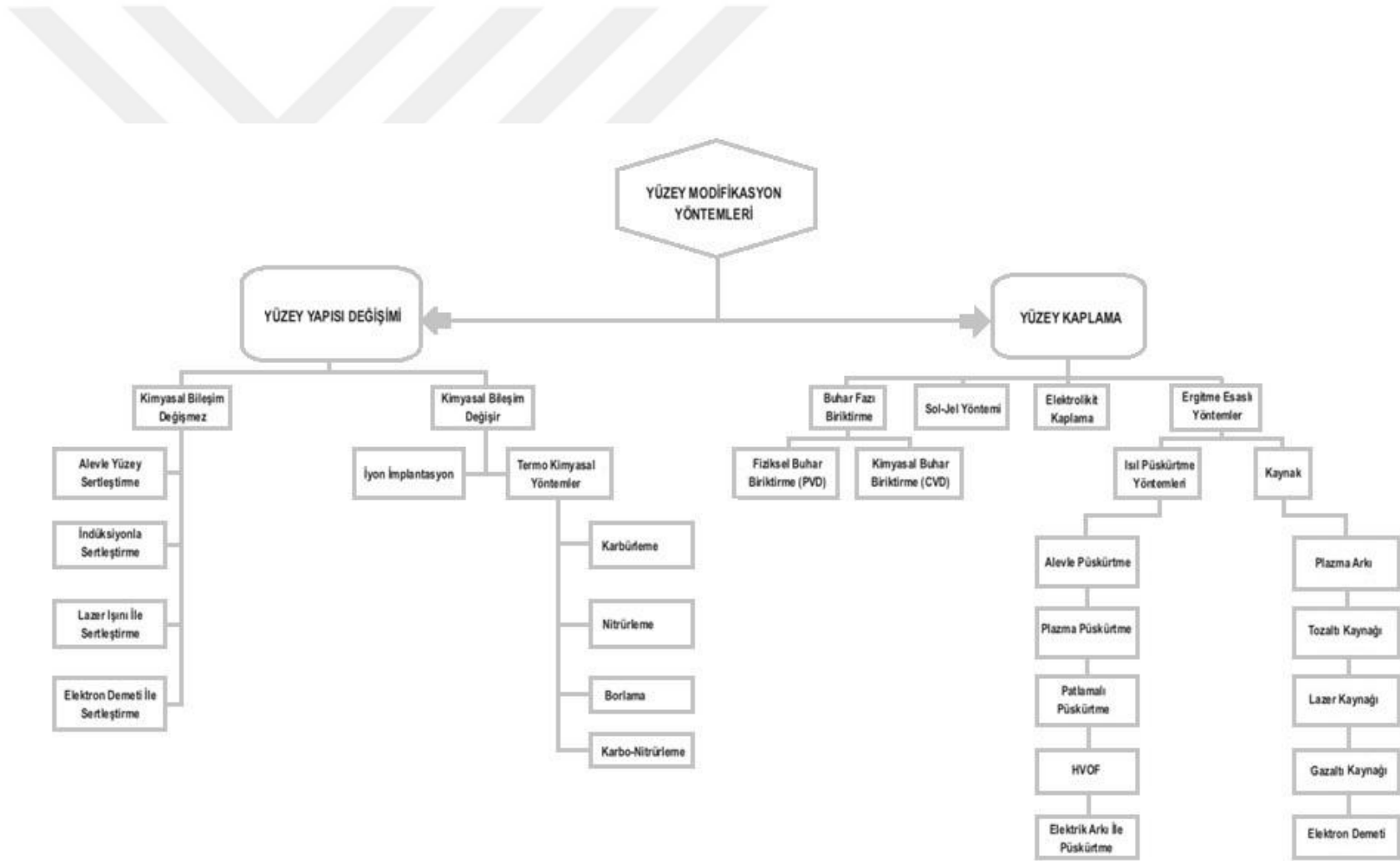
j) Yağlayıcılar düzenli olarak kontrol edilmeli ve ortamın koşulları göz önüne alarak değiştirilmelidir [49].

4. YÜZEY İŞLEMLERİ VE ALAŞIMLAMA

Aynı ya da benzer türden en az iki malzemeyi ısı ve/veya basınç ve/veya her ikisi birden kullanılmasıyla, ilave bir malzem var veya yok, yapılan birleştirmeye kaynak işlemi denilmektedir. Kaynağın gelişim sürecinde, bir yandan yeni esaslı kaynak yöntemleri ortadayken, diğer yandan da bilinen yöntemlerin geliştirilmesi ve otomatikleştirilmesi uygulanmıştır [50].

Bir metalin yüzeyleri dış ortamların zararlı etkilerinden korunması ya da ortam koşullarına göre; yorulma, sürtünme ve aşınmaları azaltmak ve ya tamamen ortamdan kaldırmak için çeşitli yüzey işlemleri uygulanması gerekmektedir [51-53].

Zorlu durumlarda çalışan endüstriyel bileşenlerin özellikleri ve daha birçok malzeme yüzey işlem morfolojisinin değişimiyle tribolojik, aşınma ve korozyon gibi özellikler değiştirilebilir [54-57]. Şekil 4.1' de yüzey modifikasyon yöntemleri verilmiştir.



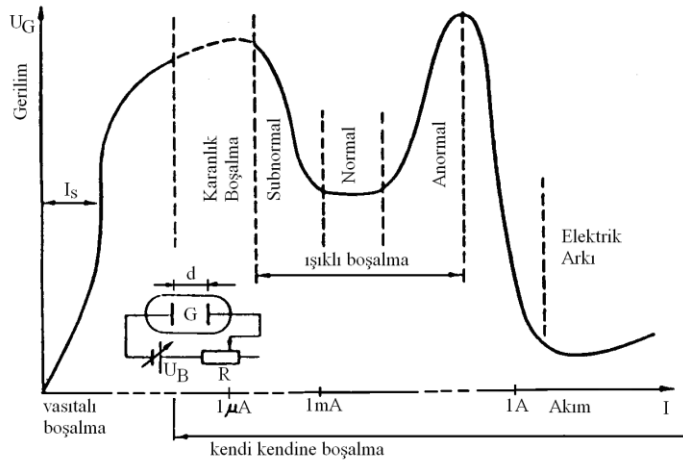
Şekil 4.1. Yüzey modifikasyon yöntemleri [37].

4.1. Ergitme Esaslı Yöntemler

Ark kaynağında, kaynak dikişine göre local döküm prosesi olan bir tür füzyon kaynağıdır. Bu döküm prosesinde kaynak yapılacak parçalar özelliğini kaybeder ve ana malzemenin erime noktasından çevre sıcaklığına kadar olan sıcaklıklara maruz kalması sonucunda kaynağın metalurjisi temel malzemeden farklı olacaktır. Bu şekilde komşu bölgelerin metalurjisi, kaynak ısısı ile değiştirilir [58].

4.1.1. Elektrik Ark Kaynağı

Bir gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve bu boşalmada bir elektrik akımı akar. Burada akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan sistemler sınıflandırılmıştır. Tüm gaz boşalma bölgeleri ve bu arada elektrik arkı boşalma bölgesi ile bu bölgelere ait karakteristikler akım ve gerilim değerlerine bağlı olarak Şekil 4.2' de görülmektedir. Eğer elektrik boşalmasında akan akımın şiddeti 10 Amperden büyük ise elde edilen sistem elektrik arkı adını alır [59].



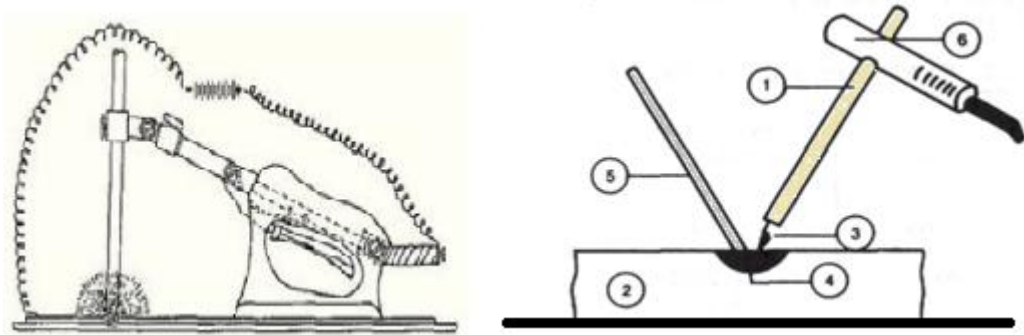
Şekil 4.2. Gaz boşalmaları tipleri ve bölgelerinin akım-gerilim karakteristikleri [59].

Kaynak metalinin özellikleri yaygın olarak, dolgu malzemesine, malzemenin türüne, ana malzemeye, kaynak yöntemi ve metodolojisine bağlıdır [60].

Isıl kaynak formları kaynaklı bağlantının oluşması gerekli ısının, elektrodlar arasında oluşturulduğu ve ark vasıtasıyla sağlandığı ergitme kaynağı türüne, elektrik ark kaynağı adı verilmektedir. Ark; kızgın bir katottan yayılan elektronların, yüksek bir hızla anodu bombardıman etmesi neticesinde oluşur. Bu bombardıman çarpma sonunda, nötr moleküllerin iyonize olmasına sebep olduğundan, kuvvetli bir sıcaklık yükselmesi meydana gelir. Ortaya çıkan toplam enerjinin % 85' i ısı ve % 15' i de ışık enerjisine dönüşmektedir [61].

Elektrik ark ilk uygulaması 1885 yılında Şekil 4.3'de gösterildiği gibi bir karbon elektrod ile iş parçası arasında ark meydana getirilmesi biçiminde olmuştur. Bernardos usulü olarak bilinen bu uygulamada, bir de ilave metal kullanılmıştır [62].

Daha sonra 1889 yılında Zereener kaynak arkını, iki karbon elektrod arasında meydana getirmiş ve arkın parçaya üflenmesini manyetik bir bobin vasıtasıyla sağlamıştır. Yine 1889 yılında Slavianoff çıplak metalik bir elektrod ile iş parçası arasında arkı teşekkül ettirerek, bugünkü ark kaynağının esasını bulmuştur. Şekil 4.3'de eriyen elektrod, kaynak ağzının doldurulmasını sağlamıştır.



Şekil 4.3. Benardos kaynak yöntemi [63-65].

1.Karbon elektrod 2. Esas metal 3. Elektrik arkı 4. Kaynak banyosu 5. Tel elektrod 6. Hamlaç.

4.1.2. Gazaltı Kaynağı

Gaz altı kaynağı, özel olarak belirlenen bir gazla korunan ve otomatik olarak kaynak havuzuna ilerleyen ve eriyen elektrot yardımıyla gerçekleşen kaynak türüdür [68]. Akım şiddeti, ark boyu ve elektrot besleme hızı kaynakçı tarafından ayarlanır. Bu ayarlar elektrot besleme ünitesi ve güç ünitesinden yapılmaktadır. Kaynak donanımı olarak ayrıca kaynak torcu, kabloları ve koruyucu gaz ünitesinden oluşur.

Gaz altı kaynak yönteminde kaynak kalitesini etkileyen etmenler;

1. Kutuplama
2. Kaynak akımı
3. Elektrot çapı
4. Ark gerilimi (ark boyu),
5. Serbest elektrot uzunluğu
6. Kaynak hızı,
7. Kaynak pozisyonu,
8. Koruyucu gazın bileşimi ve debisi gibi etmenler aynı zamanda kaynak geometrisini, kaynak metalurjik karakteristiklerini, kaynak özelliğini büyük ölçüde etkiler [66].

Bu yöntemde, kaynak kalitesini arttırmak için kaynağı etkileyen etkenler, kaynakçı tarafından doğru seçilmesi ve uygulanması gerekir. Kaynak kalitesini etkileyen etkenler en uygun değerlerle ayarlanırken elektrotun bileşimi, kaynak pozisyonu ve ana metalin cinsi göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Avantajları;

Gazaltı kaynağı örtülü elektrod ark kaynağına göre daha hızlı bir kaynak yöntemidir. Gazaltı kaynağı düşük hidrojen miktarından dolayı özellikle sertleşme özelliğine sahip çeliklerde önem arz etmektedir. Gazaltı kaynağında derin nüfuziyeti sayesinde küçük köşe kaynakları yapmaya izin verir. İnce malzemelerin kaynağına iyi sonuç verir [67].

Dezavantajları;

Gazaltı kaynak ekipmanları, örtülü elektrod ark kaynağı ekipmanlarına göre daha karmaşık, daha pahalı ve taşınması daha zordur. Gazaltı kaynak torcu iş parçasına yakın olması gerektiği için örtülü elektrod ark kaynağı gibi ulaşılması zor alanlarda kaynak yapmak kolay değildir. Sertleşme özelliği olan çeliklerde gazaltı kaynağı ile yapılan kaynak birleştirmeleri çatlamaya daha eğilimlidir. Gazaltı kaynağı, gaz korumasını kaynak bölgesinden uzaklaştırabilecek hava akımlarına karşı ek bir koruma gerektirir [67].

4.1.2.1. Oksi-Gaz Kaynağı

Oksi gaz kaynağı, ergime için gerekli olan ısıyı bir yanıcı, diğeri yakıcı (oksijen) olan gazların meydana getirdiği aynı anda alevlenme sonucu yanma olayından yararlanılarak oluşan kaynak işlemidir. Farklı metal türlerine yaygın olarak uygulanan oksi-gaz sisteminde gaz tüpleri, gaz basınç regülatörleri, hortumlar ve kaynak üfleçleri ihtiva etmektedir. Isı kontrolü, parçalar arasında geniş aralığa izin vermesi ve kaynak havuzunun açık bir şekilde

gözlenebilmesi en önemli avantajları arasında sayılabilir. Bu yöntemde yakıcı gaz seçimde alev sıcaklığının, tutuşma hızının ve ısı değeri gibi parametreler rol oynamaktadır.

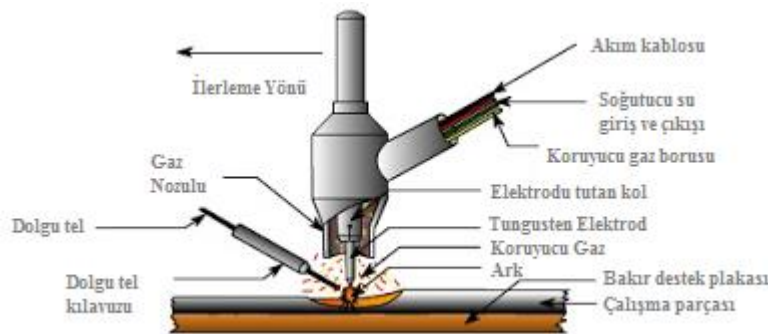
Oksi gaz kaynağında oksijenin yakıcı olarak işlevde bulunduğu yanıcı gaz olarak; Asetilen (C_2H_2), Hidrojen (H_2), Metan (CH_4), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Propan- Bütan karışımı ($C_3H_8-C_4H_{10}$), Havagazı Benzin ve Benzol buharı kullanılmaktadır [68].

Gazların türü ve kullanılan elektrota göre gaz kaynak yöntemleri TIG ve MIG/MAG olarak sınıflandırılır [69].

4.1.3. Gaz Tungsten Ark Kaynağı (TIG)

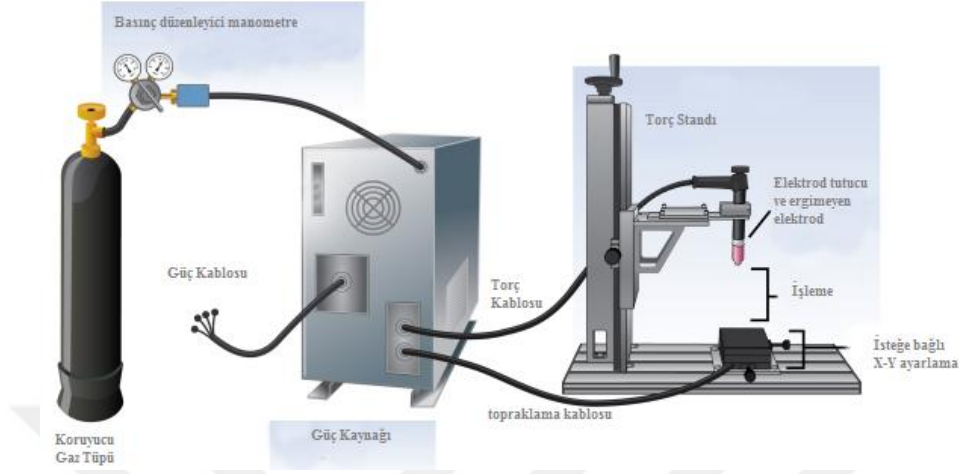
Bu prosede, metallerin karışımı, sarf malzemesi olmayan bir elektrot kullanılır. Kaynak arkı, erimeyen tungsten elektrot ile iş parçası arasında meydana gelir [70].

Tungsten Inert Gas kelimelerinin ilk harflerinden oluşmuştur. TIG kaynağı 1940-1944 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde bilhassa magnezyum, alüminyum ve diğer hafif metal alaşımlarının kaynağı için geliştirilmiş ve koruyucu gaz olarak soy bir gaz olan helyum gazından yararlanılmıştır. Bu yönteminde kullanılan elektrotlar saf tungsten veya zirkonyum ve toryum ile alaşımlandırılmış elektrotlardır. Helyumu gazı ilk etapta kullanılmıştır fakat; havadan hafif ve uçucu olması sebebiyle daha sonra argon gazı kullanılmaya başlanmıştır. Havadan daha ağır olması ve kaynak bölgesini korumada daha etkili olduğu için tercih edilmektedir [71]. Helyum gazının Özgül ağırlığı $0,179 \text{ kg/m}^3$ 'tür, havadan yaklaşık 7 kat daha hafiftir. Şekil 4.4'de TIG donanımı verilmiştir. Doğal gazdan elde edilir. Argon gazının özgül ağırlığı $1,784 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Asal gazdır. Kimyasal bakımdan nötr gazdır. Havadan ayırıştırma ile elde edilir. Her iki gazda, tek atomlu ve soygazdır. Bundan dolayı diğer elementlerle birleşmezler, renksiz ve kokusuzdurlar, yanmazlar [72].



Şekil 4.4. TIG kaynağı prosesi örnek uygulaması şeması [73].

TIG kaynak donanımı Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, kaynak makinesi, torç ve kablosu, gaz ve basınç düzenleyiciler, gaz kablosu, pensesi ve soğutma grubundan oluşmaktadır.



Şekil 4.5. TIG kaynak donanımı prensip şeması [74].

TIG kaynak yönteminde, doğru akım ve alternatif akımın ikisi de kullanılır. TIG kaynağının ısıl distorsiyonlarının az olması, ITAB’ın darlığı ve nispeten temiz bir kaynak özelliğinin dışında elektrodun dikişe karışma, yetersiz koruyucu gaz atmosferi oluşumu ve gözenek oluşumu gibi durumlar olabilir [75].

TIG kaynak avantajları;

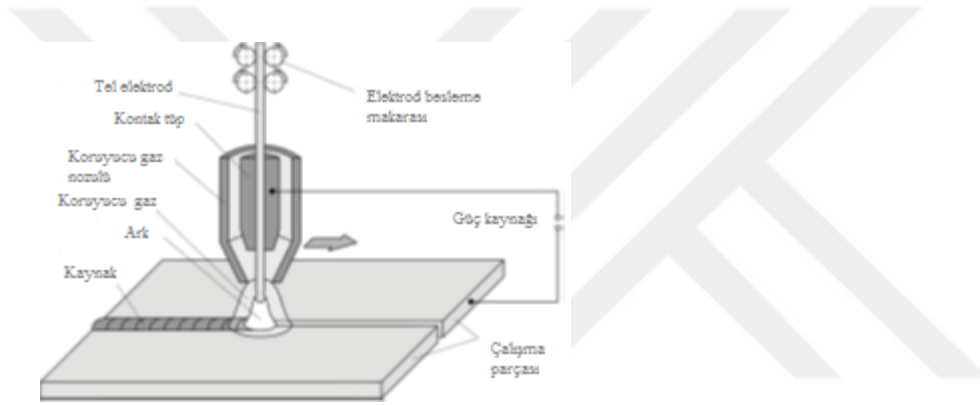
TIG kaynağı, sürekli, aralıklı ya da punto kaynakçı yapma imkânı sunar. Hem elle, hem de otomatik kaynak işlemleri için uygundur. Elektrod tükenmediği için ana metalin ergitilmesiyle veya ilave bir kaynak metali kullanarak kaynak yapılır. Her pozisyonda kaynak yapılabilir ve özellikle ince malzemelerin kaynağına çok uygundur. Isı girdisi kaynak bölgesine yoğunlaştığı için iş parçasında deformasyon düşük olur. Kaynak dikişini temizlemeye gerek yoktur.

Dezavantajları;

TIG kaynağının metal yığıma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür. Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir. Koruyucu gaz kontrolü gerekir.

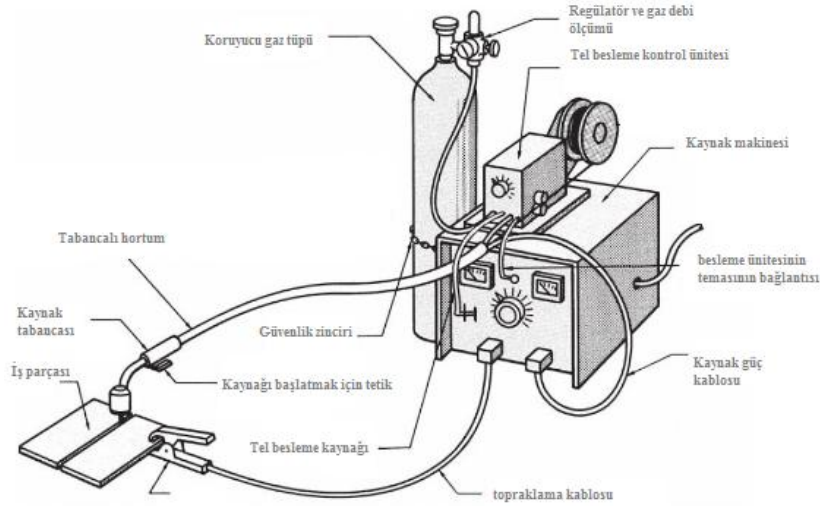
4.1.4. Gaz Metal Ark Kaynağı

MIG (Metal Inert Gas) kaynağı ilk olarak 1948 yılında, Linde Air Products Company firması tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunarak, alüminyum ve alaşımlarıyla başlayıp, kır dökme demir ve daha sonra yüksek alaşımlı çeliklerde uygulanmıştır. MIG kaynağında ısı oluşumu, torçda ki tetiğe basılması akabinde tel ünitesinden otomatik olarak gönderilen bir tel ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde meydana gelir. Kaynakta ark bölgesinin korunması için torç içerisinde telin etrafından kaynak bölgesine gaz ünitesinden gönderilen koruyucu bir gaz tarafından (Şekil 4.6) sağlanır [76].



Şekil 4.6. Gaz metal ark kaynağı prosesi şeması [77].

MIG kaynak yönteminde ark, helyum ve argon gibi asal bir gazın koruması altında yanar. MIG kaynağı için GMAW (Gas Metal Arc Welding) ifadesi de kullanılmakta ve ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağı tanımını da içersinde barındırmaktadır. Ergiyen elektrod ile gazaltı kaynak uygulamalarından bir diğeri ise CO₂ aktif gazının koruyucu gaz olarak kullanıldığı ve ismini “Metal Active Gas” kelimelerinin baş harflerinden alan MAG kaynak yöntemidir. MAG kaynak donanımı aşağıdaki Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. MIG-MAG kaynak donanımı şeması [78].

MIG/MAG kaynak yöntemlerinin en önemli üstünlükleri; kaynak bölgesine sürekli olarak koruyucu bir gazın ve tel elektrodun beslenmesi ile kaynağın dolgu oranının yüksek olmasıdır [79].

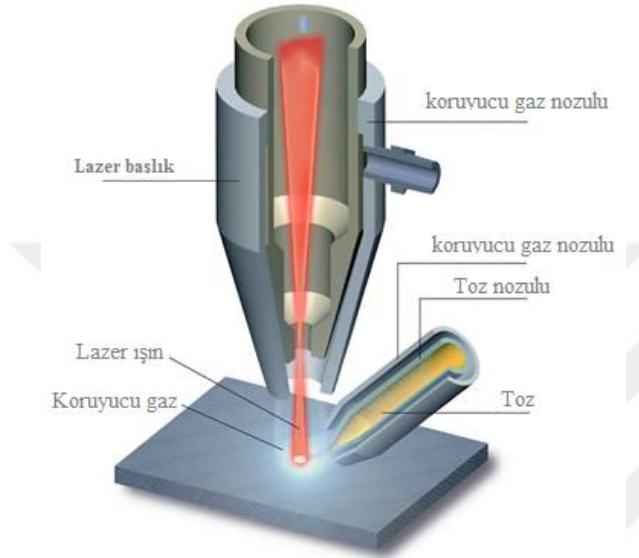
4.1.5. Lazer Işın Kaynağı

Lazer ışını kaynak işlemi ile ilk kez yayın kombinasyonu 1970'lerin sonunda yayınlandı. [80]. Enerji kaynaklarından biri olarak lazer içeren kaynak işlemleri yüksek gelişim aşamasındadır [81, 82].

Bir ergitme kaynağı olarak lazer ışını ile kaynak, yüksek yoğunluklu bir enerji üreten elektromanyetik ışınlama ve mikro kaynak tekniğidir. Lazer ışın kaynağı gelişmiş yüksek sıcaklık malzemelerinin birleştirilmesinde kullanılan kaynak tekniklerinin en çekici ve gelecek vaat edenlerinden birisi olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.8). Geleneksel kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında, kalın metalik parçaların çok düşük ısı girişi ile birleştirilmesini sağlamaktadır [83, 84].

Malzemenin yüzeyine çarpan ışının oluşturduğu kinetik enerjiyle ısı, sonucunda kaynak banyosu meydana gelir. Lazer ışın kaynağı max. 10 mm kalığı kadar kullanılmasının yanında ancak 6 mm'ye kadar kullanım imkânı vardır. Çünkü bu kalınlığın üzerinde kaynak banyosunda stabiliteyi sağlamak için hareket hızı 1 m/dak.'nın altına düşürülmeye çalışılır. Stabiliteyi sağlamanın zorluğu ikinci bir paso işlemiyle giderilebilir [85].

1960’larda lazerin önemi fark edildikten sonra, malzeme işlemleri için lazer uygulamaları sürekli olarak artış göstermektedir. Birçok lazer uygulaması arasında, lazer ışın kaynağı (LBW) yüksek güçlü lazer sistemi olarak havacılık, otomotiv, askeri ve güç santralleri gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. Çünkü eşsiz özelliklere sahiptir: süratli kaynak hızı, düşük ısı girişi, düşük distorsiyon, dar birleşme bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge [83, 86].



Şekil 4.8. Lazer ışını kaynağı prosesi [87].

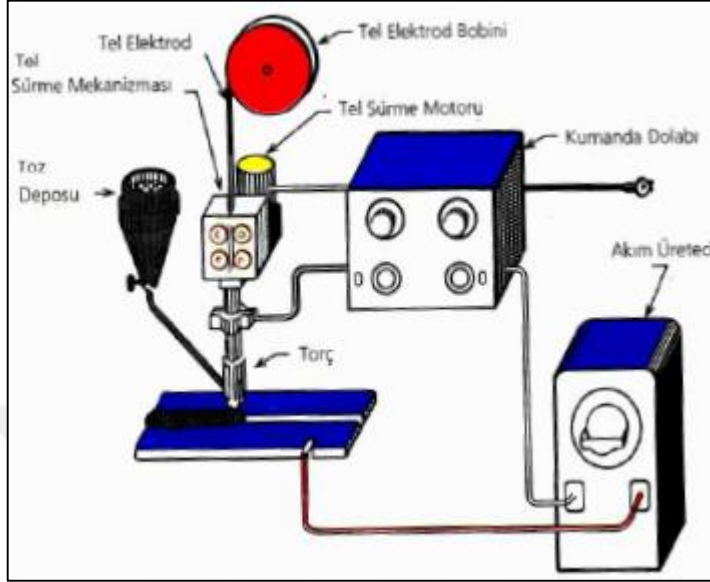
Lazer kaynak yöntemiyle hızlı ve sağlam kaynaklı birleştirmeler elde edilmesi nedeniyle endüstride kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [88-90].

Lazer kaynağında iyi kaynak hızı, metalale giren düşük enerji girdisi, ısı etkilenen bölgenin dar olması başlıca avantaj olmasına rağmen yaygın kusurları olarak gözeneklilik ve sıçramadır. Bununla birlikte küçük giriş çapları, yanlış giriş konumlandırma, kaynaşma, içbükey kök yüzeyleri ve yıpranmış kaynaklara neden olabilir. Yüksek soğutma oranları, yetersiz gazın giderilmesiyle çok derin kaynaklarda gözenek oluşumuna da neden olabilir [91].

4.1.6. Tozaltı Kaynağı

Toz altı kaynak yöntemi ilk defa 1933 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde uygulanmaya başlamıştır. Yöntem daha sonraları 1937 yılında Avrupa’da kullanılmaya başlamış ve bugünkü şeklini ise 1946 yılında Rusya’da almıştır [92]. Sürekli ilave edilen ergiyen bir elektrot ile kaynaklanmak istenen parça arasında meydana gelen ark ile kaynak

ısının olduğu kaynak yöntemidir. Kaynak, kaynaklanacak bölgeye dökülen toz yığınının altında gerçekleştirilir (Şekil 4.9). Bu sebepten bu usul, tozaltı ark kaynağı olarak adlandırılmıştır [93-95].



Şekil 4.9. Tozaltı kaynağının prensibi [96].

Tozaltı Kaynak donanımı şu ünitelerden meydana gelmiştir.

- Sabit gerilim tipi kaynak makinesi
- Tel sürme makinesi
- Çıplak elektrot kangalı
- Kaynak tozu hunisi
- Tel sürme motoru, elektrot kangalı ve toz deposunu üzerinde taşıyan araba bulunmaktadır [92].

Tozaltı kaynağının avantajları;

a. Yüksek kaynak gücü ve kaynak hızı:

Bu teknikte kullanılan akım şiddeti yaklaşık 200-2000 Amper(A) arasında değişmektedir. Çok telli tekniklerde bu değer 3000 A kadar yükselebilmektedir. Kaynak hızı olarak 6-300 m/sa arasında değişerek kullanılabilir.

b. Yüksek nüfuziyet:

Tozaltı kaynak yönteminde kaynak akım şiddetinin yüksek olması kaynak işlemine kaynak ağzı açmadan bir paso ile 18. mm. yapılabilirken kaynak ağzı açarak da iki paso ile 150 mm. kalınlığındaki kaynak parçaları üzerinde uygulanabilmektedir.

c. Enerji tasarrufu:

Bu yöntemde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı kaynak için kullanılmakta ve dolayısıyla büyük bir enerji tasarrufu elde etmiş olunur.

d. Elektrot tasarrufu:

Tozaltı kaynak yönteminde sıçrama kaybı ve tel elektrot kullanıldığından elektrot kaybı yoktur.

e. Emniyetli ve düzgün görünüşlü kaynak dikişi:

Kaynak yönteminin adındanda anlaşıldığı üzere toz altında meydana gelmesi, kaynak havuzunun atmosferin zararlı etkilerinden uzak, dikişin düzgün ve kenarlarında yanma oluklarının oluşmasından uzaktır. Kaynak metalinde birleşme hatasına ve cüruf kalıntıları bulunmaması ekstra avantajdır.

f. Kaynak dikişi kalitesine kaynakçı faktör tesir etmemektedir:

Bu yöntem otomatik bir şekilde gerçekleştirildiğinden dolayı kaynakçı bedenen daha az yorulur ve oluşabilecek kaynak hatalarının önüne geçilir.

g. Yüksek ark stabilitesi:

Toz altı kaynağı yapılırken ark bölgesi çok iyi bir şekilde muhafaza edildiğinden yüksek akım şiddeti ve kaynak hızı imkanı sunmaktadır.

h. Özel koruyucu donanımlara ihtiyaç yoktur:

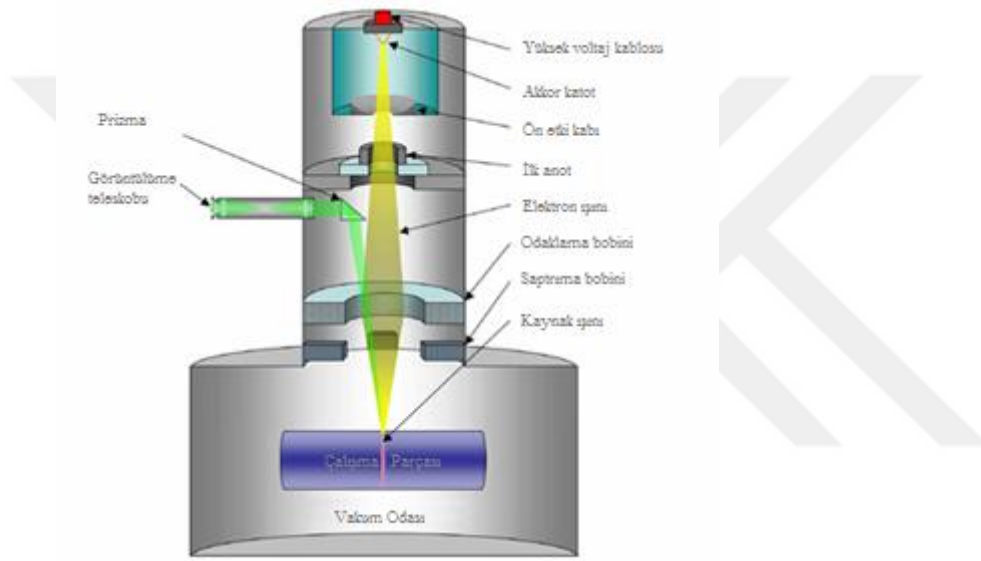
Gözleri etkileyen ultraviyole ve diğer ışınlar toz altında muhafaza edildiğinden gözleri korumak için özel maskeye ihtiyaç yoktur. Aynı zamanda kaynak esnasında toz, duman çok az olduğundan özel havalandırma sistemlerine gerek yoktur.

Tozaltı Kaynak Usulünün Dezavantajları:

Toz altı kaynak makinesi ve teçhizatları pahalıdır. Toz altı kaynak tozları havadan nem almaya eğilimlidir bu da kaynakta gözeneğe neden olur. Genelde kalın parçalar için kullanılmaktadır. 5 mm altındaki kalınlıktaki malzemeler için uygun değildir. Karışık şekilli dikişler için kullanılabilse de tam verimli olarak çalışılamamaktadır. Curuf kaynak dikişi üzerinden temizleme gereği duyulduğundan bazı uygulamalar için zordur. Çok pasolu yöntemlerde bu temizlik işlemi sıkıntı oluşturmaktadır. Kısa boylu dikişlerde zorlanılmasının yanında dik pozisyon için ekstra donanım gereklidir. Ekstra donanım maliyet artırmasıyla birlikte tavan kaynağı ve düşey pozisyonlar için elverişsizdir. Her metal ve alaşım için uygulanabilen bir yöntem değildir [97].

4.1.7. Elektron ışını ile kaynak

Elektron ışın kaynağı, malzemenin ergitilmesi için yüksek enerji yoğunluğuna sahip elektron ışının malzemeye çarpması sonucu (Şekil 4.10) meydana gelir. Elektron ışın kaynağı, yüksek nüfuziyetle birlikte ısıнын tesiri altında kalan alanın darlığı ve dolayısıyla düşük distorsiyonla etkili bir ergitme yöntemidir. Fakat bunun yanında, yüksek donanım maliyetiyle birlikte teçhizatın alımı negatif bir etkindir. Ayrıca yüksek ani hızda yüksek soğutma sonucu meydana gelen martenzitik yapıların oluşması ekstra bir dezavantajdır [98].



Şekil 4.10. Elektron ışın kaynağı prosesi [99].

Elektron ışın kaynağı 100 mm'den kalın parçaların kaynatılmasını mümkün kılmıştır. Elektron ışın kaynağı aynı zamanda elektron bombardımanı olarak da bilinir. Elektron ışını ile kaynakta kaynak ısısı, elektron ışınlarının varlığından sağlanmaktadır. Bu yöntemde oluşan ısıнын veya gücün kapasitesi diğer alışagelmiş kaynak usullerinden yüksektir. Elektron ışınlarının güç yoğunluğu (108 W/cm^2) diğer alışagelmiş kaynak yöntemlerinden daha yüksektir. Sahip olduğu bu güç yoğunluğu ile tabancadan 1 m uzaklıklara kadar çalışma imkânı tanır [71].

4.1.8. Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi

4.1.8.1. Plazma

Maddenin katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere 4 hali vardır. Bu haller arasındaki asıl fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin konumunun değiştirilmesi, verilecek enerji ile ilgilidir. Örneğin katı haldeki bir maddeye, enerji vererek sıvı, sıvı hale enerji vererek gaz ve gaz durumundaki maddeye de belirli bir enerji vererek plazma haline geçirmek mümkündür. Bu işlemin terside yapılarak yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçirmek mümkündür [100].

Plazmadaki parçacıkların (elektron, iyon, atom) miktarı Eggert-Saha denklemi yardımı ile hesaplanabilir [101].

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = \frac{2 Z_i}{Z_a} \cdot \frac{(2 \pi m_e T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot \exp \left[-\frac{E}{kT} \right] \quad (4.1)$$

n_e, n_i, n_a : Elektron, iyon ve Atomların cm^3 deki adedi.

Z_i, Z_a : İyon ve Atomların durum toplamı

T : Plazma sıcaklığı

m_e : Elektronun kütlesi

k : Boltzmann sabiti

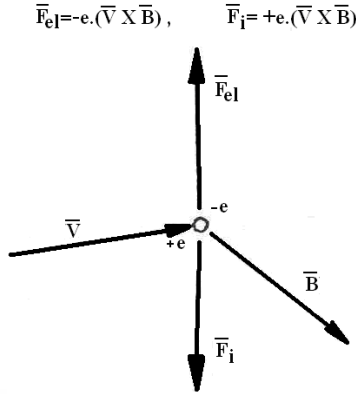
h : Planck Sabiti

E : Atomun iyonizasyon enerjisi [101].

Plazmanın kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Bunlar:

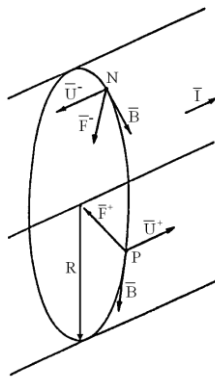
1) Plazmaya iki şekilde etki edebilir bunlar; elektrik ve manyetik alandır. Elektrik ve manyetik alan içerisindeki bir yüklü parçacığa etkiyen kuvvet, $\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{V} \times \vec{B})$ olarak verilir. Burada $q \cdot \vec{E}$ elektrik alanının yüklü parçacığa etki ettirdiği kuvvet olup, bu kuvvet, yüklü parçacıkları anod-katod arasında hareket ettiren, ark akımını oluşturan kuvvettir ve kaynak arkının stabilitesine büyük bir etkisi yoktur. Bu nedenle bunu ihmal edeceğiz. $q \cdot (\vec{V} \times \vec{B})$ ise, $\vec{B}$ indüksiyonuna sahip bir manyetik alan içerisindeki $\vec{V}$ hızına sahip bir q yüküne etkiyen kuvvet olup, bu, Lorentz kuvveti olarak bilinir. Lorentz Kuvveti, daima hız yönüne diktir. Bu nedenle elektrik alanının aksine magnetik alan yüklü parçacığın enerjisine etki etmez. Sadece yüklü parçacığın hızının yönünü değiştirir. Hızın büyüklüğüne bir etkisi olmaz. Şekil 4.11’de negatif yüke sahip bir parçacık (elektron) ve pozitif yüke sahip bir

parçacık (iyon) üzerine etkiyen Lorentz kuvvetleri $\vec{F}_{el} = -e.(\vec{V} \times \vec{B})$ ve $\vec{F}_i = + e.(\vec{V} \times \vec{B})$ görülmektedir.



Şekil 4.11. Magnetik alan içerisinde hareketli bir elektrona ve iyonla etkiyen Lorentz kuvveti

Magnetik alanın iyonla (+e yüküne) etki ettirdiği Lorentz kuvveti ($\vec{F}_i$), elektrona etki ettirdiği kuvvetin ($\vec{F}_{el}$) ters yönündedir. Şekil 4.12’de plazma çevresindeki (içinde de olabilir) bir elektron (negatif yük=N) ve bir iyonla (pozitif yük=P) plazmanın kendi elektrik akımından dolayı oluşan magnetik alanın etki ettirdiği kuvvetler görülmekte olup, bu kuvvetler plazmanın merkezine doğrudur. Dolayısıyla bu kuvvetler plazmayı magnetik olarak dıştan içe doğru çepeçevre sıkıştırırlar ve plazmanın stabilitesini (sürekliliğini) arttıırırlar.



Şekil 4.12. Plazmanın kendi magnetik alanının plazma içindeki bir elektrona (N : negatif yük) ve bir iyonla (P :pozitif yük) etki ettirdiği Lorentz kuvveti ve bu sayede oluşan plazmanın kendi kendini sıkıştırması

Elektrik alanı ve magnetik alan elektrik yüklü parçacıklara kuvvet etki ettirmektedir. Plazma da elektrik yüklü parçacıklardan oluştuğuna göre, plazmayı oluşturan yüklü parçacıklara etki etmek plazmanın kendisine etki etmek demektir. Bu nedenle plazmaya dışardan (yabancı) elektrik ve magnetik alan etki ettirilerek, plazma istenilen şekle sokulabilir. Zira elektrik alanı ve magnetik alan kuvvetlerinin yönünü ve büyüklüğünü elektrik alanının oluşturulduğu kondansatör ve magnetik alanın oluşturulduğu bobinlerle ayarlamak mümkündür.

2) Plazma, yüksek sıcaklığa sahip olup, sıcaklığı eksenden radyal yönde dışa doğru hızla azalır. Plazma içindeki yüklü parçacıklardan (elektron ve iyonlar) her biri, bir enerjiciktir. Bu yüklü parçacıkların plazma içindeki yoğunluğu yüksek olduğu için, bunların oluşturduğu enerji yoğunluğu ve sıcaklık da yüksektir. Plazmada enerji transferi yapan yüklü parçacıklar anod-katod doğrultusunda hareket ettikleri için bu doğrultuda ısı transferi yaparlar, bunların radyal yönde bir hareketi olmadığından plazmada radyal yönde bir enerji (ısı enerjisi) transferi de olmaz, dolayısıyla plazmada radyal yönde (içten dışa doğru) sıcaklık gradyenti (sıcaklık düşümü) yüksektir.

3) Plazma, iyi bir elektrik ve ısı iletkenidir. İletkenlerde elektrik ve ısıyı, yüklü parçacıklar iletmektedir. Katı iletkenlerde elektriği küçük kuvvetle de olsa atom çekirdeğine bağlı, atomun en dışındaki valans elektronları iletir. Plazma, plazma içinde serbest halde bulunan yüklü parçacıklardan oluşmaktadır. Dolayısıyla ısı ve elektriği normal katı iletkenlerden daha da iyi iletir.

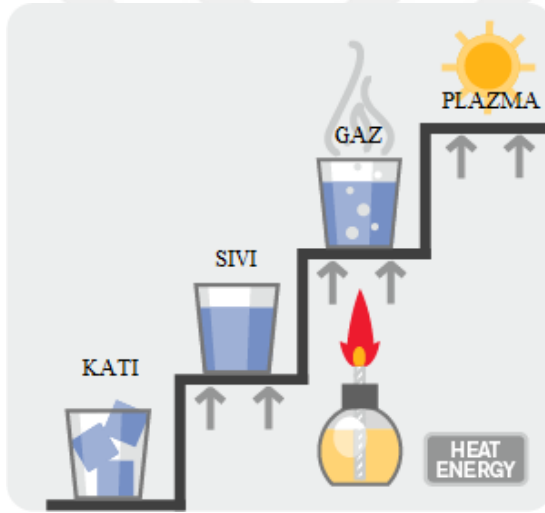
4) Plazma, dış ortama karşı elektriki olarak nötrdür. Plazmanın orijini (kaynağı, başlangıcı) nötr atom ve moleküllerdir. Bu nötr partiküllerde pozitif ve negatif yük adedi eşit olduğundan bunlardan oluşan plazmada da pozitif ve negatif yük sayısı eşittir. Yani plazma içerisindeki negatif ve pozitif yüklerin sayısı eşittir.

5) Plazma, magnetik ve termik olarak dışardan içeri doğru sıkıştırılıp, plazmanın enerji yoğunluğu ve sıcaklığı sınırsız olarak arttırılabilir. Plazma dışardan çepeçevre her yönden eşit şekilde soğutulurken, plazmanın dış kısmı gaz konumuna geçirilebilir. Dolayısıyla termik olarak sıkıştırılıp, kesiti küçültülebilir. Ayrıca plazmaya dıştan içe doğru çepeçevre her yönden eşit şekilde Lorentz kuvveti etki ettirilerek, plazmayı oluşturan yüklü parçacıklar plazma içine itilerek, plazma kesiti magnetik olarak küçültülebilir. Plazma kesiti küçülürse, plazmadaki yüklü parçacık yoğunluğu, enerji yoğunluğu ve sıcaklığı, dolayısıyla stabilitesi (sürekliliği) artar. Plazma dışardan çepeçevre ne kadar şiddetli soğutulursa veya dışardan magnetik alanla çepeçevre ne kadar şiddetli magnetik alan etki ettirilirse, plazmanın kesiti o

kadar fazla küçülür, enerji yoğunluğu ve sıcaklığı o kadar fazla artar. Bunun bir sınırı yoktur [101].

Her madde gaz fazında bulunduğunda yeteri kadar ısıtılınca, moleküllerindeki hareketlenme nedeni ile atomlar dış kabuk elektronlarını yitirerek pozitif yüklü iyonlara dönüşürler. Sıcaklık yükseldikçe, iyonlaşma derecesi artar, sıcaklık birkaç 10000 °C gibi bir değerden sonra, ortamda yalnız pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlardan oluşmuş bir karışım bulunur. Elektriksel açıdan nötr yüklü parçacıklardan meydana gelmesi nedeniyle iletken olan bu karışıma plazma denir [102].

Plazmanın tanımını olarak maddenin ilk üç halinin dışında bulunan ve maddenin sıcaklık ölçeğinde oluşumlar; Güneş (Şekil 4.13), yıldızlar, kozmik ışınlar, yıldırım ve elektrik boşalmalarında bu hal söz konusu olmaktadır.



Şekil 4.13. Maddenin dördüncü hali plazma [103].

4.1.8.1.1. Plazma Arkının Tarihi Gelişimi

20. yüzyılın başlarında, varlığı görülebilen ancak el ile tutulamayan gaz biçimindeki oluşumlara eski Yunanca bir kelime olan “**plazma**” adı verilmistir. Plazma’nın anlamı “var olan” veya “oluşturulan”dır [104, 105].

Bu konudaki çalışmalar, 1909 yılında Schonherr’in bir gazın dönel hareketinin basıncından yararlanarak arkı dengeleyen bir cihazı geliştirmesiyle başlar. Bu sistemde, içinde ark oluşturulmuş bir tüpe teğetsel bir doğrultuda bir gaz üflenmektedir, bu gazın hareketinin oluşturduğu merkezkaç kuvveti nedeni ile eksenel doğrultuda düşük bir basınç

yaratılarak, tüpün ekseninde bulunan ark dengelenmiş ve bu sistem sayesinde birkaç metre uzunluklara varan ark oluşturabilmek olanağı doğmuştur. Schonherr'' in geliştirdiği bu cihaz, ark üzerine yapılan çalışmalara öncülük etmiştir.

Plazmanın bir ısı kaynağı gibi kullanımının ortaya çıkması, 1911'' de Mathers' in patenti ile olmuştur. Su girdabı tarafından ark kolunun dengelenmesiyle elektrik ark kaynağı Gerdien ve Lotz tarafından incelenmiştir [106-108].

Ark sıcaklığının daha da yükseltilmesi amacına yönelik araştırmalar sonucunda, 1922 yılında Gerdien ve Lotz, su yardımı ile arkı dengeleyen bir cihaz geliştirmişlerdir. Bu cihazda tüpün i  cidarında teğetsel olarak hareket eden su, bir uçtan enjekte edilmekte ve diğer uçtan dışarı atılmaktadır. Tüpün içinde iki karbon elektrod arasında oluşturulan ark bu su ile soğutularak b z ld ğ nden Schonherr'' in cihazına nazaran daha yüksek bir akım yoğunluğuna ve sıcaklığına ulaşılmıştır. Bu cihaz içinde, arkın tüple bir teması bulunmamakta ve t p cidarı ile ark arasında, bir su zarfı bulunmaktadır. Bu olay, arkın su ile soğutularak büzülmesi prensibinin temelini oluşturmuştur. Bu cihaz yardımı ile Gerdien ve Lotz, 30.000 A/cm^2 lik bir akım yoğunluğuna erişebilmişlerdir [109].

1928 yılında Amerikalı fizikci Langmuir, bir ark boşalmasının göz alıcı parlaklıktaki gaz sutununu “**plazma**” olarak adlandırmıştır [104-109].

Daha sonra bu konu üzerine  alışan Burnhorn, Meacker ve Peters aynı prensipten hareket ederek ark eksenin de 50.000 K '' lik bir sıcaklık oluşturmuşlardır. Ancak; Gerdien ve Lotz'' un yönteminin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar sırasında araştırıcılar, gaz memesi ve tungsten elektrod arasındaki aralığın daraltılması sonucunda soy gazın hızının artmasının ark sıcaklığını yükselttiğini fark ettiler. Bu yüksek sıcaklıktaki arkın ısıttığı hızlı soy gaz akımının, parça üzerine doğru yönlendirildiğinde metali keştiği görüldü.

Plazmanın yüzey işlemleri ortamında kullanılması konusunda yöntemin temelleri bu süre içerisinde Bernhard Berghaus [110,111] tarafından kazandırılmıştır.

1953'de Dr. Robert Gage, refrakter malzemelerin ark yardımıyla eritilmesi üzerine yaptığı çalışmalarda, normal bir gaz alevi ile uzun bir elektrik arkı arasındaki benzerliğe dikkatleri çekti. Arkın hız ve ısı yoğunluğunun kontrolü üzerine yapılan bu çalışmalar, ilk modern plazma ark torcunun gelişmesine olanak sağladı. İlk endüstriyel plazma arkı ile kesme torcu, 1957 yılında Linde tarafından tanıtıldı. Aynı yıl Dr. Robert Gage (Union Carbide), yöntemin patentini aldı [112].

Bu cihaz prensip olarak, bir TIG kaynak torcunu andırmaktaydı; buradaki fark, elektrod torcun memesinden daha geride bulunmakta ve ark nozuldaki çok küçük çaptaki

delikten geçerken büzülmekteydi. TIG kaynağı için kullanılan alışılmış tesisata, arkın başlatılmasını sağlayacak bir pilot ark devresi ile bir plazma gazı donanımı eklenmişti. Bu tür kesme torcu 1970' lere kadar patenti nedeni ile Dr. Gage' nin tekelinde kaldı. Dr. Gage' nin buluşunu takip eden yıllarda plazma arkının yüzey işleme ve kaynakta kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yapılırken (1961-1963) kesilen kenarların kalitesinin geliştirilmesi, torç kullanım ömrünün uzatılması, kesme hızının yükseltilmesi konusunda yoğun araştırmalar yapıldı. 1960' lı yılların ortalarında Titan III-C roketi imali, doğru kutuplama plazma ark kaynağının A.B.D.' de en önemli uygulamalarından biri olmuştur. Önceleri TIG ile kaynatılmış olan kısımlarda, Linde plazma cihazları kullanılarak kaynak süresi yarı yarıya azaltılmıştır. 1962' de Thermal Dynamics Corp., James Browning' in patenti altında geliştirdiği çift gazlı ve ters kutuplamalı plazma ark yöntemini alüminyumun kaynağına uyguladı. Kaynak bölgesini koruma görevini yapan bu ikinci gaz, aynı zamanda plazma nozulunun soğutulma görevini de üstlenmişti. Bunun yanı sıra, dip kısmı olmayan bir fincan biçimindeki koruyucu gaz nozulu, plazma nozulunu çevreleyerek bunun iş parçası ile kısa devre yaparak ikincil ark oluşturma tehlikesini de ortadan kaldırdı. Bu buluş, kesilen yüzeylerin kalitesinin ve kesme hızının yükselmesine olanak sağladı. Sciaky, 1967' de değişken kutuplamalı kare dalgalı TIG kaynak akım üreteçlerini piyasaya sundu. Bu iki olay, plazma yöntemlerinin gelişmesine büyük katkılarda bulundu. 1960' ların sonuna doğru Boeing, bu iki önemli buluşu, değişken kutuplamalı akım üretecini plazma anahtar deliği tekniği ile birleştirerek değişken kutuplamalı plazma ark kaynak yöntemini geliştirdi. Koruyucu gazın plazma nozulunu soğutarak kesme kalitesini ve kullanım ömrünü artırması araştırmacıları plazma nozulunun daha iyi soğutulması için koruyucu gaz yerine suyun kullanılabilirliği konusunda çalışmalara yönlendirdi. 1968 yılında Hypertherm firmasından Richard Couch, su enjeksiyon sistemli bir plazma kesme torcunun patentini aldı. Burada, su torca radyal olarak enjekte edilerek daha iyi bir plazma nozulu soğutulması ve daha yüksek bir kesme hızı elde edildi. Değişken kutuplamalı plazma ark kaynağının parlak bir gelecek göstermesi üzerine Boeing, Hobart' a çok tatminkar sonuçlar veren bir akım üretici geliştirterek üretimini sağladı [109].

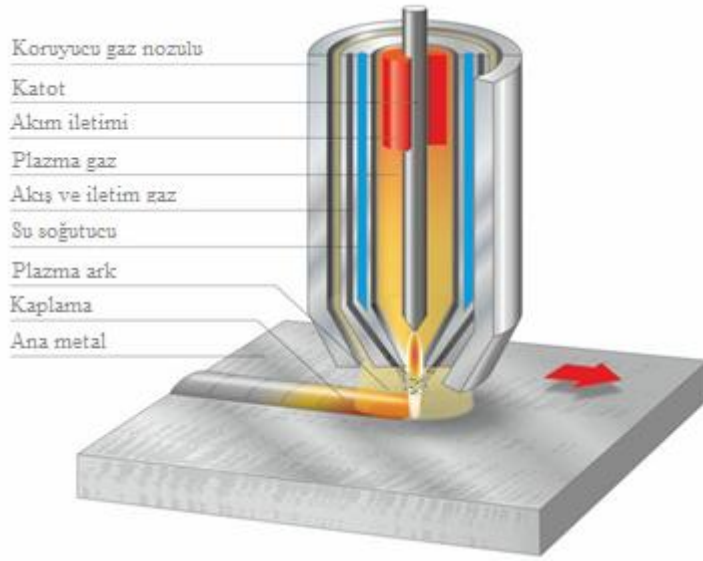
1978' de NASA' nın büyük gelişmeler gösteren bu önemli yöntemi inceleyerek, uzay mekiğinin alüminyum kısımlarının kaynağında uygulanabilirliğini ve TIG yönteminin yerinin alabileceğini açıklaması üzerine yöntem, ticari olarak büyük bir başarı kazandı. Yöntemin farklı kalınlıklara uygulanması halinde, parametrelerin uyum programları

geliştirildi ve bu şekilde değişken kutuplamalı plazma ark kaynağı uzay programlarında önemli bir role sahip oldu. İlk uygulama yıllarında kararlı plazma arkı ancak, 500 A akım şiddetlerinde elde edilebildiğinden yöntem, sadece mekanize sistemler yardımıyla kullanılabilirken 1979' lara doğru 0.1 A akım şiddetlerinde dahi kararlı bir ark oluşturabilen mikro-plazma yöntemi gibi sistemlerin geliştirilmesi plazma el torçlarının yaygınlaşmasını sağladı. Endüstri, plazma ark ile kesme yöntemine çok çabuk alıştı ve sağladığı üstünlüklerden ötürü yoğun bir biçimde kullanmaya başladı. Günümüzde, kesme kalitesi çok daha geliştirilmiş olan plazma ark kesme yöntemleri gene son yıllarda uygulama alanına girmiş olan lazerle kesme yöntemi ile yarışmaktadır [109].

4.1.8.2. Plazma Kaynak Yöntemi

PTA kaynağında, çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen torçla elektrodun etrafından gelen argon gazı tungsten elektrod ve nozul arasındaki pilot ark sayesinde iyonize olarak oluşmaktadır. Bu sıcaklıkta iletken hale gelen plazma gazı nozulun dar uç kısmından geçerek dar bir sütun halinde parçaya iletilmektedir. Arkı oluşturan plazma ısısı malzemeyi ergitmektedir. Koruyucu gaz ise nozulun dış çevresinden kaynak bölgesine iletilerek kaynak banyosunu korumaktadır. Şekil 4.14' de soğutma sisteminden gelen soğutucu sıvı ise özel kanallardan geçerek torca gitmekte ve buradaki ısıyı alarak, tekrar soğutucuda, kapalı devre, soğutmaktadır [113].

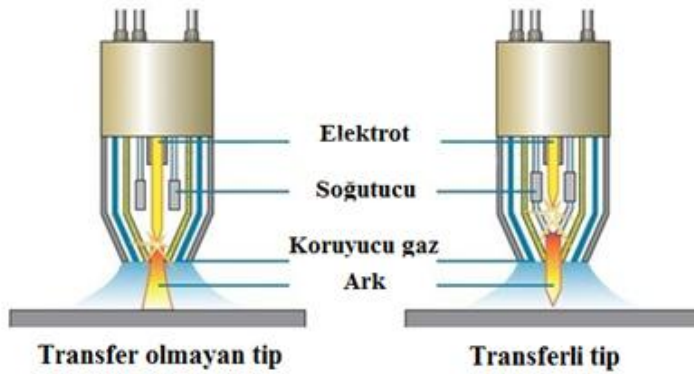
Bu yöntemle yüksek hızda inert gaz (Argon) demetinin bir ark demeti oluşturmak üzere ark bölgesine odaklanan bir nozul içinde kullanılır. 28000 C dereceye ulaşan sıcaklık ve yüksek enerji yoğunluğu ile etkin bir birleşme gerçekleşir [114].



Şekil 4.14. PTA Kaynağının şematik görünüşü [115].

Plazma arkının Transferli ve Transfersiz tipi

Aktarılan tipte tungsten elektrot negatif kutuba, iş parçası da pozitif kutuba bağlanır. Elektrot ve iş parçası arasında elektrik arkı korunur ve bir koaksiyal akan gazın ısıtılması sonucu onu plazma durumunda tutar (Şekil 4.15). İş parçası ve elektrot arasında önce ark başlatmak zordur. Bunun için, meme ile elektrot arasında pilot ark kullanımı yaygındır. Aktarılmamış tipte ise, güç doğrudan elektrod ve nozul tarafından bağlantılıdır. Elektrot aynı akımı taşır. Bu şekilde, iş parçasına doğru serpiştirilmiş olduğu gibi yüksek bir hızda iyonlaşır. Bu tipin ana avantajı, spotun duvarın içinde hareket etmesi ve gelen gazın ısıtılması ve dış katmanın serin kalması olmasına rağmen bu tür plazma düşük termal verimliliğe sahiptir [116].



Şekil 4.15. Plazma arkının transfer tipleri [116].

4.1.8.2.1. Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Teller

İnce sacların kaynağı haricinde plazma ark kaynağında TIG yöntemine benzer harici kaynak metali olarak dolgu tel elektrotlar kullanılır ve el ile yapılan kaynak işleminde kaynak bölgesine kaynak işçisi tarafından yada otomatik yapılan kaynak işleminde bir kanaldan tel sürme sistemi yardımıyla kaynak bölgesine tatbik edilir.

TIG kaynağında Tel seçimi işlemi yapıldığı gibi ana metalin muhtevasına ve uygulanacak olan işlemin amacına göre değişir [117].

Kaynak telleri, metal ve alaşımlarına göre çeşitli Avrupa standardlarında gösterilmektedir. Bunlardan sade karbonlu ve az alaşımlı çelikler için EN 440 ve EN 1668 olarak adlandırılır. Yüksek mukavemetli çelikler için EN 12534, paslanmaz ve sıcaklığa dirençli çelikler için EN 12072, alüminyum ve alüminyum alaşımları için PREN ISO 18273, nikel ve nikel alaşımları için PREN ISO 18274" de sınıflandırılmışlardır [109].

4.1.8.2.2. Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Torçlar

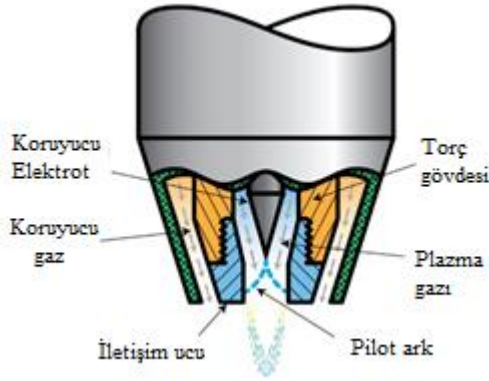
PTA kaynağında kullanılan torçlar genellikle kompleks bir yapıya sahip olup, elle tutularak yapılacak kaynak işlemleri için benzer özelliğe sahip TIG yöntemine nazaran ağırdır. Bununla birlikte, kaynak işlemini otomatik bir şekilde gerçekleştirmek için üretilmiş olarak plazma ark kaynak torçları da bulunmaktadır. Otomatik kaynak uygulamaları için üretilmiş olan plazma ark kaynak torçları, 50 ile 500 A akım şiddetlerinde kullanılacak biçimde hem Doğru akım ters kutuplama hem de doğru akım düz kutuplama ya da kare dalgalı değişken kutuplamalı alternatif akımda kullanıma uygun olarak geliştirilmiştir.

Torçların soğutulması önemli bir durumdur, çünkü oluşan ark çok yüksek sıcaklığa sahip olduğu için iyi bir soğutma, hem tungsten elektrotun, koruyucu gaz nozulunun hem de memenin uzun kullanımı için önem arz etmektedir.

4.1.8.2.3. Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Gaz Nozulu

Plazma ark kaynağında kullanılan gaz nozulu koruma gazının geçişinin sağlandığı, merkezde bulunan tungsten elektrodu Şekil (4.16) ve daraltılmış halde bulunan nozulu çevreleyen gereçtir [71]. PTA kaynak nozul kısmı bakır gereçlerden üretilmektedir. Kullanım zamanı ilk zamanda ark oluşum sayısı ile elektrod ucunun teşhisatıyla sınırlıdır.

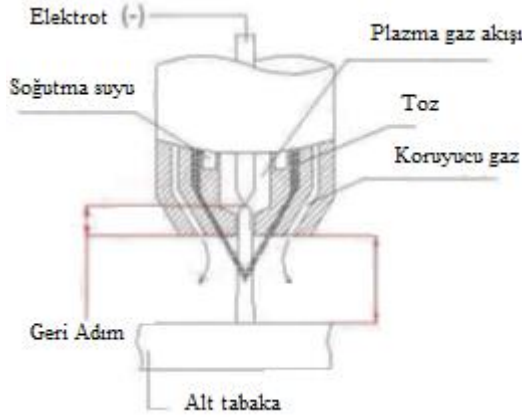
Nozul deliğinin çapına bağlı olarak akımın doğru kullanılması da önemlidir (aksi durumda çift ark oluşması sonucu ve nozulun bozulmasına sebep olacaktır). Soğutma işlemi de nozul ömrü için önemlidir [109].



Şekil 4.16. Plazma ark kaynak nozulu [118].

4.1.8.2.4. PTA kaynağında ark boyu mesafesi

Uygulamada, kaynağın kalitesini kontrol eden parametreler ana malzeme, gaz akış oranı (koyurucu gazı, plazma gazı ve taşıyıcı gaz), kaynak akımı, memeden işlenecek parçaya olan mesafe (ark boyu) ve kaynak hızıdır. Elektrot girintisi azaltıldığında, kaynak dikiş genişliği artar ve daha düşük nüfuz derinliğine sahip kaynak dikişleri elde edilir. Kaynak dikiş geometrik karakteristiklerindeki bu değişim, daraltma etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Elektrotun (Şekil 4.17) sınırlandırılmış sıkıştırma memesi (bakırdan yapılmıştır), arkın ve plazma gazının tümünün geçtiği merkezi bir deliğe sahiptir. Sıkıştırma memesinin deliğinin çapı, kaplamanın kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir, çünkü bu ilişki, doğrudan üretilen kaynak dikişinin genişliği ve penetrasyonu ile ilgilidir. Yetersiz plazma gaz akış hızı, yıpranmasına neden olduğu için sıkıştırıcı ağızlığın faydalı ömrünü etkiler. Kaynak akımı, kaynak ark sıcaklığında bir artışa bağlı olarak, konstriksiyon deliğinin çapındaki azalmanın bir fonksiyonu olarak azalır [119].

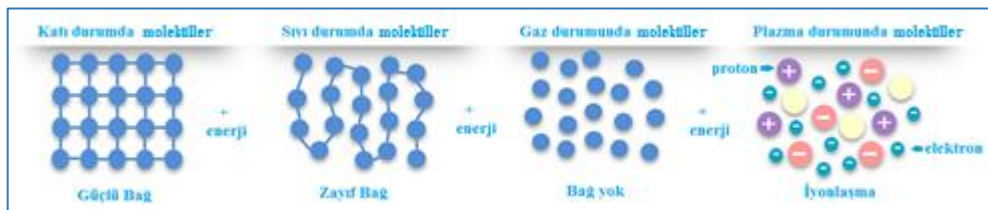


Şekil 4.17. Çalışma parçasıyla nozul mesafesi ve elektrot geri dönüşü [124].

Meme başı parçası mesafesi ne kadar büyük olursa penetrasyonu düşürür ve arkın alt tabaka üzerinde oluşma alanındaki artışa bağlı olarak kaynak dikişi genişliğini genişletir [119-121]. İyi bir kaynak birikim verimi elde etmek için, meme-iş parçası mesafesi 10 ila 15 mm'den fazla olmamalıdır. Bu aralıktan daha yüksek değerlerde, koruyucu gazının etkinliği önemli ölçüde azaltılır. Çalışma, meme başı mesafesi arttıkça seyreltme derecesinin azaldığını gösterdi.

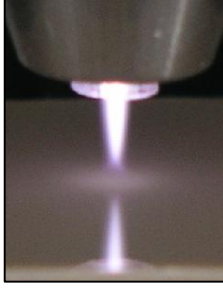
4.1.8.2.5. PTA Kaynağında Plazmanın Oluşumu

Her madde gaz fazında bulunduğu bir süre boyunca ısıtılınca, moleküllerinin hareketlenmesi sonucuyla atomlar dış tarafındaki elektronlarını kaybederek pozitif yüklü iyonlara dönüşürler. Sıcaklık arttıkça, iyonlaşma derecesi buna bağlı olarak artar, sıcaklık 10000 °C üzerindeki sıcaklık değerinden sonra, ortamda sadece pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlardan oluşan bir karışım oluşur. Elektriksel açıdan pozitif yüklü iyonlarla negatif yüklü iyonların eşitlenmesi sonucuna iletken ışıma plazma denir. Şekil 4.18'de maddenin plazma haline geçişi verilmiştir.



Şekil 4.18. Maddenin plazma haline geçişi [122].

Kaynak yapılırken plazmada gaz, elektrik arkı vasıtasıyla ısıtılarak iyonize olmaktadır. Şekil 4.19'da plazma alevi görüntülenmektedir.

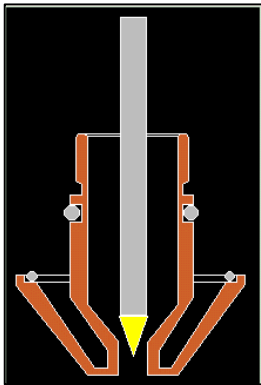


Şekil 4.19. Plazma alevi [123].

Buna göre ark kaynağı sistemlerinde elektrik arkı bir plazma oluşturmaktadır. Plazma arkının sıcaklığı, çeliği, asbest çimentosunu, kristali (yaklaşık 2323 K) ve karbonu (yaklaşık 2473 K) eritmeye yetecek sıcaklığa ulaşabilir. Metallerin kesme, yüzey hazırlık, tavlama, kaynak işlemlerinde, kaynak ağzı açma işleminde, metal püskürtme yardımıyla yüzey doldurmada çok iyi sonuçlar vermektedir.

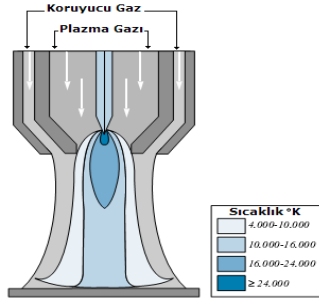
PTA kaynağında Arkın Oluşturulması;

Standart bir plazma ark torcunu oluşturan elemanlar, uç kısmında ufak bir delik bulunduran meme ve memenin merkezindeki tungsten bir elektrottur. Bir birinin içine geçmiş oval meme ile elektrot arasından plazma gazı dışarı çıkar (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. PTA kaynağında nozul ve elektrod [40].

Dış yüzeyi soğuyan ark stunu oluşturur, dolayısıyla içe doğru büzülme olur. Büzülmüş sütunun içinde sıcaklık 10.000–30.000 K sıcaklığına çıkar. Şekil 4.21. de dairesel kısımdan geçen gaz, göreceli olarak değişen yüksek enerji ve yüksek iyonlaşma düzeyine ulaşır.

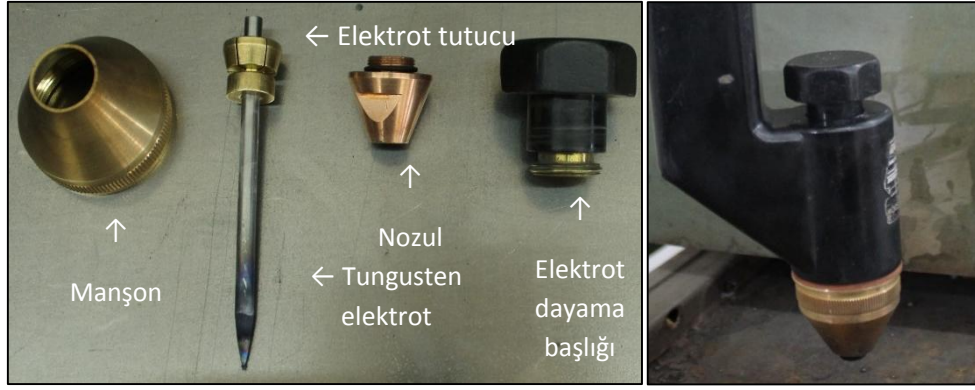


Şekil 4.21. PTA kaynak torcunda gaz akış yolları [40].

Plazma doldurma kaynağında kaynak teçhizatı, ateşleme ve kumanda birbirleriyle bitişik olmak üzere iki adet doğru akım membaı kullanılır. Kaynak cihazları 10 ilâ 15 kW güç absorbe ederler. Plazma birleştirme kaynağı kalın sacların kalınlığında, malzemelerin (I) küt alın birleştirmesinde ek metal olmadan uygulanır. Östenitik çeliklerde alın kaynağı 8-10 mm kalınlığındaki sacılar için kullanılabilir [124].

4.1.8.2.6. PTA kaynağında Kullanılan Elektrotlar

Plazma arkı kullanılan kaynak işleminde, ergime sıcaklığı 3369°C olan saf Tungsten elektrot dışında DAEN kutuplama yöntemiyle kullanılabilen toryum ve zirkonyum ile alaşımlanmış ergimeyen elektrotlar da kullanılmaktadır. PTA yönteminde ergimeyen tungsten elektrotlar, EN26848 ve AWS A5.12 standartlarına göre sınıflandırılmıştır. Uygulamada genellikle 2,4 mm çapında elektrotlar 150 A'e kadar olanlar genellikle kaynak işlerinde 150 A'in üzerinde olanlar ise 5 mm çapında elektrotlar arzu edilmektedir. Önerilen elektrot biçimi, elektrot uc kısmının aşırı ısınmasını önlemek, daha fazla akım toplayabilme oranını sağlamak için hazırlanmalıdır. Elektrotun aşınması söz konusu olduğu durumlarda ise taşlama makinelerinde belli bir mastara göre yapılmalıdır [109]. Şekil 4.22'de plazma kaynak torcu ve elektrod bağlantısı görüntülenmektedir.



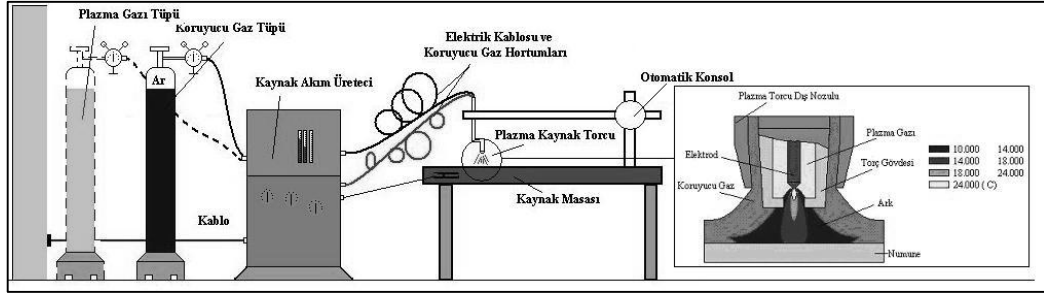
Şekil 4.22. Plazma kaynak torcu ve elektrod bağlantısının şematik görünümü

4.1.8.2.7. Plazma Ark Kaynağında Kullanılan Gazlar

Plazma ark kaynağında kullanılacak gazın seçimi kaynak edilecek malzemeye bağlıdır. Özellikle, plazma gazının asal (soy) karakterde olması istenir, aksi takdirde tungsten elektrodun çabuk tükenmesi problemi ile karşılaşılır. Plazma ark kaynağında plazma gazı olarak genellikle saf argon kullanılır. Soy bir gaz olan argon kolaylıkla iyonize olur ve plazma arkının sürekliliği için düşük gerilim gerektirir. Argonun düşük ısı iletkenliği dar, yoğunlaştırılmış, çekirdek kısmı sıcak, dış kısmı soğuk bir ark sütunu oluşturur. Saf helyumun kullanıldığı uygulamalarda arkta daha yüksek sıcaklıklar elde edilmesine karşın torc elemanlarının aşınması (tükenmesi) daha fazladır. Sürekli olarak yedek parça gerekeceğinden bunların sağlanması ve değişimlerinde de zaman kaybı işin yapım süresini etkileyerek maliyeti artırır. Buna karşın özel durumlarda argona belli oranlarda helyum veya hidrojen katılır. Ancak, özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında hidrojenin kaynak banyosundaki olumsuz etkileri nedeniyle H₂ kullanılamaz buna karşın arkın ısı girdisini artırdığından kalın kesitli parçaların yüksek kaynak hızlı ekonomik kaynak edilmelerinde Ar+He karışımlarının kullanılmasında yarar görülür [125-129].

Plazma Arkı İle Kaynak;

Plazma arkında; metal-metal olmayan malzemelerin doldurma ve birleştirme kaynağında kullanılır. Transfer olmuş ark yöntemi ile plazma kaynağı yapılır. Aktarım olmuş ark, yüksek frekans üzerinden iletilen yardımcı ark ile meme ve elektrot arasında yanar. Aktarım olmuş ark yandığında yardımcı ark sönmüş olur. Mikropilazma kaynağında, kaynak esnasında yardımcı ark sönmeyiz. Ark akımının değeri bir direnç vasıtasıyla sınırlanır. Plazma arkının şematik olarak görünüşü Şekil 4.23’de görülmektedir [124]



Şekil 4.23. Plazma transfer ark kaynağının şematik görünüşü [130].

4.1.8.2.8. Yüksek Frekans Dalga Ünitesi ve Donanımları

Pilot arkı ve transfer olmuş arkı ateşlemek-tutuşturmak için kullanılan, doğrudan katot tungsten elektroda ve anod nozula bağlı olan, sisteme yüksek frekansta dalgalar yollayan parçadır. Diğer Elemanlar:

- İki kademeli DC güç kaynağı,
- Su soğutma sistemi, anodik nozul gibi kritik parçalarda kullanılmak üzere, argon tüpleri Tungsten elektrotlar koruyucu aletler vb. Şekil 4.24’ de görüntülenmektedir.



Şekil 4.24. PTA kaynak makinesi ve donanımları

PTA DC Güç Kaynağı;

Kaynak yapılabilmesi için gerekli enerjiyi (DC; doğru akım) sağlar. Güç kaynağının genel görünüşü Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Cihaz üzerindeki aparatların özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Soğutma sistemi 4.26’ da ve kaynak arabası 4.27’ de verilmiştir.



Şekil 4.25. DC Güç kaynağı

- 1- Amper ve volt göstergesi;
- 2- Volt / Amper Şalteri;
- 3- Amper Volt göstergesini kısa süreliğine aktif eden basma butonu;
- 4- Amper ve Volt ayar düğmesi;
- 5- Uzaktan kumanda ve Panel şalteri.

PTA Soğutma Sistemi;



Şekil 4.26. Soğutma sistemi

Otomotik kaynak araba sistemi;



Şekil 4.27. Kaynak arabası konsolu ve güç kaynağı

4.1.8.2.9. Uygulama Özellikleri

Kaynak cihazları su soğutmalıdır. Plazma kaynak ekipmanı; akım üretici, hortum grubu ateşleme ekipmanı, kumanda aracı ve yanıcı gaz tüplerinden oluşur. Plazma doldurma kaynağında; ateşleme, kaynak cihazı, ve kumanda birimlerinin yanında iki tane de DA üretici bulunmaktadır. Buna ek olarak, doldurma için, toz deposu bulunan bir toz sevk ünitesinden meydana gelir. Plazma ark kaynağı ile nikel ve nikel alaşımları, alaşımsız, hafif ve yüksek alaşımlı çelikler, zirkonyum, bakır ve bakır alaşımları, alüminyum ve alüminyum alaşımları birleştirilebilir. Ostenitik paslanmaz çeliklerde, alın kaynağı 8-10 mm lik kalınlıklara kadar uygulanır. Kaynak bağlantıları, mekanik özellikler açısından iyi sonuçlar verir ve gözenek oluşmaz. Plazma ark kaynağında kaynak edilecek metallere göre gaz seçimi yapılır. Yüksek akım uygulanan kaynak uygulamalarında, plazma gazı ve koruyucu gaz aynı alınır; çünkü iki farklı gaz kullanımı durumunda arkın kararlılığı zorlaşır. Diğer metallerin yüksek akım şiddeti uygulanan birleştirmelerde; çoğu zaman kullanılan gazlar, karbonlu ve az alaşımlı çelikler için saf Ar gazı, diğerlerinde ise % 7,5' a kadar hidrojen karıştırılmış argon gazıdır. USA sanayisinde genel olarak kullanılan He gazı ülkemizde ulaşılması zordur. Düşük akım ile uygulanan plazma kaynağında, hidrojen muhtevası en çok % 5'tir. Saf argon, karbonlu çelikler, yüksek mukavemetli çelikler ve tantal, titanyum, zirkonyum alaşımları gibi reaktif metalleri, kaynak yapmak amacıyla kullanılır. Bu metallerin uygulanmasında gaz, çok düşük miktarda bile hidrojen bulunması çatlama veya mekanik özellikleri olumsuz etkiler.

Plazma ark kaynak yöntemi, üretim kaynağı olarak uzay endüstrisi, havacılık ve nükleer endüstrilerde çok yaygın kullanıma girmiştir. Özellikle dikiş kalitesi ve güvenilirliği ve ekonomiklik açısından kabul edilen bir yöntemdir. TIG yöntemi ile kaynak edilebilen tüm metal ve alarları plazma ark kaynağı ile de güvenilir bir biçimde kaynak edilirler. Plazma arkı ile kaynakta iki teknik çok sık kullanılır. Bunlar, ergitme tekniğı (melt-in mode) ve anahtar deliğı tekniğı (key hole mode) olmaktadır. Plazma arkı ile kaynakta sık kullanılan iki teknik, ergitme tekniğı (melt-in mode) ve anahtar deliğı tekniğı (key hole mode) olmaktadır [131].

4.1.8.2.10. Ergitme Tekniğı

Akım şiddetleri 50-400 A aralığında olan kaynak işlemlerinde genel olarak ergitme tekniğı kullanılır. Tungsten İnert Gaz yöntemine benzer bir kaynak dikiş oluşturulur. Bilhassa, otomatik sistem uygulamalarda, TIG yöntemi tercih edilebilir. Yüksek akım şiddeti ve Ark kararlılığı daha nüfuziyetli kaynak dikişleri oluşturulur ve kaynak sırasında arkı kontrol etmek daha kolaydır, yine kaynak süresini de kısaltan bir yöntemdir. İlave kaynak metalinin kullanımı, malzeme kalınlığına bağı olarak belirlenir [109].

4.1.8.2.11. Anahtar Deliğı Tekniğı

Plazma arkı kaynağında metalden metale değışmekte olan bir kalınlık aralığında, kullanılan akım şiddeti, gaz akımı, ve kaynak hızının uygun ayarlanması ile malzemeyi derinliğine kat eden bir delik ve küçük bir kaynak banyosu oluşturulabilir. Anahtar deliğı işlemleri yatay pozisyonda 1.5-10 mm kalınlık aralığındaki malzemelere de kullanılır. Uygun kaynak parametreleri sağlanarak bazı metal kalınlıklarında da değışik pozisyonlarda kaynak yapılabilir. Bu özelliğı gösteren tek yöntem plazma arkı ile kaynak yöntemidir.

Anahtar deliğı tekniğinde, anahtar deliğı oluşturmak plazma arkı için parçanın derinliğine doğı girdiğinden, ergiyen metal parçanın yüzeyine doğı hareket eder. Torç, kaynak dikiş doğırtusunda hareket ettiğinde arkın ön kısmında bulunan ergimiş metal plazma arkının kenarlarından dolaşarak geriye doğı hareket eder ve orada buluşarak katılaşı. Anahtar deliğı tekniğinin avantajı, kaynağın tek paso ile yapılabilmesidir [125,130].

4.1.8.2.12. Plazma Kaynağı İle Tig Kaynağı Arasındaki Fark

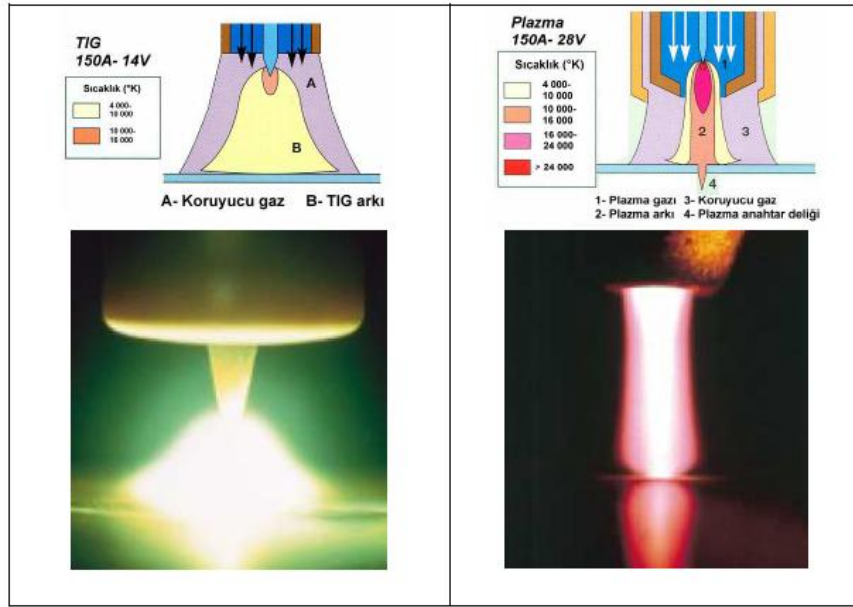
TIG kaynağında başlıca, 2 değişik ark sistemi kullanılır. Bunlardan ilki ergimeyen tungsten elektrot, taşıyıcı olmayan ark, ve su soğutmalı bakır meme arasında oluşmaktadır. Bakır meme; güç yoğunluğunu, ark odaklayıcı, güç yoğunluğu artırıcı ve dolayısıyla plazma demetinin sıcaklığını yükselten bir etki oluşturur. Tungsten elektrot negatif kutupda, bakır meme ise pozitif kutupda olarak kullanılır. Diğer ark sistemlerinde ise (taşıyıcı ark); ark toryumla alaşımlama işlemi yapılmış bir ışınlı toplayan bakır memenin içinden geçen tungsten elektrot ve ana iş parçası arasında olmaktadır. Plazma gazı, elektrot ile meme arasındaki silindirik havuza tatbik edilir. Taşıyıcı ark, yardımcı ark, elektrot ve meme arasında tutuşturulur. Taşıyıcı ark yakıldığı zaman, yardımcı ark pasif duruma geçer [118].

Bir TIG / WIG arkı, ergimeyen bir tungsten elektrod ile parça arasında serbestçe yanar. Nüfuziyet, kaynak banyosunu örtmek üzere kullanılan gaza bağlı olarak değişir. Burada en önemli faktör, gazın iletkenliğidir. He, Ar⁺ a göre 1000-10.000 K sıcaklık aralığında 5, 10 kat daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahiptir. Isıl iletkenliği yüksek olan gaz (helyum), arkta oluşan enerjinin daha büyük bir kısmını çevreye ısı olarak yayar. Bir gaz içinde, ancak; bu gazın iyonize olması halinde akım taşınabilir. Bu teknikte, termik bir plazma söz konusu olup, yüksek sıcaklıkta iletken hale gelir. Yüksek sıcaklığa sahip bir ark çekirdeği oluşur. Sıcaklık dışarıya doğru radyal yönde düşer. Bu sıcaklık düşüşü, kullanılan gaza bağlı olarak değişir. Isıyı iyi iletken bir gazda, bu değer düşüktür. Kötü iletken bir gazda ise daha kuvvetli bir sıcaklık düşmesi oluşur. TIG / WIG arkındaki düşüşü ve tipik nüfuziyet formu ile karşılaştırılırsa, her ikisinin de benzer biçimde olduğu görülür. Plazma arkından, ark çekirdeğinden dışarıya doğru olan sıcaklık düşüşü, su ile soğutulan bakır meme ile çok kuvvetlendirilmiştir. Örneğin; 3 mm² lik bir plazma meme çapında, ark merkezindeki yaklaşık 20.000 K iken, radyal olarak 1.5 m.T dışarıda, bu sıcaklık yaklaşık 1300 K² e düşer. Meme borusu üzerindeki sıcaklık daha yüksek olsaydı, bakır meme erirdi [124].

Plazma arkı ve TIG kaynak arkı karşılaştırıldığında benzerliklerinin olduğu görülür, zira her iki yöntemde de ark ergimeyen tungsten bir elektrod ile iş parçası arasında yanar. Ancak ergimeyen elektrod, plazma torcunda nozulun içinde geriye çekilmiş olup oluşan ark memeyi çevreleyen kanallarda dolan su ile soğutulduğundan sıkışmış (büzölmüş), boyu uzamış ve sıcaklığı yaklaşık olarak 24.000°C gibi bir değere yükselmiş olarak oluşur. Bu durumdan dolayı plazma ark kaynağı, TIG kaynak yöntemi ile karşılaştırıldığında bazı üstünlüklere sahip olduğu görülür. Plazma arkı daha derin nüfuziyetlidir, daha az ağız

hazırlama işlemine gerek duyulur, düşük ısı girdisi sayesinde parçada daha az açılmal çarpılma oluşur ve daha az kaynak pasosu ile kaynak işlemi tamamlanır [104, 127-130].

Bununla birlikte kısa ark uzunluğu kullanımı gereken yerlerde, TİG yönteminde tungstenli kaynak elektrod kirlenirken, elektrod ucuyla kaynak havuzuna kaynakçının istemeyerek dokunmasına sebep olabilir. PTA' da elektrod nozul içine yerleştirildiğinden bu problem yoktur. Şekil 4.28' de elektrod konumu ve ark büzülmesi görüntülenmektedir.



Şekil 4.28. TIG ve plazma arkı oluşumundaki erimeyen elektrodun konumu ve ark büzülmesinin ark sıcaklık-gerilim üzerine etkisi [105].

Plazma kaynak mekanizması, tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan ark şeklinde bakıldığında, TIG kaynak mekanizmasına benzemektedir. Ancak elektrodun torçtaki konumu, kaynağın mekanizması ve arkın iletim şekli ile tamamen farklılık göstermektedir.

4.1.8.2.13. Plazma Ark Kaynağının Avantajları

Plazma ark kaynağının avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

1. PTA kaynaklı yüzey, üzerindeki kaynak çatlakları olmaksızın pürüzsüz bir kalite sağlar [131].
2. Kaynak hızı TIG kaynak yöntemine nazaran iki katı kadar fazladır [124].

3. PTA tekniği, yoğun ve homojen kaplamalar, yüksek derecede tekrarlanabilirlik, maliyet etkinliği, endistürü kolay bulanabilirliği, 6mm kalınlığına kadar kolay kaplamalar ve nispi kayıplarla güçlü metalürjik bağ meydana getirmesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [5-8].
4. PTA kaynak işlemleri nükleer, uzay, gemi inşaatı, elektronik ve daha birçok endüstri alanında kullanıla bilen bir yöntemdir. PTA kaynak işlemleri ekonomik olmasının yanında, büyük oranda kalite ve güvenilirlik içermektedir. Bilinen yüzey işlemleri yöntemlerine göre, plazma ile yüzey serdeştirme işlemleri önemli avantajlara sahiptir. Bunlar; Çevresel temizlik, güvenilirlik, ekonomiklik, işlem süresinin kısalığı, kolay maskeleme, minimum distorsiyon, mikroyapının kontrol edilebilirliği ve mükemmel aşınma direncidir [100, 132].
5. Düşük akım şiddetli plazma ark kaynağıyla, ince tel elekler, ince tellerin uç uca kaynağı, röle kutusu üretimi, ince kalınlıklı basınçlı kaplar, vakum tüpü elemanları, yüksek akım şiddetli kaynaklarda ise; titanyum ve paslanmaz borular, türbin motor elemanları, roket yakıt tankları, yüksek güvenlik ile derinlemesine nüfuziyetli kaynaklar elde edilebilir. Plazma doldurma kaynağı ile demir, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar püskürtülür. Böylece yapılan kaplama ile yüzeyin aşınma mukavemetini ve korozyon dayanımını iyileştirmek mümkün olmaktadır. Doldurma tabakası kalınlığı 0,25-6 mm. arasında değişebilir ve bu teknikle toz halindeki doldurma malzemesi saatte 5 kg. kadar yığılabılır.
6. PTA kaynak işlemleri oluşturmada, iki bağımsız ark (transfer olmayan pilot ark ve bir ana transfer ark olarak) kullanmanın avantajı vardır. Bu işlem iyonize olmuş pilot ark sayesinde diğer ana ark için iyi bir iletken oluşturur. Bununla birlikte düşük seyreltme, diğer kaynaklara kıyasla yüksek tekrarlanabilirlik derecesi gibi avantajlar gösterir [133-137].
7. Anahtar deliği konumunda, 12 mm kalınlığa kadar tek pasoda kaynak yapmak mümkündür. Bunu, diğer gaz altı kaynak yöntemleri ile yapmak mümkün değildir. Kaynakta paso sayısı azaltılırken, içyapı değişimleri, iş belli bir alanda yoğunlaştırıldığı için fazla olmamaktadır.
8. Arkın Sutunsu bir halde oluşun şekli, MIG-MAG kaynağındaki konik şekilli ark ile karşılaştırıldığında, ark mesafenin daha kolay kullanılabilme imkânı vermektedir.
9. Gaz tungsten ark yönteminde kısa ark uzunluğunu, tungstenli kaynak elektrodunu kirletir ve elektod ucuyla kaynak havuzuna kaynakçının istemeyerek dokunmasına

sebepe olabilir. Plazma transferli ark yönteminde elektrot nozul içine konumlandırıldığından böyle bir problemle karşılaşılmaz. Torçdaki nozulun dar olması nedeniyle, TIG elektrodu kirlenmeden korunmaktadır. Ark boyu uzun tutulabildiği için, özellikle el ile yapılan arkta, dikiş kaynakçı tarafından daha rahat izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Bu da kaynakçı hatalarını minimum seviyeye indirir [61, 65].

10. PTA yönteminin bu avantajlarıyla birlikte düşük distorsiyon, ısıdan etkilenen bölgenin darlığı ve ince taneli mikroyapının eldesi de bu tekniğin avantajlarından [119, 138, 139]

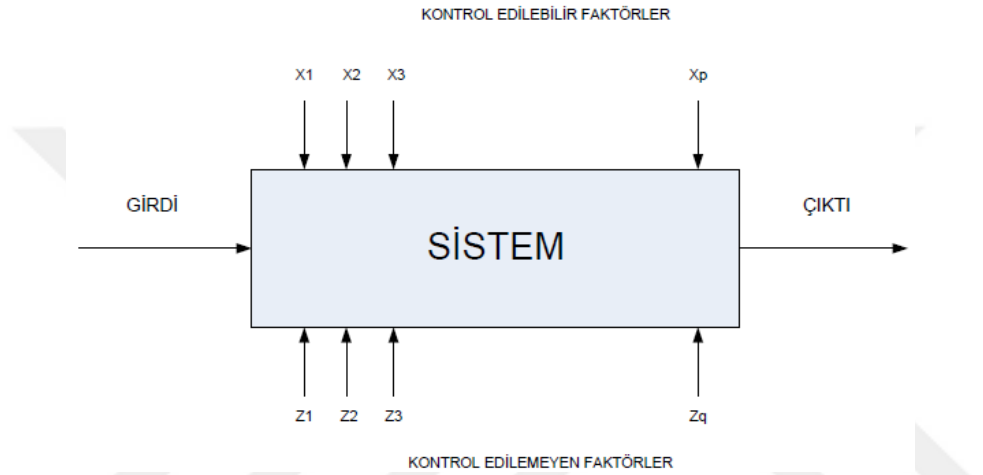
4.1.8.2.14. Plazma Ark Kaynağının Dezavantajları

Plazma ark kaynağının dezavantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

1. MIG-MAG kaynağına göre, makine ve ekipmanı çok daha pahalıdır.
2. PTA kaynağında elde tutularak kullanılmakta olan kaynak torçları, TIG kaynağında kullanılan torçlara göre daha karışık yapıya sahip olduklarından daha ağırdırlar.
3. Ark dar ve sütunsu olduğu için, ağızdaki yerleştirme ve toleranslara karşı daha duyarlıdır.
4. Daha fazla bakım ve daha dikkatli kullanım gerektirir.
5. Elektrodun yerleştirilmesi için, torcun tamamen sökülmesi ve sonra da hassas bir şekilde yeniden ayarlanması gerekir.
6. PTA kaynak torcu, daha karışıktır ve hem nozul çapı, hem koruyucu gaz akış oranının ayarlanması ve uygulanması için nozul çapının seçimi, pozisyonu ve uygun elektrod ucu gerektirir [65].

5. DENEY TASARIMI VE MODELLEME TEKNİKLERİ

Bir süreç ya da sistemin girdilerinde değişiklik yapılarak çıktıların gözlenmesi ve analizi olayına deney denir. Makinelerin kombinasyonu, metotlar, insanlar veya çıktı üreten diğer kaynaklar topluluğuna ise proses denir. Faktörler yani deney değişkenleri ise deney sonucunu etkileyen kontrol altında olan ve olmayan çevre değişkenleridir.



Şekil 5.1. Deney tasarım prosesi modeli [140].

Deney tasarımı (DT) ise deneyde oluşabilecek hataları minimuma indirme yöntemidir. Deney tasarımı bilim ve araştırmanın vazgeçilmez bir unsurudur, ancak deneysel çalışmalar uzun zaman ve uğraş gereken bir işlemdir. DT, bir süreçteki girdiyle başlayan arzuladığımız değişiklikleri uygulayıp akabinde elde edilen cevap değişkeni üzerindeki değişkenlerin gözlenerek yorumlanması olayıdır. İlk olarak DT, 1920’de İngiliz istatistikçi “Sir Ronald Fisher” tarafından tarım alanında üretim verimini arttırmak amacıyla araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir [141].

Şekil 5.1’de değişkenler X_1 , X_2 , X_3 , X_p kontrol edilebilir değişkenler iken Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_q kontrol edilemeyen değişkenlerdir. Bir ürün ya da süreç tasarımında problemleri minimum düzeye getirmek için bu şartları etkileyen faktörler incelenir. Değişkenliğin kaynağı olan, kontrol edilemeyen değişkenlerin (Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_q) etkisinin en az olduğu bir süreç ile en iyi koşullar sağlanmaktadır [142]. Bu sebepten dolayı kontrol edilmeyen faktörler diğer bir adıyla deney değişkenlerle deneyler yapılarak gözleme alınır ve en iyi

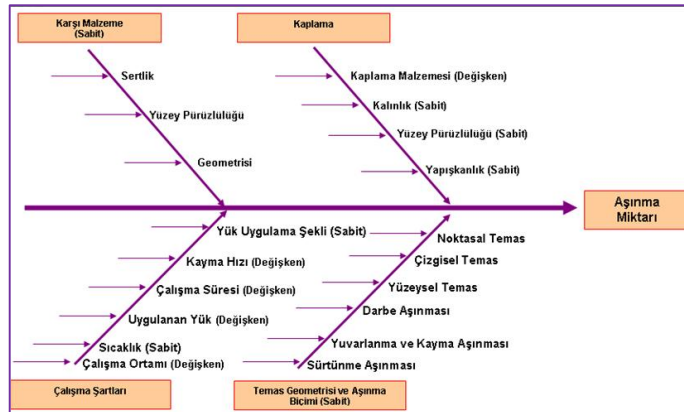
sonuçlar elde edilmesi arzulanır. Bu faktörlerin doğru sonuçları bulmasında ise doğru sorular ile yaklaşım önemlidir.

Deney Tasarımı (DT); deney, düzen ve çözümleme olarak üç aşamaya ayrılmaktadır. Genel olarak DT'nin adımları kısaca aşağıda verilmektedir: [143]

1. Etkileri arasındaki gerçek farkların araştırılması istenen faktörler ve seviyelerinin belirlenmesi.
2. Deneyde her faktör için kaç tekrar yapılacağına karar verilmesi.
3. Veri analizinde kullanılacak tekniklerin belirlenmesi.
4. Belirlenen deney tasarımıyla elde edilen deneysel veri sonuçlarının yorumlanması.

Deney tasarım metotları birçok disiplinde uygulama alanı bulmaktadır. Deneysel tasarım mühendislik çalışmalarında üretim prosesinin performansını geliştirmede önemli rol oynamaktadır. Prosesin geliştirilmesinde deneysel tasarım tekniklerinin uygulanması ile ürün geliştirilir, değişkenlik azalır ve hedef gereksinimlere yakın sonuçlar sağlanır ve maliyetler düşürülür.

Balık kılçığı diyagramı deneylerin tasarımında hazırlanan ilk çıktılardan biridir. Belirlenen faktörlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin net olarak görülebilmesi ve sınıflandırılabilmesi için bir balık kılçığı çizelgesi oluşturulabilir [141]. Şekil 5.2'de örnek amaçlı bir aşınmaya etki eden faktörlerin balık kılçığı diyagramı görüntülenmektedir.



Şekil 5.2. Aşınmaya etki eden faktörlerin balık kılçığı diyagramı [131].

Deneysel bir çalışmadan en iyi çıktı sistematik bir yaklaşım dikkate alındığı zaman elde edilir. Farklılıklar olmasına rağmen genel olarak deneysel bir çalışma; problemin tanımı, bağımlı ya da yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin seçimi, bağımsız

değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi ve etken düzeylerinin nasıl birleştirileceği basamaklarını içermektedir.

Deneysel tasarım;

- alınan gözlemlerin sayısı,
- deney sırası,
- kullanılacak rastgeleleştirme yöntemi ve deneyi tanımlayan matematiksel model temel bileşenlerinden oluşmaktadır.

Çözümleme ise;

- veri toplama
- işleme,
- deney istatistiklerinin hesaplanması ve sonuçların yorumlanmasını içerir.

Matematiksel modelleme, bir fiziksel sistemin ya da işlemin temel özelliklerinin eşitlik ya da formül şeklinde verilmesidir. Bir matematiksel model genel olarak şu şekilde ifade edilebilir: Bağımlı Değişken= f (Bağımsız değişken, parametreler, etkili fonksiyon).

Bağımlı değişken, sistemin durumunu ya da davranışlarını yansıtan bir özellik olup eşitliğin sağındaki değerlere bağlı olarak değişmektedir. Bağımsız değişken ise, sistemin durum ya da davranışlarının belirlendiği zaman veya uzay gibi boyutlardır. Parametreler, sistemin özelliklerini ya da yapısını belirleyen katsayılardır. Etkili fonksiyonlar ise sistem üzerine etkisi olan dış kuvvetlerdir [144, 145].

Endüstriyel şartlar düşünüldüğünde ekonomi-zaman ilişkisini en uygun ve doğru şekilde uygulamak için kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirebilmek için deney tasarımı yöntemlerinin uygulaması son derece verimli bir yaklaşımdır [146].

Deneysel tasarım ve modelleme teknikleri olarak genellikle;

1. Adım adım uygulanan istatistiksel geleneksel teknikler,
2. Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) ile birlikte Yanıt Yüzey Tekniği (YYT),
3. Faktöriyel Tasarım Teknikleri,
4. Taguchi Tekniği (TT),
5. Digraph ve Matris Metodu,
6. Stokastik Teknikler, kullanılmıştır [147].

Genel olarak deney sayısının artması zaman, maliyet, iş gücü ve emek açısından firmaları daha kolay çözümler üretmeye itmektedir. Problemin çözümüne yönelik olarak

uygun bilimsel yaklaşımlar geliştirmek ve uygulamak tasarımcı için önemli kolaylıklar sağlayabilmektedir [131].

İmalat yapan her çoğu sektörde süreç gelişimi araştırmalarında yapılan deneyleri tasarlamak için, en çok bilgiyi en kısa sürede, en az maliyet ve işgücüyle elde eden çeşitli yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler sayesinde geleneksel ve tarihsel olarak, üretim süreçleri maksimum verimlilik veya minimum maliyet elde etmek için üretilmiştir [148, 149]. 1980 ve sonrasında kullanılan Taguchi yöntemi bu çalışmalardan başlıcadır. Bu tasarımınla dikey dizinin görselliği, sapmanın hangi etkileşim bileşenlerinden kaynaklandığını gösterdiğinden bazı tasarımlar için daha iyi tahminler elde edilir [141].

5.1. Taguchi Metodu

Taguchi yöntemi, tasarım parametrelerini optimize etmek için benimsenen deneyler için tasarım ve analiz uygulamalarında kullanılan güçlü istatistiksel araçlardan biridir. Amaç olarak nispeten düşük bir maliyetle yüksek kaliteli ürünleri üretmek için tasaralanan bir yaklaşım türüdür. [150, 151].

Bu yöntemde, olası tüm kombinasyonları test etmek yerine kombinasyon çiftlerini test ederek min. miktarda deney yaparak, çıktıyı etkileyen başlıca faktörlerin belirlenmesini sağlar [152-155].

Yöntem istatistiksel veri analizi üzerine kurulu, karmaşık sistemlerin analizini ve süreç işlemlerini en uygun şekle sokarak basitleştirir [156]. Taguchi deney tasarımında yeni ürün geliştirme ve karmaşık problemleri araştırmanın yanında uygun alternatiflere harcanacak maliyet ve zaman etkin olarak sunulmaktadır.

Üretim yapılmakta olan işletmeler, ürünlerini müşterilerinin beklentilerini karşılamak ve bu beklentilerini ileri düzeye çıkarabilmek için sürekli rekabet içerisindeyler. Bu işletmelerin, müşterilerine bağıntıyı yerine getirebilen, daha ucuz, daha kaliteli ve daha hızlı ürünler ulaştırabilmek için gösterdikleri çaba, kalitenin gelişmesine ve ilerlemesine sebep olmuştur. İşletme yöneticileri işletmelerinin verimliliklerini arttırmak ve rekabet üstünlüklerini arttırmak için, kalitenin yalnız üretim bölümünde değil malzeme ve proses tasarımı kısımlarının da doğru bir şekilde planlanmasının gerektiği bilincindedirler [157, 158].

Rekabete dayanan pazarda, işletmelerinin varlıklarını devam ettirebilmeleri ve pazar paylarını arttırabilmeleri için kalitelerini yükseltme çalışmalarına önem vermeleri gerekmektedir. Kalitelerini yükseltme ve geliştirme, birçok organizasyonda rekabet edebilmek ve piyasaya tutulabilmesi için en temel faaliyetler haline gelmiştir [141].

Bu doğrultuda üretim yönetimi araçlarında da gelişmeler olmuş ve günümüz gereksinimleri için teknikler ortaya konmuş, yâda yıllardır teoride kalmış yöntemler uygulama alanına geçirilmiştir. Bunlardan biri de, özellikle sanayileşmiş ülkelerde kullanılmakta olan deney tasarım teknikleridir. Tasarım için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine ve hızlı bir şekilde neticeye ulaşamadığından dolayı da uygulanabilirliğini tamamen yitirmektedir. Ancak Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir [158].

Ortogonal diziler, faktör seviyelerini, teker teker değiştirmek yerine, eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Bu sayede, deney tasarımında Taguchi yaklaşımı kimya ve elektronik sektöründe olduğu gibi üretim sektöründe kabul görmüştür. Taguchi, deneysel tasarlama yöntem açısından önemli bir yenilik getirmemesine rağmen, sanayi uygulamalarına yönelik yeni fikirler ortaya atarak ve başarılı uygulamalar sergileyerek, deney tasarımı yönteminin imalat sektöründe kabul görmesinde büyük katkılarda bulunmuştur [141].

Taguchi metodunun esas amacı; kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerde zaman ve maliyet açısından etkin, aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler tasarlamaktır. Taguchi deney tasarım tekniği; ürünlerin kalitesinin olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânı vermektedir [158].

5.2. Taguchi Metodunun Gelişimi

Taguchi metodunun 1920 li yıllarda İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında çalışmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. İngiliz istatistikçi ayrıca deney verilerinin analizi "varyans analizi" (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir. Kullanılan bu yöntem Amerika'da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi uygulanmış ve Amerika'nın tarım alanında dünyada lider konuma gelmesine büyük katkı sağlamıştır. Ürünler üzerinde

verimliliği arttırmak için tarımsal çalışmalarda, sulama alanlarında ürünlere üzerindeki etkileri izlenmiş ve başarılı değerler alınmıştır [141].

Japonya ikinci dünya savaşının sonlarına doğru günümüze kadar gelişmesinin temelleri atılmıştır. Bu yıllardaki en önemli projelerden biri Japon iletişim sisteminde gelişmiştir. Amerika Bell Enstitüsünde kullanılan telefon sisteminin benzerini Japonya da kurulmuştur. Ancak Bell laboratuvarına göre hacimce daha az bir alana sahipti. Telefon sisteminin kurulumu yaklaşık yirmi yıl beklenirken taguchi yöntemiyle proje dört yılda bitirildi ve Taguchi çok ünlü oldu [157].

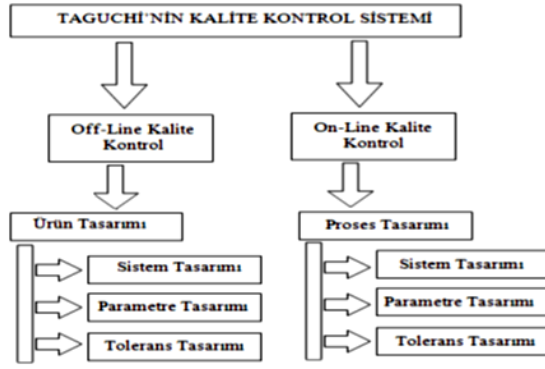
5.3. Taguchi Felsefesi

Taguchi'nin felsefesinin temeli 7 temele dayanır;

1. Üretilen bir ürünün kalitesi toplumda meydana getirdiği kayıpla ölçülür. Toplumsal kayıp ürünün tüketici gereksinimlerine uygunsuzluğu ve kullanımda ortaya çıkan zararlar olarak tanımlanır.
2. İşletmenin kalıcılığı ve ayakta durması için kaliteyi devamlı geliştirmeli ve maliyeti azaltmalıdır.
3. İyi bir kalite geliştirme programında ürün ve hedef değerinde sapmanın az olmasıyla sağlanır.
4. Ürünün kalitesinde tüketicide meydana gelen memnuniyetsizlik sapmanın karesiyle bağlantılıdır.
5. Ürünün iyi nitelikte olması tasarım ve üretimiyle bağlantılıdır.
6. Ürün performansı olumsuz etkileri en aza indirgenmeli sapmaları kontrol altına almamız gerekir.
7. İstatistik yapılan çalışmalar ürün veya proseslere ait sapmalarını azaltmak için kullanılır [157].

5.4. Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi

Kalite için yapılan çalışmalar iki kısımda incelenir. Bunlar Çevrim İçi (On-Line) ve Çevrim dışı Off-Line'dir. Deney tasarımı, Bu sistemin kalite kısmında, off-line kalite kontrol içinde, proses, ve tasarımı kısımlarında kullanılmaktadır. Bu hal Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Taguchi kalite kontrol sistemi prosesi [157].

Çevrim içi kalite kontrol; Üretime başlanan ürünün muayene yöntemleri ile kalitesinin sağlamaya çalışılması aşamasıdır.

Çevrim dışı kalite kontrol; Ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi, pazar araştırması çalışmalarını kapsar. Yapılan bu çalışmalar ürüne direkt müdahale yerine, üretimden önce amaçlanan tasarım çalışmalarını kapsar [141]. Çevrim dışı (Off-line) kalite kontrol metotları ürünlerin daha uzun süre kullanılması, maliyetinin azaltılması, üretilebilirlik ve iyi bir ürün geliştirmek için kullanılır. Taguchi Off-line üç aşamalı bir yöntemle güvenilirlik sağlanmıştır. Kalitede hem ürün tasarımı hemde proses tasarımı açıklanan kalite basamakları; parametre tasarımı, sistem tasarımı ve tolerans tasarımıdır [158]. Taguchi metodunun kalite parametreleri Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Taguchi metodunun sistematik şekli [165].

5.4.1. Sistem Tasarımı

Taguchi Metodunun ilk aşamasını oluşturur. Burada amaçlanan yapıları gözlemlenmesidir. İstenilen özellikte ürün elde etmek için teknolojik çalışmalar belirlenir ve bunlar içinde uygun olanlar seçilir. Çalışmanın konusunu ürünle ilgili buluşların değerlendirilmesi verilerin toplanması pazarın istekleri malzeme maliyet kullanılan ekipmanlar oluşturur. Malzeme alımında parçaların özelliklerinin iyileştirilmesinde bir takım kararlar alınması önemli rol oynar [158].

Kaliteli bir ürünün üretilmesi ve yatırıma dönük olması beklenir. Burada önemli olan mamül üretimde maliyetin düşük olması önemlidir. Bunun için fiyat araştırması iyi yapılmalı, teknolojik gelişmeler ve bilimsel buluşlardan faydalanılmalıdır [157].

5.4.2. Parametre Tasarımı

Parametre tasarımı yapılabilmek için Taguchi sistemine göre, malzeme kalitesini geliştirmede en önemli kısımdır. Malzeme parametre tasarımı, malzeme değerleri, ürün hesaplama değerleri, farklı boyutlar, yüzey uygulamaları gibi, en uygun değerlerin tespit edilmesi anlamına gelmektedir [157].

Proses değişken ve ürün değişken tasarımında asıl amaç, malzemede ve sistemde varyasyon (hedef değerden uzak yani kaliteli olmayan) yaratan kontrol edilemeyen değerleri, üzerinde kontrol edilebilen (değişkenlerin) değerlerini en uygun belirleyerek, ürün ve işlemdeki değişimleri en aza düşürmektir. Taguchi, bu sisteme sağlam tasarım adını vermiştir.

Isı, nem, toz, gibi etkiler, alıcının kullanımındaki etkenler ve ürünlerdeki farklılıklar kontrol edilemeyen faktörlerdir. İyi bir üretim basamakları, kalitesizliğe neden olan kontrolü mümkün olmayan bir faktörün etkisi, kontrolü mümkün olan diğer değişkenlerin düzenlenmesi sonucu azaltılabilir.

Malzeme ve işlem parametre üretim aşamalarında, en uygun parametrelerin belirlenmesi ve en uygun ayarların yapılması birçok sayıda faktör bulunmaktadır. Tasarım faktörleri olarak yük, hız, sıcaklık, seçilen malzemeler, sürtünme katsayısı, aşınma oranının test sonuçlarını etkileyecek kayma hızı gibi birçok tasarım faktörü vardır [159]. Bununla birlikte bu faktörlerin birçoğu kendi aralarında bağlantılıdır. Kontrol edilebilen-edilemeyen değişkenlerin, ürün ve ürünün başarıma olan etkilerini istatistiksel deney tasarımı kullanılır.

Deney tasarımı yöntemiyle, birçok etkenin ürün üzerindeki değerlerini ekonomik olarak belirleyerek varyasyonu yaratan faktörlere karşı önlemlerin alınmasıdır [141].

5.4.3. Tolerans Tasarımı

İşlem basamakları istenilmeyen değişkenleri düşürmek yeterli olmadığı şartlarda tolerans tasarımı yönteminden faydalanılır. Üretim oluşturmada düşük maliyetli, büyük bir oranda değişen bileşenler veya faktörler kullanılabilir. İstenilmeyen durumları istenilen değere getirmek için bileşenlerin kalitesinin geliştirip tolerans tasarlama sistemi kullanılır. Tolerans tasarımında üç farklı kalite değişken bulunur.

Bu değişkenler sırasıyla

- En küçük en iyi ,
- En büyük en iyi,
- Hedef değer en iyi olmak üzere 3' e ayrılmaktadır.

5.4.3.1. En Büyük En İyi

Yapılan deneylerde kalite değerlerinde bir üst sınır olmadığından hedeflenen bir sonuçta olmaz. Ölçünün büyümesi durumunda verimlilik artacaktır. Örnek olarak malzemelerin dayanıklılığı verilebilir.

5.4.3.2. En Küçük En İyi

Bu yöntemde alt sınırın olması istenir. Negatif yönde bir etki göstermez. Tolerans azalması durumun daha iyi olmasını sağlar. En iyi örnek üretim aşamasında oluşan hurda kayıp malzeme miktarı verilebilir.

5.4.3.3. Hedef Değer En İyi

Bu kısımda sapmalar iki çeşittir. Vasıtasıyla iki kademedeki toleransa sahiptir. Bu ifadeye en iyi örnek olarak boyut kriterleri verilebilir.

5.5. Taguchi Metodunda Parametre Tasarımı

Parametre dizaynının liderlerinden biri olarak Genichi Taguchi kabul edilmektedir. Parametre üretimi, üretim ve işlem üretimi sırasında, istenmeyen özelliklerin ve kontrolü mümkün olmayan faktörlere karşı olan isteği azaltmak için kullanılan çalışmadır. Taguchi metodu yerinde kullanıldığında güzel sonuçlar alınır.

Güvenilir işlem basamaklarının tasarımında en öncü ilke, işlem istenilen değerini korurken istenilmeyen değerleri azami seviyeye indirgenecek etkileri belirlemektir. Varyasyona etki eden faktörleri belirledikten sonra, kontrol edilebilir değişkenler üzerinde çalışmalar yapılabilir. Kontrol edilmesi mümkün olmayan faktörler ise etkisini minimum seviyeye indirgenmeye çalışılır. Proses tasarımında önemli olan sürekli aynı değere ulaşmaktır [158].

5.5.1. Temel Çalışma Biçimi

Bu yöntem, birden fazla sayı da faktöre dayalı olduğu ürün ve işlemin kalitesini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bütün etki eden faktörlerin tüm bileşenleri test edilerek kurulumu yapılır. Bilimsel yapılan çalışmalarda çok sayıda faktör içerdiği için, oluşabilecek sonuçlar fazladır. Bunun yanında yapılan özel projelerde etkileşim olması deneme miktarını çoğaltmaktadır. Test kombinasyonlarını indirgemede çoğu zaman kısmi faktöriyel tasarım kullanılmaktadır. Taguchi faktöriyel çalışmalarda ortogonal dizilerden oluşan bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem dizaynların kullanılması verilen faktörlerin en az sayıda deney yapılması bütün değişkenlerin değişmeyen seviyeli olduğu ve etkilenmesi önem taşımadığı durumlarda standart ortogonal diziler kullanılmaktadır. Faktörlerin değişen seviye ve etkileşimlerin incelendiği hallerde ortogonal dizilerin dizayn edilmesi gerekmektedir. Birden fazla faktörün olduğu durumlarda birinci deney tasarımı planının ileriletilmesi İngiliz olan Sir R. A. Fisher 1920’de faktöriyel üretim olarak çalışmıştır. Tam faktöriyel üretiminde verilen deney seti için tüm olanakları ele alınmıştır. Deneylerin birçoğu çok sayı da faktör içerir. Tam faktöriyel tasarımda çok geniş çalışma alanı doğurur. Mesela tam faktöriyel tasarımda 7 faktörlü olmakla birlikte her faktörün 2 seviyeli olduğu bir test işlemi için tam $128 (2^7)$ deney yapılmalıdır [157].

Ayrıca Kısmi faktöryel üretimin deneylerinde belli bir grup seçilerek incelenir. Kısmi faktöryel hesabı kısa bir yol olarak yapılsada uygulama ve analiz için belli bir kural yoktur. Taguchi metodu ile yapılan çalışmada iki önemli açığı tamamlamıştır.

Bunlar;

> Deney ortamlarına uygun olarak belirlenen ortogonal diziler açık bir şekilde belirlenmiştir.

> Sonuçların tespitinde belirli metotlar belirlenmiştir.

Taguchi uygulamasında analiz metotlarının ve standart deney tasarımı tekniklerinin birleşimi ele alınır. Bu birleşimde kombinasyon diğer istatistiksel yöntem çalışmalarıyla üretimi test edilebilir. Bu deney kombinasyonlarının nasıl oluştuğunu açıklamak faydalı olacaktır.

Mesela bir A(sıcaklık) faktörünü düşünürsek. A faktörünün eğer 2 seviyesi varsa (200°C ve 400°C) her iki seviye için ayrı ayrı çalışma yapmak gerekir.

Faktör A: Seviye 1 = $A_1(200^{\circ}\text{C})$ Seviye 2 = $A_2(400^{\circ}\text{C})$

Faktör sayısını 2'ye çıkardığımızda ve her bir faktörde 2 seviye olduğu durumda, kombinasyon sayısı aşağıda gösterildiği şekilde 4' e çıkar.

A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 ve A_2B_2

Faktör sayısı 3 seviye durumu 2 olduğu durumda $2^3=8$ deneme ile karşı karşıya kalırız.

Bunlar;

$A_1B_1C_1$, $A_1B_1C_2$, $A_1B_2C_1$, $A_1B_2C_2$, $A_2B_1C_1$, $A_2B_1C_2$, $A_2B_2C_1$, $A_2B_2C_2$

görüldüğü gibi bütün kombinasyonların denendiği tam faktöryel tasarımda, faktör seviyesi artarsa, deney sayısı 2 seviyeli deneylerde ikinin kuvvetleri şeklinde artmaktadır. Farklı faktör ve seviyeli deneyler için tam faktöryel tasarım ve Taguchi metodu için gerekli deneme sayıları Tablo 5.1. de verilmiştir. Burada deney sayılarındaki farklılık bariz bir şekilde görülmektedir [157].

Tablo 5.1. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar [157].

Faktör	Seviye	Deney Sayısı	
		Tam Faktöryel Tasarımı	Taguchi Metodu
2	2	$4(2^2)$	4
3	2	$8(2^3)$	4
4	2	$16(2^4)$	8
7	2	$128(2^7)$	8
15	2	$32768(2^{15})$	16
4	3	$81(3^4)$	9

5.5.2. Deney Tasarımı

Deney Tasarımı; İşlem açısından önem arz eden faktörler ve seviyelerinin belirlenmesi, veri analizinde kullanılacak tekniklerin belirlenmesi, her faktör için kaç tekrar yapılacağına karar verilmesi ve deneysel veri sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanması sürecinin tamamıdır. Deney Tasarımı, bir süreçteki girdiler üzerinde arzu edilen değişkenlerin uygulanması sonucu cevap değişkeninde meydana gelen değişikliklerin, elde edilerek yorumlanması olarak tanımlanır. Deney tasarımı içerisinde geçen tasarım yapılan planları ve projeleri açıklar. Tasarım farklı durumlarda meydana gelir. Mühendislikte tasarım, proses dizaynı ve ürün tasarımı anlaşılır [141]. Deneylerin tasarlanması için, tasarım faktörlerinin seçimi önemli bir aşamadır [159, 160].

Deney tasarımına başlamadan ürün ve takip sürecinde iyi bir bilgi birikimine sahip olmamız gerekir. Kullanılacak yöntemleri etkileri belirlenmelidir. Faktörler iyi tanımlamak için bilgi alışverişi yapılmalıdır. Taguchi tüm faktörlerin ve bunların seviyelerinin belirlenmesinde fikir paylaşımı tekniğinin önemli bir adım olarak görmüştür.

Taguchi tasarımı seçilirken;

- Kontrol faktörü sayısı
- Her bir faktörün seviye sayısı
- Deney çalıştırma sayısı
- Diğer şartların sisteme etkileri (maliyet, zaman, üretebilme durumu) göz önüne alınır.

Deneyler dinamik ve statik sonuçlu olmak üzere 2 türlü yapılabilmektedir. Statik sonuçlu deneylerde kalite değişkenleri sabittir. Dinamik sonuçlu deneylerde ise kalite değişkenleri verilen değer arasındadır [141].

5.5.2.1. Statik Sonuçlu Tasarım

Taguchi metodunda önemli iki hedef ulaşılması planlanır. Bunlar;

- 1- Kalite değişkenini hedefe mümkün olduğunca yaklaştırmak,
- 2- Varyansı, yani hedef değerden sapmayı azaltmaktır.

Statik sonuçlu tasarımlar kalite değişkeninin sabit seviyeli olduğu tasarımlardır. Bu tür tasarımlarda hedef değerden sapmayı minimize etmek için bir değişim ölçüsü

gerekmektedir. İşte bu noktada Taguchi deney sonuçları S/N (Signal/Noise) oranlarını arasındaki farkı azaltmak için tasarlanmıştır [157, 158].

Bu yöntemde, ürünleri etkileyen proses parametreleri iki ana gruba ayrılır: kontrol faktörleri ve gürültü faktörleridir. Kontrol faktörleri tasarım veya üretim sürecinde kararlılık için en iyi koşulları seçmek için kullanılırken, gürültü faktörleri varyasyona neden olan tüm faktörleri belirtir [149]. Taguchi, istenen değerden sapma gösteren performans karakteristiğini ölçmek için kayıp fonksiyonu kullanılır. Kayıp fonksiyonunun değeri, kalite özelliklerini hesaplamak ve sayısız parametreyi değerlendirmek için sinyal(signal)-gürültü(noise) oranına (S/N) dönüştürülür. S/N oranı bulmak için ortalamanın (sinyal), standart sapmaya (gürültü) oranı alınmaktadır. Genellikle, standart S / N oranı, performans özelliklerini genel olarak üç kategorisine sahiptir; en küçük-en iyi, en nominal-en iyi ve daha iyidir. Her tasarım parametresinin S / N oranı S / N analizine dayanarak hesaplanır [159, 161].

En küçük, en iyi:

$$\frac{S}{N_L} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.1)$$

En büyük, en iyi:

$$\frac{S}{N_L} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2)$$

Nominal, en iyi:

$$\frac{S}{N_T} = -10 \log \left(\frac{\tilde{y}}{s_y^2} \right) \quad (5.3)$$

n: incelenen deney sayısı

y_i: gözlenen deneysel veriler

s: hedef değer [162]

Statik bir tasarımda Taguchi tarafından belirlenmiş S/N oranları iyi analiz edilmeli ve istenen hedeflerde çalışılabilir. Seçilebilecek S/N oranları yukarıdaki bilgiler ışığında Tablo 5. 2.' de verilmiştir [141].

Tablo 5.2 Taguchi'nin Sinyal/Gürültü oranları [157].

Seçim	Amaç	Sonuç
En Büyük En İyi $S/W = -10(\log(\Sigma Y)/n)$	Sonucun maximize edilmesi	Pozitif
Hedef Değer En İyi $S/N = -10(\log(s^2))$	Sadece standart sapmanın azaltılması	Pozitif, sıfır ya da negatif
Hedef Değer En İyi $S/N = -10(\log(Y^2/s^2))$	Standart sapmanın ve ortalamanın belli bir hedef değerde olması	Ortalama sıfır olduğu zaman standart sapma da sıfır
En Küçük En İyi $S/W = -10(\log(\Sigma V)/n)$	Sonucun minimize edilmesi	Pozitif

5.5.2.2. Dinamik Sonuçlu Tasarım

Kalite değişkeninin belli bir değer aralığı kapsadığından sabit değildir. Dinamik sonuçlu bir çalışmada işleme anı ile sonuç arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve geliştirmek için kullanılır. Genel olarak gürültü faktörünün, kalite değişkenlerinin sistemin giriş anına bağlı olarak belirli değerler aldığı durumlarda kullanılır. Buna örnek olarak otomobilin ivmelenmesi verilebilir. Burada işleme başlama durumu otomobilin gaz pedalına basılmasıyla başlar ve dinamik sonuç otomobilin hızıdır. İdeal olarak işleme başlama anı ile sonuç arasında doğrusal bir ilişki olması gerekir. Duyarsızlık bu ilişki içerisinde gürültü faktörleri yüzünden minimum varyasyona ihtiyaç duyar. Bu yüzden dinamik tasarımlarda mümkün olduğunca deneme sayısı fazla tutulmalıdır [141].

5.5.3. Uygulama İşlemleri

Taguchi metodunun uygulama işlemleri sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- Problemin belirlenmesi.
- Hedeflerin belirlenmesi.
- Kalite değişkenleri ve ölçüm sisteminin belirlenmesi.
- Kalite değişkenlerini etkileyen faktörlerin seçimi ve seviyelerinin tespit edilmesi.
- Faktörlerin kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler olarak ayrılması.
- Etkileşimlerin belirlenmesi.
- Uygun ortogonal dizinin seçimi.
- Kontrol faktörleri ve etkileşimleri sütunlara atamak.

- i) Deneylerin yapılması ve sonuçları kaydetmek.
- j) Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin en iyi değerlerinin belirlenmek.
- k) Doğrulama deneyinin yapılması [157].

5.5.3.1. Problemin Belirlenmesi

Tasarlanan bir bilimsel çalışmanın en önemli ayağı Problemin belirlenmesi ve tanımlanması oluşturur. Çalışmanın başında yapılacak hatanın telafisi olurken sonraki aşamalarda telafisi hem maddi hem zaman açısından olumsuzluğa yol açar. Müşteriler ve mühendislik birimleriyle görüşülüp fikirleri alınmalıdır.

Problemin tespiti yapılırken öncelikle daha önceden belirlenmiş kalite değişkenleri kullanılır. Eğer mümkünse müşteri görüşleri ve eğilimlerinden faydalanılarak hedef daha da hassaslaştırılır. Çalışmada meydana gelecek olumsuzluklar ve değer sapmaları tam olarak netleştirilir. Meydana gelen sapmaların ne gibi kayıplar getirdiği iyice belirlenir. Söz konusu kayıplar itibar kaybı, maliyetin artması, müşteri tatminsizliği vs. olabilir. Bunlar arasında maliyet kaybını ölçmek kolay iken diğerlerini ölçmek zordur.

Etkileri uzun dönemde ortaya çıkar. Taguchi' nin deneyinde amaç uzun dönemde ortaya çıkacak kayıpların önüne geçmektir. Ekonomideki rekabet şartlarında itibarda ve dolayısıyla müşteride meydana gelebilecek kayıplar uzun dönemde ciddi hasarlar işletmelere bırakabilir. Bu nedenle ilk olarak bu tür kayıpların önüne geçilmeli ve müşteri memnuniyeti azami derecede sağlayabilmesine özen göstermek gerekir [158].

Problem belirlenirken küçük gözüken problemler ileriki dönemlerde büyük etkiler doğurabilir [157]. Taguchi yönteminin bundan sonraki dönemlerini ekip çalışması yapılarak verimliliği arttırılmalıdır.

5.5.3.2. Hedeflerin Belirlenmesi

Her işletmenin uygulamalarında belirli metodu ve amacı bulunmaktadır. Bu amaç ve metot belli bir üretim sayısına erişmek, alıcının memnuniyeti, bedeline düşürmek vb. olabilir. Bu açıdan incelenirse Taguchi metodunun iki önemli faktör vardır. Bunlar kalite çıtasını yükseltmek ve varyasyonu en az seviyeye indirmektir [157].

Kalite konuları düşünülecek olursa varyasyon, istenilen değerden uzaklaşma olarak açıklanabilir. İmalat değişkenleri testte belirtilen seviyelerde yapıldığında, bu değişkenlerin

ortalama değeri optimize olacaktır. Ancak ürünün kalitesinde, grup ortalaması yerine, grup dağılımı sayesinde temsil edilir. Meselâ, kaynak direnimi ortalama değeri, min. anlamı sınırının üstünde olduğu halde, grubun önemli oranı (%30-%40 gibi) testi geçemeyip reddedilebilir [141].

5.5.3.3. Kalite Değişkenleri ve Ölçüm Sisteminin Belirlenmesi

Kalite değişkeni alıcı tarafından üründe istenilen kaliteyi yakalamaktır. Bu basamakta arzulanan kalite değişkenleri tespit edilir. Bununla birlikte kalite değişkenlerinin ölçümü yapılırken ölçme yöntem ve mühendislik birimlerine başvurulabilir [141].

5.5.3.4. Kalite Değişkenlerini Etkileyen Faktörlerin Seçimi ve Seviyelerinin Tespit Edilmesi

Bu değişkenleri etkileyen faktörleri tespit ederken bu alanda önder kişiler ve kalite teknik elemanlarla çalışılmalıdır. Yapılması gereken en iyi yöntem beyin fırtınası tekniğidir. Bununla birlikte akış şeması ve sebep-sonuç diyagramlarından da yararlanılmalıdır [158].

Karşılıklı fikir alış verişi çalışma tekniğinde problemin uzman personellerin bir araya gelerek çözüm önerilerini vermeleri ve oylama işlemiyle etkili olan doğru çözüm belirlenir. Oylamada her personelin görüşü ele alınıp değerlendirilir. Etkili faktörler belirlenerek doğru çözüm bulunur [157].

5.5.3.5. Faktörlerin Kontrol Edilebilen Ve Kontrol Edilemeyen Faktörler Olarak Ayrılması

Faktörler kontrol edilebilen faktörler ile kontrol edilemeyen faktörler olmak üzere iki bölümde incelenir. Taguchi işlemi kontrol edilebilen faktörleri kullanarak kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini düşürmeye çalışacaktır. Seçilen faktörler en az iki seviyeli olmalıdır. Seviye sayıları ölçülebilen ve bununla birlikte seviyelerinin ayarlanması kolay olan faktörler kontrol edilebilir faktörler, seviyesi olmayan veya kontrolü güç olan faktörler ise kontrol edilemeyen yani hata faktörleri olarak ayrılmaktadır.

5.5.3.6. Etkileşimlerin Belirlenmesi

Taguchi Dizaynları ana etkileri üstünde çalışmak için kullanılmıştır. Arzulandığı takdirde 2 yönlü etkileşimler üzerinde de çalışılabilir. İki faktörün etkileşimli olması, faktörlerden birinin etkisinin diğerine bağımlı olmasıdır. A faktörünün etkisinin B faktörünün etkisini değiştirmesi gibi. Bu işlem $A*B$ şeklinde gösterilir. Mesela sıcaklıkla nem arasında insanlık için rahatlık açısından güçlü bir etkileşim vardır. Sıcaklıktaki artış küçük bir olumsuzluk verebilirken nemin artması daha büyük rahatsızlık verir.

Deneye başlamadan önce faktörlerin birbiri üzerindeki etkileri belirlenebilir. Bu noktada çok dikkatli çalışılmak gerektiği gibi doğru kararlar alınmalıdır [157].

5.5.3.7. Uygun Ortogonal Dizinin Seçimi

5.5.3.7.1. Ortogonal Diziler

Ortogonal diziler hangi denemede faktörün hangi seviyesini kullanılacağını belirler. İlk olarak Ünlü Fransız matematikçi Jacques Hadamard tarafından bir buluş olarak ortaya konmuştur.

Taguchi yöntemindeki en önemli adım, en iyi kalitede performans elde etmek için işlem parametresini optimize etmek gerekmektedir. İşlem parametresi sayısı artarsa, optimize edilmiş parametrenin elde edilmesi için birçok deney yapılmalıdır. Görevi kolaylaştırmak için Taguchi yöntemi, işlem parametrelerini az sayıda deneyle incelemek için ortogonal dizilerin tasarımını kullanmaktadır. [159, 162-168]

Geleneksel deney yaklaşımıyla karşılaştırıldığında, bu yöntem tepki işlevlerini modellemek için gerekli olan deney sayısını büyük ölçüde azaltır [169].

Ortogonal düzenin en önemli faktörü, birden fazla özelliği min. sayıda test ile değerlendirilmesini sağlaması ve alışlagelmiş metottun haricinde faktör basamakları birer birer değiştirme yapma yerine birlikte değiştirme yapmayı önermesidir. Normal 2^k değişkenlerde bir deneysel tasarım kurulacaksa tam faktöriyel oluşumu gereği 2^k tür deneyi yapılması gerekir. İşlem basamaklarından bir tanesiyle oynayıp diğer değeri sabit tutularak deney yürütülür. Gelişen çalışmalar sonucunda Taguchi benzer deneme planları geliştirerek bu planların vereceği sonuçla 2^k denemenin sonuçları aynı olacağını ortaya attı. Bu fikrinde haklı olduğunu da deneyleriyle ispatladı. Bu standart deneme planlarının

esas eş zamanlı olarak birden fazla faktörün kademelerini değiştirerek deneme sayısında aşırı bir azalma yapmasına dayanmaktadır.

Mesela yedi faktörün tespit edildiği bir deney için $2^7=128$ adet uygulamayı gerçekleştirme gerekir. Oysa Taguchi metodunda bu işlem için 8 uygulama yeterli olmaktadır. Bu şekilde açıklanabilir. Tablo 5.3’de 2 uygulama planı görülmektedir. Buna işleme göre 1 ilk seviyeyi, 2 ise ikinci seviyeyi gösterir. İlk 6 değişken sabit iken 7. faktörde seviye değişikliği yapılmaktadır. Bu şekilde bütün faktörler sırayla denenmektedir. Sonuçta 128 işlem uygulanması gerekir. Taguchi dizaynına göre birinci denemeden ikinciye geçilince 7 faktörden 4’ü değiştirilmektedir. Akabinde diğer denemeler için de 4’ü 2.seviyede, 3’ü 1. seviyede olmak üzere her aşamada değişiklik yapılmaktadır. Bunda da toplam 8 deneme ulaşılabilir. Taguchi sonuçta yüksek oranda düşük maliyet ve zaman tasarrufu getirmektedir [158].

Tablo 5.3. 2^k ve Taguchi dizaynı deney planları

Deneme Numarası	Faktör numarası						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
:	:	:	:	:	:	:	:
128	2	2	2	2	2	2	2

2^k Dizaynı

Deneme Numarası	Faktör numarası						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taguchi Dizaynı

Bu dizilere her faktörde aynı miktarda farklı seviye bulundurduğundan ortogonal dizi denilmektedir. Ortogonal dize üçe ayrılmaktadır. Bunlar 3 seviyeli, 2 seviyeli ve 2 ve 3 seviyelidir. Belirlenen bu diziler standart olup Taguchi metodunun işlem basamaklarını oluştururlar. Taguchi metodu kullanılarak yapılacak tüm deney bu standart dizilerden birini seçip kullanmak zorundadır. Aksi takdirde başlangıçta faktörlere uygun dizi bulunamadıysa, faktörlerde bir takım yeni düzenlemeler yapıp dizilerden birini bulmak gerekmektedir. Sıklıkla kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{12} ve L_{32} iken 3 seviyeliler için L_9 , L_{18} , L_{27} dizileri bulunmaktadır. Her iki seviyenin karıştırıldığı dizilerden bazıları L_{18} , L_{36} , L_{54} dizileridir [157].

5.5.3.7.2. Ortogonal Dizi Seçimi

Ortogonal dizi seçimi seviye sayısı ve toplam serbestlik derecesi kullanılarak yapılır. Seviye sayısı önemlidir. Seviyelerin karışık olması durumunda bu karışıklık giderilip düzeltmeler yapıldıktan sonra toplam serbestlik derecesine incelenir. Bir dizinin toplam serbestlik derecesini bulmak için her bir faktörün ayrı ayrı serbestlik derecelerinin toplamak gerekir. Dizide sütunlara atanan faktörlere tek başına faktör yada iki faktörün etkileşimi olabilmektedir. Serbestlik dereceleri sırasıyla şu şekilde hesaplanmaktadır.

V_A : A faktörünün serbestlik derecesi V_{A*B} : A ve B etkileşiminin serbestlik derecesi
 k_A : A faktörü seviye sayısı

Faktör grubunun serbestlik derecesini bulmak için ise tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamak gerekir Bu aynı zamanda toplam deney sayısından bir çıkarmakla da bulunur.

V_T : Dizinin toplam serbestlik derecesi

N : Dizideki toplam deney sayısı

$$V_T = N - 1 \quad (5.4)$$

Serbestlik derecesi hesaplandıktan hemen sonra ortogonal dizi seçimi yapılır. Dizinin deneme sayısına hangisi uygun düşerse o derece serbestlik derecesini vermektedir. Toplam serbestlik derecesi en fazla seçilecek olan dizinin deneme sayısından bir eksik olabilir. Aksi taktirde eşit olması durumunda bir üst diziyi seçmek zorunlu olacaktır. Dolayısıyla mevcut serbestlik derecesine 1 eklendiği durumda eldeki dizilerden hangisine eşit olursa o seçilmelidir. Ancak hiç birine eşit olmaması durumunda ve herhangi ikisinin arasında kalıyorsa bir alt değil bir üstteki seçilir [158].

5.5.3.8. Kontrol Faktörleri ve Etkileşimlerin Sütunlara Atanması

Kontrol ve etkileşimlerin sütunlara ataması yapılmadan önce etkileşimler atanır. Aksi taktirde bazı sütunlar etkileşim olan diğer sütunlarla karıştırılabilir. Bunun anlamı bağımsız olarak değerlendirilemeyebilir. İki yönlü etkileşimler ele alınırken sütunlardan bazılarına faktör atanmaz. Taguchi dizaynı bir etkileşim tablosu bulunur. Etkileşim tabloları etkileşimlerin olduğu sütunları gösterir. Bu etkileşimler sütunlara atanırken etkileşim tabloları kullanılır [157].

5.5.3.9. Deneylerin Yapılması ve Sonuçların Kaydedilmesi

Ortogonal dizinin sütunlarına değişkenler yerleştirildikten daha sonra deney düzeni, kurulmuş olur ve testleri gerçekleştirmek için gereken fiziksel şartlar sağlanmaktadır. Akabinde deneylerin hangi sırayla yapılacağı belirlenir. Burada rassallığın sağlanması gerekir [157].

5.5.3.9.1. Deneylerin Yapılış Sırası

Deneylerin yapılış sırası belirlenirken en çok tercih edilen yöntem Rassallaştırma yöntemidir. Rastgele yapılan denemelerin yapılış sırasının, numara sırasına göre olmayıp belli bir rastgele şekilde yapılmasıdır. Uygulamadan oluşan sonuçların işlem sırası rassallık içermelidir. Bu şekilde test anında oluşabilecek ve sonuçları negatif yönde etkileyebilecek, fakat başta tahmin edilmemiş olan değişkenlik kaynaklarına karşı korunabilmek olasıdır. Rassallaştırma farklı biçimde yapılabilir. En çok kullanılan yöntemler;

- 1- Tamamen rassallaştırma,
- 2- Bloklar içinde tamamen rassallaştırmadır.
- 3- Basit tekrar

Tamamen rassallaştırma işleminde tüm testler seçilmede aynı şansa sahiptir. Bu yüzden ilk olarak arzu edilen deney yapılır. Akabinde deneyler rastgele sayılar tablosu kullanılarak belirlenen deney sırasıyla yapılır. Yineleme söz konusu olduğunda bir test sonuçlanana kadar bütün testler rassal olarak seçilir ve ikinci tekrar yapılırken deney sırası rassal olarak bir öncekinden farklı sırada seçilir. Deneyler tamamlanana kadar bu halde uygulanır. Basit tekrarda da bütün deneyler ilk test olarak seçilebilmek için aynı şansa sahiptir. Ancak ötekilerinden farkı, tekrarlar söz konusu olduğunda, seçilen deney için gerekli tüm tekrarlar art arda test edilir. Bu yöntem ucuz olmayıp, deneyin hazırlanışının zor ve zaman alıcıdır [157].

5.5.3.9.2. Deneylerin Tekrarlanma Sayısı

Tekrarlanma sayısı için en az bir deney yapılmalıdır. Birden fazla yapılan deneyin ortalamasında ortaya çıkacak küçük değişkenlerin belirtilmesi sağlanacaktır. Bazı

deneyler kolay ve ekonomik ya da çok maliyet ve zaman alıcıdır. Maliyeti yüksek deneyler pahalı ise bir deneme için bir test, ucuzsa bir deneme için birden fazla deney yapılır [158].

Test sonuçlarının çıktıları bilgisayar ortamında düzenlenen formların kullanılmasıdır. Minitab Release on beş sistem programı deney sonuçlarının kaydedilmesi için hazır bir form vermektedir [157].

5.5.3.10. Veri Analizi ve Kontrol Edilebilen Değişkenlerin En İyi Değerlerinin Belirlenmesi

Optimum faktör seviyelerinin tespit edilmesi beş yöntemle kontrol edilir. Bunlar;

- 1- Sıralama metodu
- 2- Gözlem metodu
- 3- Varyans analizi metodu
- 4- Sütun farkları metodu
- 5- Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi (FEGG) metodudur [157].

5.5.3.11. Doğrulama Deneyinin Yapılması

Son aşamada deney seçilen en iyi şartlar altında tekrarlanır. Bu doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler beklenen güven aralığının içinde ise bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerini veren kombinasyondur ve deneytasarımı amacına ulaşmıştır. Ancak doğrulama deneyi sonuçları belirlenen güven aralığı değerleri içerisinde değilse o zaman yapılan deney tasarımında bir başarısızlık vardır. Bu durumda proses tekrar incelenir ve hatalar tespit edilmeye çalışılır. Hataların bulunması ile deney tasarımı tekrar başlatılarak en iyi faktör-seviye kombinasyonu bulunmaya çalışılır.

Çalışmada varyans analizi kullanıldığından bu metot aşağıda kısaca verilmektedir.

5.5.4. Varyans Analizi

Varyans analizi, hangi bağımsız faktörün diğerine baskın olduğuna ve bu bağımsız değişkenin yüzde katkısını bulmak için yapılmaktadır [170,171]. Her parametrenin etkinliğini hesaplamak, varyans analizi, Roy (1990) kullanılarak mümkündür [161, 162].

Ürün veya proses geliştirmenin amacı; müşteri beklentileri ve ihtiyaçları ile ilgili olan ürün veya prosesin performans karakteristiğini geliştirmektir. Deneylerin amacı ise malzemelerin ya da işlem farklılıklarını denetlemek ve azaltmaktır. Sonra da başarıyı etkileyen parametrelerin hangileri olduğu ile ilgili bir karar verilmelidir.

Kalite ile ilgili tartişmaların büyük bir bölümü varyans ile ilgili olduğundan dolayı, deneysel verilerin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır. ANOVA, süreç parametrelerini tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir ve etkileşimleri, kalite özelliklerini önemli ölçüde etkiler [172, 173]. Bu analizde toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve karelerin toplamı, serbestlik derecesi, ortalama kareler gibi niceliklerin hesaplanması için kullanılır. Varyans analizinin temelinde kontrol edilmeyen değişkenlerin analizinin yapılabilmesi esasına dayanmaktadır. Bu işlemin temelinde İngiliz istatikçi ‘‘Fisher’’ (1929) yatmaktadır. Bu analiz sisteminde tek, iki ve çok faktörlü olmak üzere birçok uygulama alanı oluşturmaktadır. Varyans analizi Taguchide ortogonal dizileri iki ve üç kademeli olduklarından dolayı burada kullanılmaktadır [158, 174].

Faktörlerin nederece etkilerinin belirlenmesinde kullanılan varyans analizi hesaplamalarında kullanılan dizgeler bu şekilde sıralanabilir.

SS_A : A faktörü için kareler toplamı

SST : Tüm değerlerin kareleri toplamı

SS_o : Hata kareleri toplamı

V_T : Toplam serbestlik derecesi

V_A : A’nın serbestlik derecesi

$V_{A \times B}$: A ve B interaksiyonunu serbestlik derecesi

V_o : Hata varyansı

N : Elde edilen toplam veri sayısı

n_A : A faktörü için veri sayısı

T : Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması

y_i : Gözlenmiş değer

k_A : A faktörünün kademe sayısı [158, 174].

5.5.4.1. Kareler Toplamı

Toplam varyansı bileşenlerine ayırırsak üç çeşit varyasyonla karşılaşılır.

1. Performans karakteristiğini etkileyen faktörlere göre (A, B, C ...) varyasyon.
2. Bu faktörlerin etkileşimlerine göre varyasyon,
3. Hataya göre varyasyondur.

Eğer A ve B gibi iki faktörümüz ve bu faktörler arasında bir etkileşim varsa toplam varyasyon aşağıdaki gibi yazılır.

$$SST = SSA + SSB + SS_{AXB} + SSo \quad (5.5)$$

$A \times B$, A ve B faktörleri arasındaki etkileşimi temsil etmektedir.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.6)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.7)$$

Bir hata varyasyonunu bulmak için, toplam kareler toplamından tüm faktörler ve etkileşimlerin kareler toplamını çıkarmak gerekir.

$$SSo = SST - SSA - SSB - SS_{AXB} \quad (5.8)$$

Ortogonal düzende sütunların toplam kareler toplamı SS_T 'yi vermektedir.

$$SS_T = \sum SS_{SÜTUN} \quad (5.9)$$

5.5.4.2. Serbestlik Derecesi

Serbestlik derecesi, ANOVA hesaplarını tamamlamalarda önemli bir faktördür. İstatistiksel olarak serbestlik derecesini tanımlamada, verilerden elde edilen her bir parça bilgi ile adlandırılır. Serbestlik derecesi genel olarak bir sonuca varabilmek için yapılması gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısı olarak tanımlanır. Benzer şekilde kareler toplamı gibi serbestlik derecelerinin toplamı da toplam serbestlik derecesini vermektedir [174].

İki faktör ve bunların etkileşimleri düşünülürse:

V_T = Toplam Serbestlik derecesi

$$V_T = V_A + V_B + V_{AXB} + V_O \quad (5.10)$$

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşit olmaktadır.

$$V_T = N - 1 \quad (5.11)$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir.

$$V_A = k_A - 1 \quad (5.12)$$

$$V_B = k_B - 1 \quad (5.13)$$

Etkileşimin serbestlik derecesini bulmak için ise etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımını bulmak gerekir.

$$V_{SXB} = (V_A) * (V_B) \quad (5.14)$$

Hata serbestlik derecesini bulmak için ise; toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkartılarak bulunmaktadır.

$$V_O = V_T - V_A - V_B - V_{AXB} \quad (5.15)$$

Bir denemelerin tekrarları söz konusu olduğunda ise toplam serbestlik derecesi

$$V_T = \text{Deneme sayısı} \times \text{Tekrar sayısı} - 1 \quad (5.16)$$

5.5.4.3. Varyans

ANOVA tablosundan hesaplanabilen başka bir değer tanımlayıcısı istatistikte varyans hesabıdır. Genellikle varyans, hata varyansı olarak bilinir. Hata kareleri toplamının hata serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değer hata varyansını vermektedir.

V_e = Hata varyansı

Hata varyansı, deneylerdeki ölçüm hatalarını da içine alan hata faktörlerden (kontrol edilemeyen) kaynaklanan değişimin ölçüsüdür. Benzer şekilde faktörler ve etkileşimlerinin varyansları da hesaplanmaktadır.

A faktörü için varyans:

$$V_A = \frac{SS_A}{V_A} \quad (5.17)$$

B faktörü için varyans:

$$V_B = \frac{SS_B}{V_B} \quad (5.18)$$

AxB etkileşimi için varyans formülü:

$$V_{AXB} = \frac{SS_{AXB}}{V_{AXB}} \quad (5.19)$$

şeklinde bulunur.

Hata kareler toplamını, ortogonal düzende atama yapılmamış olan sütunların toplam kareler toplamı vermektedir [158]. Sütunların hata varyansının kestiriminde kullanılması yaklaşımı tüm sütunlara faktörler atandığında da kullanılabilir. Deneyler yönlendirilmeden önce performans karakteristiğini etkileyeceği düşünülen faktörler aslında deneye bir etkisi bulunmayabilir. Bu faktörlerin atandığı sütunların varyansı küçük olacağından bunlar hata varyansının kestiriminde kullanılmaktadır. Eğer bir faktörün deney sonucuna katkısı yüzde olarak küçük bir değerse, analiz hesaplamalarında göz ardı edilmesi tasarımı daha fazla önem arz eden faktörlerin belirlenmesinde gerek duyulur. Deney sonucuna katkısının yüzdesel etkinin yanı sıra, kareler toplamında hata varyansının hesaplanmasında hangi sütunların birleştirileceğinin belirlenmesi için kullanılabilir. Bir hata varyansı için sütun belirleme işlemi yapılırken F-testi de uygulanabilir. F testine göre; etkisi en çok olan sütunu takip eden küçük etkili sütuna göre önemli olup olmadığını görmek için uygulanmaktadır. Bununla birlikte eğer önemli bir F oranı bulunmazsa, bu iki sütunun etkisi bir sonraki küçük etkili sütunla karşılaştırılmak üzere birleştirilir. Yapılan bu işlem önemli bir F oranı buluncaya kadar devam etmektedir [174].

5.5.4.4. F Testi

1920’de Fisherın ismi verilen F testi, kalite karaktresiklerine %95 güven düzeyinde önemli bir etkisi olan parametrenin belirlenmesinde kullanılır [175]. Testler yapıp varyanslar hesaplandıktan sonra F-testi uygulanır. Standart F-testi uygulanırken, hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F-testi varsayımları yerine getirilmediği takdirde, önem derecesi hesapları doğru sonuçları yansıtmayabilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlardan sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabilceği belirtilmektedir [163]. F- testi uygulanırken analiz sırasında hesaplanan F değerleri ile belirlenen güven seviyesindeki F tablo oranları karşılaştırılarak, tablo oranından büyük F değerine sahip faktörlerin performans karakteristiği üzerinde etkili olduğu düşünülür. Verilerden elde edilen F değeri faktör ya da etkileşimi varyansının hata varyansına oranıdır [176].

6. ÇELİKLERDE ISIL İŞLEM

Üretimi yapılan parçaların çalışma şartlarına göre değerlendirilmesiyle, parçanın tamamı veya bir kısmının, çekirdeğe kadar veya sadece cidar yüzeyi boyunca sertlik kazanması istenebilir. Bu gibi durumlar söz konusu olduğu zaman istenen özelliğe göre farklı ısıt işlemler uygulanması gerekir [177]. Çelikte ana ısıt işlem prosedürleri östenit dönüşümünü içerir. Bu dönüşüm ürünlerinin özelliği ve görünüşü çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Isıt işlemde ilk adım östenit oluşturmak için malzemeyi belli bir kritik sıcaklığıyla ısıtmasıyla başlar.

İstenen sertlik ve mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla yapılan su verme ve menev işlemi yapılmaktadır. Özellikle parçanın tüm kesitinin sert olması istene durumlar için kullanılır.

6.1. Su Verme

En basit şekilde, malzemenin sertleştirme sıcaklığına kadar ısıtılması ve ani olarak soğutulmasıyla sertleştirilmesi şeklinde tariflenebilir. Konuyla ilgili olarak, sertleştirme sıcaklığının seçimi, ısıtma hızı, soğutma ortamı seçimi ve soğutma hızı gibi faktörlerin birbiri ile olan ilgileri ve doğru değerlerin belirlenmesi uzmanlık gerektiren konulardır. Sertleştirme sıcaklık aralıkları, maksimum sertliğin, en küçük tane yapısı ile elde edilmesini sağlayacak şekilde bir dizi deney ile belirlenen değerlerdir. Bu değerlerin altında veya üzerinde yapılacak ısıtma, sertlik değerinin düşük, nihai iç yapının ise istenen şekilde olmaması ile sonuçlanacaktır. Ayrıca sertleştirme sıcaklığında tutma süresi önemli olup, malzemenin alaşımlı, az alaşımlı olması ve tane boyutlarının uygunluğu ile bağlantılıdır.

Su verme ortamının seçimi, malzemenin alaşım miktarıyla alakalıdır. Düşük alaşımlı çelikler için daha çok su ve tuz banyoları tercih edilirken, yüksek alaşımlı çelikler için çarpılma riski göz önünde bulundurularak yağ gibi yumuşak ortamlar tercih edilir. Yoğunlukla kullanılan soğutma ortamları; su, yağ, tuz banyosu ve hava şeklinde belirtilebilir.

6.1.1. Suda Su Verme İşlemi

Suda su verme işlemiyle ilgili en önemli özelliklerden biri, sıcak parçayı soğutmak için kullanılan suyun sıcaklığıdır. 20 - 40 °C arasındaki soğutma suyu sıcaklığı en verimli sıcaklıktır. 60°C üzerindeki sıcaklıklarda soğutma hızı fazlasıyla düşer.

6.1.2. Yağda Su Verme İşlemi

Yağda su verme işlemindeki yağın soğutma hızı, suyun soğutma hızından yavaştır. Soğutma hızının en verimli olduğu yağ sıcaklığı 50 - 80 °C arasındadır. Ayrıca yağın sürekli olarak hızlı biçimde karıştırılması verimi büyük ölçüde artırır. Alaşımlı çeliklere yağ içinde su verilir ve beynitik yapı elde edilir.

6.1.3. Hava-Fırın Ortamında Su Verme İşlemi

Havada su verme işlemi diğer yöntemlere göre en az verimli olanıdır. Bunun en büyük sebebi havanın soğutma hızının çok düşük olmasıdır. Hatta sakin havanın soğutma hızı suyun % 1 'inden daha azdır. Bu sebeple bu yöntem sadece yüksek hız çelikleri için tercih edilebilir. Fırın ortamı ise kademeli soğumalar tercih edildiğinde kullanılmaktadır.

7. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

İç, Y.T. ve Yıldırım, S. (2012), bir çamaşır makinesi modelinin kalite özelliklerine etki eden faktörleri ve her bir faktör için uygun seviyeler belirlemiştir. Faktörlerin kalite özelliklerinde hangi seviyelerinde kalite karakteristiklerini en olumlu etki ettiğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları görüşmeler sonrası L8 ortogonal dizinine karar vererek çok az denemeyle başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Kalite karakteristiği üzerinde yıkama performansı Taguchi yöntemiyle incelendiğinde, A2B2C3 faktör seviyeleri en iyi sonuçları tesbit etmişlerdir [178].

Pandey, K.P. vd. (2016), Hardox 400 çelik yüzeyinin aşınma özelliklerini geliştirmek amacıyla tungsten karbid sertleştirici elektrot kullanarak, metal ark kaynak yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kullanılmış olan elektrot, 4.0 mm çap ve 350 mm uzunluğa sahiptir. Yüzey kaplama işleminde kaynak işlemi, 140A(Amper) ve 160A tercih edilmiştir. Tungsten karbid elektrotundaki karbonun varlığı ve Cr, Si gibi elementlerin sertliğe olan etkisi vurgulanmıştır. Kaplama işlemiyle birlikte ana metalin sertlik değeri 1.7 kat arttığı ve Amerikan Test Malzemeleri Derneği (ASTM) B117 tuz spreyle yapılan korozyon testi sonucunda herhangi bir pas ve leke meydana gelmediği belirtilmiştir. Aşınma direnci, artan amperle ve alaşım elementlerinin nufuziyeti sayesinde arttığı belirtilmiştir [179].

Gür, A.K. ve Kaya, S. (2017), yaptıkları çalışmada AISI 430 ferritik paslanmaz çelik yüzeyine FeCrC, SiC, B₄C tozlarını PTA kaynak yöntemiyle alaşımlandırılmıştır. Alaşımla sonucu kaplama tabakaları farklı aşındırıcı, yük ve mesafe parametrelerinde Taguchi yöntemine göre aşınma işlemine tabi tutulmuştur. Abrasiv aşınma kütle kayıp sonuçları Taguchi metodunda statik sonuçlu deney tasarımdan en küçük-en iyi kontrol karakteristiği ile optimize edilerek sonuçlar grafiksek yöntemlerle analiz edilmiştir. Ortogonal dizilerden L27 (3*4) kullanılarak çok az denemeyle az işlem gerçekleştirmiştir [180].

Yao, M.X. vd. (2005), plazma transferli ark kaynak metoduyla Co esaslı Cr-W-C-Mo Stellite alaşımlarıyla ürettikleri, kaplama tabakalarının abrasiv, adhesiv ve eroziv aşınma gibi mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca bu kaplama tabakalarının korozyon direncini incelemiştir. Bu çalışmada, Co esaslı kaplama tabakasının mikroyapısında ötektik üstü ve ötektik altı karbürlerin varlığı sayesinde aşınma ve korozyon direncinin ana malzemeye göre oldukça iyi olduğunu belirlemiştir [181].

Zhang, L. vd. (2007), plazma transferli kaynak yöntemiyle düşük karbonlu çeliğin yüzeyini Fe esaslı alaşımlarla kaplamışlar ve üretilen kaplama tabakasının karakteristiklerini incelemişlerdir. Kaplama tabakasında östenit ve hiperötektik yapılar elde edilmiştir. Kaplama tabakasında birincil fazlar, dentritik östenit γ -Fe ile $(\text{Fe,Cr})_7(\text{C, B})_3$ ve $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}_2$ elde edilmiştir. γ -Fe fazı dengesiz katı çözelti fazıdır. Fe esaslı kaplama tabakası abrasiv aşınma testi sonuçlarında, kaplama tabakasının aşınma direncinin düşük karbonlu çelikten çok yüksek çıktığı tesbit edilmiştir. Buna dağınık dentritik östenitler, sert karbür ve borürler katkıda bulunmuştur. Kaplama tabakasının maksimum mikrosertliği 780 HV çıkmıştır [182].

Gür, A.K. vd. (2013), yaptığı çalışmada AISI316 paslanmaz çeliğin yüzeyini PTA metoduyla farklı ısı girdilerinde ve farklı kombinasyonlara FeCrC/B₄C tozlarıyla kaplamıştır. Çalışmada kaplama tabakasında oluşan karbür ve borür fazları tespit edilmiştir. Ayrıca kaplama tabakasının altlık mazlemede sertlikte belirgin artışlar olduğunu gözlemlemiş ve bu çalışmada mikroyapı ile mikrosertlik arasında ki bağıntıyı değerlendirmiştir [183].

Gür, A.K. vd. (2014), yaptığı çalışmada AISI 316 paslanmaz çeliğin yüzeyini PTA metoduyla farklı ısı girdilerinde ve farklı kombinasyonlara FeCrC/B₄C tozlarıyla kaplamıştır. Kaplama tozlarının kullanılan altlık malzemenin yüzey sertliğine önemli ölçüde etki ettiğini gözlemlemiştir. Kaplama tabakasının abresive aşınma direncini değerlendirirken Taguchi dizaynından faydalanmış ve optimum değerleri hesaplamıştır [184].

Konovalov, S. vd. (2016), Aşınmaya dayanıklı çelik gruplarından Hardox 450'nin yüzeyine Özlü tel kullanılarak yüzey kaplama işlemi yapılmış ve bu oluşumun metalografik incelemesi yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda, yapıda $\text{M}(\text{Cr, Fe, W})_{23}\text{C}_6$ NbC karbürle ve intermetalik fazlar tesbit edilmiştir. Malzemenin aşınma direncinin, Hardox 450 çeliğinden daha yüksek olduğu ve ikinci birikmiş tabakanın malzemenin tribolojik özelliklerini pek fazla etkilemediği sonucuna varmışlardır. Gelişen çok fazlı mikron altı ve nanoyapıya bağlı olarak, çökelmiş tabakanın mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesinin mümkün olduğu bulunmuştur. Ayrıca Fe, Cr, W ve Nb karbürlerinin mukavemet özelliklerini artırdığı tespit edilmiştir [185].

Mindivan, H. (2013), darbeli plazma nitrürleme ve borlama işlemlerinin bir kombinasyonunu içeren dubleks muameleyle, Hardox 400 çeliği için iki aşamalı bir yöntemle kaplama işlemi yapılmış ve XRD işlemi sonucu FeB, Fe₂B, Fe₄N gibi sert fazlar tespit edilmiş akabinde aşınma testine maruz bırakılarak, darbeli plazma nitrasyonundan

sonra borlama işleminin, sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmada faydalı bir etkiye sahip olduğunu mikroskobik incelemelerle ortaya koymuştur [186].

Kıvak, T. vd. (2014), kuru öğütme altında PVD ve CVD kaplı karbür uçlar ile çeliklerin işlenebilirliğini değerlendirmek için deneyler gerçekleştirdi. Çeliğin işlenebilirliği için Taguchi metodu ve regresyon analizi kullanılmıştır. Taguchi' de ortogonal dizi olarak L₁₈ tercih edilmiştir. Parça işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kenar garnitürleri üzerindeki etkisini ANOVA analizi kullanılarak belirlemiştir. Deneylerden, besleme hızının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör olduğu ve kesim hızının yan kenarlığı etkilediği bulunmuştur [187].

Sudeepan, J. vd. (2014), yaptıkları çalışmada bir polimer matrisli kompozit üretmiş ve daha sonra Taguchi dizaynını kullanarak çok az deney yerine daha az deneme yaparak başarılı sonuçlar almıştır. Taguchi dizaynında L27 ortogonal dizinini kullanılmıştır. Sürtünme aşındırma deneyinin akabinde ANOVA yöntemiyle varyans analizi yapmışlardır. Tasarım parametrelerinden polimer kompozit malzemenin özel aşınma oranı ve sürtünme katsayısı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Deney sonucunda, sürtünme katsayısının ve özel aşınma oranının dolgu maddesi içeriği, hız ve yükteki artıştan önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. ANOVA varyans analizi sonucunda tribolojik özellikleri etkileyen en önemli etki faktörü olarak normal yük ve bunu takiben dolgu maddesi içeriği ve hızı olarak bulunmuştur. Ayrıca Optimum parametre kombinasyonunda yıpranmış yüzeyler için aşınma mekanizmalarını tanımlamak için ve çıkan sonuçları desteklemek için taramalı elektron mikroskobundan faydalanılmıştır. Polimer sürtünme katsayısı için en uygun koşul kompozitlerin, ağırlıkça % 5 dolgu içeriği, 35 N uygulanan yük ve 120 dev/dak. hız olduğu belirlenmiştir [188].

Khare, S.K. vd. (2017), yaptıkları çalışmada korojenik duruma maruz kalan 4340 çeliğin, torna tezgâhlarında işleme parametrelerinin optimizasyonu taguchi tekniğini kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve eğim açısı gibi talaş kaldırma parametreleri, AISI 4340 çelik üzerindeki minimum yüzey pürüzlülüğü için optimize edilmiştir. Taguchi yöntemiyle planan bu deney için L9 ortogonal dizi seçilmiştir. Bununla birlikte S/N oranları tespit edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Statik sonuçlu tasarımlardan S/N oranı hesaplamada en düşük en iyi problemi seçilerek hesaplanmıştır. Ve daha sonra etki faktörleri belirlenmiştir. Kesme hızı ve kesme derinliği yüzey pürüzlülüğünde en etkili faktör olarak belirlenmiştir [189].

8. DENEYSEL YÖNTEM

Yüksek aşınma direnci gereksinimi olan uygulamalarda parçaların çalışma ömürleri göz önünde bulunduğunda bu ihtiyacı karşılamak ve bu aşınmaya direnci sürecini uzatmak için Hardox 400 çelik kullanılmıştır. Hardox çeliğinin kullanılmasında amaç, bu çeliklerin aşınma direnci istenen endüstriyel uygulamalarda kullanılması, kolay bulunabilirliği, yüksek toklukları, rahat bükülebilme ve kaynak edilebilmeleri gibi özellikleri göz önüne alınarak seçilmiştir. PTA yönteminin kullanılmasının nedeni ise, geleneksel olarak kullanılan yüzey alaşımlama tekniklerine göre daha yeni bir uygulama olması, yüksek yoğunlaşma oranı ve yüksek ısı girdisi, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, uygulanmasında otomatik tezgâhlar kullanılması Plazma ark kaynağının donanımlarının, benzer özelliklere sahip lazer ekipmanlarından daha ucuz oluşudur.

Taguchi deneysel tasarım metodunun kullanılmasının nedeni ise; çok fazla sayıda numunenin tamamını aşındırmak yerine daha az sayıda numuneyi çok daha fazla faktör seviyelerinde farklı parametrelerde aşındırabilme kolaylığı sağlamasındandır.

Bu çalışmada, mikroalaşımlı Hardox 400 çelik yüzeyine plazma transfer ark (PTA) yöntemiyle alaşımlama işlemi yapılmıştır. Yüzey alaşımlama işlemi için B_4C , $FeCrC$, SiC , TiC tozlarının ağırlıkla farklı kombinasyonları kullanılmıştır. PTA yöntemiyle farklı kombinasyonlara sahip tozlar Hardox 400 çeliğine ergitilerek alaşımlandırılmıştır. PTA alaşımlama işlemi sonucunda alaşımlandırılmış tabakalarının mikroyapı, mikrosertlik ve kaplama tabakalarının abrasiv aşınma direnci incelenmiştir. Abrasiv aşınma direncinde Taguchi deneysel tasarım metodundan faydalanılmıştır. Bu amaçla deneyler dört aşamada yapılmıştır. Bunlar;

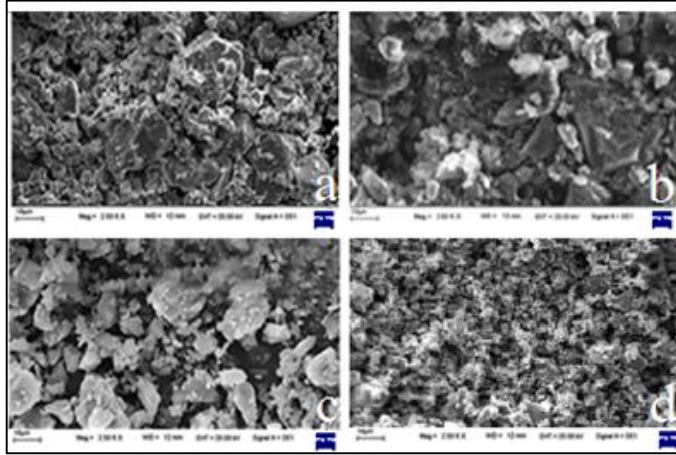
1. Hardox 400 mikroalaşımlı çelik çeliğin PTA yöntemiyle alaşımlanması,
2. Alaşımlanmış numunelerin mikroyapılarının incelemeleri,
3. Alaşım tabakasının mikrosertlik incelemeleri,
4. Alaşımlanmış numunelerinin abrasiv aşınma davranışlarının Taguchi deneysel tasarımıyla belirlenmesi

8.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, altlık malzemesi olarak 10x10x100 mm boyutlarındaki Hardox 400 mikroalaşımlı çelik kullanılmıştır. Tablo 8.1’de Hardox 400 mikroalaşımlı çeliğin, B₄C, FeCrC, SiC ve TiC tozlarının kimyasal bileşimi verilmektedir. Şekil 8.1’de ise B₄C, FeCrC, SiC ve TiC tozlarının SEM mikroyapılarındaki morfolojisi görülmektedir.

Tablo 8.1 AISI 430 paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi

	Kimyasal Bileşim (% ağırlık)										
	Cr	C	B	Ni	Si	Mn	W	P	S	Mo	Fe
HARDOX 400	1,4	0,32	0,004	1,5	0,7	1,6	-	0,025	0,01	0,6	-
FeCrC	70.21	12.44	-	-	1.08	-	-	-	-	-	Diğ.
B ₄ C	%99 Saflıkta										
SiC	%99 Saflıkta										
TiC	%99 Saflıkta										



Şekil 8.1. Alaşımlamada kullanılan tozların morfolojisi (a. B₄C Tozu, b. FeCrC Tozu, c. SiC Tozu, d. TiC Tozu)

EHT= 20.00 kV, Signal A= SE1, WD= 9.0 mm Mag= 2.50 K X parametrelerinde görüntü alınmıştır.

8.2. Yüzey Alaşımlama İşlemi İçin Numunelerin Hazırlanması

PTA ile alaşımlama işlemi öncesi plaka halinde bulunan Hardox 400 numune 10x10x100 mm boyutlarına Manisa’da Turuva Kalıp Tel Erezyon Tasarım Makine Yedek Parça Desen işletmesinde tel erezyon makinesi (Şekil 8.2) yardımıyla getirilmiştir.

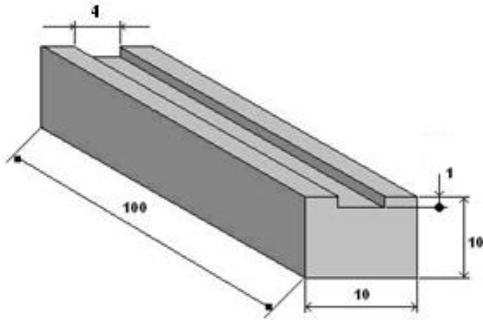


Şekil 8.2. Tel erezyon makinesi

Alaşım lama öncesi Hardox 400 çelik numunelerin yüzeyine Elazığ Gazi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde yatay freze tezgahında (Şekil 8.3) 4 mm kalınlığında ki dairesel testere diş kullanılarak 1 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Şekil 8.4'de numunenin şematik resmi ve boyutları görülmektedir.

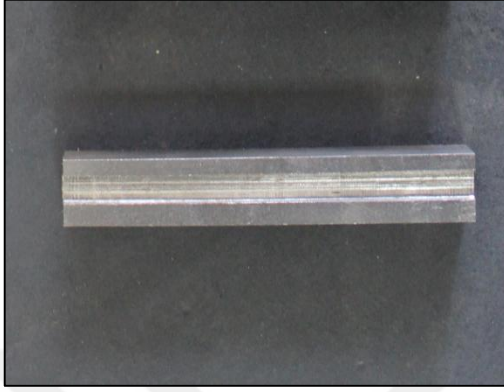


Şekil 8.3. Yatay testere dişli freze makinesi



Şekil 8.4. Numunenin freze işlemi sonrası kanal boyutları

Kanal açma işleminden sonra numunelerin yüzeyleri, kir ve yağdan arındırılmak için aseton banyosunda 1 saat bekletilerek temizlenip kurutulmuştur. Temizlenmiş numunenin resmi Şekil 8.5’de görülmektedir.



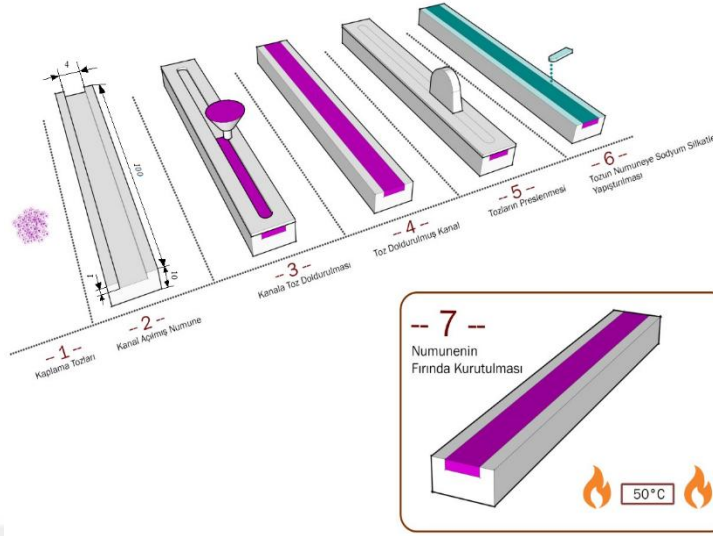
Şekil 8.5. Numunenin kaplama öncesi dijital resmi

Alaşım tozlarının homojen bir şekilde karışım işlemi için ise Şekil 8.6’da görüntülenen karıştırıcı, yoğunlukları ve tane boyutları farklı olan tozları çelik bilya ve porselen yardımıyla homojen karışımını sağlamaktır.



Şekil 8.6. Tozlar için karıştırma aparatı

PTA alaşımlama yönteminde ark ve koruyucu gazın sebep olacağı tozların sıvanan yüzeyden uzaklaşmaması için bir miktar sodyum silikat bağlayıcıyla kaplama yüzeyinde tutulup 50 °C sıcaklıkta Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği atölyesinde 30 dk kurutulmuştur. İşlemin şematik görüntüsü Şekil 8.7’de sunulmuştur.



Şekil 8.7. Alaşımlanacak olan Hardox 400 numunenin PTA kaplama işlemine hazırlanmasının şematik görüntüsü



Şekil 8.8. Kurutma fırını

Fırın (Şekil 8.8), sodyum silikat sıvısının uçması için 50°C ve işlemsiz Hardox 400 çeliği ıslah işlemi için 900°C sıcaklık ve yarım saat ayarlanmıştır.

8.3. PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımlama İşlemi

PTA yöntemiyle yapılacak kaplama çalışmalarında uygulanacak PTA kaplama parametreleri, Tablo 8.2’de ki gibi belirlenmiştir.

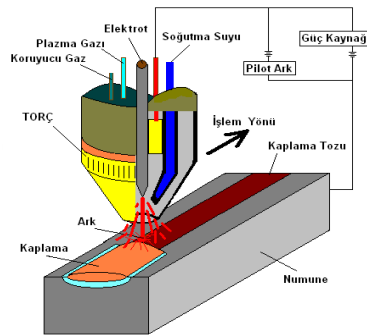
Tablo 8.2. PTA Kaplamada üretim parametreleri

Numuneler	B ₄ C	FeCrC	SiC	TiC
Akım (A)	130			
Gerilim (V)	18			
Koruyucu gaz debisi (m ³ /h)	25			
Plazma gaz debisi (m ³ /h)	0.5, Ar			
Elektrod çapı (mm)	4.7			
Elektrot Türü	% 2 toryumlu tungsten elektrot			
İlerleme Hızı (m/dak)	0.15			
Torç Malzeme Arası Mesafe (mm)	3≈ 4			
Torç Uç Çapı (mm)	3.25			
Set Back (mm)	4			
Isı Girdisi (KJ)	$Q = U \cdot I \cdot 60 / V \cdot 1000$			
Enerji Girdisi (KJ)	$Q_w = \eta \cdot Q (\eta:0.55)$			

Bu parametreler ışığında, PTA kaplama işleminin Şekil 8.9’da dijital resmiyle, torcun şematik görüntüsü ve torcun kısımları görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 8.9. a. Alaşımlama işlemi dijital resmi b. İşlemin şematik görüntüsü ve torcun kısımları

Deney çalışmalarında kaplama parametrelerinin çokluğu nedeniyle, deney sonuçlarını daha kolay irdelenmesi ve değerlendirilmesi amacı ile tüm parametreler Tablo 8.3’de verilmiştir.

Tablo 8.3. PTA Kaplamada deney numunelerinin parametreleri

Numune No	Kaplama Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)			
	B ₄ C	FeCrC	SiC	TiC
1	70	10	10	10
2	55	15	15	15
3	40	20	20	20
4	25	25	25	25
Numune No	Kaplama Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)			
	FeCrC	B ₄ C	SiC	TiC
5	70	10	10	10
6	55	15	15	15
7	40	20	20	20
4	25	25	25	25
Numune No	Kaplama Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)			
	SiC	B ₄ C	FeCrC	TiC
9	70	10	10	10
10	55	15	15	15
11	40	20	20	20
4	25	25	25	25
Numune No	Kaplama Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)			
	TiC	B ₄ C	FeCrC	SiC
13	70	10	10	10
14	55	15	15	15
15	40	20	20	20
4	25	25	25	25

PTA kaplama işlemi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü atölyesinde bulunan ve Şekil 8.10'da ki dijital resimde görülen Thermal Dinamik/Ark marka plazma tungsten ark kaynak makinesinde yapılmıştır.



Şekil 8.10. Plazma kaynak makinesi genel görünümü ve donanımı

8.4. PTA Yönteminde Isı girdisi ve Enerji Girdisinin Hesaplanması

PTA yönteminde ısı girdisi ve enerji girdisinin hesaplanması, kaynak hızına, enerji yoğunluğuna ve malzeme cinsine göre en yüksek sıcaklık-yüksek-daha düşük ve ana malzemelerin sıcaklığına soğuma, yavaş veya hızlı olabilir. Ana metalin, ısının tesiri altındaki bölgesindeki (ITAB) sıcaklık dağılımının ve soğuma hızının bilinmesi halinde, kaynaktan sonra bu bölgede meydana gelebilecek mikroyapı kontrol edilebilmektedir. Tablo 8.4'te değişik kaynak türleri için verimlilik katsayısı η değerleri verilmiştir.

Kaynaktaki ısı girdisini bulmak için;

$$Q = U \cdot I / V \quad (\text{J/cm}) \quad (8.1)$$

Kaynaktaki enerji girdisini hesaplamak için;

$$Q_w = \eta \cdot Q = \eta \cdot U \cdot I / V \quad (\text{J/cm}) \quad (8.2)$$

$Q_w = \eta \cdot Q = (\eta \cdot U \cdot I \cdot 60 / V \cdot 1000) \quad (\text{KJ})$, formülüyle bulunur.

Formülde;

- Akım I (A): PTA kaynağı çalışma akım (Amper),
- Gerilim U (V): Çalışma akımına denk gerilim (Volt),
- Üretim Hızı V (mm/dk): V = Bir dakika milimetre cinsinden ilerleme hızı,

- Üretim Zamanı t (dk): Dakikada kaynağın başlangıç ve bitiş süresi,
- Verimlilik Katsayısı : η = kaynak bölgesine aktarılan enerjiyi tanımlamaktadır.

Tablo 8.4. Kaynakta verimlilik katsayıları (η) değerleri

Kaynak Yöntemi	Verimlilik Katsayısı %
PTA (PAW)	50–60
TIG (GTAW)	25–50
Mig/Mag (GMAW)	60–70
Elek. Ark (SMAW)	65–85
Erg. Kayn. (SAW)	95–98

8.5. Mikroyapı ve Mikrosertlik İncelemeleri

Mikroyapı, mikrosertlik, abrasiv aşınma ve XRD testler (Şekil 8.11) için numuneler SketchUp Pro 2016’da Şekil 8.12’deki gibi hazırlanılmıştır. Metalografik incelemeler için numuneleri hazırlama işlemi Fırat Üniversitesi Prof.Dr Nuri ORHAN Metalografi Laboratuvarında yapılmıştır.

Mikroyapı incelemeler için numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400-1200 mesh’lik zımparalarda parlatılmış daha sonra 1 ve 3 μm ’lik elmas pasta ve solüsyon yardımıyla çuhalanarak parlatılmış ve mikroyapı için hazırlanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri Nikon Eclipse MA 150 optik mikroskopta yapılmıştır. Bu işlem 50x-100x-250x şeklinde büyütmelemlerle incelenmiştir.



Struers marka hassas kesme makinesi



Struers marka parlatma makinesi



Nikon Eclipse MA 150 optik mikroskop

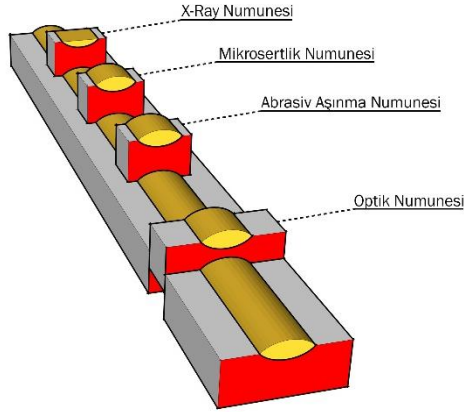


Duraschan 20 mikrosertlik cihazı

Şekil 8.11. Hassas kesme makinesi, parlatma cihazı, optik mikroskop ve mikrosertlik ölçüm cihazı

Parlatılan numuneler Nital (%2 HNO₃ + %98 Etil alkol) çözeltiyle 10-15 sn sürelerde dağlama işlemine tabi tutulmuştur.

Alaşımlandırılmış yüzey tabakasının mikrosertlikleri yan kesit kaplama ara tabakasından başlanıp, 200 gr. yük uygulanarak 10 saniye bekleme süresinde 100 µm(mikrometre) mesafelerde, Fırat Üniversitesi Prof. Dr. Nuri ORHAN Metalografi Laboratuvarında bulunan Duraschan 20 mikrosertlik cihazında alınmıştır.



Şekil 8.12. Optik mikroskop, abrasiv aşınma, mikrosertlik ve XRD numunesinin alınması

8.6. SEM, EDS ve XRD İncelemeleri

PTA yöntemiyle yüzeyi alaşımlanan numunelerin mikroyapısında görünen karbürlerin, fazların, matrisin ve önemli görülen noktaların noktasal analizleri alınmıştır. SEM (Scanning Electron Microscope) ve EDS (Enerji Dispersive Spektrograph) incelemeleri Fırat Üniversitesi, Merkezi laboratuvarında bulunan EVO MA10 marka cihazla yapılmıştır.

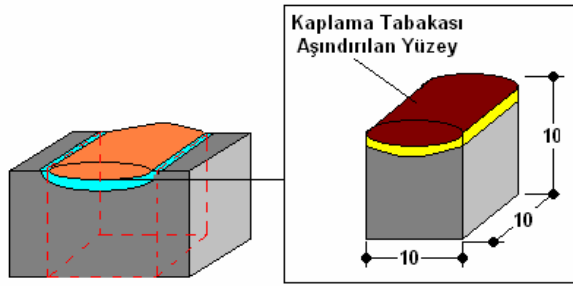


Şekil 8.13. SEM ve XRD analiz cihazları

Yüzey modifikasyonu işlemine tabi tutulan numunelerde oluşan karbürlerin ve fazların cinsini belirlemek için X-RAY cihazı kullanılmıştır (Şekil 8.13). XRD (X - Ray Diffraction) analizleri İnönü Üniversitesi, Teknoloji ve Uygulama Laboratuvarı'nda bakır α ışını tüpüne sahip cihazda 1,5406 Å dalga boyunda 2 θ açısında, 40 kV(elektrik gerilimi) ve 40 mA'de Cu-K α radyasyonu ayrıca yine Fırat Üniversitesi, Merkezi laboratuvarında bulunan D8 Advance cihazı kullanarak elde edilmiştir.

8.7. Abrasiv Aşınma ve Taguchi Deneysel Tasarım

Aşınma deneyi abrasiv yöntemde yapılmıştır. Aşınma numuneleri Şekil 8.14'deki gibi numuneden çıkarılmış ve şematik resim haline getirilip 10×10×10 mm boyutlarına getirildikten sonra kaplama tabakasından aşındırılmıştır.

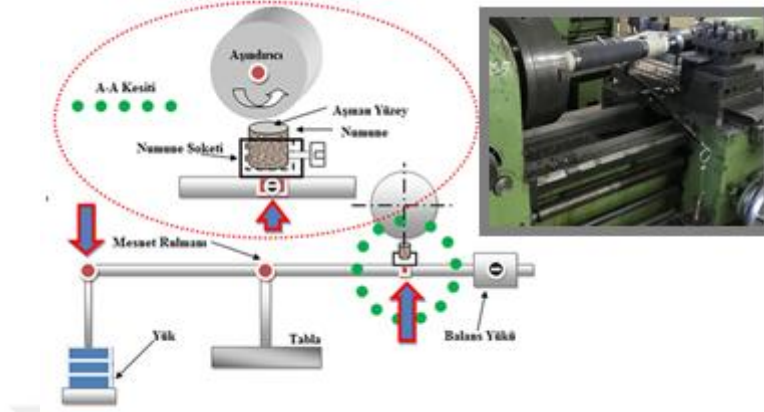


Şekil 8.14. Aşınma numunesinin alınışının şematik görüntüsü ve boyutları

Şekil 8.14.'de abrasiv aşındırıcı aparatı ve kısımları şematik resmi görülmektedir. Abrasiv aşınma deneyi numunenin kaplama tabakasının aşındırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler block-on-disc sistemine sahip; Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Atölyesi'ndeki bulunan abrasiv aşınma aparatında yapılmıştır.

Abrasiv aşındırma numuneleri; Taguchi dizaynlarında verilen parametrelerin dizaynına göre seviyeleri; aşındırıcı olarak 120 ve 180 mesh'lik zımpara kağıdı ile 6 N ve 16 N'luk iki farklı yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her yük altında 10, 20, 30 ve 40 m'luk mesafelerde ayrı ayrı aşınma deneyi yapılmıştır. Torna tezgâhında (Şekil 8.15) gerçekleştirilen abrasiv aşınma deneylerinde devir sayısı 16 devir/dakika olarak seçilmiştir. Devrin düşük seçilmesi; ilerleme sırasında oluşabilecek aşınma direnci sonrasındaki

sıçramaları düşük seviyeye çekmektir. Aşındırıcı zımpara yüzeyinde kat edilen toplam yol torna tezgahındaki vida adımı ve devir/dakika hesabıyla tespit edilmiştir.



Şekil 8.15. Abrasiv aşınma mekanizması ve freze tezgahı

Ancak aşınma işlemleri Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak devam edilmiştir. PTA yüzey kaplama işleminde, yüzey alaşımlama işleminde kaplama tabakası, aşınma mesafesi, aşındırıcı tane boyutu, ve uygulanan yük olmak üzere dört ayrı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu dört faktör için ilk ikisi 4 diğer ikisinin 2'li seviyeleri seçilmiştir. Yani $L_{16}(4 \times 2, 2 \times 2)$ seçilmesinin amacı: Taguchi dizaynını yaptığımız paket programın ancak bu dizinlere uygun olmasından kaynaklanmaktadır. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve S/N oranları verilmektedir.

9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; kaynak gücü, plazma gazı ve koruyucu gaz debileri literatür incelemesinden sonra en uygun olan değerlerin kullanılmasına karar verilmiştir [198-201].

Şekil 9.1’de PTA kaplama işleminin şematik görünümü ve makro resminde numune ve torch görülmektedir. PTA kaplama işleminde uygulanan parametreler Tablo 9.1.’de verilmiştir [50].

Hardox 400 mikroalaşımli çeliğin özelliğine, alaşım tozlarının etkisini daha rahat anlayabilmemiz için sonuçlar Tablo 8.3. şeklinde düzenlenmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 9.1. PTA kaplama işlemi numune, torch ve bakır altlık

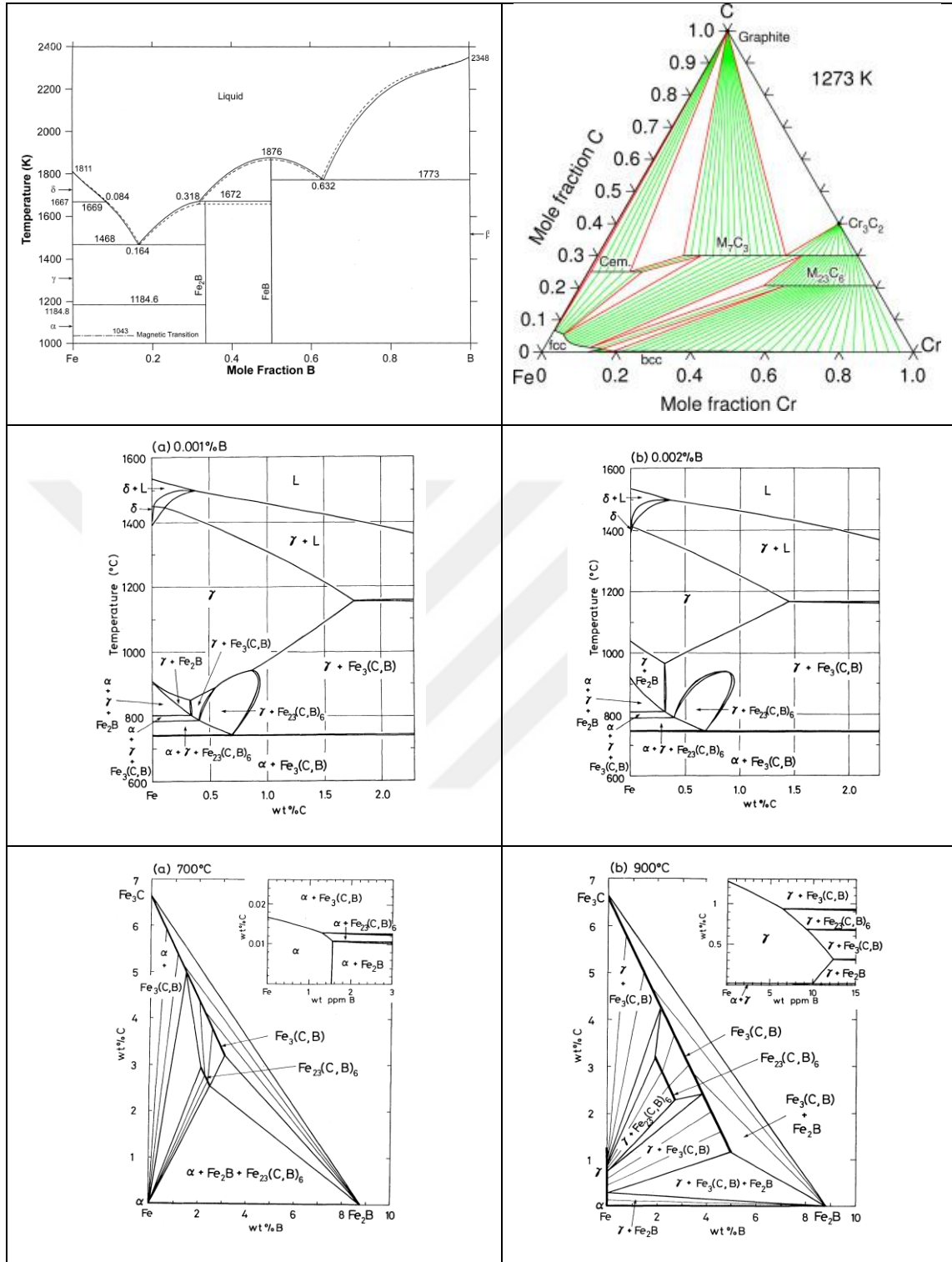
Tablo 9.1. PTA Kaplama işleminde uygulanan parametreler

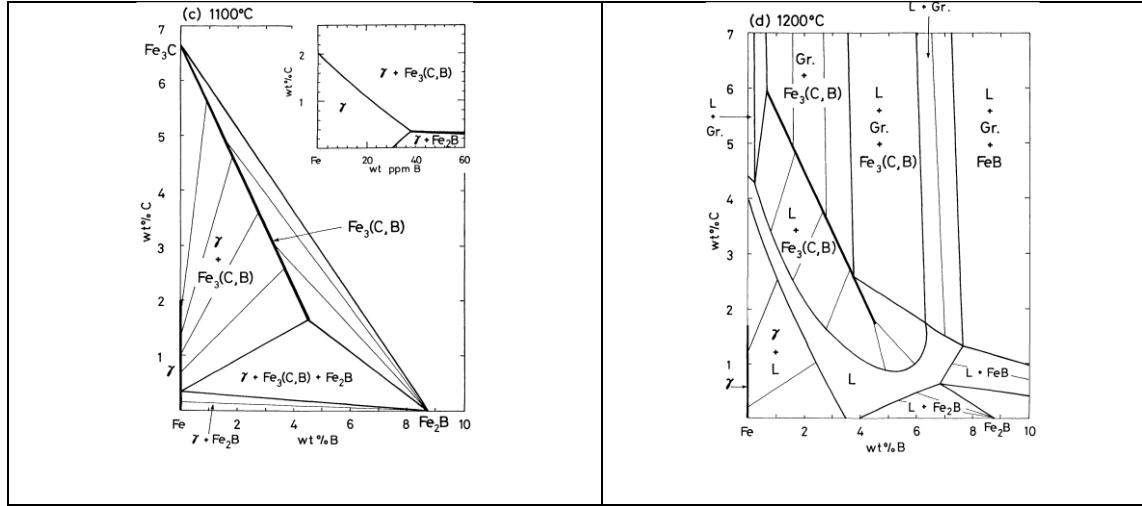
Numuneler	B ₄ C	FeCrC	SiC	TiC
Akım (A)	130	130	130	130
Gerilim (U)	18			
Koruyucu gaz debisi (m ³ /h)	25			
Plazma gaz debisi (m ³ /h)	0.5, Ar			
Elektrod çapı (mm)	4.7			
Elektrot Türü	% 2 toryumlu tungsten elektrot			
İlerleme Hızı (m/dak)	0.15			
Torç Malzeme Arası Mesafe (mm)	3≈ 4			
Torç Uç Çapı (mm)	3.25			
Set Back (mm)	4			
Isı Girdisi (KJ) Q	9.36			
Enerji Girdisi (KJ) Q _w	5,148			

Aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta korozyon ve aşınma özelliklerini geliştirecek çeşitli özel alaşımların kaplanması ile geliştirilir [194-198]. Plazma transferli ark kaynağı ısıyla ergimiş hale gelen tozlar, Hardox 400 mikroalaşımli çelik tabakası (kaynak

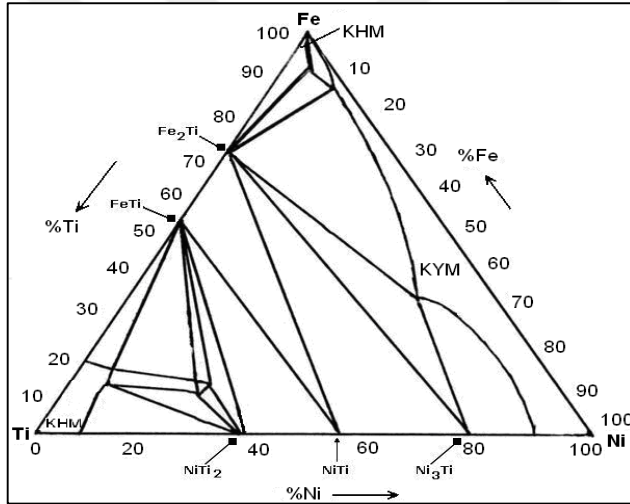
havuzunda) hapsedilerek alaşımlandırılması sağlanmıştır. Yüzeyi alaşımlanmış numunelerin makro resimleri vardır. Bu resimler incelendiğinde alaşımlanmış kaplama tabakasının başlangıç ve bitiş noktalarında kaynak baş ve sonunda oluşan bazı kraterler gözlemlenmiştir. Kplama tabakasında hızlı soğuma sonucu oluşması muhtemel herhangi bir makro çatlağa rastlanmamıştır. Numunelerde, kaplama tabakası düzgün ve homojen oluşmuştur. Numunelerin tamamında kaplama işleminin başladığı ilk noktalarda, kaplama tozu işlem sırasında ergiyik bölgede plazma ve koruyucu gazın oluşturduğu türbülans çok fazla etkilenmemiş ve numune boyunca özellikle inceleme amacıyla çıkarılacak merkeze yakın bölgelerinde üniform yapı oluşmuştur.

Şekil 9.2 ve Şekil 9.3 incelenmiştir. İnceleme ve değerlendirme sonucunda Fe, B, C ve Cr'dan oluşan ikili ve üçlü faz diyagramlarında, oluşması muhtemel fazlar görülmektedir. Ayrıca Ni-Ti-Fe Üçlü Faz Diyagramı verilmektedir.





Şekil 9.2. Fe-C-B ikili ve üçlü, Fe-Cr-C üçlü denge diyagramı [199].

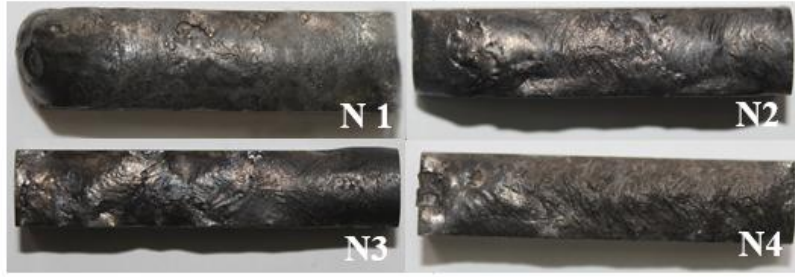


Şekil 9.3. Ni-Ti-Fe Üçlü Faz Diyagramı (900 °C) [200].

9.1. PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımlama İşlemi Yapılan Numunelerin Mikroyapı ve Mikrosertlik İncelemeleri

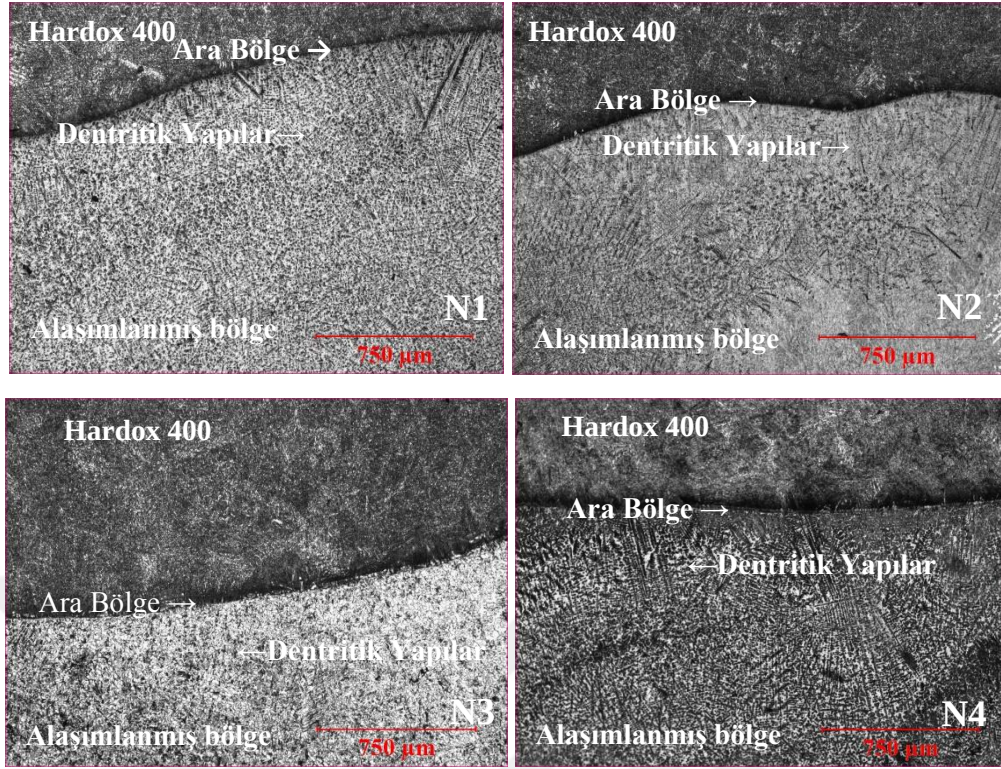
9.1.1. B₄C Genel Sonuçlar

Plazma transferli ark kaynağı tekniğiyle alaşım tozları Tablo 8.3' deki kimyasal bileşim parametreleri kullanılmıştır. Yüzey kaplama yani alaşımlama işleminden sonra numuneler havada soğutulmuştur. Kaplama tabakasının üst görüntüsü ayrı ayrı verilmiştir.



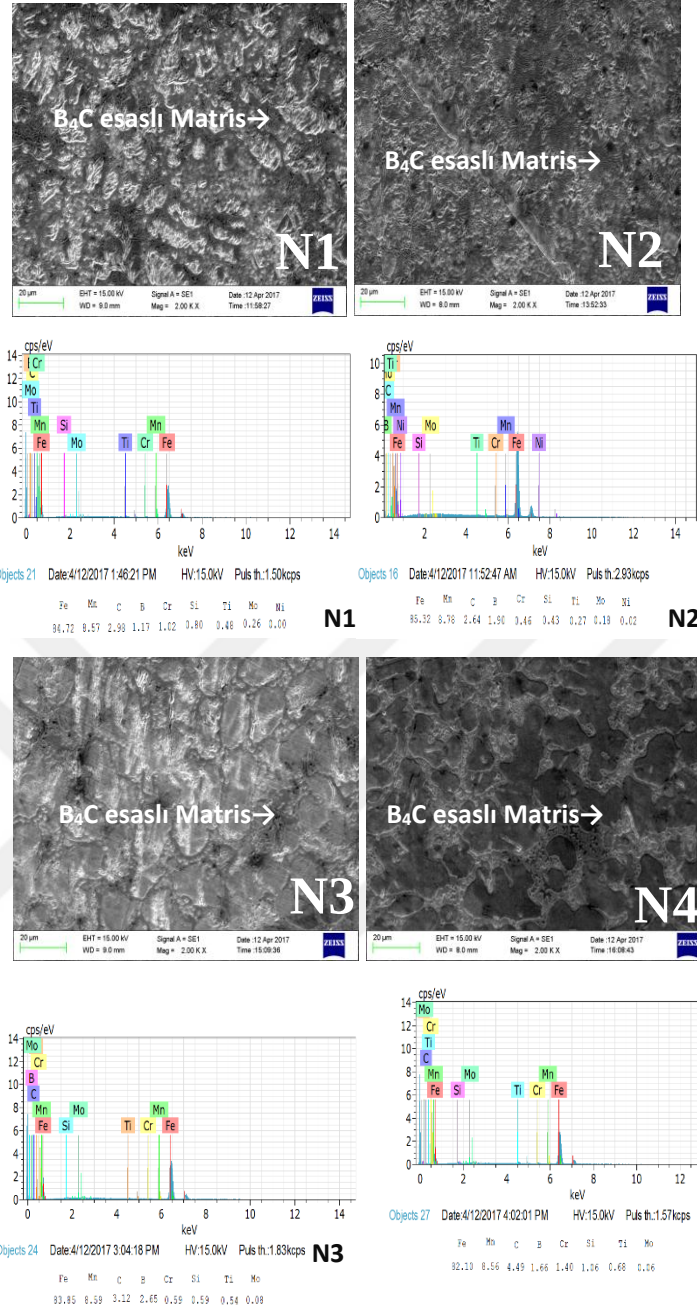
Şekil 9.4. B₄C Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri

PTA yöntemiyle mikroalaşımlı HARDOX 400 çelik yüzeyinde oluşturulan ve Şekil 9.4’de optik görünüşü verilen alaşımlanmış tabakanın kalınlığı $1.4 \pm 0.7 \text{ mm}$ ’ dir. Kaplama tabakası ile alt tabaka arayüzey bölgesinde dendritik katılaşma gerçekleşmiştir. Katılaşma yönü kaplama alt tabaka arayüzeyine dik yöndedir. PTA kaynak yönteminde, hem yüzeyi hem de kaplanan toz ve karbürlere verilen enerji oldukça yüksektir. Lokal olarak ergitilen alt tabaka malzemesiyle kaplama malzemesinin soğuma ve katılaşma hızı da yüksek olur. Yüksek sıcaklıkta karbür ve alaşım elementleri çözünerek ergiyik havuz içerisinde katılaşma sırasında yeni bir faz ve karbürler oluşturarak katılaşır. Toz tanelerinin çözünmesi için yeterli sıcaklık ve zaman bulunamadığında, taneler ergiyik havuz içerisinde çözünmeden yapı içerisinde blok halinde katılaşır [201]. Şekil 9.5’ de de görüldüğü üzere, B₄C karbür ve diğer element tozlarıyla yapılan kompozit kaplamasında, tüm toz taneleri tamamiyle çözünerek, yapı içerisinde homojen bir şekilde katılaşma göstermiştir.



Şekil 9.5. B₄C toz karışımıyla elde edilen alaşımlanmış kaplama/ alt tabaka arayüzünün optik görüşleri

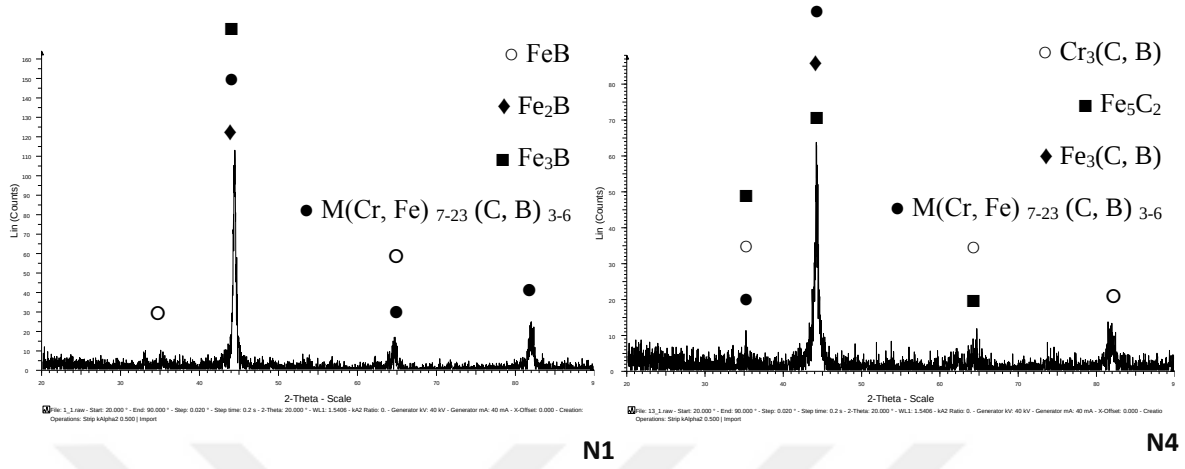
Alaşımlanmış tabakanın üst yüzey bölgesine doğru gidildikçe dendritik yapı yerini martenzitik görünümüne sahip fazlara bırakmıştır. PTA işlemi sonrasında alaşımlanmış tabakanın oval bir şekil aldığı maksimum nüfuziyetin ortada olduğu kenar bölgelerinde ise kalınlığın inceldiği görülmüştür. Bunun sebebinin enerji yoğunluğunun elektrot ucuna dik olan doğrultuda daha yoğun şekilde meydana gelmesidir. Şekil 9.6’ da SEM ve EDS görüntülerinde numunlerde fazlar matrisi çepeçevre sarmıştır. Ötektik matristen alınan EDS verileri göre N1 numaralı bileşime sahip yapıda Şekil 9.6 (N1)’ de dendritik yapılar meydana gelmiş ve alaşım elementlerini bünyesine alarak katılaşma göstermiştir. Şekil 9.6 (N2)’ de dendritler arası ötektik matriste katılaşan fazlar yapı içerisinde görüldüğü gibi yoğundur. Katılaşma işlemi sonrasında katılaşma, dentit kolları şeklinde ana tabakadan yüzeye doğru ikincil ve az da olsa üçüncül dentritleri oluşturarak devam etmiştir. Şekil 9.6 (N3)’ de oluşan yine dendritik bir katılaşma meydana gelirken tanelerin daha da büyüdüğü görülmektedir. Şekil 9.6 (N4)’ de Oluşan fazlar, B₄C oranındaki azalmayla birlikte dentrit kollarında daralma ve nisbeten daha büyük taneler ile katılaşma meydana gelmiştir. Yapıda bulunan karbürler ötektik yapı içinde dağılmıştır.



Şekil 9.6. B₄C toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerinin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri

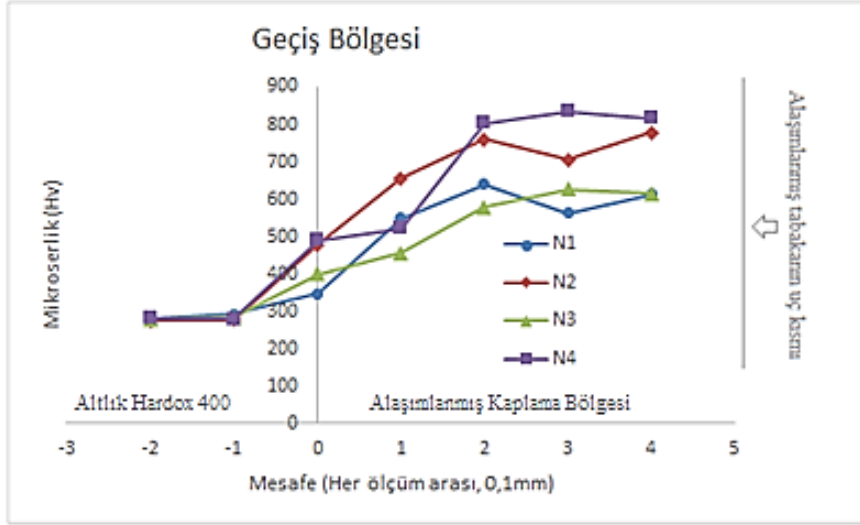
Şekil 9.7’de, N1 ve N4 numaralı numunesinin kaplama tabakasının X-ışını difraktogramı verilmiştir. EDX verilerine dayanarak X-ışını sonucu, PTA torcu kullanılarak alaşımlanmış kaplama tabakasında FeB, Fe₂B, Fe₃(C, B), M(Cr, Fe)₇₋₂₃(C, B)₃₋₆, Cr₃(C, B), Fe₅C₂ fazları varlığını göstermektedir. B₄C kaplı numunelerin kaplama tabakasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması N1:591, N2:725, N3:570 ve N4:744 Hv değerlerine çıkmıştır.

Bu değerlerin yüksek çıkmasında kaplama tabakasında oluşan sert karbür fazların varlığı söz konusu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.7. N1 ve N4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi

PTA yöntemi yüksek enerji girdisi avantajı ile birlikte B₄C bileşiğinin kaplama sonrasında yüzeye nüfuz ettiği ve arayer fazı oluşturması sebebiyle sertleşmeyi artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek enerji girdisine sahip PTA yönteminin yine mikroyapıda oluşan karbürlerin ergimesine yardımcı olmasıyla mikroyapıda karbürlerin homojen bir şekilde yapıya dahil olmasına sebep olup, sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Bu değerlerin yüksek çıkmasında, oluşan FeB, Fe₂B, Fe₃B ve M(Cr, Fe)₇₋₂₃(C, B)₃₋₆ ve sert fazların oluşması etkili olmuştur. Ayrıca ferrokrom tozunun karbon oranının fazla olmasından, kaynak banyosunda karbür affinitesi yüksek olan krom ile yoğun bir karbür ağı oluşmaktadır. B₄C ilavesiyle bu durum daha da yükselmesine sebep olmaktadır.

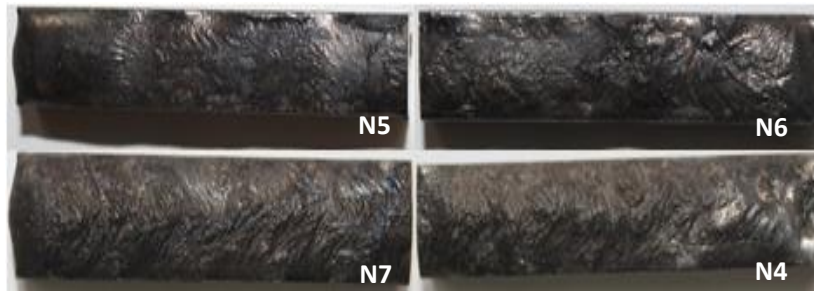


Şekil 9.8. B₄C toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri

Kaplanan malzemedan başlayarak, kaplama tabakasının altında gerçekleşen az orandaki difüzyonla birlikte sertlik artmaya başlamıştır (Şekil 9.8); daha sonra karbür ve borür bileşiklerinin oluşmasıyla ara tabakada hızla sertlik artışı gözlenmiş ve ara tabakadan yaklaşık 0,2 mm uzaklıktan itibaren sertlik 550–836 HV değerlerine kadar ulaşmıştır [202]. Alaşımlanmış kaplama tabakasında homojen katılaşma sonucunda oluşan karbür ve bileşiklerin homojen dağılması, tabaka içerisinde sertlik dağılımı tamamen dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. En yüksek sertlik değeri 836 HV ile 4 numaralı numunede meydana gelmiştir.

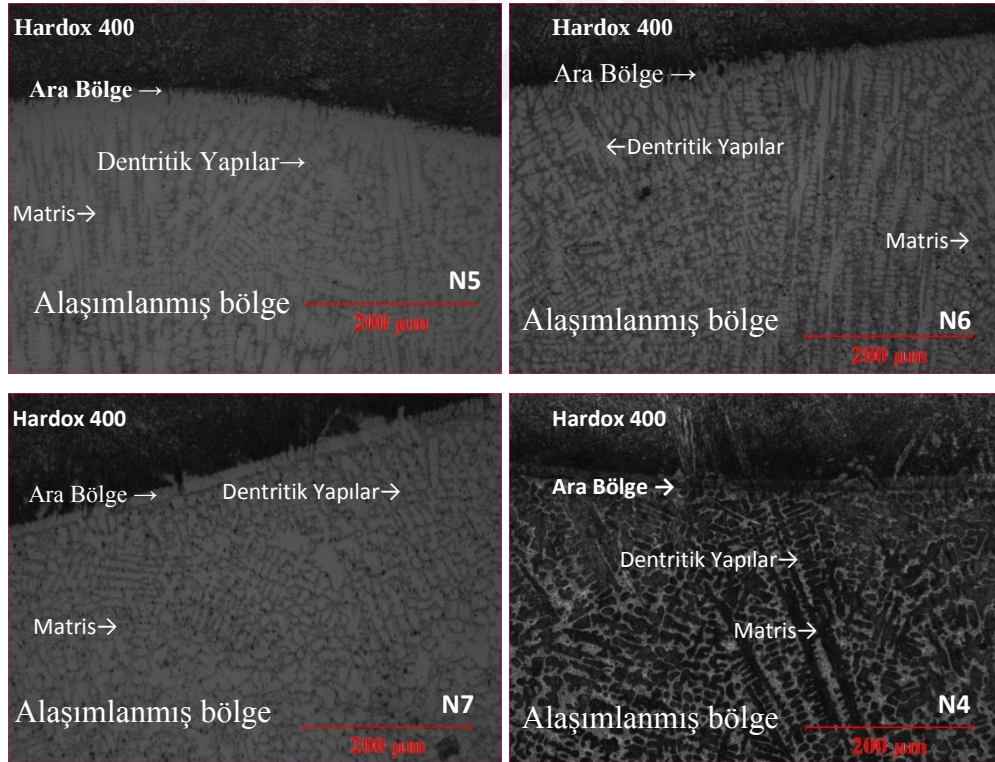
9.1.2. FeCrC Genel Sonuçlar

PTA yöntemiyle, mikroalaşımlı HARDOX 400 çelik yüzeyinde oluşturulan ve Şekil 9.9’da optik görünüşü verilen kaplama tabakasının kalınlığı ısı girdisinin varlığıyla $1.3 \pm 0.6 \text{ mm}$ arasında değişmektedir.



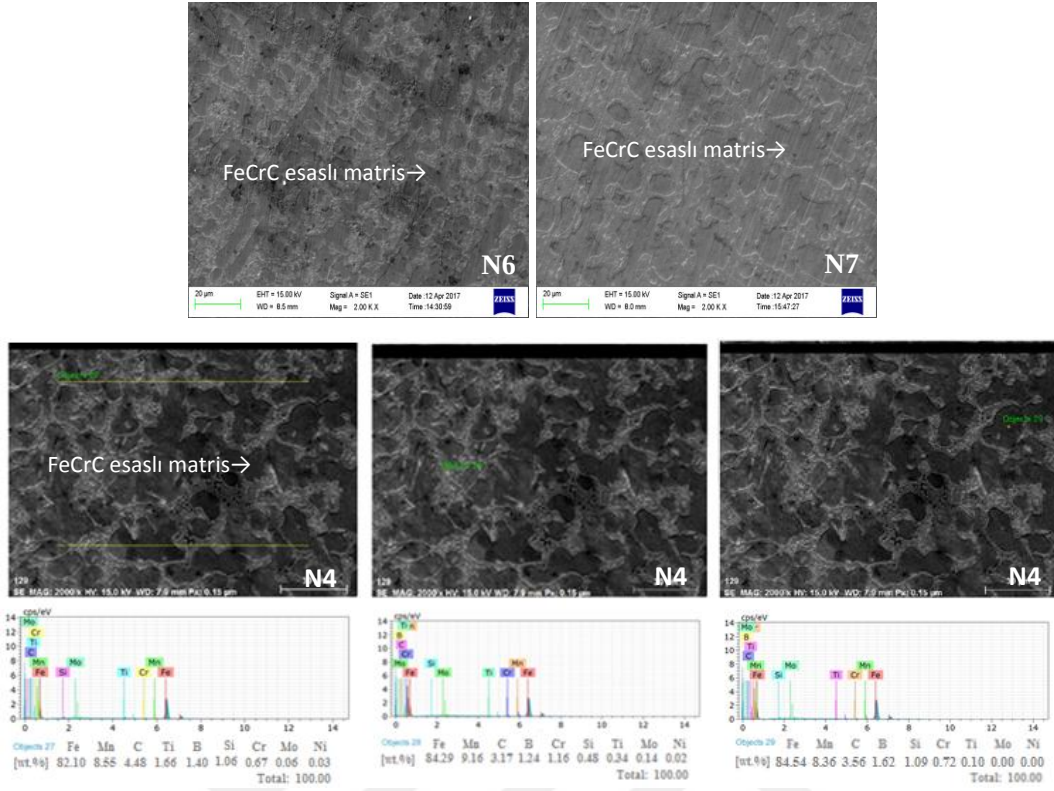
Şekil 9.9. FeCrC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri

Optikleri incelenen numunelerin kaplama tabakası ile alt tabaka arayüzey bölgesinde dendritik katılaşma gerçekleşmiştir. Katılaşma yönü kaplama alt tabaka arayüzeyine dik yöndedir. Dendritik bölge, kaplama tabakasında ortalama 400 μm 'lik bir bölgesinde meydana gelerek ikincil, yer yer üçüncül dentritik kollar şeklinde göstermiştir. Bununla birlikte ara bölgeden uzaklaştıkça taneler küresel, hegzagonik bir görüntü almıştır. PTA kaynak yönteminde, hem yüzeyi hem de kaplanan toz ve karbürler verilen enerji oldukça yüksektir. Yerel olarak ergitilen alt tabaka malzemesiyle kaplama malzemesinin soğuma ve katılaşma hızı da bir o kadar yüksek olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta karbür ve alaşım elementlerin çözünmesi neticesinde ergiyik havuz içerisinde katılaşma sırasında yeni bir faz ve karbürler oluşturarak katılaşır [199]. Bununla birlikte yeterli sıcaklık ve zaman bulunamadığında toz taneleri çözünemez, taneler ergiyik havuz içerisinde çözünmeden yapı içerisinde blok halinde bir katılaşma sergiler [201]. Şekil 9.10' de de görüldüğü üzere, FeCrC karbür ve diğer element tozlarıyla yapılan kaplamasında, tüm toz taneleri tamamıyla çözünerek, yapı içerisinde homojen bir şekilde katılaşma göstermiştir.



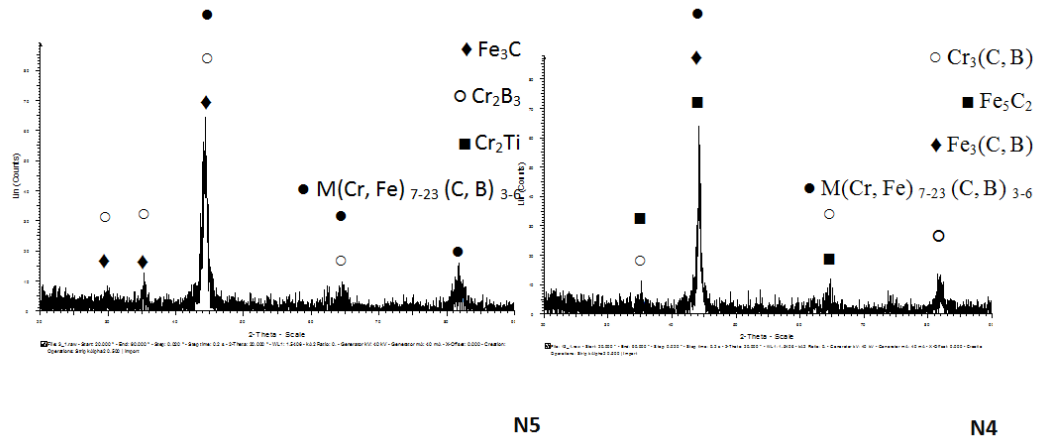
Şekil 9.10. FeCrC toz karışımıyla elde edilen alaşımlanmış kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri

Alaşımlanmış kaplama tabakasının üst yüzey bölgesine bakıldığında dendritik yapı daha çok martenzitik görünümüne sahip küçük tanelere bırakmıştır. PTA işlemi sonrasında alaşımlanmış kaplama tabakasının ovale yakın bir görüntü aldığı, maksimum nüfuziyetin ortada olduğu kenar bölgelerine doğru gidildikçe ise kalınlığın incelendiği görülmektedir. Bu görüntünün oluşumuna enerji yoğunluğunun elektrot ucuna dik olan doğrultuda daha yoğun şekilde meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9.11' de SEM ve EDS görüntülerinde fazlar matrisi çepeçevre sarmıştır. Ötektik matristen alınan EDS verilerine dayanarak elementlerin yapı içine nüfuz ettiği, Şekil 9.11 (N6) numunesinde dentritik yapılar kendisini ikincil, yer yer üçüncül dentrik kolları şeklinde göstermiştir. Şekil 9.11 (N7)' de dendritler arası ötektik matriste katılan fazlar, yapı içerisinde görüldüğü gibi yoğundur. Bununla birlikte östenit yapı yüksek sıcaklığa çıkıldıktan sonra katılaşmaya bırakılırsa, yüksek konsantrasyonlu Cr elementine sahip bir yapı oluşarak malzemeyi korozyona karşı daha dayanıklı yaparak koruyacaktır [158]. Şekil 9.11 (N4)' de Oluşan fazlar, FeCrC oranındaki azalmayla birlikte dentritik kollar arasındaki mesafeler daha genişleyerek katılma meydana geldiği görüntülenmektedir. Şekil 9.11 (N8) Bölgesel ve noktasal EDS analizinde tespit edilen Fe, Cr, C elementlerinin alaşımlanan altlığa yüksek oranda geçtiği görülmektedir. Yapıda bulunan karbürler ise ısı girdisinin artmasına bağlı olarak altlık malzemenin daha yoğun ergimesiyle kimyasal kompozisyon farkından ve katılma zamanının değişmesinden ötektik yapı içinde dağıldığı düşünülmektedir. Bu sonuç Şekil 9.12'de XRD analizinde, N4 ve N5-N7 numaralı numenelerinin alaşımlanmış kaplama tabakasının X-ışını difraktogramında verilmiştir.



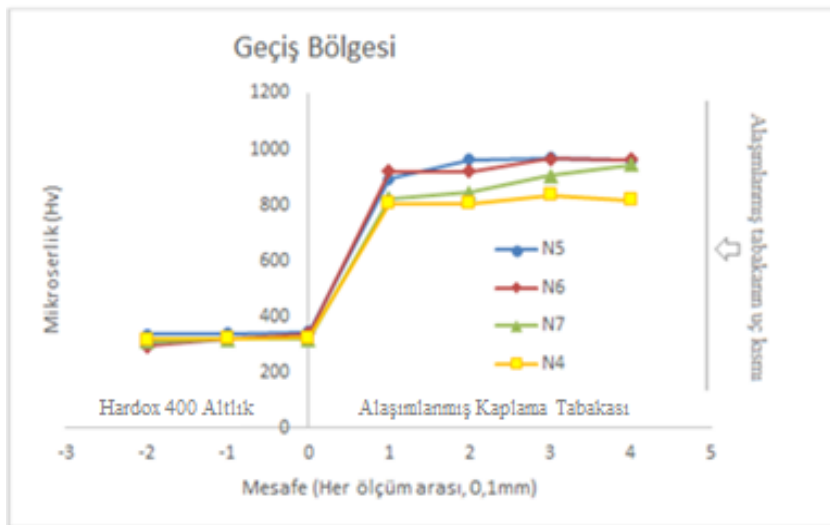
Şekil 9.11. FeCrC ile alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri

Fırat Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı D8 Advance'den alınan EDX verilerindeki elementlerin varlığına dayanarak X-ışını sonucu, PTA yardımıyla kaplama tabakasında $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$, $\text{M}(\text{Cr}, \text{Fe})_{7-23}(\text{C}, \text{B})_{3-6}$, $\text{Cr}_3(\text{C}, \text{B})$, Cr_2B_3 , Fe_5C_2 , Cr_2Ti karbür ve intermetalik bileşikler Şekil 9.12' de varlığını göstermektedir. Şekil 9.3'de ki Fe-C-B üçlü ve ikili denge diyagramının varlığında oluşabilecek fazların göstergesidir. N5 nolu numunenin aksine N4 numunesinde Fe_3B borürü tespit edilmiştir. Bu oluşumun meydana gelme sebebi yüksek ısı girdisinden dolayı katılaşma hızının değişmesi ile daha fazla demirin yapıya karışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. [153, 154] EDX sonuçlarında bu numunenin kaplama tabakasında daha fazla demirin bulunduğunu doğrulanmaktadır. FeCrC ile alaşımlandırılmış numunelerin kaplama tabakasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması N5: 946, N6:941, N7:879 ve N4:821 Hv değerlerine çıkmıştır. Bu değerlerin yüksek çıkmasında kaplama tabakasında oluşan sert karbür fazların varlığı söz konusu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.12. N5 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi

PTA yöntemi yüksek enerji girdisi avantajı ile birlikte FeCrC bileşiğinin kaplama sonrasında yüzeye nüfuz ettiği ve arayer fazı oluşturması sebebiyle sertleşmeyi artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek enerji girdisine sahip PTA yönteminin yine mikroyapıda oluşan karbürlerin ergimesine yardımcı olmasıyla mikroyapıda karbürlerin homojen bir şekilde yapıya dahil olmasına sebep olup, sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Bu değerlerin yüksek çıkmasında, Şekil 9.12 oluşan $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$, $\text{M}(\text{Cr}, \text{Fe})_{7-23}(\text{C}, \text{B})_{3-6}$, $\text{Cr}_3(\text{C}, \text{B})$, Cr_2B_3 , Fe_5C_2 , sert faz, karbür ve borürlerin oluşması sebep olmuştur. Ayrıca FeCrC tozunun karbon oranının fazla olmasından, kaynak banyosunda karbür affinitesi yüksek olan krom ile yoğun bir karbür ağı oluşmaktadır. FeCrC ilavesiyle bu durum daha da yükselmesine sebep olmaktadır.

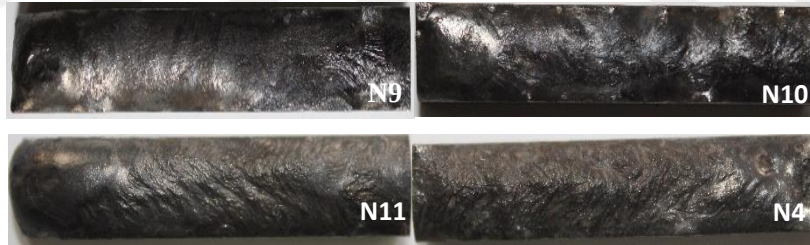


Şekil 9.13. FeCrC toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri

Kaplanan ana malzemeden başlanarak, kaplama tabakasının altında gerçekleşen az orandaki difüzyonla birlikte sertlik artmaya başlamış (Şekil 9.13); daha sonra karbür bileşiklerinin oluşmasıyla ara tabakada hızla sertlik artışı gözlenmiş ve ara tabakadan yaklaşık 0,2 mm uzaklıktan itibaren sertlik 804–969 HV değerlerine kadar ulaşmıştır [202]. Kaplama tabakasında oluşan karbür ve metalik bileşiklerin homojen dağılması sonucunda, tabaka içerisinde sertlik dağılımı tamamen dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 9.13’ de görüldüğü gibi ortalama maksimum mikrosertlik 969 HV ile N5’ de gözlenmektedir. Bu değer Hardox 400 çeliğinin sertliğinden önemli oranda fazladır. En düşük sertlik değeri ise N4 numunesinde ölçülmüştür. Tüm numunelerinin kaplama bölgesi sertlik dağılımları, homojen bir dağılım göstermektedir.

9.1.3. SiC Genel Sonuçlar

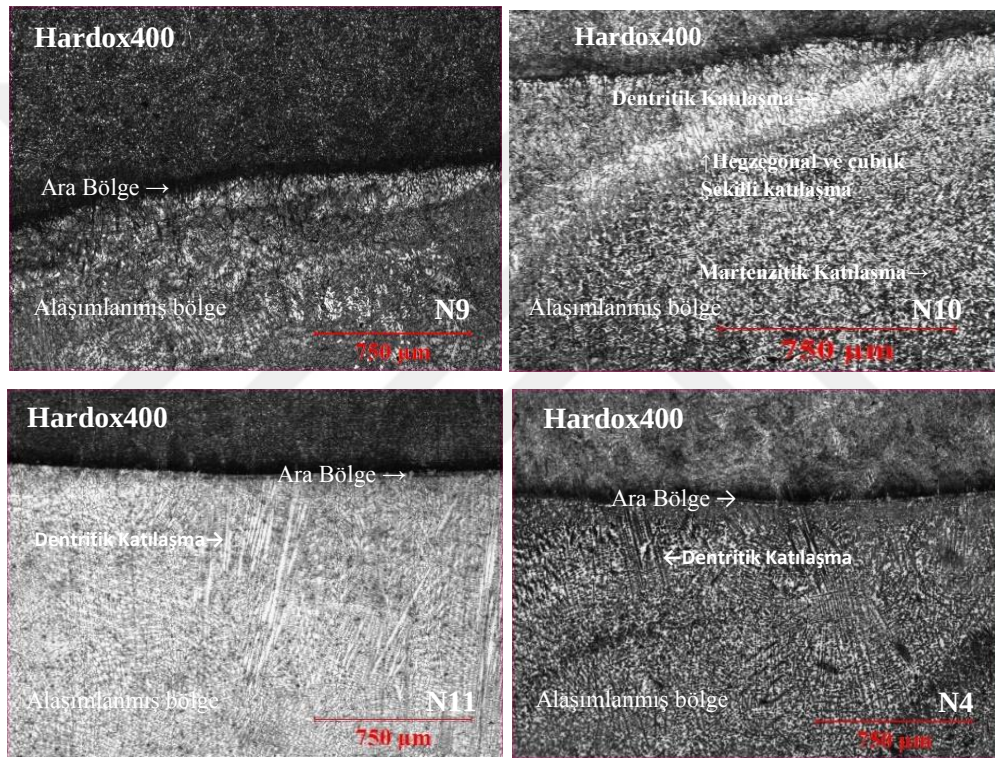
PTA yöntemiyle, mikroalaşımli Hardox 400 çelik yüzeyinde oluşturulan ve Şekil 9.14’de optik görünüşü verilen kaplama tabakasının kalınlığı ısı girdisinin varlığıyla 0.8 ± 1.4 mm arasında değişmektedir.



Şekil 9.14. SiC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri

Optikleri incelenen numunelerin alaşımlanmış kaplama tabakası ile alt tabaka arayüzey bölgesinde dendritik bir katılaşma meydana gelmiştir. Katılaşma yönü kaplama alt tabaka arayüzeyine dik yönde oluşmuştur. Dendritik bölge, N11 ve N4 Numuneleri için kaplama tabakasında ortalama 400 μm ’luk bir bölgesinde N10 numunesindeyse bu mesafe 500 μm ’luk bir mesafede gelmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerde ara bölgeden uzaklaştıkça taneler küresel, hegzagonik bir görüntü almıştır. Plazma transferli kaynak yöntemi, hem yüzeyi hem de alaşımlanacak toz ve karbürlere verilen enerji oldukça fazladır. Bölgesel bir şekilde ergitilen alt tabaka, alaşımlanacak olan kaplama malzemesinin soğuma ve katılaşma hızı benzer şekilde yüksektir. Bu yüksek ısı enerjisiyle karbür ve alaşım

elementlerin çözünmesi sonucunda ergiyik havuz içerisinde katılaşma esnasında yeni bir faz ve karbürler meydana gelerek katılaşma gerçekleşir [199]. Ayrıca yeterli sıcaklık ve zaman bulunamadığı durumlarda toz taneleri çözünmez ve taneler ergiyik havuz içerisinde çözünmeden yapı içerisinde blok halinde bir katılaşma oluşturur [201]. Şekil 9.15’ de görüldüğü üzere, SiC karbür ve diğer element tozlarıyla yapılan alaşımlamada, tüm toz taneleri tamamiyle çözünerek, yapı içerisinde homojen bir şekilde katılaşma sergilemiştir. N4 numunesi % bileşim oranının 4 grubun ortak değeri olması münasebetiyle hepsinde kullanılmıştır.

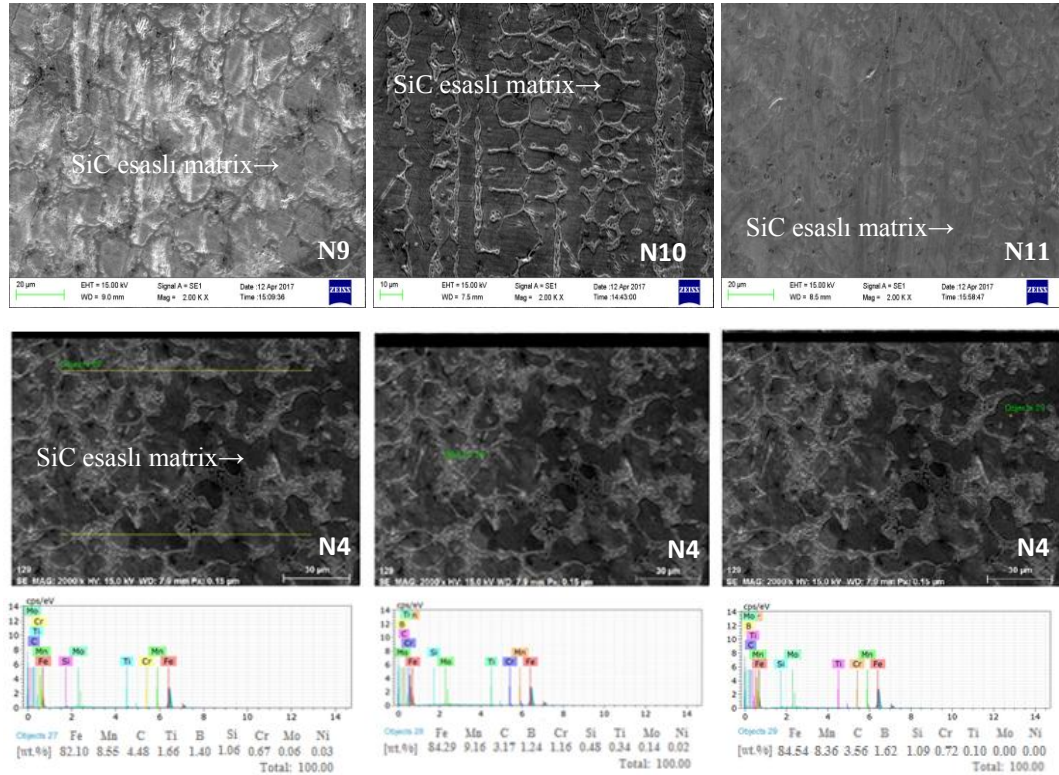


Şekil 9.15. SiC toz karışımıyla elde edilen kompozit kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri

Alaşımlanmış kaplama tabakasının üst yüzey kısmına bakıldığında dendritik yapı kendisini daha çok martenzitik görünümüne sahip küçük tanelere bırakmış durumdadır. PTA işlemi sonrasında kaplama tabakasının ovale yakın bir görüntü aldığı, maksimum nüfuziyetin ortada olduğu kenar bölgelerine doğru gidildikçe ise kalınlığı incelmektedir. Bu görüntünün oluşumuna enerji yoğunluğunun elektrot ucuna dik olan doğrultuda daha yoğun şekilde meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9.16’da SEM ve EDS görüntülerinde fazlar matrisi çepeçevre sarmıştır. Ötektik matristen alınan EDS verilerine dayanarak elementlerin yapı içine nüfuz ettiği, Şekil 9.16 (N10) numunesinde dendritik

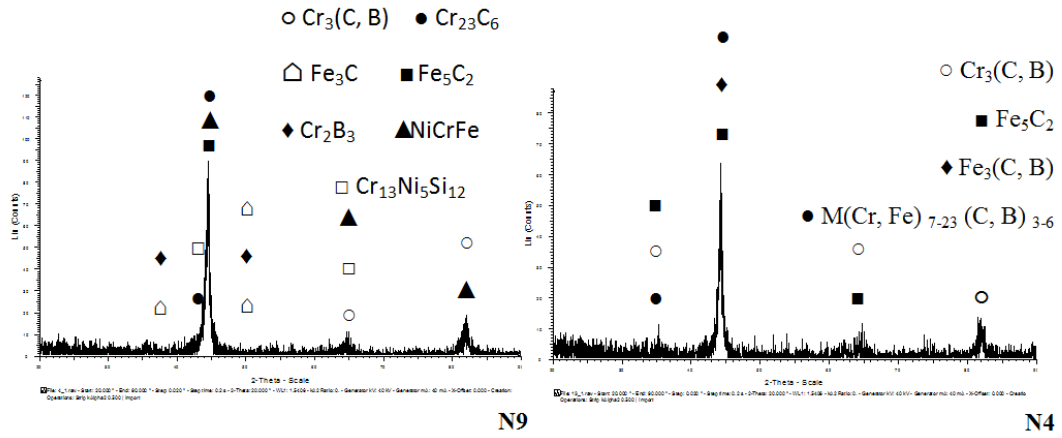
yapılar kendisini ikincil, yer yer üçüncül dentrik kolları şeklinde göstermiştir. Şekil 9.16 (N4)' de dendritler arası ötektik matriste katılaştan fazlar, yapı içerisinde görüldüğü gibi yoğundur. Bununla birlikte östenit yapı yüksek sıcaklığa çıkıldıktan sonra katılaşmaya bırakılırsa, yüksek konsantrasyonlu Cr elementine sahip bir yapı oluşarak malzemeyi korozyona karşı daha dayanıklı yaparak koruyacaktır [158]. Şekil 9.16 (N4)' de Oluştan fazlar, SiCrC oranındaki azalmayla birlikte dentritik kollar arasındaki mesafeler azalarak katılaşma meydana geldiği görüntülenmektedir. Şekil 9.16 (N4) Bölgesel ve noktasal EDS analizinde tespit edilen B, Fe, Cr, C elementlerinin alaşımlanan altlığa yüksek oranda geçtiği düşünülmektedir.

Noktasal olarak alınan ağırlıkça yüzde 84.29 Fe, 1.16 Cr, 3.14 C, 1.24 B ve elementlerinin atom yarıçapları $1\text{\AA}$ (Ångström)'dan küçük C $0.77\text{\AA}$, N $0.70\text{\AA}$, B $0.88\text{\AA}$ mertebesinde bulunduklarından karbür oluşumu kaçınılmazdır [199]. Karbürler ısı girdisinin artmasına bağlı olarak altlık malzemenin daha yoğun ergimesiyle kimyasal kompozisyon farkından ve katılaşma zamanının değişmesinden ötektik yapı içinde dağıldığı C ve B'un metal matrislerle birleşerek MC veya BC bileşiklerini ve fazlarının oluştuğu düşünülmektedir. Bu durum Şekil 9.17 XRD analizinde, N9 ve N4 numaralı numunelerinin kaplama tabakasının X-ışını difraktogramında verilmiştir.



Şekil 9.16. SiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri

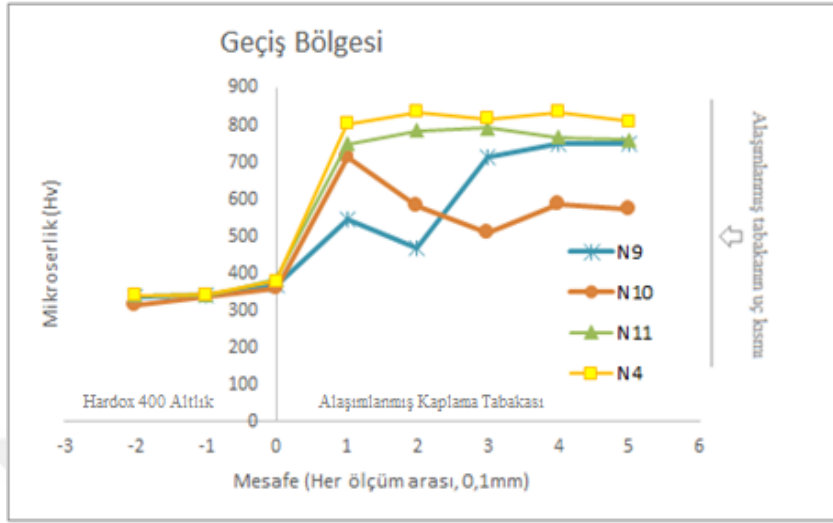
Fırat Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı D8 Advance'den alınan EDX verilerindeki elementlerin varlığına dayanarak X-ışını difraktogramı uygulanmıştır. PTA yardımıyla kaplama tabakasında $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$, $\text{M}(\text{Cr}, \text{Fe})_{7-23}(\text{C}, \text{B})_{3-6}$, $\text{Cr}_3(\text{C}, \text{B})$, Fe_5C_2 , Cr_2B_3 , $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_{12}$, NiCrFe karbür, faz ve intermetalik bileşikler Şekil 9.17' de tesbit edilmiştir. Şekil 9.12'de ki Fe-C-B üçlü denge diyagramının varlığında oluşabilecek fazların göstergesidir. N9 numunesinde yüzdece SiC oranının fazlalığından dolayı yapıda, sertlik ve yüksek aşınma direncine sahip $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_{12}$ ve NiCrFe gibi bileşikler elde edilmiştir [190,191]. N9 nolu numunenin aksine N4 numunesinde Fe_3B borürü ve Me_7C_3 karbürü tespit edilmiştir. Bu oluşumun meydana gelme sebebi yüksek ısı girdisinden dolayı katılaşma hızının değişmesi ile daha fazla demirin yapıya karışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [157]. Ayrıca yapıya ilave edilen karbür yapıcı elementlerin varlığı bu duruma katkıda bulunmuştur. SiCrC ile alaşımlandırılmış numunelerin kaplama tabakasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması N9:645 N10:592, N11:771 ve N4:821 Hv değerlerine çıkmıştır. Bu değerlerin yüksek çıkmasında kaplama tabakasında oluşan sert karbürlerin ve fazların varlığı söz konusu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.17. N9 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi

PTA yöntemi yüksek enerji girdisi avantajı ile birlikte SiC bileşiğinin kaplama sonrasında yüzeye nüfuz ettiği ve arayer fazı oluşturması sebebiyle sertleşmeyi artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek enerji girdisine sahip PTA yönteminin yine mikroyapıda oluşan karbürlerin ergimesine yardımcı olmasıyla mikroyapıda karbürlerin homojen bir şekilde yapıya dahil olmasına sebep olup, sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Bu değerlerin yüksek çıkmasında, özellikle $\text{M}(\text{Cr}, \text{Fe})_{7-23}(\text{C}, \text{B})_{3-6}$, $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$, $\text{Cr}_3(\text{C}, \text{B})$, Cr_2B_3 , Fe_5C_2 karbür ve borürlerin oluşması sebep olmuştur. Ayrıca SiC tozunun, kaynak

banyosunda karbür afinitesi neticesinde yoğun bir karbür ağı oluşmaktadır. Yapıya ilave edilen diğer tozlar sayesinde bu durum daha da artmakta ve sertlik değerlerini arttırmaktadır.

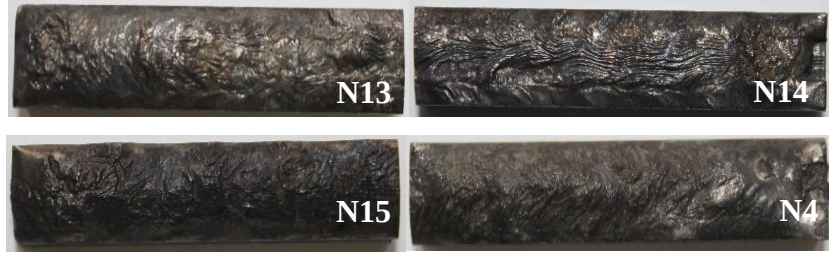


Şekil 9.18. SiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri

Kaplanan ana malzemedan başlanarak, kaplama tabakasının altında gerçekleşen az orandaki difüzyonla birlikte sertlik artmaya başlamış (Şekil 9.18); daha sonra karbür bileşiklerinin oluşmasıyla ara tabakada hızla sertlik artışı gözlenmiş ve ara tabakadan yaklaşık 0,2 mm uzaklıktan itibaren sertlik 510–836 HV (Vickers sertlik) değerlerine kadar ulaşmıştır [202]. Kaplama tabakasında oluşan karbür ve metalik bileşiklerin homojen dağılması sonucunda, tabaka içerisinde sertlik dağılımı dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 9.18’de maksimum mikrosertlik N4’ de 836 HV gözlenmektedir. Bu değer Hardox 400 çeliğinin sertliğinden önemli oranda fazladır. En düşük sertlik değeri ise N9 numunesinde 510 HV ölçülmüştür. Bütün numunelerinin kaplama bölgesi sertlik dağılımları, homojen bir dağılım sergilemektedir.

9.1.4. TiC Genel Sonuçlar

PTA yöntemiyle, mikroalaşımlı HARDOX 400 çelik yüzeyinde oluşturulan ve Şekil 9.19’de optik görünüşü verilen kaplama tabakasının kalınlığı ısı girdisinin varlığıyla 1.7 ± 1.3 mm arasında değişmektedir.



Şekil 9.19. TiC Toz karışımıyla alaşımlanan numunelerinin makro resimleri

Kaplama tabakası ile alt tabaka arayüzey bölgesinde dendritik katılaşma gerçekleşmiştir. Katılaşma yönü kaplama alt tabaka arayüzeyine dik yöndedir. Tüm numunelerde genelde dentritik yapılar hakimdir. Şekil 9.20’de özellikle N13-N14 ve N4 görülen dentritik oluşumlar kendilerini yer yer ikincil ve üçüncül dentrik kolları halinde göstermiştir. Alaşımlanan yüzey tabakalarda dendritik yapılar, arayüzeyden malzeme yüzeyine doğru yönlendirilerek katılaşma meydana gelmiştir. N13 numunesinde gözlenen martenzitik katılaşma hızlı soğumanın sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir. N13 ile N15 gözlemlendiğinde Şekil 9.20’ de N13’den N15’e doğru gidildikçe oval taneler azalmıştır. PTA kaynağı enerji yoğunluğunun elektrot ucuna dik olan doğrultuda daha yoğun şekilde meydana gelir. Dolayısıyla optiği alınan numuneler ara bölge orta kısımları ovale yakın bir görüntü halini alır.



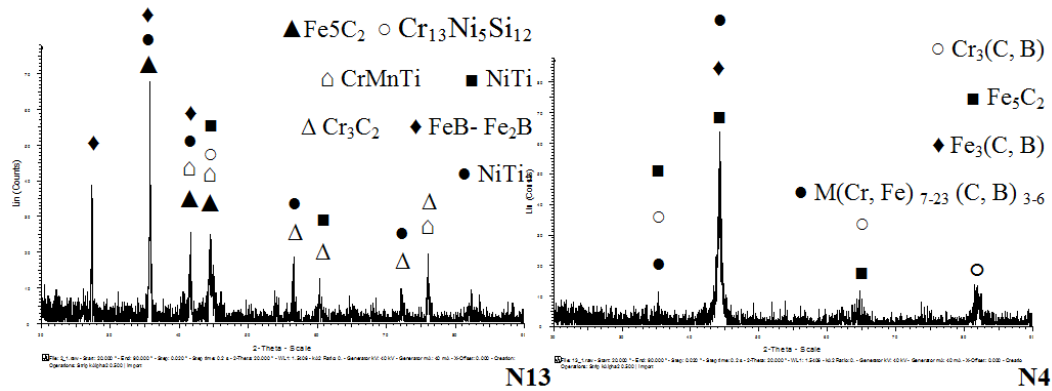
Şekil 9.20. TiC toz karışımıyla elde edilen kompozit kaplama/ alt tabaka arayüzeyinin optik görüntüleri



Şekil 9.21. TiC toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasının SEM görüntüleri

Şekil 9.21 SEM görüntülerinde oluşan mikro-yapılar alaşım elementlerinin etkisiyle düzenli bir katılaşma gerçekleşmiş, fazlar matrisi çepeçevre sarmıştır. Şekil 9.21’ de görüldüğü üzere dentritik yapılar meydana gelmiş yapıda bulunan elementleri bünyesine alarak katılaşma göstermiştir. Şekil 9.21 N15 numunesinde dentritik kollar daha yassı N4’de ise daha ovaldir. Dendritler arası ötektik matriste katılan fazlar görüldüğü üzere yapı içerisinde yoğundur. Yapıda spesifik özellikleri bulunan karbür yapıcı elementleri SEM analizinde görüntülenmemesi, PTA’nın yüksek ısı yoğunluğu sonucu ötektik yapı içinde dağıldığı düşünülmektedir.

TiC ile alaşımlandırılmış numunelerin kaplama tabakasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması N13:887, N14:694, N15:774 ve N4:821 Hv değerlerine çıkmıştır.

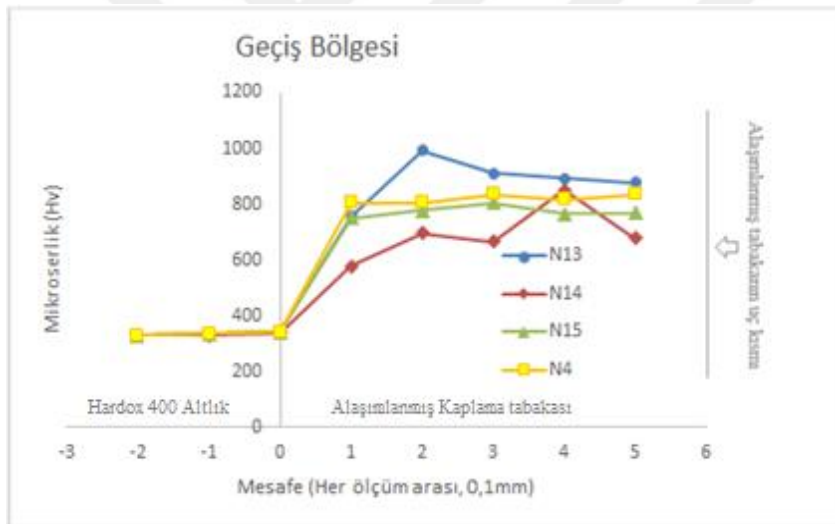


Şekil 9.22. N13 ve N4 alaşımlanmış numunelerin kaplama tabakasından alınan XRD analizi

PTA yöntemi yüksek ısı enerjisi avantajıyla TiC bileşiğinin kaplama sonrasında yüzeye nüfuz ettiği ve arayer ve intermetalik bileşiklerin varlığıyla sertleşmeyi artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek enerji girdisine sahip PTA yöntemi mikroyapıda oluşan karbürlerin ergimesine yardımcı olmasıyla, karbürlerin homojen bir şekilde yapıya dahil olup, sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Bu değerlerin yüksek çıkmasında Şekil

9.22' de, özellikle $M(\text{Cr, Fe})_{7-23}(\text{C, B})_{3-6}$, $\text{Fe}_3(\text{C, B})$, $\text{Cr}_3(\text{C, B})$, Fe_5C_2 , Cr_3C_2 , FeB , Fe_2B , CrMnTi , $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_{12}$, NiTi , NiTi_2 karbür, borür ve intermetalik fazların oluşması sebep olmuştur. Ayrıca alaşım tozlarının, kaynak banyosunda karbür afinitesi neticesinin bu yoğunluğu yüksek oranda karbür ağı oluşmaktadır. Yapıya ilave edilen diğer tozlar sayesinde bu durum daha da artmakta ve sertlik değerlerini artmaktadır.

N13 ve N4'de XRD difraksiyonunda meydana gelen Fe_5C_2 karbürü aşınma ve sertlik değerlerini arttırmada başarılı bir karbür bileşiğidir [158]. N13 numunesinde yapıda oluşan $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_{12}$, sertlik ve yüksek aşınma direncine sahiptir [155, 157]. XRD Analizleri sonucunda elde edilen Ni, Ti ve Fe elementlerinin varlığı sayesinde Şekil 9.3 üçlü denge diyagramında yapıda meydana gelmesi muhtemel Fe_2Ti , FeTi fazlarının kanıtıdır. Oluşan bu fazların sert hegzagonal yapıdan meydana geldiği ve bu fazlarında kübik yüzey merkezli kafes sisteminin [159] içinde oluştuğunu düşünebiliriz.



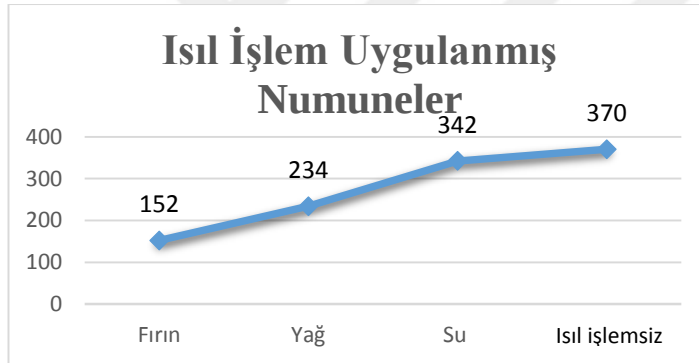
Şekil 9.23. TiC Toz karışımıyla alaşımlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri

Tablo 8.3.'de ki oranlarla alaşımlandırılmış numunelerin kaplama tabakasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması N13:887, N14:694, N15:774 ve N4:821 Hv değerlerine çıkmıştır. Bu değerlerin yüksek çıkmasında kaplama tabakasından oluşan sert karbürlerin ve fazların varlığı söz konusu olduğu düşünülmektedir. Kaplanan ana malzemeden başlanarak, kaplama tabakasının altında gerçekleşen az orandaki difüzyonla birlikte sertlik artmaya başlamış (Şekil 9.23); daha sonra karbür bileşiklerinin oluşmasıyla ara tabakada hızla sertlik artışı gözlenmiş ve ara tabakadan yaklaşık 0,2 mm uzaklıktan itibaren sertlik 578–994 HV (Vickers sertlik) değerlerine kadar ulaşmıştır [202]. Kaplama tabakasından oluşan karbür, borür ve intermetalik bileşiklerin homojen dağılması sonucunda, tabaka içerisinde sertlik

dağılımı dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 9.23’de de görüldüğü üzere maksimum mikrosertlik N13’ de 994 HV gözlenmektedir. Bu değer Hardox 400 çeliğinin sertliğinden önemli oranda fazladır. Bütün numunelerinin alaşımlanmış kaplama bölgesi sertlik dağılımları, homojen bir şekilde dağılım sergilemektedir.

9.2. Hardox 400 Mikroalaşımlı Çeliğin, Isıl İşlem Sonrası Mikro Sertliğinin İncelenmesi

Östenitleme sıcaklığı; $Ac3+(30^{\circ}-50^{\circ}C)$ bekletme işlemi, çeliğin yapısı tamamı östenit olması ya da sementitin parçalanması sonucu karbonun yapı içerisinde tamamen çözünmesi için gereken süredir. Bu süre genellikle 1 inç (25,4 mm) kalınlık için 1 saat olarak kabul edilmektedir. Çelikteki C miktarına bağlı olarak tavlama sıcaklığındaki değişim C oranı 0,29-0,38 olan çelikler için $840-900^{\circ}C$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.24. Isıl işlem uygulanmış numunelerin mikro sertlik işlemleri

Isıl işlem sonrası suya çekilmiş numunenin soğuma hızı yağda soğutma işlemine göre 3 kat daha hızlıdır. Bu sebeple suda soğutma yağda soğutmadan daha fazla sertlik değeri Şekil 9.24’ de görüldüğü gibi ortaya çıkmıştır. En düşük soğuma hızı ise fırın ortamında gerçekleştiğinden en düşük sertlik değeri fırın ortamında oluşmuştur. Bu sebeple yüksek hızlı soğutma, malzemenin sertliğinde görüldüğü gibi önem arz etmektedir.

9.3. PTA Yöntemiyle Yüzey Alaşımlama İşlemi Yapılan Numunelerin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Taguchi Metoduyla Analizi

Aşınma, yüzeyler birbirine temas ettiğinde ortaya çıkar. Temas yüzeyinden aşınma kaybı getirir. Az mukavemet, aşınma direncinde az dayanıklılığa sebebiyet verir. Yüke dayanmak, sertliğini arttırmak, yüksek sertlik ve korozyon direnci sağlamak için uygun alaşımların birikimi esas temeldir. Aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta korozyon ve aşınma özelliklerini geliştirecek çeşitli özel alaşımların kaplanması ile geliştirilecektir [194 -197].

Bu çalışmada, Hardox 400 mikroalaşımlı çeliğin yüzeyi PTA metoduyla B₄C, SiC ve FeCrC ve TiC tozlarıyla aynı parametrelerde kaplanmıştır. Taguchi dizaynı, 13 numune için Minitab 14 paket programında yeterli sayıda varyasyona sahip olmadığından Bu işlem Tablo 9.2 'de verilen parametrelerde düzenlenmiştir. Taguchi dizaynı Y1-Y4, Y5-Y8 ve Y9-Y12 alaşım elementleri etkisi 3'e bölünerek 4'er 4'er incelenmiştir. 13. Numune ise kendi içinde tüm parametreler ayrı ayrı incelenmiştir.

Tablo 9.2. PTA Kaplamada deney numuneleri Taguchi parametreleri

Numune No	Kaplama Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)				Taguchi Dizaynı Grubu
	B ₄ C	TiC	FeCrC	SiC	
Y1	70	10	10	10	L 16 (4*2, 2*2)
Y2	10	70	10	10	
Y3	10	10	70	10	
Y4	10	10	10	70	
Y5	55	15	15	15	
Y6	10	55	15	15	
Y7	15	15	55	15	
Y8	15	15	15	55	
Y9	40	20	20	20	
Y10	20	40	20	20	
Y11	20	20	40	20	
Y12	20	20	20	40	
Y13	25	25	25	25	-

9.3.1. Y1-Y4 Numunelerin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi

Bu çalışmada, Hardox 400 mikroalaşımli çeliğin Taguchi dizaynı, Minitab 14 paket programından faydalanılarak yapılmıştır. Bir ortogonal dizi için serbestlik derecesinin, Roy KR (1990) ve Paulo Davim, J. (2000) tarafından bildirilen orthogonal dizinin serbestlik derecesi aşınma parametrelerinin toplamından daha büyük veya ona eşit olması gerektiği kuralına göre yapılmalıdır. [161, 208]. Bu işlem için Tablo 9.2 'de verilen parametreler ve seviyelerinin L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizini Tablo 9.3' de oluşturulmuştur. Bu parametreler dört adet numune, dört adet yol (mt), iki adet yük (N) ve iki adet aşındırıcı (tane boyutu-grid) seviyeye sahip parametrelerdir.

Tablo 9.3. PTA Kaplamada Y1-Y4 deney numuneleri parametreleri

Sıra No	Parametreler				
	Numune	Yol	Yük	Aşındırıcı	
1	1	10	6	120	L 16 (4*2, 2*2)
2	1	20	6	120	
3	1	30	16	180	
4	1	40	16	180	
5	2	10	6	180	
6	2	20	6	180	
7	2	30	16	120	
8	2	40	16	120	
9	3	10	16	120	
10	3	20	16	120	
11	3	30	6	180	
12	3	40	6	180	
13	4	10	16	180	
14	4	20	16	180	
15	4	30	6	120	
16	4	40	6	120	

Kaplama tabakalarının abrasiv aşınma direnci, bu orthogonal dizin kullanılarak en düşük en iyi kontrol özelliğiyle deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Taguchi metoduyla elde edilen veriler, deney sonuçlarına göre grafiksel analizleriyle değerlendirilmiştir.

9.3.1.1. Y1-Y4 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı

Bu çalışmada; yüzey alaşımlama işleminde kaplama tabakası, aşınma mesafesi, aşındırıcı tane boyutu ve uygulanan yük olmak üzere dört ayrı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu dört faktör için ilk ikisi 4 diğerlerinin 2'li seviyeleri seçilmiştir. Çalışmamızda kullanılan parametreler ve parametrelerin her birinin seviyeleri Tablo 9.4'de verilmiştir. Parametre ve seviyeleri eşit olmadığından karışık seviyeli dizin olan L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizinini seçilerek oluşturulmuştur.

Tablo 9.4. Y1-Y4 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri

Sembol	Test Parametresi	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	Numuneler	Y1	Y2	Y3	Y4
B	Aşınma Mesafesi (mt)	10	20	30	40
C	Uygulanan Yük (N)	6	16	-	-
D	Aşındırıcı Tane Boyutu(mesh)	120	180	-	-

Tablo 9.4'de ki parameter ve seviyesine göre yapılan abrasiv aşınma işlemleri karışık orthogonal L16 (4*2, 2*2) dizinine göre yapılmıştır. Bir deneme süresince çoklu veri noktalarını yoğunlaştıran Sinyal Gürültüsü (S / N) oranı, değerlendirilmekte olan karakteristik türüne bağlıdır. Bu çalışmada, aşınma kaybı "en küçük en iyi" özellikler seçilmiştir. Çünkü aşınma direncinde önemli olan aşınmanın az olmasıdır. Abrasiv aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve S/N oranları verilmektedir.

Taguchi tarafından verilen ve "Kütle kaybı ölçümü" olan aşınma oranı için "en küçük en iyi" S / N oranı: $S / N = -10 \log [1/n (\Sigma y^2)]$ kullanılmıştır [209]. Tablo 9.5'te faktör seviyelerine göre S/N oranları verilen işlemde S/N oranlarının ortalaması 39,06218698 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9.5. Y1-Y4 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması

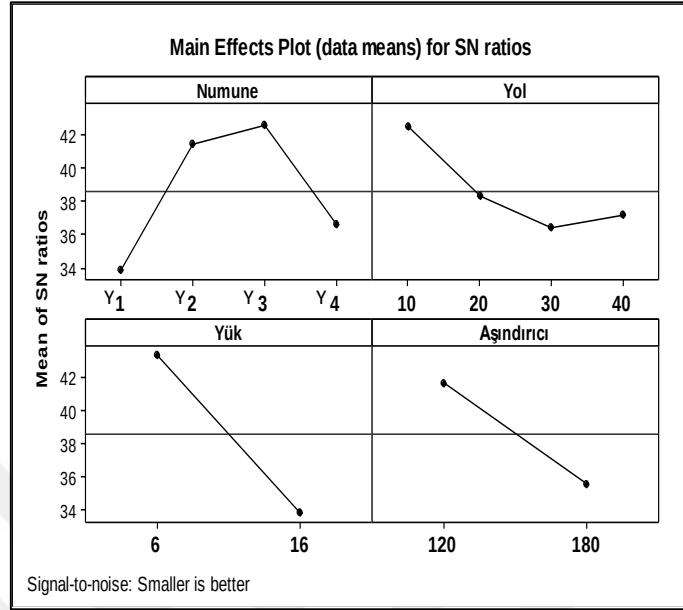
Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	%70B ₄ C-%10 TiC-%10FeCrC-%10 SiC	10	6	120	0,0048	46,37517525
2	%70B ₄ C-%10 TiC-%10FeCrC-%10 SiC	20	6	120	0,0092	40,72424345
3	%70B ₄ C-%10 TiC-%10FeCrC-%10 SiC	30	16	180	0,0546	25,25614715
4	%70B ₄ C-%10 TiC-%10FeCrC-%10 SiC	40	16	180	0,0701	23,08563964
5	%70TiC-%10 B ₄ C-%10FeCrC-%10 SiC	10	6	180	0,0041	47,74432287
6	%70TiC-%10 B ₄ C-%10FeCrC-%10 SiC	20	6	180	0,0081	41,83029962
7	%70TiC-%10 B ₄ C-%10FeCrC-%10 SiC	30	16	120	0,0077	42,2701855
8	%70TiC-%10 B ₄ C-%10FeCrC-%10 SiC	40	16	120	0,0087	41,20961495
9	%70FeCrC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 SiC	10	16	120	0,007	43,0980392
10	%70FeCrC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 SiC	20	16	120	0,008	41,93820026
11	%70FeCrC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 SiC	30	6	180	0,0075	42,49877473
12	%70FeCrC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 SiC	40	6	180	0,0074	42,61536561
13	%70SiC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	10	16	180	0,0229	32,80329035
14	%70SiC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	20	16	180	0,0365	28,75414271
15	%70SiC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	30	6	120	0,0072	42,85335007
16	%70SiC-%10 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	40	6	120	0,008	41,93820026

Tablo 9.6. Y1-Y4 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu

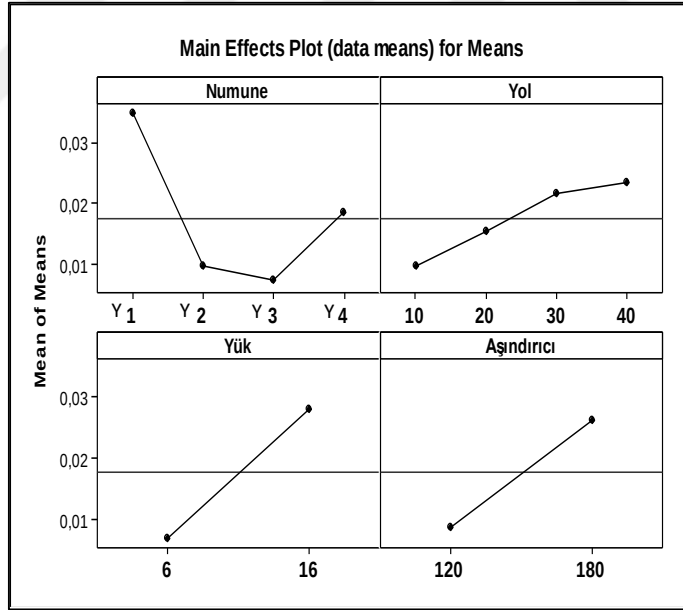
Parametreler	S/N oranı			
	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	33,86	42,54	43,26	36,59
B	42,51	38,31	37,21	38,22
C	43,32	34,80		
D	42,55	35,57		

Tablo 9.5 ve Tablo 9.6’da kontrol faktörü olarak seçilen verilerin, abrasiv aşınma direnci sonucu elde edilen kütle kayıpları hesaplanarak S/N oranları tablosu yapılmıştır. Parametrelerden herhangi bir için en iyi değer o parametrenin tüm seviyeleri arasında elde edilen en büyük S/N oranına göre tespit edilmiştir. [190, 192]. Dolayısıyla A3B1C1D1 denklemi optimum şartların sağlandığı değerlerdir. S/N oranın en yüksek olduğu seviye, bütün faktörlerin seviyeleri arasında optimum seviyeyi vermektedir. Şekil 9.25’de çalışmanın S/N oranlarının, kontrol faktörleri ve seviyeleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 9.26’de Plazma transferli ark kaynağıyla alaşımlandırılmış Y1-Y4 numunelerinin,

Taguchi dizaynına göre aşındırıldıktan sonra, bu numunelerin faktör ve seviyelerin abrasiv aşınma direncinde kütle kaybına etkileri görülmektedir.



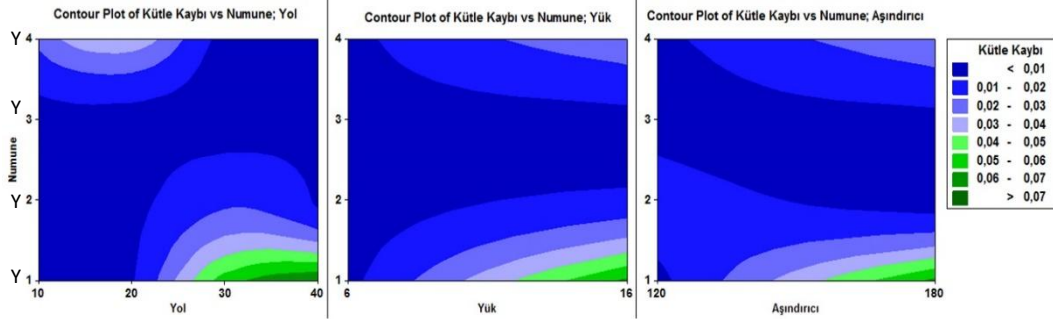
Şekil 9.25. Y1-Y4 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)



Şekil 9.26. Y1-Y4 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği

Şekil 9.27’da kütle kaybının kontrol faktörleri üzerindeki etkisi countour plot renk dağılımı metoduyla verilmiştir. Bu grafiklerde kaplama tabakasının diğer her bir kontrol faktörünün kütle kaybına olan etkisi harita olarak verilmiştir. Her bir kaplama kendi içinde değerlendirilirse faktörlerin ne kadar etkili oldukları görülmektedir. Talaş kaldırılamayan durumlarda ya aşındırıcı taneleri yüzey içine doğru uzanarak yüzey deforme olur bununla birlikte enerji tüketilir fakat malzeme kaldırılamaz ve yüzeyde ezmeye sebep olur ya da

aşındırıcı taneleri yüzeye temas eder ancak sadece sürtme/ovalama sürtünmesi oluşur, enerji tüketilir, fakat hiçbir malzeme kaldırmadan ovalama yapar [210].



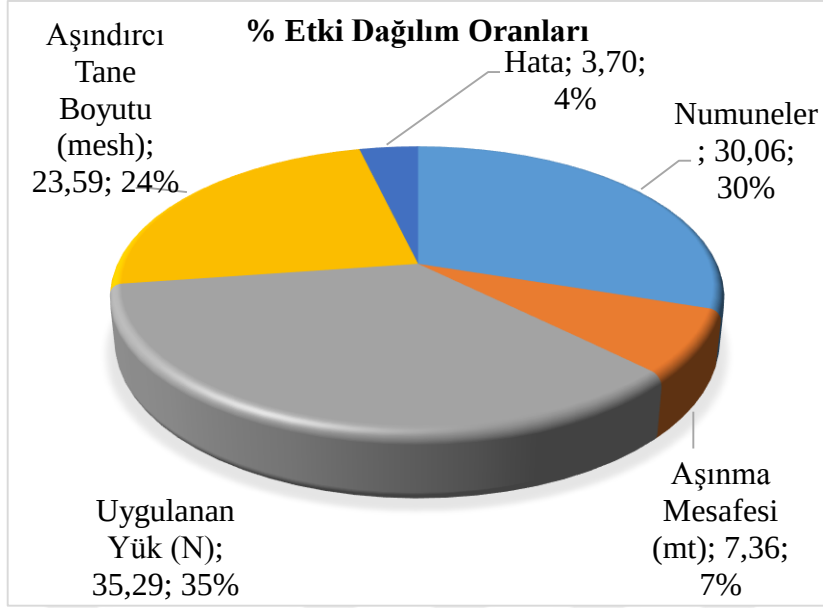
Şekil 9.27. Y1-Y4 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği

S/N oranındaki varyans analizi, istatistiksel olarak anlamlı parametrelerin tanımlanması için gerçekleştirilir [202]. Abrasiv aşınma davranışının yapılan varyans analizleri sonuçlarında faktörlerin aşınma direnci üzerindeki etkileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonuçları Tablo 9.7’de verilmiştir.

Tablo 9.7. Y1-Y4 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları

Sembol	Df	Ss	Variance	F	p ^a (%)
Numuneler	3	251,6613	83,8871	41,59789 ^b	30,05847
Aşınma Mesafesi (mt)	3	66,19978	22,06659	10,94237 ^b	7,36128
Uygulanan Yük (N)	1	290,3997	290,3997	144,0032 ^b	35,29295
Aşındırıcı Tane Boyutu (Grid)	1	194,7352	194,7352	96,56519 ^b	23,58533
Hata	7	14,11634	2,016619	0	3,701974
TOPLAM		817,1124			
Df ; Serbestlik derecesi; ss; Kareler Toplamı; aKatkı Oranı, b 99 % Güven seviyesi					

Ayrıca kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri ve hata yüzdesi grafiksel olarak Şekil 9.28’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün faktörlerin sonuç üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi uygulanan yük miktarı %35 oranıyla en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 9.28. Y1-Y4 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri

S/N oranı grafikleri incelendiğinde en optimum seviyelerin A2B1C1D1 olduğu görülmektedir. Bu seviyelerdeki optimum S/N oranının elde edilmesinde 4 nolu denklem kullanılmıştır.

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (9.1)$$

η_{opt} , optimum S/N oranını, η_m , ortalama S/N oranlarının ortalaması, η_i her bir parametrenin ideal olan seviyesinin S/N oranını göstermektedir. Yapılan hesaplamada optimum S/N oranı -24,26135086 dB bulunmuştur. Bu denklemden elde edilen optimum S/N oranı en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre 5 nolu denklem kullanılarak optimum ortalama aşınma miktarının hesaplanması sağlanmıştır.

$$Ra_{opt} = \sqrt{10^{-\frac{\eta_{opt}}{10}}} \quad (9.2)$$

5 nolu denklemde $Wear_{opt}$, optimum ortalama aşınma miktarını ifade etmektedir. Optimum ortalama aşınma miktarı 0,061225516 gr olarak hesaplanmıştır.

9.3.2. Y5-Y8 Numunelerinin Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi

Bu çalışmada, Hardox 400 çeliğin yüzeyi PTA metoduyla B₄C, FeCrC, SiC ve TiC tozlarının farklı kombinasyonlarında ancak aynı parametrelerde kaplanmıştır. Taguchi dizaynı, Minitab 14 paket programından faydalanılarak yapılmıştır. Bu işlem için Tablo 9.8 'de verilen parametreler ve seviyelerinin L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizini oluşturulmuştur. Bu

parametreler dört adet numune, dört adet yol (mt), iki adet yük (N) ve iki adet aşındırıcı (tane boyutu-grid) seviyeye sahip parametrelerdir.

Tablo 9.8. PTA Kaplamada Y5-Y8 deney numuneleri parametreleri

Sıra No	Parametreler				
	Numune	Yol	Yük	Aşındırıcı	
1	5	10	6	120	L 16 (4*2, 2*2)
2	5	20	6	120	
3	5	30	16	180	
4	5	40	16	180	
5	6	10	6	180	
6	6	20	6	180	
7	6	30	16	120	
8	6	40	16	120	
9	7	10	16	120	
10	7	20	16	120	
11	7	30	6	180	
12	7	40	6	180	
13	8	10	16	180	
14	8	20	16	180	
15	8	30	6	120	
16	8	40	6	120	

Kaplama tabakalarının abrasiv aşınma direnci, bu orthogonal dizin kullanılarak en düşük en iyi kontrol özelliğiyle deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Taguchi metoduyla elde edilen veriler, deney sonuçlarına göre grafiksel analizleriyle değerlendirilmiştir.

9.3.2.1. Y5-Y8 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı

Bu çalışmada; yüzey alaşımlama işleminde kaplama tabakası, aşınma mesafesi, aşındırıcı tane boyutu, ve uygulanan yük olmak üzere dört ayrı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu dört faktör için ilk ikisi 4 diğer ikisinin 2'li seviyeleri seçilmiştir. Çalışmamızda kullanılan parametreler ve her parametrenin seviyeleri Tablo 9.9'da ki gibidir. Parametre ve seviyeleri eşit olmadığından karışık seviyeli dizin olan L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizinini seçilerek oluşturulmuştur.

Tablo 9.9. Y5-Y8 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri

Sembol	Test Parametresi	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	Numuneler	Y5	Y6	Y7	Y8
B	Aşınma Mesafesi (mt)	10	20	30	40
C	Uygulanan Yük (N)	6	16	-	-
D	Aşındırıcı Tane Boyutu(mesh)	120	180	-	-

Tablo 9.8’de ki parameter ve seviyesine göre yapılan abrasiv aşınma işlemleri karışık orthogonal L16 (4*2, 2*2) dizinine göre yapılmıştır. Abrasiv aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve S/N oranları verilmektedir. Tablo 9.10’da abrasiv aşınma işlemi sonunda elde edilen en küçük en iyi ilkesiyle çalışan sisteme göre, faktör seviyelerine göre S/N oranları verilmektedir. İşlemden S/N oranlarının ortalaması 35,01779862 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9.10. Y5-Y8 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması

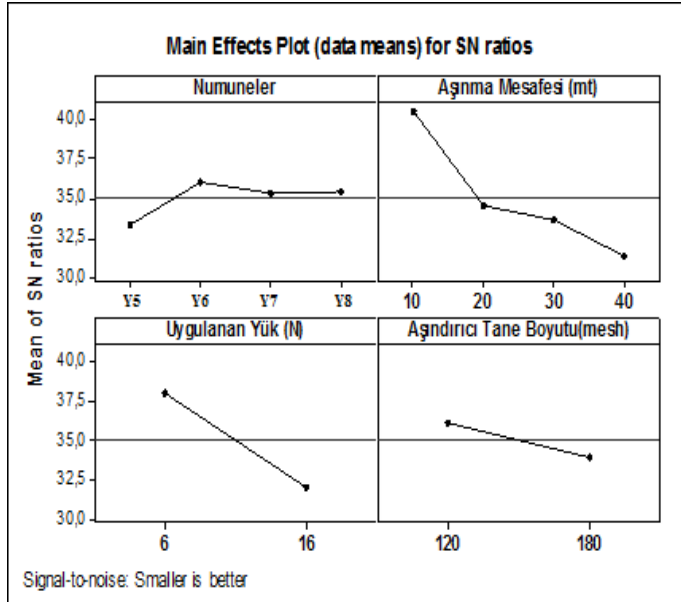
Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	%55B ₄ C-%15 TiC-%15FeCrC-%15 SiC	10	6	120	0,0063	44,01318901
2	%55B ₄ C-%15 TiC-%15FeCrC-%15 SiC	20	6	120	0,0146	36,71294288
3	%55B ₄ C-%15 TiC-%15FeCrC-%15 SiC	30	16	180	0,0438	27,17051779
4	%55B ₄ C-%15 TiC-%15FeCrC-%15 SiC	40	16	180	0,0542	25,32001427
5	%55TiC-%15 B ₄ C-%15FeCrC-%15 SiC	10	6	180	0,0085	41,41162149
6	%55TiC-%15 B ₄ C-%15FeCrC-%15 SiC	20	6	180	0,0118	38,56235985
7	%55TiC-%15 B ₄ C-%15FeCrC-%15 SiC	30	16	120	0,0231	32,7277604
8	%55TiC-%15 B ₄ C-%15FeCrC-%15 SiC	40	16	120	0,0268	31,43730412
9	%55FeCrC-%15 B ₄ C-%15 TiC-%15 SiC	10	16	120	0,0119	38,48906077
10	%55FeCrC-%15 B ₄ C-%15 TiC-%15 SiC	20	16	120	0,024	32,39577517
11	%55FeCrC-%15 B ₄ C-%15 TiC-%15 SiC	30	6	180	0,0154	36,24958558
12	%55FeCrC-%15 B ₄ C-%15 TiC-%15 SiC	40	6	180	0,0199	34,02293847
13	%55SiC-%15 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	10	16	180	0,0122	38,27280339
14	%55SiC-%15 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	20	16	180	0,0297	30,54487101
15	%55SiC-%15 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	30	6	120	0,0121	38,34429259
16	%55SiC-%15 B ₄ C-%10 TiC-%10 FeCrC	40	6	120	0,0186	34,60974112

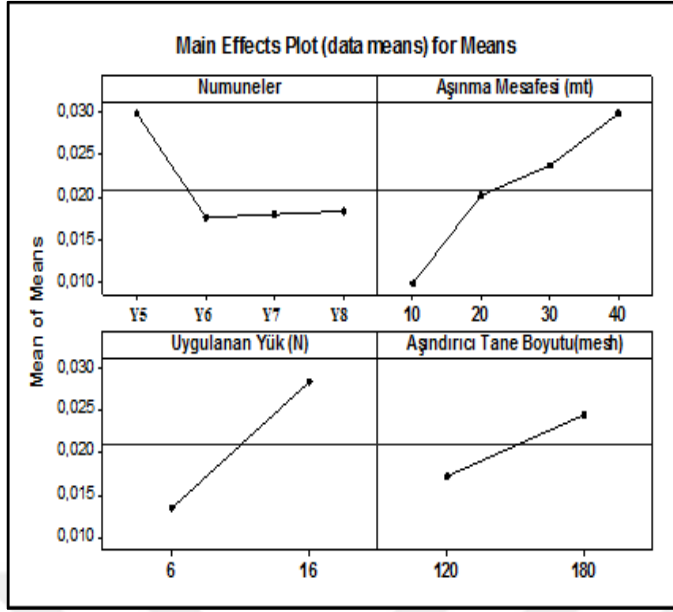
Tablo 9.11. Y5-Y8 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu

Parametreler	S/N oranı			
	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	33,30	36,03	35,29	35,44
B	40,55	34,55	33,62	31,35
C	37,99	32,04		
D	36,09	33,94		

Tablo 9.10 ve Tablo 9.11’de kontrol faktörü olarak seçilen verilerin, abrasiv aşınma direnci sonucu elde edilen kütle kayıpları hesaplanarak S/N oranları tablosu yapılmıştır. Sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılan S/N oranı, en yüksek S/N oranı değeri deney tasarımında arzulanan optimum nokta olan en düşük değere göre hesaplanmış kütle kaybını göre tespit edilmiştir [210].

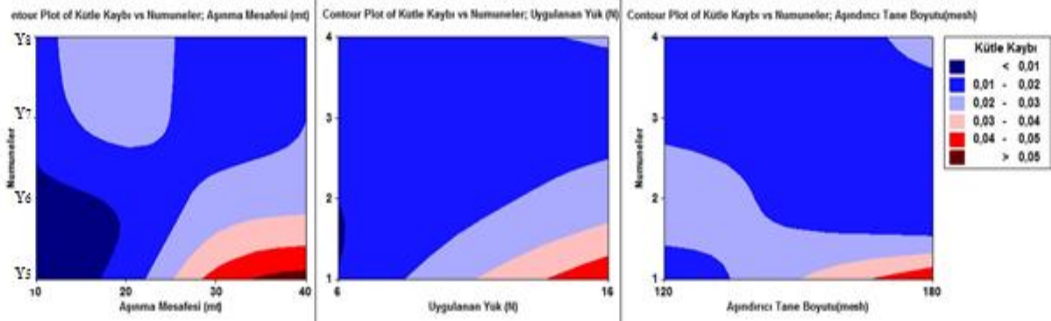
Dolayısıyla A2B1C1D1 denklemi optimum şartların sağlandığı değerlerdir. S/N değerinin büyük olduğu seviye tüm faktörlerin seviyeleri arasında optimum seviyedir. Şekil 9.29’de çalışmanın S/N oranlarının, kontrol faktörleri ve seviyeleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 9.30’de Plazma transferli ark kaynağıyla alaşımlandırılmış Y5-Y8 numunelerinin, Taguchi dizaynına göre aşındırıldıktan sonra, bu numunelerin faktör ve seviyelerin abrasiv aşınma direncinde kütle kaybına etkileri görülmektedir.

**Şekil 9.29.** Y5-Y8 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)



Şekil 9.30. Y5-Y8 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği

Şekil 9.31’de kütle kaybının kontrol faktörleri üzerindeki etkisi countour plot renk dağılımı metoduyla verilmiştir. Bu grafiklerde kaplama tabakasının diğer her bir kontrol faktörünün kütle kaybına olan etkisi harita olarak verilmiştir.



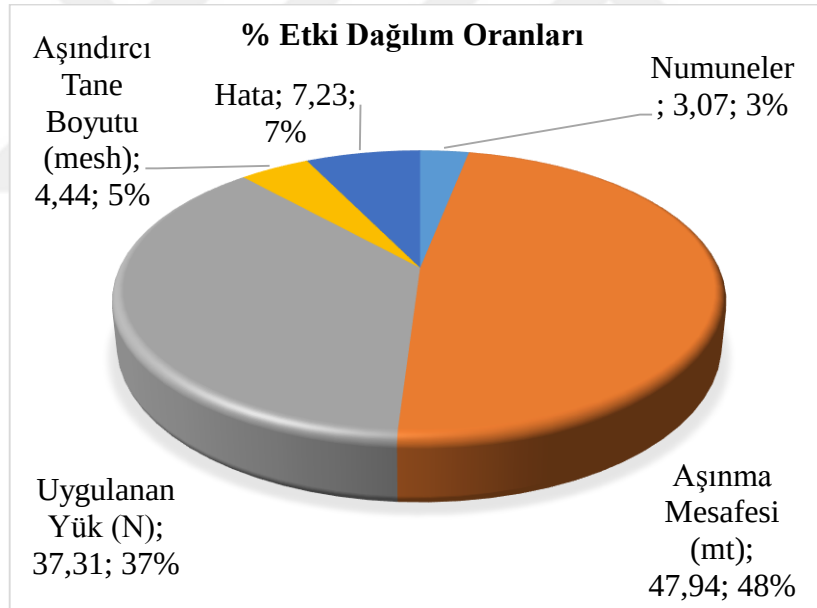
Şekil 9.31. Y5-Y8 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği

Abrasiv aşınma davranışının yapılan varyans analizleri sonuçlarında faktörlerin aşınma direnci üzerindeki etkileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonuçları Tablo 9.12’de verilmiştir.

Tablo 9.12. Y5-Y8 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları

Sembol	Df	Ss	Variance	F	p ^a (%)
Numuneler	3	16,90088	5,633625	3,121967	3,069902
Aşınma Mesafesi (mt)	3	184,7999	61,59997	34,13664 ^b	47,9396
Uygulanan Yük (N)	1	141,423	141,423	78,3719 ^b	37,31195
Aşındırıcı Tane Boyutu (Grid)	1	18,43705	18,43705	10,2172 ^b	4,444916
Hata	7	12,63158	1,804512	0	7,233625
TOPLAM		374,1924			
Df ; Serbestlik derecesi; Ss; Kareler Toplamı; a Katkı Oranı, b 95 % Güven seviyesi					

Ayrıca kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri ve hata yüzdesi grafiksel olarak Şekil 9.32’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün faktörlerin sonuç üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi uygulanan aşınma mesafe %47 oranıyla en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 9.32. Y5-Y8 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri

S/N oranı grafikleri incelendiğinde en optimum seviyelerin A2B1C1D1 olduğu görülmektedir. Bu seviyelerdeki optimum S/N oranının elde edilmesinde 4 nolu denklem kullanılmıştır.

$$\eta_{\text{opt}} = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (9.1)$$

η_{opt} , optimum S/N oranını, η_m , ortalama S/N oranlarının ortalaması, η_i her bir parametrenin ideal olan seviyesinin S/N oranını göstermektedir. Yapılan hesaplamada optimum S/N oranı

-25,58737197 dB bulunmuştur. Bu denklemden elde edilen optimum S/N oranı en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre 5 nolu denklem kullanılarak optimum ortalama aşınma miktarının hesaplanması sağlanmıştır.

$$Ra_{opt} = \sqrt{10^{-\frac{\eta_{opt}}{10}}} \quad (9.2)$$

5 nolu denklemde $Wear_{opt}$, optimum ortalama aşınma miktarını ifade etmektedir. Optimum ortalama aşınma miktarı 0,052557101 gr olarak hesaplanmıştır.

9.3.3. Y9-Y12 Numunelerin Abrasiv aşınma Dirençlerinin Analizi

Bu çalışmada, Hardox 400 çeliğin yüzeyi PTA metoduyla B_4C , $FeCrC$, SiC ve TiC tozlarının farklı kombinasyonlarında ancak aynı parametrelerde kaplanmıştır. Taguchi dizaynı, Minitab 14 paket programından faydalanılarak yapılmıştır. Bu işlem için Tablo 9.13 'de verilen parametreler ve seviyelerinin $L_{16} (4 \times 2, 2 \times 2)$ Taguchi dizini oluşturulmuştur. Bu parametreler dört adet numune, dört adet yol (mt), iki adet yük(N) ve iki adet aşındırıcı (tane boyutu-grid) seviyeye sahip parametrelerdir.

Tablo 9.13. PTA Kaplamada Y9-Y12 deney numuneleri parametreleri

Sıra No	Parametreler				
	Numune	Yol	Yük	Aşındırıcı	
1	9	10	6	120	L 16 (4*2, 2*2)
2	9	20	6	120	
3	9	30	16	180	
4	9	40	16	180	
5	10	10	6	180	
6	10	20	6	180	
7	10	30	16	120	
8	10	40	16	120	
9	11	10	16	120	
10	11	20	16	120	
11	11	30	6	180	
12	11	40	6	180	
13	12	10	16	180	
14	12	20	16	180	
15	12	30	6	120	
16	12	40	6	120	

Kaplama tabakalarının abrasiv aşınma direnci, bu orthogonal dizin kullanılarak en düşük en iyi kontrol özelliğiyle deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Taguchi metoduyla elde edilen veriler, deney sonuçlarına göre grafiksel analizleriyle değerlendirilmiştir.

9.3.3.1. Y9-Y12 Numuneler İçin Taguchi Dizaynı

Bu çalışmada; yüzey alaşımlama işleminde kaplama tabakası, aşınma mesafesi, aşındırıcı tane boyutu, ve uygulanan yük olmak üzere dört ayrı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu dört faktör için ilk ikisi 4 diğer ikisinin 2'li seviyeleri seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 9.14'de verilmiştir. Parametre ve seviyeleri eşit olmadığından karışık seviyeli dizin olan L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizinini seçilerek oluşturulmuştur.

Tablo 9.14. Y9-Y12 Numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri

Sembol	Test Parameteresi	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	Numuneler	Y9	Y10	Y11	Y12
B	Aşınma Mesafesi (mt)	10	20	30	40
C	Uygulanan Yük (N)	6	16	-	-
D	Aşındırıcı Tane Boyutu(mesh)	120	180	-	-

Tablo 9.13'de ki parameter ve seviyesine göre yapılan abrasiv aşınma işlemleri karışık orthogonal L16 (4*2, 2*2) dizinine göre yapılmıştır. Abrasiv aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve S/N oranları verilmektedir. Tablo 9.15'de abrasiv aşınma işlemi sonunda elde edilen en küçük en iyi ilkesiyle çalışan sisteme göre, faktör seviyelerine göre S/N oranları verilmektedir. İşlemde S/N oranlarının ortalaması 34,93864683 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9.15. Y5-Y8 Numunelerinin kaplama tabakasının kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması

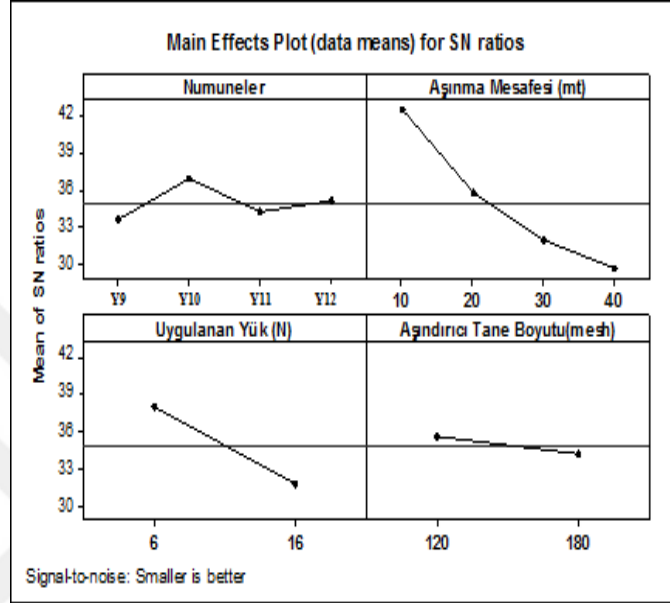
Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	%40 B ₄ C-%20 TiC-%20 FeCrC-%20 SiC	10	6	120	0,0062	44,15216621
2	%40 B ₄ C-%20 TiC-%20 FeCrC-%20 SiC	20	6	120	0,0115	38,78604319
3	%40 B ₄ C-%20 TiC-%20 FeCrC-%20 SiC	30	16	180	0,0478	26,41144207
4	%40 B ₄ C-%20 TiC-%20 FeCrC-%20 SiC	40	16	180	0,0565	24,95903104
5	%40 TiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 SiC	10	6	180	0,0043	47,33063089
6	%40 TiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 SiC	20	6	180	0,0105	39,57621402
7	%40 TiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 SiC	30	16	120	0,0222	33,07294051
8	%40 TiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 SiC	40	16	120	0,0421	27,51435808
9	%40 FeCrC-%20 B ₄ C-%20 TiC-%20 SiC	10	16	120	0,011	39,1721463
10	%40 FeCrC-%20 B ₄ C-%20 TiC-%20 SiC	20	16	120	0,0227	32,87948286
11	%40 FeCrC-%20 B ₄ C-%20 TiC-%20 SiC	30	6	180	0,0228	32,84130306
12	%40 FeCrC-%20 B ₄ C-%20 TiC-%20 SiC	40	6	180	0,0256	31,83520069
13	%40 SiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 TiC	10	16	180	0,011	39,1721463
14	%40 SiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 TiC	20	16	180	0,0263	31,60088503
15	%40 SiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 TiC	30	6	120	0,0172	35,28943106
16	%40 SiC-%20 B ₄ C-%20 FeCrC-%20 TiC	40	6	120	0,019	34,42492798

Tablo 9.16. Y9-Y12 Kaplama tabakasının S/N oranları tablosu

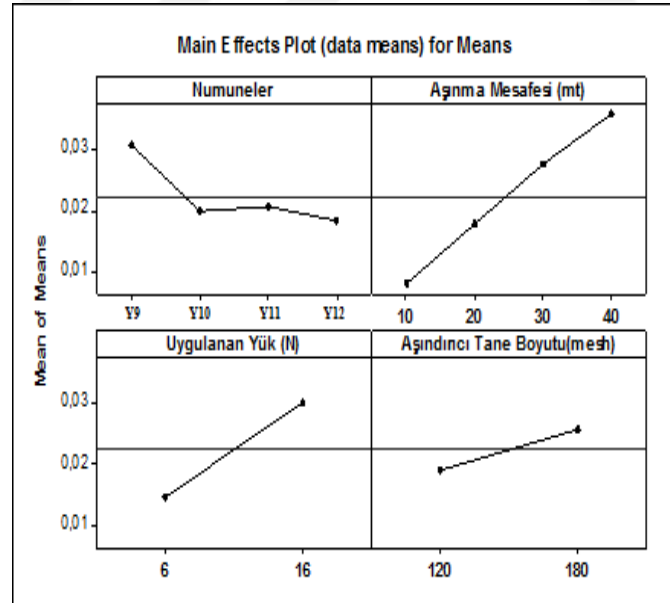
Parametreler	S/N oranı			
	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	33,58	36,87	34,18	35,12
B	42,46	35,71	31,90	29,68
C	38,03	31,85		
D	35,66	34,22		

Tablo 9.15 ve Tablo 9.16’da kontrol faktörü olarak seçilen verilerin, abrasiv aşınma direnci sonucu elde edilen kütle kayıpları hesaplanarak S/N oranları tablosu yapılmıştır. Parametrelerden herhangi biri için en iyi değeri belirtmek, o parametrenin tüm seviyeleri arasında bulunan en büyük S/N oranına göre belirlenmiştir. [190, 192]. Yapılan deneysel çalışmada optimum sonucu elde etmek için kullanılan parametre seviyelerinin en yüksek S/N oranı olan seviyelerine göre tespit edilmiştir [211]. Dolayısıyla A2B1C1D1 denklemi optimum şartların sağlandığı değerlerdir. S/N değerindeki oranın en fazla olduğu seviye, bütün faktörlerin seviyeleri arasında optimum seviyeyi vermektedir. Şekil 9.33’de

çalışmanın S/N oranlarının, kontrol faktörleri ve seviyeleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 9.34’de Plazma transferli ark kaynağıyla alaşımlandırılmış Y9-Y12 numunelerinin, Taguchi dizaynına göre aşındırıldıktan sonra, bu numunelerin faktör ve seviyelerin abrasiv aşınma direncinde kütle kaybına etkileri görülmektedir.

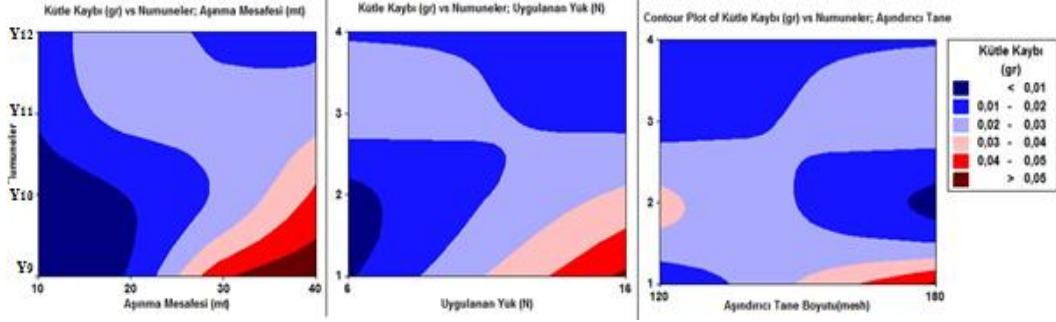


Şekil 9.33. Y9-Y12 S / N oranları için ana etki grafiği (dB)



Şekil 9.34. Y9-Y12 Ana ağırlık kütle kaybı grafiği

Şekil 9.35’de kütle kaybının kontrol faktörleri üzerindeki etkisi countour plot renk dağılımı metoduyla verilmiştir. Bu grafiklerde kaplama tabakasının diğer her bir kontrol faktörünün kütle kaybına olan etkisi harita olarak verilmiştir.



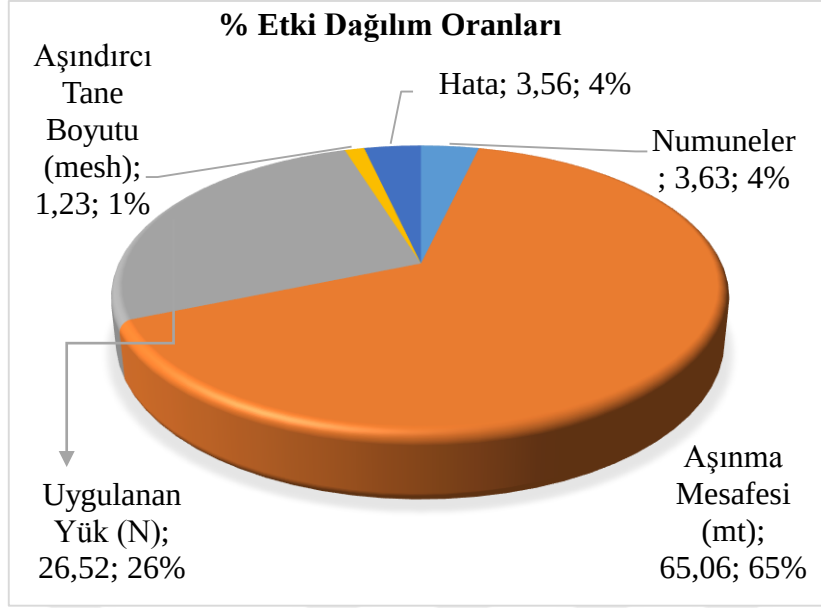
Şekil 9.35. Y9-Y12 Kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği

Abrasiv aşınma davranışının yapılan varyans analizleri sonuçlarında faktörlerin aşınma direnci üzerindeki etkileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonuçları Tablo 9.17’de verilmiştir.

Tablo 9.17. Y9-Y12 Kaplama tabakası kütle kaybı için varyans analizi sonuçları

Sembol	Df	Ss	Variance	F	p^a (%)
Numuneler	3	24,81376	8,271253	6,095754 ^b	3,630798
Aşınma Mesafesi (mt)	3	375,7859	125,262	92,31564 ^b	65,06371
Uygulanan Yük (N)	1	152,8529	152,8529	112,6497 ^b	26,51733
Aşındırıcı Tane Boyutu (Grid)	1	8,358811	8,358811	6,160282 ^b	1,225592
Hata	7	9,498214	1,356888	0	3,562572
TOPLAM		571,3096			
Df ; Serbestlik derecesi; Ss; Kareler Toplamı; aKatkı Oranı, b 95 % Güven seviyesi					

Ayrıca kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri ve hata yüzdesi grafiksel olarak Şekil 9.36’da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün faktörlerin sonuç üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi uygulanan aşınma mesafe %65 oranıyla en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 9.36. Y9-Y12 Kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri

S/N oranı grafikleri incelendiğinde en optimum seviyelerin A2B1C1D1 olduğu görülmektedir. Bu seviyelerdeki optimum S/N oranının elde edilmesinde 4 nolu denklem kullanılmıştır.

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (9.1)$$

η_{opt} , optimum S/N oranını, η_m , ortalama S/N oranlarının ortalaması, η_i her bir parametrenin ideal olan seviyesinin S/N oranını göstermektedir. Yapılan hesaplamada optimum S/N oranı 24,50827025 dB bulunmuştur. Bu denklemden elde edilen optimum S/N oranı en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre 5 nolu denklem kullanılarak optimum ortalama aşınma miktarının hesaplanması sağlanmıştır.

$$Ra_{opt} = \sqrt{10^{-\frac{\eta_{opt}}{10}}} \quad (9.2)$$

5 nolu denklemde $Wear_{opt}$, optimum (en uygun değer) ortalama aşınma miktarını ifade etmektedir. Optimum ortalama aşınma miktarı 0,059509526 gr olarak hesaplanmıştır.

9.4. Mikroalaşımlı Hardox 400 Çeliğin Isıl İşlemlerden Sonrası Abrasiv Aşınma Dirençlerinin Analizi

Hardox 400 mikroalaşımlı çeliğin Taguchi dizaynı, Minitab 14 paket programından faydalanılarak yapılmıştır. Bu işlem için Tablo 9.18 'de verilen parametreler ve seviyelerinin L16 (4*2, 4*2) Taguchi dizini oluşturulmuştur. Bu parametreler dört adet numune, dört adet

yol (mt), iki adet yük(N) ve iki adet aşındırıcı (tane boyutu-grid) seviyeye sahip parametrelerdir.

Tablo 9.18. Isıl işlem deney numuneleri parametreleri

Sıra No	Parametreler				
	Numune	Yol	Yük	Aşındırıcı	
1	1	10	6	120	L 16 (4*2, 2*2)
2	1	20	6	120	
3	1	30	16	180	
4	1	40	16	180	
5	2	10	6	180	
6	2	20	6	180	
7	2	30	16	120	
8	2	40	16	120	
9	3	10	16	120	
10	3	20	16	120	
11	3	30	6	180	
12	3	40	6	180	
13	4	10	16	180	
14	4	20	16	180	
15	4	30	6	120	
16	4	40	6	120	

Kaplama tabakalarının abrasiv aşınma direnci, bu orthogonal dizin kullanılarak en düşük en iyi kontrol özelliğiyle deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Taguchi metoduyla elde edilen veriler, deney sonuçlarına göre grafiksel analizleriyle değerlendirilmiştir.

9.4.1. Isıl İşlem Uygulanmış Numuneler İçin Taguchi Dizayını

Bu çalışmada; yüzey alıştırma işleminde kaplama tabakası, aşınma mesafesi, aşındırıcı tane boyutu ve uygulanan yük olmak üzere dört ayrı kontrol faktörü kullanılmıştır. Bu dört faktör için ilk ikisi 4 diğer ikisinin 2'li seviyeleri seçilmiştir. Çalışmamızda kullandığımız parametreler ve her parametrenin kendi seviyeleri Tablo 9.18'de verilmiştir.

Parametre ve seviyeleri eşit olmadığından karışık seviyeli dizin olan L16 (4*2, 2*2) Taguchi dizinini seçilerek oluşturulmuştur.

Tablo 9.19. Isıl işlem numunelerinin kontrol faktörleri ve onların seviyeleri

Sembol	Test Parametresi	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	Numuneler	Fırın	Yağ	Su	Isıl İşlemsiz
B	Aşınma Mesafesi (mt)	10	20	30	40
C	Uygulanan Yük (N)	6	16	-	-
D	Aşındırıcı Tane Boyutu(mesh)	120	180	-	-

Tablo 9.19’de ki parametre ve seviyesine göre yapılan abrasiv aşınma işlemleri karışık orthogonal L16 (4*2, 2*2) dizinine göre yapılmıştır. Abrasiv aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma kütle kayıpları ve S/N oranları verilmektedir. Tablo 9.20’de abrasiv aşınma işlemi sonunda elde edilen en küçük en iyi ilkesiyle çalışan sisteme göre, faktör seviyelerine göre S/N oranları verilmektedir. İşlemden S/N oranlarının ortalaması 35,37560455 dB olarak hesaplanmıştır.

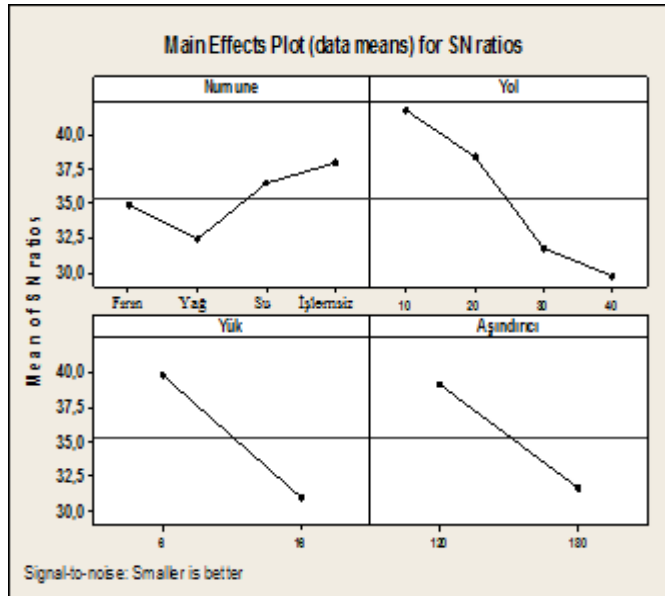
Tablo 9.20. Isıl işlem numunelerinin kütle kaybı oranlarının deneysel olarak S/N oranının hesaplanması

Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)	S/N Oranı
	A	B	C	D		
1	Fırın	10	6	120	0,0061	44,2934033
2	Fırın	20	6	120	0,0033	49,6297212
3	Fırın	30	16	180	0,0727	22,76931178
4	Fırın	40	16	180	0,0734	22,6860788
5	Yağ	10	6	180	0,0094	40,53744293
6	Yağ	20	6	180	0,0150	36,47817482
7	Yağ	30	16	120	0,0574	24,82176215
8	Yağ	40	16	120	0,0416	27,61813339
9	Su	10	16	120	0,0058	44,73144013
10	Su	20	16	120	0,0129	37,78820579
11	Su	30	6	180	0,0218	33,23087013
12	Su	40	6	180	0,0315	30,03378892
13	Isıl İşlemsiz	10	16	180	0,0136	37,32922183
14	Isıl İşlemsiz	20	16	180	0,0332	29,57723833
15	Isıl İşlemsiz	30	6	120	0,0051	45,84859648
16	Isıl İşlemsiz	40	6	120	0,0117	38,63628277

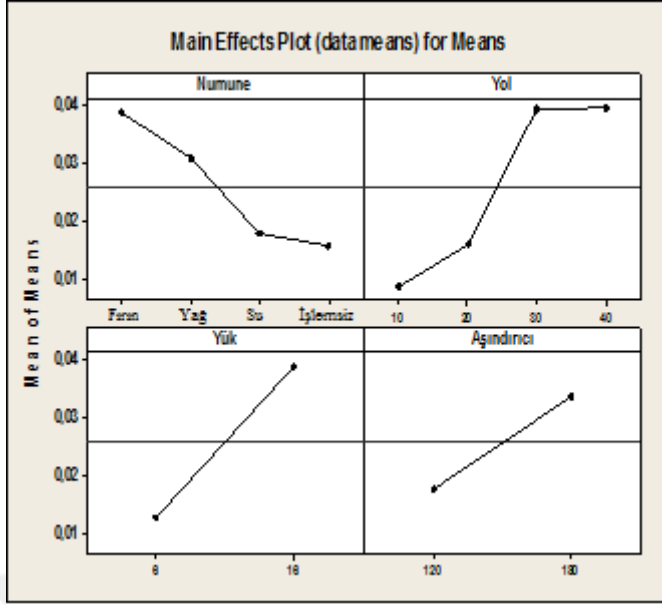
Tablo 9.21. Isıl işlem numunelerinin S/N oranları tablosu

Parametreler	S/N oranı			
	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
A	34,84	32,36	36,45	37,85
B	41,72	38,37	31,67	29,74
C	39,84	30,92		
D	39,17	31,58		

Tablo 9.20 ve Tablo 9.21’de kontrol faktörü olarak seçilen verilerin, abrasiv aşınma direnci sonucu elde edilen kütle kayıpları hesaplanarak S/N oranları tablosu yapılmıştır. Parametreler için en iyi değeri belirtmek, parametrenin tüm seviyeleri arasında elde edilen en büyük orandaki S/N oranına göre bulunarak verilmiştir [198, 200]. Dolayısıyla A4B1C1D1 denklemi optimum şartların sağlandığı değerlerdir. S/N oranının sonucu büyük çıktığı seviye tüm faktörlerin seviyeleri karşılaştırılırsa o seviye en optimum seviyeyi vermektedir. Şekil 9.37’de çalışmanın S/N oranlarının, kontrol faktörleri ve seviyeleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 9.38’de ile ısıtma işlem uygulanmış, mikroyağlı Hardox 400 çeliğinin Taguchi dizaynına göre aşındırıldıktan sonra, bu numunelerin faktör ve seviyelerin abrasiv aşınma direncinde kütle kaybına etkileri görülmektedir.

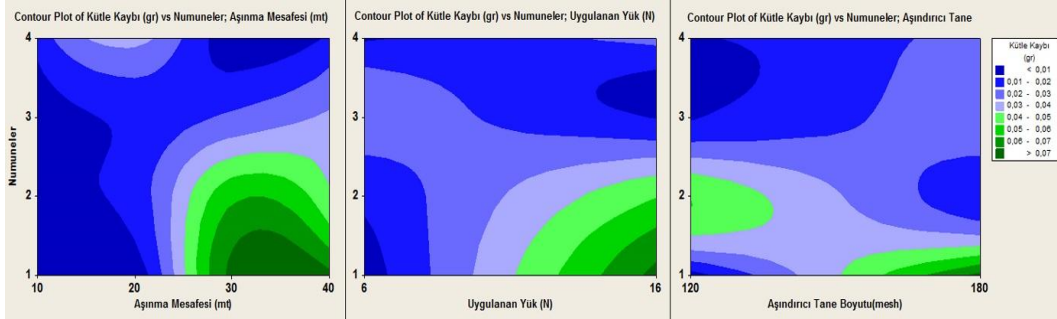


Şekil 9.37. Isıl işlem numuneleri S / N oranları için ana etki grafiği (dB)



Şekil 9.38. Isıl işlem numuneleri ana ağırlıklı kütle kaybı grafiği

Şekil 9.39’da kütle kaybının kontrol faktörleri üzerindeki etkisi countour plot renk dağılımı metoduyla verilmiştir. Bu grafiklerde kaplama tabakasının diğer her bir kontrol faktörünün kütle kaybına olan etkisi harita olarak verilmiştir.



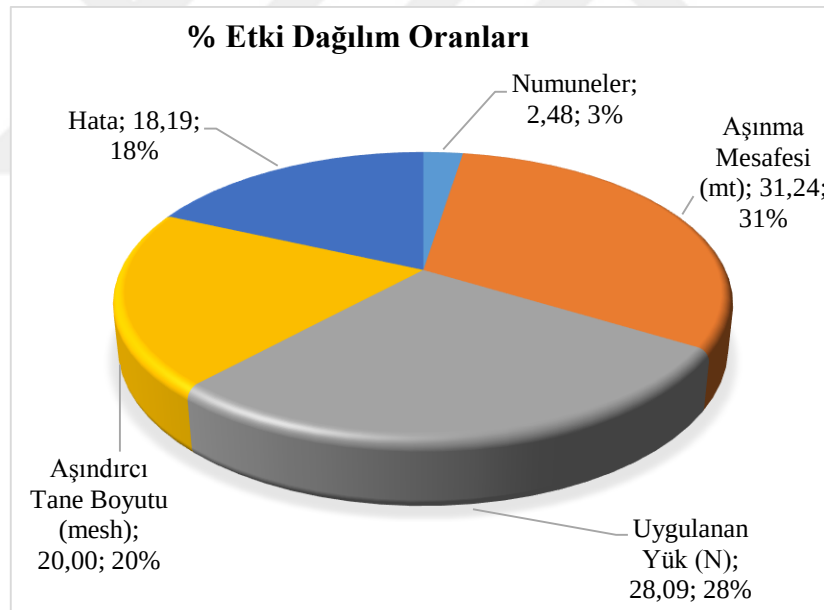
Şekil 9.39. Isıl işlem numuneleri kütle kaybının kalan parametrelerle Contour Plot grafiği

Abrasiv aşınma davranışının yapılan varyans analizleri sonuçlarında faktörlerin aşınma direnci üzerindeki etkileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Varyans analizi sonuçları Tablo 9.22’de verilmiştir.

Tablo 9.22. Isıl işlem numuneleri kütle kaybı için varyans analizi sonuçları

Sembol	Df	Ss	Variance	F	p ^a (%)
Numuneler	3	66,44105	22,14702	1,681114	2,478018
Aşınma Mesafesi (mt)	3	378,8526	126,2842	9,585856 ^b	31,23692
Uygulanan Yük (N)	1	318,327	318,327	24,16326 ^b	28,09073
Aşındırıcı Tane Boyutu (Grid)	1	230,4735	230,4735	17,49456 ^b	20,00341
Hata	7	92,21809	13,17401	0	18,19092
TOPLAM		1086,312			
Df ; Serbestlik derecesi; ss; Kareler Toplamı; aKatkı Oranı, b 99 % Güven seviyesi					

Ayrıca kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri ve hata yüzdesi grafiksel olarak Şekil 9.40'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün faktörlerin sonuç üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi uygulanan aşınma mesafe %31 oranıyla en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 9.40. Isıl işlem kontrol faktörlerinin aşınma direncine yüzde olarak etkileri

S/N oranı grafikleri incelendiğinde en optimum seviyelerin A4B1C1D1 olduğu görülmektedir. Bu seviyelerdeki optimum S/N oranının elde edilmesinde 4 nolu denklem kullanılmıştır.

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (9.1)$$

η_{opt} , optimum S/N oranını, η_m , ortalama S/N oranlarının ortalaması, η_i her bir parametrenin ideal olan seviyesinin S/N oranını göstermektedir. Yapılan hesaplamada

optimum S/N oranı -18,47607562 bulunmuştur. Bu denklemden elde edilen optimum S/N oranı en küçük en iyi kalite karakteristiğine göre 5 nolu denklem kullanılarak optimum ortalama aşınma miktarının hesaplanması sağlanmıştır.

$$Ra_{opt} = \sqrt{10^{-\frac{\eta_{opt}}{10}}} \quad (9.2)$$

3.nolu denklemde $Wear_{opt}$, optimum ortalama aşınma miktarını ifade etmektedir. Optimum ortalama aşınma miktarı 0,119178035 gr olarak hesaplanmıştır.

9.5. Y13 Numunesinin Abrasiv Aşınma Dirençleri Sonuçları

13 nolu numune Taguchi tasarım varyasyonlarının içine dahil edilmediğinden ayrı ayrı olarak her bir parametre gereğince abrasiv aşınma testi uygulanmıştır.

Tablo 9.23. PTA Alaşımlamada Y13 deney numunesinin aşınma parametreleri

Sıra No	Kontrol Faktörleri				Ölçülen Kütle Kaybı (gr)
	A	Yol	Yük	Aşındırıcı	
1	13	10	16	120	0,0131
2	13	20	16	120	0,0260
3	13	30	16	120	0,0252
4	13	40	16	120	0,0178
5	13	10	6	120	0,0032
6	13	20	6	120	0,0042
7	13	30	6	180	0,0072
8	13	40	6	180	0,0080
9	13	10	16	180	0,0124
10	13	20	16	180	0,0298
11	13	30	16	180	0,0365
12	13	40	16	180	0,0229
13	13	10	6	180	0,0051
14	13	20	6	180	0,0173
15	13	30	6	120	0,0115
16	13	40	6	120	0,0207

Tablo 9.23' de görüldüğü üzere en çok aşınma 11 numaralı deneyde 0,0365 (gr) kütle kaybıyla en az aşınmanı iste 5 nolu deney numunesinde 0,0032 (gr) meydana gelmiştir. Bu

değerin gözlenmesinde aşındırıcı tane boyutunun iriliği, mesafe ve yük değerleri rol oynamaktadır. Artan yol, yük ve mesh ile birlikte aşınma değeri artmıştır. Bununla birlikte, 11 numaralı deneyi 12 numaralı deneyle, 5 numaralı deneyi, 1 numaralı deneyle kıyasladığımıza aşınma oranının azalmasında pekleşme unsurları, dislokasyonlar başrol oynadığı bu değerlerin gözlenmesinde etkili olduğu düşünülmüştür.



10. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

10.1. Sonuçlar

Bu çalışmada; Hardox 400 mikroalaşımli çeliğin yüzeyi B_4C , TiC , $FeCrC$ ve SiC tozları kullanılarak plazma transferli ark kaynak kaplama yöntemiyle sabit enerji girdisi ve ilerleme hızında tozlar ergitilerek alaşımlandırılmıştır. Kaplama tabakasının mikroyapı ve mikrosertlikleri incelenmiştir. Kaplama tabakaları iki farklı aşındırıcı, yük ve dört farklı mesafede abrasiv aşınma direncine olan etkisi, Taguchi yöntemi kullanılarak bu alaşımlanmış tabakalarının abrasiv aşınma direncine etkisi araştırılmıştır. Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak ortalama en düşük aşınma değeri üzerinde parametre seviyelerinin etkileri analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

1. Deney çalışmalarında alt tabaka malzemesi olan Hardox 400 mikro-alaşımli çelik malzemenin yüzeyinin özellikleri PTA yöntemiyle değiştirilmiş ve geliştirilmiştir. Alaşımlanmış kaplama tabakasında herhangi bir makro ve mikro çatlak meydana gelmemiştir.
2. Kaplama tabakasında, çubuk şekilli ve dentritik yapı kısmen belirginleşirken, kolların uzantılarının yaklaşık 5-15 μm kadar uzunlukta ve kısa olduğu gözlenmiştir. Homojen bir şekilde difüzyonla element geçişleri, altlık malzemesinde yüksek ısı sayesinde tane sınırları içerisine doğru meydana gelmiştir. N1-N4 numaralı numunelerde: Kaplama tabakasının verilen enerjiyle çözündüğü ve katılaşma sırasında karbür yapıcı metal elementlerle birleşerek FeB , Fe_2B , $Fe_3(C, B)$, Fe_5C_2 , $M(Cr, Fe)_{7-23}(C, B)_{3-6}$, $Cr_3(C, B)$, borürler ve karbürler tespit edilmiştir. N5, N4 numunelerinde katılaşma sonrası mikroyapıda Cr_2B_3 , $Fe_3(C, B)$, Fe_5C_2 , $M(Cr, Fe)_{7-23}(C, B)_{3-6}$, $Cr_3(C, B)$, Cr_2Ti , borür, karbür ve intermetalik bileşikler meydana gelmiştir. N9, N4 katılaşma sonrası mikroyapıda $Fe_3(C, B)$, $M(Cr, Fe)_{7-23}(C, B)_{3-6}$, $Cr_3(C, B)$, Fe_5C_2 , Cr_2B_3 , $Cr_{13}Ni_5Si_{12}$, $NiCrFe$, borür, karbür ve intermetalik bileşikler meydana gelmiştir. N13, N4 Katılaşma sonrası mikroyapıda $M(Cr, Fe)_{7-23}(C, B)_{3-6}$, $Fe_3(C, B)$, $Cr_3(C, B)$, Fe_5C_2 , Cr_3C_2 , FeB , Fe_2B , $CrMnTi$, $Cr_{13}Ni_5Si_{12}$, $NiTi$, $NiTi_2$, borür, karbür ve intermetalik bileşikler meydana gelmiştir.

3. Yüzey modifikasyonu işleminde, kaplama malzemesi, yüzeyi kaplanan malzeme ve kaynak parametrelerinin birlikte göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya konmuştur.
4. Bütün numunelerde metal karbür, metal borür ve metaller arası bileşiklerin oluşumu hızlanmış ve sonuç olarak; bu sert fazların oluşumu ve homojen dağılması sonucunda aşınma direnci ve sertlik değerleri yükselmiştir.
5. Tüm kaplanan numunelerde; kaplama malzemesi yüzeyinden başlayarak oluşan bileşik fazların sertlik ve dağılımına bağlı olarak ara tabaka ve kaplamanın alt kısmında sertlik olmakta ve noktadan noktaya fazla bir değişim göstermemektedir. Sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek N5-N7 grubunda 946 Hv ortalama sertlik değeri ve en yüksek değer olarak N13-N15 grubunda N13 deney numunesinde 994 Hv sertlik tespit edilmiştir. Bu değer Hardox 400 mikro-alışımli çeliğin sertliğine oranla yaklaşık iki kat fazladır.

Y1-Y4, Y5-Y8, Y9-Y12 ve ısıt işlemler numuneleri için Taguchi dizaynı sonuçları;

6. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda seçilen parametrelerin her birinin birbirinden bağımlı ve bağımsız olarak etkisi tesbit edilmiştir.
7. Yapılan varyans analizi sonuçlarında bütün parametrelerinin aşınma direnci üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğu % olarak tespit edilmiştir. Fakat alışımli kaplama tabakası ve uygulanan yük bu çalışmada en önemli iki etken olarak ANOVA analizi ile tespit edilmiştir.
8. Kaplama tabakaları, uygulanan yük, aşınma mesafesi ve tane boyutu değerlerinde Y1-Y4 ve ısıt işlemler numuneleri için %99, Y5-Y8 ve Y9-12 ise %95'in üzerinde bir güvenilirlik değerine ulaşılmıştır.
9. Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyon işleminde Y1-Y4 numuneleri için A3B1C1D1, Y5-Y8 numuneleri için A2B1C1D1, Y9-Y12 numuneleri için A2B1C1D1 ve ısıt işlemler numuneleri için ise A4B1C1D1 parametre seviyelerinin kullanılmasıyla optimum aşınma direnci değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. Etki dağılım oranları olarak Y1-Y4 numunelerinde en fazla uygulanan yükün etkisi, Y5-Y8 ve Y9-Y12 ve ısıt işlemler numunelerinin ise en fazla değer, aşınma mesafesi üzerinde etkin olduğu ortaya çıkmıştır.

10.2. Öneriler

Mikroyapı, sertlik ve abrasiv aşınma dirençlerinden hareket ederek, PTA yöntemi Hardox 400 çeliklerin yüzeylerine alaşım elementleri ilave edilerek yüzey özelliklerinin değiştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte; bu numuneler üzerinde aşağıdaki uygulamaları gerçekleştirmek mümkündür.

- Yaptığımız alaşımlama işlemiyle yüzey sertliğinin artması tokluk değerlerini ne derecede etkilediğini tokluk testiyle öğrenilebilir.
- Kaplama tabakalarının korozyon testleri yapılarak elde edilen kaplama tabakası hakkında daha detaylı bilgiler elde edilebilir.
- PTA kaplama yönteminin kolaylığı, maliyetinin düşüklüğü ve her boyuttaki metal grubuna otomatik sistemlerde uygulanabilirliği yöntem için kaplamacılıkta tercih nedeni olarak alınabilir.
- Isıl işlem uyguladığımız numunemize alaşımlama işlemi sonrası Taguhci dizaynı seçilip gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Burakowski, T. and Wierzchon T.**, 1999. Surface Engineering Of Metals. Ralph Brian Editor. CRC Press LLC. London Press.. 38-46.
- [2] **Lo, K.H., Cheng F.T. and Man, H.C.**, 2003. Cavitation Erosion Mechanism Of S31600 Stainless Steel Laser Surface-Modified With Unclad WC, In: E. J. Lavernia Editor. *Materials Science And Engineering A*. 168–180.
- [3] **Bourithis L, Milonas A. and Papadimitriou GD.**, 2003. Plasma Transferred Arc Surface Alloying Of A Construction Steel To Produce A Metal Matrix Composite Tool Steel With Tic As Reinforcing Particles, *Surface And Coatings Technology*, 165: 0257-8972.
- [4] **Lu SP, Kwon O.Y. and Guo Y.**, 2003. Wear Behavior Of Brazed WC/Nicrbsi (Co) Composite Coatings. *Wear* 254: 0043-1648.
- [5] **Fauchais P.L., Heberlein, J.V.R. and Boulos M.**, 2014. Plasma-Transferred Arc, Therm. Spray Fundam. Springer, USA: 631–673.
- [6] **Takano, E.H., Queiroz. and D'Oliveira A.S.C.M.**, 2010. Evaluation Of Processing Parameters On PTA Hardfacing Surfaces. *Weld* 24: 1754-2138.
- [7] **Yaedu, A.E. and D'Oliveira A.S.C.M.**, 2005. Cobalt Based Alloy PTA Hardfacing On Different Substrate Steels. *Materials Science And Technology* 21: 1743-2847.
- [8] **Sigolo, E., Soyama, J., Zepon, G., Kiminami, C.S., Botta, W.J. and Bolfarini C.**, 2005. Wear Resistant Coatings Of Boron-Modified Stainless Steels Deposited By Plasma Transferred Arc. *Surface & Coatings Technology*; 302: 0257-8972.
- [9] **Xibao, W., Chunguo, L., Xiaomin, P., Libo, S. and Hong Z.**, 2006. The Powder's Thermal Behavior On The Surface Of The Melting Pool During PTA Powder Surfacing. *Surface And Coatings Technology* 201: 0257-8972.
- [10] **William, C. and D. David G.**, 2013. Rethwisch Materials Science And Engineering, Applications and machining of metal alloys, pp. 395. Nobel, Kenan Genel, Ankara.
- [11] **Metals Handbook:** 1978 Properties And Selection: Irons And Steels, Vol. 1, 9th Edition, B. Bardes(Editor), ASM 185, 407.
- [12] **Kaynar, A.**, 2013. Orta Karbonlu Alaşımsız Ve Mikroalaşımlı Çeliklerde Sıcak Deformasyon Ve Soğuma Şartlarının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [13] **Özcan, M.M.**, 2005. Mikroalaşımlı Ve Sementasyon Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [14] **Topateş T.**, 1995. Mikroalaşımli Çeliklerin Termomekanik İşlemi Sırasında Değişen Proses Parametrelerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Çeviker, İ.**, 1991. Mikroalaşımli Dövme Çeliklerde Mikroyapısal Karakterizasyon Ve Mikroyapı-Mekanik Özellikler İlişkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Tekin, A.**, 1992. Malzeme Yapı Ve Muayenelerinde Elektron Mikroskobunun Uygulanması’’ Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Fakültesi. 265.
- [17] **Taner, Y.**, 2010. Masif Ve Özlü Kaynak Telleri İle Birleştirilen Hardox 400 Çeliklerinin Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [18] Metal-Oks Ürün Katoloğu, Hardox, İstanbul, 2001.
- [19] General Product Information Weldox, Hardox, Armox And Toolox SSAB Handbook Page 8.
- [20] **Buglacki, H. and Smajdor, M.**, 2003. Mechanical Properties Of Abrasion-Resistant Hardox 400 Steel And Their Welded Joints, *Advances In Materials Science*, December, 4: 2 (4), 64-71.
- [21] **Tabur, M.**, 2008. Bor Karbür Kaplanmış Aisi 8620 Ve Hardox 400 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] Hardox Wear Plate SSAB Oxelösund AB, 613 80 Oxelösund, Sweden Version 2008-05-10 Sid. 1 (2)
- [23] **Yılmaz, R., Gedikli, M. ve Barlas, Z.**, 2005. Hardox 400 Çeliğinin Sert Dolgu Kaynağında Paso Sayısının Sertliğe, Aşınmaya Ve Mikroyapıya Etkisi. *Teknoloji*, 8 : 1, 57-64.
- [24] **Uluocak, M.E.** 2008. Hardox 450 Çeliklerinin Mag Kaynak Bölgesi Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Marmara Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] <http://www.catiaturk.com/arge/861/asinmaya-dayanikli-celik-secimi-12.html>
Aşınmaya Dayanıklı Çelikler. 15 Kasım 2013.
- [26] **Wang, A.G. and Hutchings, I.M.**, 1988. Mechanisms Of Abrasive Wear in a Boronized Alloy , *Wear*, **124**, 149-163.
- [27] **Dybkov, V. I., Lengauer, W. and Barmak, K.**, 2005. Formation Of Boride Layers At The Fe- 10% Cr Alloy-Boron Interface , *Journal Of Alloys And Compounds*, **398**, 113-122.
- [28] <https://tr.scribd.com/doc/117658492/celik-uretim-yontemleri> Çelik Üretim Yöntemleri. 15 Kasım 2017.
- [29] <http://www.hamitarslan.com/celikler.html> Çelik Üretim Yöntemleri. 15 Kasım 2017

- [30] <http://www.kucuklercelik.com/dokumanlar3.html> Malzemenin Mekanik Özellikleri. 10 Kasım .2015
- [31] EN-Welding Of Hardox - V1-2014 SSAB Handbook S4
- [32] <http://www.ybmakina.com/talasli-imalat.asp> Talaşlı imalat yöntemleri. 8 Eylül 2016.
- [33] <http://www.asinmazcelik.com/hardox-400.html>. . 5 Temmuz 2017.
- [34] **BS ISO**, 2009. *Plain Bearings-Terms, Definitions, Classification And Symbols, Part 2: Friction And Wear*, Second Edition. BSI Stand. Pub, 4378-2, 32.
- [35] **Yelda, I.B.**, 2013. Perlitik Ray Çeliklerinde Yüzey Pürüzlülüğünün Abrasiv Aşınmaya Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [36] **Gök, M.S.**, 2008. Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine Tıg Kaynak Metoduyla Kaplanan Östenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37] **Ulutan, M.**, 2007. AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [38] **Yıldız, T., Koç, A. ve Gür, A.K.**, 2007. AISI 4142 Çeliğinin Elektrik Ark Kaynağı İle Yüzey Modifikasyonu Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **19**, 417–423.
- [39] **Bach, W. and Duda, T.**, 1980. *Moderne Beschichtungsverfahren* , Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [40] **Gür, A.K.**, 2006. Aşınma Mekanizmaları, *Doktora Semineri*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [41] **Stephen, D.C and Bernard S.C.J.**, 2005. Properties And Selection: Irons, Steels, And High-Performance Alloys, *ASM International Handbook Committee*, 1.
- [42] **Cimenoglu, H., Mindivan, H. and Kayali, E.S.**, 2003. Microstructures And Wear Properties Of Synchronizer Rings, *Wear*, **254** (5-6), 532-537.
- [43] **Gleaze, W.A.**, 1995. Friction And Wear Of Ceramics, *ASM Handbook*, 18, 812-815.
- [44] **Karl-Heinz Z.G. and John A.W.**, 1987. Microstructure And Wear Of Materials, *Tribology Series*, 10.
- [45] **Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W.**, 2011. Engineering Tribology, 3, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [46] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Friction, Lubrication And Wear Technology, 18.
- [47] **Ayhan O.**, 2008. Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma Ve Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi* Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [48] **Blau, P.J. and Budinski, K.G.**, 1999. Development And Use Of ASTM Standards For Wear Testing, *Wear*, **2**, 225-229.
- [49] **Sarıkaya, Ö.**, 2007. Ağınmaya Kargı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, **1**,60.
- [50] **Gür A.K.**, 2009. PTA Yöntemiyle Düşük Karbonlu Çeliğin Yüzey Modifikasyonuna Koruyucu Gazların Etkisi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [51] **Buytoz, S., Gür, A.K. ve Sarsılmaz, F.**, 2005. Tungsten Asal Gaz Yöntemiyle Üretilen Sicp Esaslı Kaplamaların Mikroyapısı. *Metal Makine Dergisi*, **17**, 180-187.
- [52] **Çay, V.V., Çelik, H. Ve Gök, M.S.**, 2004. Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Yüzeyi Alaşımlandırılan AISI 1010 Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışının Araştırılması, *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 101-109.
- [53] **Sarsılmaz, F. ve Özel, S.**, 2008. Wc-Co Tozunun Düşük Karbonlu Çelik Yüzeyine Gaz Tungsten Ark (GTA) Yöntemi İle Alaşımlandırılması, *Teknik-Online Dergi*, **7**, 1302/6178.
- [54] **Gruzdys, E. and Meskinis, S.**, 2011. Influence Of Plasma Transferred Arc Process Parameters On Structure And Mechanical Properties Of Wear Resistive Nicrbsi-WC/Co Coatings, *Materials Science*, **17**, 140-144.
- [55] **Díaz, V.V., Dutra, J.C. and D'Oliveira ASC.**, 2016. Hardfacing By Plasma Transferred Arc Process, *Croatia Intech*, 2011.
- [56] **Deuis R.L., Yellup, J.M. and Subramanian, C.**, 1998. Metal-Matrix Composite Coating By PTA Surfacing, *Composites Science And Technology*, **58**, 299-309.
- [57] **Tahaei, A., Garcia, F. and Mattia V.**, 2016. Metallurgical Characterization Of A Weld Bead Coating Applied By The PTA Process On The D2 Tool Steel, *Soldagem & Inspeção*. **21**, 209-219.
- [58] **Tolunguc, B.**, 2012. Microstructural And Mechanical Characterization Of Duplex Stainless Steel Grade 2205 Joined By Hybrid Plasma And Gas Metal Arc Welding, *PhD Thesis*, Middle East Technical University, Turkey.
- [59] **Karadeniz, S.**, 2009. ARK Fiziği Ders Notu, İstanbul.
- [60] **Okan, K.**, 2015. An Investigation On Fatigue Crack Propagation In Gas Metal And Hybrid Plasma-Gas Metal Arc Weldments Of Aa5083-H111, *Master Thesis*, Middle East Technical University, Turkey.
- [61] **Teker, T.**, 2010. AISI 430/AISI 1040 Çelik Çiftinin Anahtar Deliği Plazma Kaynak Yöntemi ile Birleştirmesi, Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması, *Doktora Tezi* Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [62] https://www.weldinginfocenter.com/history/his_01.html ark kaynağı tarihçesi. 15 kasım2017.
- [63] **Anık, S.**, 1991. Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Holding Yayını, İstanbul.

- [64] **Yassin, MA., Khairul, S.M., Sahari, M.I., Basim, A.K., Eltxtric, T.L and T.L. Electric,** 1973. Historical Development Of Fusion Joining, Twelfth Ed. AENSI Journals Australian Journal Of Basic And Applied Sciences History Of Elements And Welding Processes. Published By The Lincoln Electric Company, Printed In U.S.A, pp: 1.1–1 – 1.1–10.
- [65] **Kou, S.,** 2003. *Welding Metallurgy Second Edition*, John Wiley & Sons Inc, New Jersey.
- [66] **Anzehaee, M.M., Haeri, M.,** 2011. Welding Current And Arc Voltage Control İn A GMAW Process Using Armakov Based MPC, *Control Engineering Practice*, 19, 1408-1422.
- [67] http://www.oerlikon.com.tr/ark_kaynak_yontemleri.html Kaynak Yöntemleri. 15 Kasım 2017.
- [68] **Çakır, M.,** 2010. Emin Hidrojen Gazı İle Oksi – Gaz Kaynak Tekniğinde Kaynak Yapılan Çelik Ve Alüminyum Levhaların Birleştirme Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [69] **Tama, Y.S.,** 2009. Çelik Yapı Uygulamalarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri, Üstünlükleri Ve Sakıncalı Yönleri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- [70] **Sudhakaran, R.A., Sivasakthivel, P.B., Nagaraja, S.C. and Eazhil M.D.,** 2014. *The Effect Of Welding Process Parameters On Pitting Corrosion And Microstructure Of Chromium-Manganese Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welded Plates*, *Procedia Engineering*, 97, 790 – 799
- [71] **Kırbaş, C.,** 2014. AISI P11 Ve AISI P91 Kalite Dikişsiz Boru Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Gerilme Giderme Tavlama Sıcaklığının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [72] **Gözütok, E.,** 2011. Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [73] **Atamert, S.,** 1988. Wear Resistance And Microstructure Of Iron, Cobalt And Nickel-Based hardfacing Alloys, Phd Thesis, University Of Cambridge, U.K.
- [74] <http://www.mech4study.com/2017/04/what-is-tig-welding-principle-working-equipment-application-advantages-and-disadvantages.html> Tig yöntemi çalışma ekipmanları. 15 Kasım 2017.
- [75] **Acar, H.,** 2014. Bakır Ve Paslanmaz Çeliğin Tıg Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [76] **Dikbaş H.,** 2011. 2 Ti6al4v/Ti6al4v Malzeme Çiftinin Pta Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

- [77] **Brumm, S. and Bürkner, G.**, 2015. Materials Today: Light Metals – Forming Technologies And Further Processing Gas Metal Arc Pulse Welding With Alternating Current For Lightweight, *Materials Proceedings*, **2**, 179 – 187.
- [78] [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=lvltvxsi1ec&oi=fnd&pg=pp1&dq=mig-mag yöntemleri](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=lvltvxsi1ec&oi=fnd&pg=pp1&dq=mig-mag+yöntemleri) 17temmuz2017.
- [79] **Güngör, B.** 2013. Aw 5083-H111 Ve Aw 6082-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma (FSW) Ve Robotik CMT-MIG Kaynak Yöntemleri İle Kaynağında Mekanik Ve Metalürjik Özelliklerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tez*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [80] **Ivan, B., Odd, M., Akselsena, B., Xiaobo, Renb. and Antti S.D.**, 2017. Lappeenranta, Finland Hybrid Welding Possibilities Of Thick Sections For Arctic Applications, *Physics Procedia*, **78**, 74 – 83.
- [81] **Stiles, E.**, 2010. The Filler Wire-Laser Beam İnteraction During Laser Welding With Low Alloyed Steel Filler Wire, *Mechanika*, **4**, 67-74.
- [82] **Anna, U., İlkka, P. and Antti S, B.**, 2015. Lappeenranta, Finlandİnfluence Of Filler Wire Feed Rate İn Laser-Arc Hybrid Welding Of T-Butt Joint İn Shipbuilding Steel With Different Optical Setups 15th Nordic Laser, Materials Processing Conference, Nolamp, 25-27 August 2015, 15.
- [83] **Üzgür, S.**, 2013. Lazer Kaynaklı Inconel 718 Süperalaşımının Kaynak Hassasiyeti İçin Vareststraint Test Düzeneginin Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Fen Billimleri Ensitüsü, Eskişehir.
- [84] **Egbewande, A.T., Buckson, R.A. and Ojo. O.A.**, 2010. Analysis Of Laser Beam Weldability Of Inconel 738 Superalloy, *Materials Characterization*, **61**, 569–574.
- [85] **Eryürek, İ.B., Bodur, O. and Dikicioğlu, A.**, 1995. Kaynak Teknolojisinin Esasları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [86] **Odabaşı, A., Ünlü, N., Göller, G. and Eruslu, M.N.**, 2010. A Study On Laser Beam Welding (LBW) Technique: Effect Of Heat Input On The Microstructural Evolution Of Superalloy Inconel 718, *Metallurgical And Materials Transactions A*, **41**, 2357-2365.
- [87] <http://www.laserwh.cn/laser%20welding.htm> Lazer kaynak yöntemi 15 Kasım 2017.
- [88] **Köse, C. and Kaçar, R.**, 2015. Effect Of Welding Speed On The Mechanical Properties And Microstructure Of Laser Welded AISI 316L Stainless Steel, *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, **30**, 225-235.
- [89] **Taskin, M., Caligulu, U. and Turkmen, M.**, 2011. X-Ray Tests Of AISI 430 And 304 Stainless Steels And AISI 1010 Low Carbon Steel Welded By CO2 Laser Beam Welding, *MP-Materials Testing-Materials And Components Technology And Application*, **53**, 741-747.

- [90] **Taskin, M., Caligulu, U., and Kolukisa, S.,** 2009. The Effect Of Welding Speed On The Laser Welding Of AISI 430 Ferritic Stainless–AISI 1010 Low-Carbon Steel, *Practical Metallography*, **46**, 598-607.
- [91] **Josefine, S., Isabelle, C., Alexander, F.H and Kaplanb, L.,** 2015. Finland Laser Welding Process – A Review Of Keyhole Welding Modelling Physics Procedia 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 15, 25-27 August 2015, 78, 182 – 191.
- [92] **K l hl , E.,** 1988. Kaynak Bilimi, İstanbul: *Oerlikon Yayını*, **2**, 1
- [93] **Norrish, J.,** 2006. Advanced Welding Processes, pp. 46-52, T J International Limited, England.
- [94] <http://www.welding-technology-machines.info/hardfacing-of-materials/hardfacing-alloys.htm> Toz altı kaynağı. 15 Kasım 2017.
- [95] **Yüksel, N.,** 2011. 2 Farklı Kompozisyonlarda  retilen Aşınma Plakalarının Karakterizasyonu Ve Aşınma  zelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri , Manisa.
- [96] **Mill  Eğitim Bakanlığı** Metal Teknolojisi Tozaltı Kaynağı 521MMI240 Ankara, 2011
- [97] **Anık, S., Tülbentçi, K.** 2010. Kaynak Teknolojisi II Tozaltı Kaynak Tekniği Gedik Kaynak San. Tic. A.Ş İstanbul-http://www.oerlikon.com.tr/ark_kaynak_yontemleri.html
- [98] **Kurt, B.,** 2005. Ti-6Al-4V Alaşımı İle Farklı Tür Paslanmaz  eliklerin Difüzyon Kaynağı, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [99] <https://www.ebindustries.com/electron-beam-welding/> Elektron ışın kaynağı 15 Kasım 2017.
- [100] ** elik, A., Alsaran, A., Karakan, M.,** 2010. Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Mühendis Ve Makina 43, **510**, 17-18.
- [101] **Karadeniz S.** 2010 TMMOB Makine Mühendisleri Odası, *Pluzma Tekniği*, **137**, 21.
- [102] <https://www.quora.com/What-is-plasma-arc-welding> Plazma şekli. 6 Kasım 2015.
- [103] <http://wwwo.metalica.com.br/o-processo-de-corte-de-metals-por-plasma> Plazma nedir 6 kasım 2015.
- [104] **Killing, R.,** 2001. Welding Processes And Thermal Cutting , English Edition, 1, DVS-Verlag Gmbh, Dusseldorf, Germany.
- [105] **Kaluc, E., Taban, E.,** 2011. Alüminyum Ve Alüminyum Alaşımlarının Değişken Kutuplamalı Plazma Ark (VPPA) Kaynağı İle Birleştirilmesi, Aluminium Symposium, Kocaeli, Türkiye .
- [106] **Gerdien, H. and Lotz, W.** 1923. Z Veroffentlichungen Siemenswerk, *Tech. Phys.* 4, 157.
- [107] **Gerdien, A. and Lotz, W.** 1922. Veroffentlichungen Siemenswerk *Tech. Phys.* 2, 489.

- [108] **Hrabovsky, M., Konrad, M., Václav, K. and Sember V.**, 2000. Thermal Plasma Torches And Technologies, *Properties Of Water-Stabilized Plasma Torches 1*. **243**. 242-266.
- [109] **Kaluç, E. and Taban E.**, 2004. Plazma Arkı Ile Kaynak Ve Endüstriyel Uygulamaları, Makinetek, 84.
- [110] **Berghaus, B.**, 1939. *German Patent*, No: DRP 668, 669 W32.
- [111] **Berghaus, B.**, 1939. *German Patent*, No: DRP 851, 540 1939.
- [112] **Gage, R.**, 1957. *U.S. Patent*, No: 2,806,124 1957.
- [113] **Gür, A.K., Taskın, M.A., Orhan, A., Çalgülü, U. ve Dikbas, H.**, 2009. Ti6Al4V Alaşım Çiftinin PTA Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliği, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İats'09), Karabük, Türkiye.
- [114] **Anık, S.** 1981. Kaynak Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, 35-75.
- [115] <http://www.kjellberg.de/welding-equipment/service/welding-methods/pta-welding.html>
- [116] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/4904-plasma-arc-welding-transferred-type-plasma-arc-welding-non-transferred-type-plasma-arc-welding/>
- [117] **Gür, A.K., Orhan, A., Yıldız, T.**, 2009. The Examination Of Microhardness And Microstructure Of FeCrC-B4C-Ti Layer Electronic Journal Of Machine Technologies, (6) 49-58
- [118] <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/02/plasma-the-fourth-state-of-matter/>
- [119] **Díaz, V.V. and Dutra J.C.**, 2011. Source: Intech In Book: Arc Welding Hardfacing By Plasma Transferred Arc Process ASC D'Oliveira - Arc Welding, - İntechopen.Com DOI: 10.5772/28802
- [120] **Vergara, V.M.** 2005. Inovação Do Equipamento E Avaliação Do Processo Plasma De Arco Transferido Alimentado Com Pó (PTAP) Para Soldagem Fora De Posição: Doctoral Thesis, Mechanical Engineering Department - UFSC, Florianópolis. 174.
- [121] **Hallen, H. Lugscheider, E. and Mekideche, A.**, Plasma transferred arc surfacing with high deposition rates. In: Proceedings of conference on thermal spray coatings: properties, processes and applications, Pittsburgh, USA, 4–10 May 1991. ASM International; 1992. p. 537–539.
- [122] <http://www.grinp.com/plasma/physics.html>
- [123] **Katja, F., Ina, K., Helena, T., Lukasz, J., Karsten, S. and Axel, K.**, 2012. Atmospheric pressure plasma: a high- performance tool for the efficient removal of biofilms . <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042539>
- [124] **Anık, S., Anık, E.S. ve Vural, M.**, 1993, 1000 Soruda kaynak teknolojisi el kitabı , Cilt: 1, Birsen Yayın evi, İstanbul.
- [125] **Cary, B. H.**, 2002. Modern Welding Technology , Printice Hall, USA.

- [126] **Welding Handbook**, 2004. Welding Processes- Part 1, Volume 2, Ninth Edition, AWS, USA.
- [127] **Lahti, K. and Jernstrom, P.**, 1999, Plasma Welding Aluminium , Svatseran, No. 3, pp. 26-28.
- [128] **Mathers, G.**, 2002. The Welding of Aluminium and Its Alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- [129] **Blewett, R.V.**, 1991. Welding Aluminium and Its Alloys , Welding and Metal Fabrication, 449- 455.
- [130] **Manganello, S. J. And Wilson, A. D.**, 1993. Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate , Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90's, Ed. R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals & Materials Society, 235-241.
- [131] **Yoshifumi, H., Taishi, K., Masaki, M. and Masayoshi A.** Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan Estimation of roles of matrix and NbC particles dispersed in surface layer of tool by PTA welding. Procedia Engineering 81 1927 – 1932
- [132] **Strafford, K.N., Smart, R., C, Sare, I. and Subramarn, C**, 1995. Surface Engineering, Technomic Publishing Company, USA.
- [133] **Hallen, H. and Lugscheider, A.E.**, 1992. Ait-Mekideche, Proceedings of the Conference of the International Thermal Spray, Orlando FL, USA, 893–897.
- [134] **Hallen, H. and Mathesius, A.H.**, 1995 Proceedings of the Conference of the International Thermal Spray, Orlando, FL, USA, 899–902.
- [135] **Saltzman, G.A. and Sahoo, P.**, 1991. Proceedings of the Conference of the 4th National Thermal Spray, Pittsburgh PA, USA 541–548.
- [136] **Beber, P., Gimondo, P., B. Grifoni, A. Scaccia. and F. Sintoni**, 1992 Proceedings of the Conference of Materials Development in Rail, Tire, Wing, Hull Transportation, Genoa, Italy, 2.83–2.89.
- [137] **Hyung, J.K., Byoung, H.Y. and Chang, H.L.** 2002. Wear performance of the Fe-based alloy coatings produced by plasma transferred arc weld-surfacing process Wear 249 846–852
- [138] **Zhang, L.; Sun, D. & Yu, H.** 2008. *Effect of niobium on the microstructure and wear resistance of iron-based alloy coating produced by plasma cladding*. Available at: <http://www.elsevier.com/locate/msea> Accessed in: Nov. 2008.
- [139] **Liu, Y.F., Mu, J.S. and Yang, S.Z.**, 2007. *Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC reinforced composite coating prepared by plasma-transferred arc weld-surfacing process*. Available at: <http://www.elsevier.com/locate/msea> Accessed in: Nov. 2008.
- [140] **Taylan, D.**, 2009. Taguchi deney tasarımı uygulaması , Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 15-42.
- [141] **Şirvancı, M.** 1997. Kalite için Deney Tasarımı. Literatür Yayınları. 110 sayfa.

- [142] **Montgomery, D.C.**, 1991. Design and analysis of experiment, John Wiley& Sons, Newyork.
- [143] **Yıldırım, S.**, 2011. Taguchi Tasarımı Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ürün Tasarımı Geliştirilmesi: Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [144] **Hicks, R.C.**, 1985. Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler , Çeviri Muluk, Z., Toktamış, Ö., Kurt, S. ve Karaağaoğlu, E., Akademi Matbaası, Ankara, s. 1-10 .
- [145] **Muluk, Z., Saraçbaşı, T., Aktaş, S. ve Başar, Ç.**, 1998. Taguchi Üzerine Araştırma , 94K120340/2 nolu DPT Projesi, Devlet Planlama Teşkilatı,71-80, Ankara.
- [146] **Savaşkan, M., Taptık, Y. and Ürgen, M.** 2004. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. İtühergisi/d Mühendislik, 3(6), 117-128.
- [147] **Benardos, P.G. and Vosniakos, G.C.**, 2003. Prediction surface roughness in machining: a review , *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43**, p. 833-844
- [148] **Jovane, F., Yoshikawa, H., Alting, L., Boer, C.R. and Westkamper E.**, 2008. The Incoming Global Technological and Industrial Revolution Towards Competitive Sustainable Manufacturing. CIRP Annals Manufacturing Technology 57(2):641-659.
- [149] **Huynh, H.N, Anh T.N., Ngoc L.H. and Thi, T.T.**, 2017. Application of fuzzy Taguchi method to improve the dimensional accuracy of fusude deposition modeling rocessed product *System Science and Engineering Procedia*, 2325-0925.
- [150] **Taguchi, G.**, 1990. Introduction to quality engineering. Asian Productivity Organization. Tokyo,
- [151] **Ross, P.J.**, 1995. Taguchi techniques for quality engineering, Mc Graw Hill, New York. Hill, Newyork. p.1 -278,
- [152] **Alting, L. and Boer, C.R.**, 2005. Taguchi Techniques for Quality Engineering, second ed., Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2005.
- [153] **Goswami, A. and Kumar, J.**, 2014. Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method *Engineering Science and Technology, an International Journal* 17: 173-184
- [154] **Radhika, N., Subramanian, R., Venkat, P.S.**, 2011. Tribological Behaviour of Aluminium/Alumina/Graphite Hybrid Meta matrix composites using taguchi techniques, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10, 5, 427-443
- [155] **Balajia, M. and Murthyb B.S.N.**, 2016. Optimization of Cutting Parameters in Drilling Of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA -- Mohan Raoc *Procedia Technology* 25 1106 – 1113.
- [156] **Lochner, H.R.**, 1990. *Designing for quality, An Introduction to The Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Method Design*, Chapman-Hall, 1990.
- [157] **Canıylmaz, E.**, 2001. Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu Ve Bir Örnek *uygulama* , Yüksek lisans tezi.

- [158] **Kayı, Y.**, 2006. Plastik enjeksiyon prosesindeki parametrelerin çekme problemine Etkilerinin taguchi metodu ile incelenmesi , *Yüksek Lisans Tezi*.
- [159] **Gür A.K., Orhan A. ve Çalgülü U.**, 2008. Microstructure Properties Of Coatings On The Surface AISI 1020 With Pta Method Of Ni/Ti Powders. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları; 2008
- [160] **Besterfield, D.H., Besterfield, C., Besterfield, G.H. and Besterfield, M.** 1995. Total quality management, New Jersey: Prentice Hall Inc.
- [161] **Roy, R.K.**, 1990. A Primer on the Taguchi Method, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [162] **Ozay, C.**, 2014. Investigating the Surface Roughness after Tangential Cylindrical Grinding by the Taguchi Method. Determination Article in Materialprufung · Surface Roughness 306-311 Elazığ, Turkey
- [163] **Phadke, M.S.**, 1989. Quality engineering using robust design, Prentice Hall Englewood & Cliffs, New Jersey.
- [164] **Bahadur, S. and Tabor, D.**, 1985. Role of fillers in the friction and wear behaviour of high density polyethylene. Polymer Wear and its Control 287,253–268.
- [165] **Biswas, S. and Satapathy, A.**, 2009. Tribo-performance analysis of red mud filled glass epoxy composites using Taguchi experimental design. Materials and Design 30, 2841–53.
- [166] **Rashmi, N., Renukappa, M., Suresha, B., Devarajaiah, R.M. and Shivakumar, K.N.**, 2011. Dry sliding wear behaviour of organo-modified montmorillonite filled epoxy nanocomposites using Taguchi's techniques. Materials and Design 32, 4528–36.
- [167] **Siddhartha, P.A. and Bhatt, A.D.**, 2011. Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy–TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment. Materials and Design 32, 615-627.
- [168] **Difallah, B., Kharrat, M., Dammak, M. and Monteil, G.**, 2012. Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. Materials and Design 34, 782–787.
- [169] **Palani, K.**, 2006. Cutting parameters optimization for surface roughness in machining GFRP composites using Taguchi's method, *Journal of Reinforced Plastic Composites*, Vol.25, 1739-1751.
- [170] **Jayaramana, P., Mahesh, L. and Kumar, B.**, 2014. Multi-response Optimization of Machining Parameters of Turning AA6063 T6 Aluminium Alloy using Grey Relational Analysis in Taguchi Method-- Procedia Engineering 97: 197 – 204
- [171] **Bala, G.N., Krishnab, V.M. and Sindhub, R.**, 2014. Prediction of Wear Behaviour of Almg1sicu Hybrid MMC Using Taguchi with Grey Rational Analysis-- Procedia Engineering 97; 555 – 562,

- [172] **Bayazida, S.M. and Farhangia, H.,** 2015. Ghahramania Investigation of friction stir welding parameters of 6063-7075 Aluminum alloys by Taguchi method *Procedia Materials Science* 11: 6 – 11
- [173] **Liao, S.J., Chang, D.Y., Chen, H.J., Tsou, S.J. and Ho, J.R.,** 2004. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. *Polymer Engineering Science* 44, 917–928.
- [174] **Durmaz, S.** 2008. Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- [175] **Sudeepan, P.J, Kumar, K., Barman, T.K. and Sahoo, P.,** 2014. Tribological behavior of ABS/ TiO₂ Polymer composite using taguchi statistical analysis *Rocedia Materials Science* 5 41 – 49
- [176] **Özay, Ç.** 2009. Teğetsel tornalama-frezeleme yönteminde işleme parametrelerinin teorik ve deneysel olarak araştırılması, Doktora Tezi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- [177] <http://www.atacelik.com/sertlestirme.html>
- [178] **İç, Y.T. ve YILDIRIM, S.,** 2012. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte Taguchi Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Geliştirilmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **27**,(2), 447-458.
- [179] **Pandey, K.P. and Singh, R.,** 2016. Experimental Investigation of Surface Properties of Hardox 400 Hardfaced with WC, *International Journal of Engineering Research & Technology*, **5**, 5.
- [180] **Gür, A.K. and Kaya S.** 2017. The Evaluating Of Abrasive Behavior In PTA Coatings, *A Taguchi Approach Science and Eng. J of Fırat Univ*, **29**(2), 195-202.
- [181] **Yao, M.X., Wu, J.B.C., Xu, W. and Liu, R.,** 2005. Metallographic study and wear resistance of a high-C wrought Co-based alloy Stellite 706K. In: E. J. Lavernia editor. *Materials Science and Engineering A*, 291-298.
- [182] **Zhang, L., Sun, D., Yu, H. and Li, H.,** 2007, Caracteristic of Fe-based Alloy Coating Producud By Plasma Caldding Precress, *Materials Science and Engineering A*. **457**, 319-324.
- [183] **Buytoz, S., Orhan, A., Gür, A.K., Çalgülü, U.,** 2013. Microstructural Development of Fe Cr C and B₄C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma Transferred Arc Weld Surfacing. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **38**(8),2197-2204.
- [184] **Gür, A.K., Özay, Ç., Orhan, A., Buytoz, S., Çalgülü, U. And Yiğittürk, N.,** (2014). Wear Properties of Fe Cr C and B₄C Powder Alloy Coating on AISI 316 Stainless Steel by Taguchi Method. *Materials Testing*, **56**(5),393-398.
- [185] **S. Konovalov, V. Kormyshev, V. Gromov and Yu. Ivanov** 2016. Metallographic Examination of Forming Improved Mechanical Properties via Surfacing of Steel HARDOX 450 with Flux Cored Wire *Materials Science Forum*, **870**, 159-162, September 2016.

- [186] **Mindivan, H.** 2013. Effects of Combined Diffusion Treatments on the Wear Behaviour of Hardox 400 Steel, Malaysian International Tribology Conference. *Procedia Engineering* 2013; 68: 1877-7058.
- [187] **Kivak, T.** 2014. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. 50, , Pages 19-28.
- [188] **Sudeepan, K., Kumar, T.K. and Barman, P.S.** 2014. Study of Friction and Wear of ABS/Zno Polymer Composite Using Taguchi Technique, *Procedia Materials Science*, **6**, 391-400.
- [189] **Khare, S.K. and Agarwal. S.,** 2017. Optimization of Machining Parameters in Turning of AISI 4340 Steel under Cryogenic Condition using Taguchi Technique, *Procedia CIRP*, **63**, 610-614.
- [190] **Gür, A.K.** 2013. Investigating the wear behaviour of FeCrC/B4C powder alloys coating produced by plasma transferred arc weld surfacing using the Taguchi method. *Materials Testing*, 55(6), 462-467.
- [191] **Yildiz, T., Gür, A.** 2011. Microstructural characteristic of N2 shielding gas in coating FeCrC composite to the surface of AISI 1030 steel with PTA method .*Archives of Metallurgy and Materials*, 56(3), 723-729.
- [192] **Maleque, M.A., Bello, K.A., Adebisi, A.A. and Dube, A.** 2017. Abrasive wear response of TIG-melted TiC composite coating: Taguchi approach *Materials Science and Engineering* 184, 012018.
- [193] **Buytoz, S., Orhan, A., Gur, A. K., and Caligulu, U.** 2013. Microstructural Development of Fe–Cr–C and B4C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma-Transferred Arc Weld Surfacing. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **38**(8), 2197-2204.
- [194] **Deng, H., Shi, H. and Tsuruoka, S.,** 2010. Influence of coating thickness and temperature on mechanical properties of steel deposited with Co-based alloy hardfacing coating. *Surf Coat Technol* **204**, 3927–34.
- [195] Kennametal. Guidelines for Stellite® hardfacing onto steels. 2007;7-7.
- [196] **Lolla, T., Siefert, J., Babu, S.S. and Gandy, D.,** 2014. Delamination failures of Stellite hardfacing in power plants: a microstructural characterisation study. *Sci Technol Weld Join* **19**, 476-86.
- [197] **Singh, R., Kumar, D., Mishra, S.K. and Tiwari SK.** 2014. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance. *Surf Coat Technol*, **251**, 87–97.
- [198] **Ferozhkhana, M.M. and Duraiselvamb, M.K.,** 2016. Plasma Transferred Arc Welding of Stellite 6 Alloy on Stainless Steel for Wear Resistance *Procedia Technology*, **25**, 1305 – 1311

- [199] **Ohtani, H., Hasebe, M., Ishida, K. and Nishizawa. T.,** 1988. Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **28**, 1043–1050
- [200] **Sagawa, H.,** 2007. Fundamental research on metal composition and layer structure of clad metal with high-corrosion resistance and brazing-strength, Hitachi Cable Review, Germany.
- [201] **Wang. X., Wang, X. and Shi, Z.,** 1992. The composite Fe–Ti–B–C Coatings by PTA powder surfacing process, Surface and Coatings Technology, **192** (2-3), 257-262.
- [202] **Liu, Y.F., Han, J.M., Li, R.H. and Li, W.J.,** 2006. Microstructure and dry-sliding wear resistance of PTA clad (Cr, Fe)₇C₃/γ-Fe ceramal composite coating, Applied Surface Science, **252**(20), 7539-7544.
- [203] **Gür, A.K. ve Kaya, S.,** 2017. PTA Kaplamalarda Abrasive Aşınma Davranışının Değerlendirilmesinde Bir Taguchi Yaklaşımı, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **29**(2),195-202.
- [204] **Gürgenç, T. and Özel, C.,** 2016. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of FeCrC, FeB and FeW Alloys Coated AISI 1020 Steel Using PTA Method. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **28**, 1308-9072.
- [205] **Wang, D., Hu, Q.W. and Zeng, X.Y.,** 2015. Residual stress and cracking behaviors of Cr13Ni5Si2 based composite coatings prepared by laser-induction hybrid cladding, Surface & Coatings Technology, **274**, 51–59.
- [206] **Fang, Y.L. and Wang, H.M.,** 2007. High-temperature sliding wear resistance of a ductile metal-toughened Cr13Ni5Si2 ternary metal silicide alloy, Journal of Alloys and Compounds, **433**, 114–119.
- [207] **Wang, X.H, Zhang, S.W., Wang, D, G. and N.Wu** 2008. Technical sessions-Proceedings of CIST2008& ITS-IFTToMM2008 research on worn mechanism of disc-brake pair materials for drilling rig. Advanced tribology: Proceedings of CIST2008& ITS-IFTToMM. China 338-341.
- [208] **Paulo, N.Y.,** 2000. An experimental study of Tribological Behaviour of the Brass/Steel pair, Journal of Materials Processing Technology, **100**, 273-277.
- [209] **Ravindra, S.R., Rajesh P. and Anil S.,** 2014 Optimization of Wear Performance of Aa 5083/10 Wt. % Sicp Composites Using Taguchi Method. Ranad Procedia Materials Science **6**, 503 – 511.
- [210] **Skarvelis, P. and Papadimitriou, G.D.** 2009. Plasma transferred arc composite coatings with self lubricating propertiraes, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behavior, *Surface and Coatings Technology*, 203(10-11): 1384-1394.
- [211] **Gür, A.K., Çalgülü, U. and Taşkın.M.,** 2011. The Optimisation of Adhesive Wear Behavior of AlMgSi SiC Aluminium Composite with Taguchi Method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **5**(9), 1584-1590.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Elazığ'da doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. Sırasıyla Dumlupınar İlk Öğretim Okulu ve Korgeneral Hulusi Sayın Lisesin' den mezun oldum. 2011 yılında girdiğim Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden 2015 yılında mezun oldum. İki kardeşim var ve Elazığ'da ikamet etmekteyim.

Muhammet Hulusi Cengiz

