



T.C.

**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**API ÇELİKLERİNİN TOZALTI KAYNAĞINDA FARKLI KÖK
PASO UYGULAMASININ KAYNAKLANABİLİRLİĞE VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

MAHMUT GEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ SERKAN APAY**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**API ÇELİKLERİNİN TOZALTI KAYNAĞINDA FARKLI KÖK
PASO UYGULAMASININ KAYNAKLANABİLİRLİĞE VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Mahmut GEL tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

08 Temmuz 2019

Mahmut GEL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimde ve bu çalışmanın hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu süreçlerde manevi desteği ile her zaman yanımda olan eşim Nur GEL'e, ve varlığı ile bana hayat ışığı olan oğlum Kerim GEL'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca beni her zaman destekleyerek benimle gurur duyan ve bugünlere getiren babam Ali GEL ve annem Hacile GEL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez süresince bana desteklerini esirgemeyen Erciyas Çelik Boru A.Ő., Noksel Çelik Boru A.Ő. ve GEDİK A.Ő. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

08 Temmuz 2019

Mahmut GEL

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	Viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	Xi
KISALTMALAR.....	Xii
SİMGELER	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. TEZİN AMACI.....	1
2. ÇELİK MALZEMELER.....	2
2.1. DEMİR VE ÇELİK TANIMI.....	2
2.2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRMASI.....	7
2.2.1. Üretim Yöntemlerine Göre Çelikler	7
2.2.2. Kullanıldığı Bölgeye Göre Çelikler.....	7
2.2.3. Kimyasal Bileşimlerine Göre Çelikler.....	8
2.2.4. Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Göre Çelikler	8
2.2.5. Metalografik Yapılarına Göre Çelikler	8
2.2.6. Sertleştirilme Yöntemlerine Göre Çelikler	8
3. YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLER	9
3.1. YDDA ÇELİKLERİN TANIMI VE ÖNEMİ	9
4. YDDA ÇELİKLERİN KAYNAKLARI	12
4.1. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ.....	13
4.1.1. Uygulama Alanları	14
4.1.2. Avantajları	16
4.1.3. Kısıtlamalar	16
4.1.4. Kaynak Tozları.....	17
4.1.5. Kaynak Elektrotları	17
4.2. ELEKTRİK ARK KAYNAK YÖNTEMİ.....	18
4.2.1. Avantajları	20
4.2.2. Kısıtlamalar	21
4.2.3. Elektrod Örtüsünün Görevleri	21
4.2.4. Elektrot Tipleri ve Genel Özellikleri	21
4.3. MIG/MAG KAYNAK YÖNTEMİ	23
4.3.1. Avantajları	25
4.3.2. Kısıtlamaları	26
4.3.3. MIG-MAG Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar	26
4.3.4. Kaynak Elektrotları	29

4.4. TİG KAYNAK YÖNTEMİ	30
4.4.1. Avantajları.....	31
4.4.2. Kısıtlamalar	31
5. YDDA ÇELİKLERİN KAYNAK TESTLERİ.....	32
5.1. TAHRİBATSIZ TESTLER.....	32
5.1.1.Gözle Muayene	32
5.1.2.Ultrasonik Muayene.....	33
5.1.2.1.Kaynak Dikişi Muayenesi.....	35
5.1.2.2.Tespit Edilebilen Süreksizlikler.....	36
5.1.2.3.Yöntemin Avantajları ve Kısıtlamaları.....	37
5.1.3.Manyetik Partikül Muayenesi.....	37
5.1.3.1.Mıknatıslanma.....	39
5.1.3.2.Yöntemin Avantajları ve Kısıtlamaları.....	41
5.1.4.Radyoskopi Muayenesi	42
5.2. TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ	43
5.2.1.Çekme Deneyi	43
5.2.2.Eğme Deneyi	46
5.2.3.Çentik Darbe Deneyi.....	47
5.2.3.1.Kırma enerjisi hesabı.....	47
5.2.3.2.Darbe Test Numuneleri.....	48
5.2.4.Sertlik Deneyi	49
5.2.5.Makroskobik Muayene Deneyi	50
5.2.6.Mikroskobik Muayene Deneyi	50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER	51
6.1.1.Ana Malzeme	51
6.1.2.Seçilen Dolgu Malzemeleri	53
6.1.3.Kaynak Kombinasyonları ve Kaynağın Yapılışı.....	54
6.2. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ	56
6.3. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	58
6.3.1. Enine Çekme Test Numuneleri.....	58
6.3.2. Enine Eğme Test Numuneleri	59
6.3.3. Çentik Darbe Test Numuneleri.....	60
6.3.4. Sertlik Test Numuneleri	61
6.3.5. Makroskopik Muayene Numuneleri	61
6.3.6. Mikroskopik Muayene Numuneleri	62
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
7.1. TAHRİBATSIZ TEST SONUÇLARI	63
7.2. TAHRİBATLI TEST SONUÇLARI	63
7.2.1. Enine Çekme Deney Sonuçları.....	63
7.2.2. Enine Yan Bükme Deney Sonuçları	67
7.2.3. Çentik Darbe Deney Sonuçları	69
7.2.4. Sertlik Deney Sonuçları	72
7.2.5. Makroskobik Muayene Sonuçları	75
7.2.6. Mikroskobik Muayene Sonuçları	76
7.2.7. Kırık Yüzeylerin Muayene Sonuçları	84
7.2.7.1. PL-1&PL-2&PL-3 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi	85
7.2.7.2. PL-1&PL-2&PL-3 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında	85

<i>Muayenesi</i>	86
7.2.7.3. <i>PL-1&PL-2&PL-3 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi</i>	88
7.2.7.4. <i>PL-1&PL-2&PL-3'ların ITAB Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi</i>	89
7.2.7.5. <i>PL-4&PL-5&PL-6 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi</i>	91
7.2.7.6. <i>PL-4&PL-5&PL-6 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında</i> <i>Muayenesi</i>	92
7.2.7.7. <i>PL-4&PL-5&PL-6 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi</i>	94
7.2.7.8. <i>PL-4&PL-5&PL-6 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi</i>	95
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
8.1. SONUÇLAR	97
8.2. ÖNERİLER	98
9. KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	103



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Çelik üretimi ve şekillendirme teknolojilerinin gelişimi.....	6
Şekil 4.1. Kaynak türlerinin gösterimi.....	13
Şekil 4.2. Tozaltı kaynağının genel prensibi.....	14
Şekil 4.3. Benardos kaynak yöntemi.	18
Şekil 4.4. Zerener kaynak yöntemi.	19
Şekil 4.5. Slavianoff kaynak yöntemi.....	19
Şekil 4.6. Oscar Kelberg kaynak yöntemi.	20
Şekil 4.7. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi.	20
Şekil 4.8. Gaz korumalı özlü tel kaynak ark bölgesi.	25
Şekil 4.9. Kendinden korumalı özlü tel kaynak ark bölgesi.	25
Şekil 4.10. Tungsten inert gaz kaynağı şematik gösterimi.	30
Şekil 5.1. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi.....	34
Şekil 5.2. Ultrasonik test problemleri a) Normal (düz prob) b) Açılı prob c) Daldırma probu d) Odaklama probu.	35
Şekil 5.3. İncelenen parça üzerindeki prob konumuna göre yansıma şekilleri.....	36
Şekil 5.4. Ultrasonik muayenede kullanılan çeşitli kalibrasyon blokları.	36
Şekil 5.5. Manyetik alan çizgileri A) yüzeysel B) yüzey altı.	38
Şekil 5.6. Manyetik parçacık yönteminin şematik görünümü.	39
Şekil 5.7. Metalik malzemelerin manyetik davranışı a) manyetik olmayan malzeme b) manyetik malzeme.	39
Şekil 5.8. Elektro bobin ile manyetikleştirme.....	40
Şekil 5.9. İçinden akım geçen kablo ile manyetikleştirme.	40
Şekil 5.10. Parça içinden akım geçirerek manyetikleştirme.....	41
Şekil 5.11. Dijital radyoskopi sistemi.....	42
Şekil 5.12. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri.	44
Şekil 5.13. Elastisite modülü tespiti.....	44
Şekil 5.14. Çekme diyagramında akma dayanımının gösterimi.	45
Şekil 5.15. Çekme diyagramında çekme noktasının gösterimi.....	45
Şekil 5.16. Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjisinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi.....	46
Şekil 5.17. Eğme deneyinin genel prensibi.....	46
Şekil 5.18. Darbe deneyinin şematik gösterimi a) darbe deneyinin şematik gösterimi b) çalışma sistemi.	47
Şekil 5.19. Çentik ve izod deneylerinde kullanılan çentikli örnekler.	48
Şekil 5.20. Çentik ve izod numunelerinin test bölgesine yerleştirilmesi.....	48
Şekil 5.21. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi.	49
Şekil 6.1. İş akış planı.	51
Şekil 6.2. Plakalarda tam nüfuziyetli alın kaynağı için deney numuneleri. a: numune genişliğinin yarısı, b: numune uzunluğu, c: numunenin kalınlığı.	52
Şekil 6.3. Genel v tipi kaynak ağzı görünümü.....	52
Şekil 6.4. Deney plakalarının gösterimi a) 6,7 mm plaka b) 16,87 mm plaka.	53

Şekil 6.5. Dijital radyografi muayene görüntüleri a) 16,87 PL-5 görünümü b) 16,87 mm PL-4 görünümü.	57
Şekil 6.6. Ultrasonik muayene görüntüleri a) 16,87 mm PL-6 ön yüzey b) 16,87 mm PL-6 arka yüzey.	57
Şekil 6.7. Manyetik partikül görüntüleri a) PL-3 ön yüzey b) PL-3 arka yüzey.	57
Şekil 6.8. Kaynaklı test plakalarından çıkarılan numuneler.	58
Şekil 6.9. Çekme test cihazları a) Çekme Test Cihazı (20 ton) b) Çekme Test Cihazı ..	58
Şekil 6.10. Çekme test numune ebatları.	59
Şekil 6.11. Zwick eğme test cihazı.	59
Şekil 6.12. Zwick çentik darbe test cihazı.	60
Şekil 6.13. Çentik test numune ebatları a) tam numune b) yarım numune.....	60
Şekil 6.14. Sertlik ölçüm cihazı.	61
Şekil 6.15. Test metal mikroskop cihazı.	62
Şekil 7.1. 16,87 mm deney plakaları çekme dayanımları (Rm).	64
Şekil 7.2. 16,87 mm kopma uzamaları (%).	65
Şekil 7.3. 6,7 mm deney plakaları çekme dayanımları (Rm).	66
Şekil 7.4. 6,7 mm kopma uzamaları (%).	66
Şekil 7.5. Enine yan bükme test numunesi ölçüleri t_s : Numune Kalınlığı, b: Numune Genişliği, L_t : Numune Boyu.....	67
Şekil 7.6. Nokta eğme test düzeneği. t_s : Numune kalınlığı / Ød: Mandrel çapı / R: Mesnetlerin yarıçapı / l: Mesafe / L_s : Kaynak genişliği.....	68
Şekil 7.7. Çentik numune boyutları – 6,7 mm.	70
Şekil 7.8. Çentik numune boyutları – 16,87 mm.	70
Şekil 7.9. 6,7 mm kaynaklarının çentik test grafiği.	70
Şekil 7.10. 16,87 mm kaynaklarının çentik test grafiği.	71
Şekil 7.11. Deney numunelerinin sertlik noktaları.	72
Şekil 7.12. 16,87 mm kaynak kep bölgesi sertlik ölçümü.	73
Şekil 7.13. 16,87 mm kaynak orta bölgesi sertlik ölçümü.....	73
Şekil 7.14. 16,87 mm kaynak kök bölgesi sertlik ölçümü.....	73
Şekil 7.15. 6,7 mm kaynak kep bölgesi sertlik ölçümü.	74
Şekil 7.16. 6,7 mm kaynak orta bölgesi sertlik ölçümü.....	74
Şekil 7.17. 6,7 mm kaynak kök bölgesi sertlik ölçümü.	75
Şekil 7.18. 16,87 mm deney numunelerinin makro görüntüleri a) PL-1 b) PL-2 c) PL-3.	76
Şekil 7.19. 6,7 mm deney numunelerinin makro görüntüleri a) PL-4 b) PL-5 c) PL-6.	76
Şekil 7.20. Karbon oranlarına göre ferrit yapının mikro yapı görüntüsü.	77
Şekil 7.21. X70 Kalite çeliklerin mikro yapısı a)100X büyütme b)200X büyütme	77
Şekil 7.22. X65 Kalite çeliklerin mikro yapısı a)100X büyütme b)200X büyütme.	78
Şekil 7.23. PL-1 Mikro yapı görüntüleri.....	78
Şekil 7.24. PL-2 Mikro yapı görüntüleri.....	79
Şekil 7.25. PL-3 Mikro yapı görüntüleri.....	80
Şekil 7.26. PL-4 Mikro yapı görüntüleri.....	81
Şekil 7.27. PL-5 Mikro yapı görüntüleri.....	82
Şekil 7.28. PL-6 Mikro yapı görüntüleri.....	83
Şekil 7.29. PL-1-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	85
Şekil 7.30. PL-2-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	85
Şekil 7.31. PL-3-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	86
Şekil 7.32. PL-1-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	86
Şekil 7.33. PL-2-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	87

Şekil 7.34. PL-3-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	87
Şekil 7.35. PL-1-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	88
Şekil 7.36. PL-2-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	88
Şekil 7.37. PL-3-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	89
Şekil 7.38. PL-1-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	89
Şekil 7.39. PL-2-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	90
Şekil 7.40. PL-3-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	90
Şekil 7.41. PL-4-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	91
Şekil 7.42. PL-5-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	91
Şekil 7.43. PL-6-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	92
Şekil 7.44. PL-4-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	92
Şekil 7.45. PL-5-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	93
Şekil 7.46. PL-6-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	93
Şekil 7.47. PL-4-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	94
Şekil 7.48. PL-5-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	94
Şekil 7.49. PL-6-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.	95
Şekil 7.50. PL-4-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	95
Şekil 7.51. PL-5-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	96
Şekil 7.52. PL-6-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.	96

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. Tozaltı kaynağının uygulama alanları.	15
Çizelge 4.2. Tozaltı kaynağının karakteristik sınır değerleri.....	15
Çizelge 5.1. Yöntemin avantaj ve kısıtlamaları.....	37
Çizelge 5.2. Yöntemin avantaj ve kısıtlamaları.....	41
Çizelge 6.1. X65 ve X70 kalite çeliklerin kimyasal bileşikleri (% Kütle).	52
Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan bazik elektrotun kimyasal ve mekanik özellikleri.	53
Çizelge 6.3. Deneyde kullanılan özlü telin kimyasal ve mekanik özellikleri.....	53
Çizelge 6.4. Deneyde kullanılan TIG telin kimyasal ve mekanik özellikleri.	54
Çizelge 6.5. Deneyde kullanılan kombinasyonun kimyasal ve mekanik özellikleri.	54
Çizelge 6.6. Kaynak kombinasyonları.....	54
Çizelge 6.7. 16,87 mm plakaların kaynak parametreleri.	55
Çizelge 6.8. 6,7 mm plakaların kaynak parametreleri.	56
Çizelge 7.1. 16,87 mm enine çekme deneyleri sonuçları.	64
Çizelge 7.2. 6,7 mm enine çekme deneyleri sonuçları.	65
Çizelge 7.3. 6,7 mm enine yan bükme numune ölçüleri ve sonuçları.	69

KISALTMALAR

A	Akım Şiddeti
AA	Alternatif Akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
API	Amerika Petrol Enstitüsü
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSD	Brinell Sertlik Değeri
BOF	Bazik Oksijen Fırını
CCD	Charge Coupled Device- Şarj Bağlı Cihaz
DA	Doğru Akım
DGS	The Distance Gain Size- Mesafe Kazanç Boyutu
DSY	Disk Şeklindeki Yansıtıcılar
EN	European Norm
FDD	Işın ile alıcı arasındaki mesafe
FOD	Işın ile malzeme arasındaki mesafe
HV	Vickers Sertlik
IEC	Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu
ISO	International Organization for Standardization
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
KO	Kaynak Ortası
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal Asal Gaz
Mpa	Mega Paskal
MS	Milattan Sonra
PL	Plaka
Rm	Çekme Mukavemeti
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	Tahribatsız Muayene
TS	Türk Standartları
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
TIG	Tungsten Asal Gaz
YAD	Yandan Açılmış Delik
YDDA	Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşım

SİMGELER

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
A ₀	Malzeme kesit alanı
Ar	Argon
α	Düşme açısı
β	Yükselme açısı
C	Karbon
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CaF ₂	Kalsiyum florit
cm	Santimetre
cm ³	Santimetre küp
CaO	Kalsiyum oksit
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbondioksit
Cu	Bakır
E	Elastisite modülü
F _{max}	Malzemeye uygulanan en yüksek mukavemet
gr	Gram
H ₂	Hidrojen
He	Helyum
σ_a	Akma dayanımı
$\sigma_{\check{c}}$	Çekme dayanımı
σ_e	Elastisite modülü
kg	Kilogram
m ³	Metreküp
MHz	Mega hertz
ml	Mililitre
mm	Milimetre
Mn	Mangan
MnO	Mangan oksit
MgO	Magnezyum oksit
Nb	Niobyum
O ₂	Oksijen
P	Fosfor
S	Kükürt
SiO ₂	Silisyum dioksit
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Vanadyum

ÖZET

API ÇELİKLERİNİN TOZALTI KAYNAĞINDA FARKLI KÖK PASO UYGULAMASININ KAYNAKLANABİLİRLİĞE VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mahmut GEL

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Temmuz 2019, 102 sayfa

Petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan boruların üretim esnasında tozaltı kaynak yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte yüksek işletme basınçlarının talep edilmesinden dolayı kaynaklarda beklenen kalite her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çeliklerin tipi, kaynak metodu, kaynak parametreleri, ilave kaynak malzemeleri kaynakların performansını etkileyen faktörlerdir. Bu faktörler, kaynak tasarımının önemini vurgulanması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X65 ve X70 API 5L çeliklerine uygulanan tozaltı kaynak yöntemi ve farklı kök paso uygulamalarının kaynaklanabilirlik ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda farklı kalınlıklarda X65 ve X70 plaka parçaları, V tipi kaynak ağzı açılarak birbirlerine uç bölgelerinden punta kaynağı ile sabitlenmiştir. Parçaların montaj işlemi sonrası alt kısımlarına seramik altlık yerleştirilerek, farklı kaynak yöntemleri ile kök kaynakları kaynatılmıştır. Kök kaynakları sonrasında kaynak bölgesini tamamlamak için kalan kısımlar tozaltı kaynak metoduna göre kaynatılmıştır. Deney numuneleri tahribatsız muayene yöntemlerinden manyetik partikül, ultrasonik ve radyoskopi yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Kaynak bölgesinin mukavemet değerlerini tespit edebilmek için tahribatlı muayene yöntemlerinden çekme, çentik-darbe, eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Kaynak esnasında meydana gelen yapısal değişiklikler, elektron mikroskobu ile makro numune üzerinden analiz edilmiştir. Çentik darbe numuneleri üzerinden kırık yüzeyler Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile incelenmiştir. Deney sonuçlarında, farklı kalınlıktaki X65 ve X70 kalite API 5L çeliklerinin farklı kaynak metodları ile kök kaynaklarının kaynatılabildiği, yapılan kaynaklar birbirleri ile kıyaslandığında TIG kaynak metodu kullanılan kök kaynaklarının çekme ve çentik darbe değerlerinin diğer kaynak metodlarına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: API çelikleri, Elektrik ark kaynağı, Gaz korumalı kaynak, Kök paso, Toz altı kaynağı.

ABSTRACT

THE EFFECT OF DIFFERENT ROOT PASS ON WELDABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES IN SUBMERGED ARC WELDING APPLICATION OF API STEELS

Mahmut GEL

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serkan APAY

July 2019, 102 pages

Submerged arc welding is widely used during the production of pipes used in oil and gas pipelines. However, due to the demand for high operating pressures, the expected quality of welds is increasing every day. The type of steels used, welding method, welding parameters, and additional welding materials are the factors affecting the performance of welds. These factors are important to emphasize the importance of weld design. In this study, the effect of submerged arc welding method and different root pass applications on low alloy, fine grain, high strength X65 and X70 API 5L steels were investigated in terms of weldability and its effect on mechanical properties. In the experimental studies, X65 and X70 plate pieces of different thicknesses were fixed to each other by spot welding by opening V type welding mouth. After the assembly process of plates, ceramic backing were put on the bottom of the plates and root welds were welded with different welding methods. After root welding, the remaining parts were welded according to submerged arc welding method to complete the welding zone. The test samples were checked by magnetic particle, ultrasonic and radiography methods which are non-destructive testing methods. In order to determine the strength values of the welding zone, tensile, notch-impact and bending tests, which are one of the destructive inspection methods, were subjected to the tests. Structural changes that occurred during welding were analyzed by electron microscope on macro sample. The fractured surfaces were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) over notch impact samples. In the results of the experiment, it was observed that the root welds of X65 and X70 grade API 5L steels of different thicknesses can be welded with different welding methods, and compared with each other, the tensile and notch impact values of the root welds using TIG welding method are higher than the other welding methods.

Keywords: API steel, Electric arc welding, Gas metal arc welding, Root pass, Submerged arc welding.

1. GİRİŞ

Dünyada insan nüfusunun artmasıyla birlikte, ihtiyaç duyulan petrol ve doğalgaz miktarı da artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için uzak kaynaklardan elde edilen petrol ve doğalgazın, işlenmesi için öncelikle endüstriyel tesislere ve ardından yerleşim alanlarına güvenli bir şekilde taşınması gereklidir. Boru hatlarının güvenilirliğini sağlamak ve ekonomik kaygılar nedeniyle özel boru çelikleri geliştirilmiştir. Bu çeliklerin geliştirilmesi; özel kaynak yöntemlerinin, kaynak tellerinin ve kaynak tozlarının da gelişmesine yol açmıştır. Türkiye coğrafi konumu itibari ile bölgede enerji taşımacılığı anlamında köprü görevi görmektedir. Türkiye'nin bu avantajı en üst seviyede kullanabilmesi ve söz sahibi olabilmesi için gerek hat borusu üretiminde, gerek hat montajında kaynak yöntemlerinin ve teknolojilerinin geliştirilmesi alanlarında yapılan çalışmalar oldukça önemlidir [1].

1.1. TEZİN AMACI

Doğalgaz ve petrol hatları için geliştirilen düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X65 ve X70 çelikler ile kök kaynaklarının örtülü elektrot ark kaynağı, gazaltı ve tungsten asal gaz ark kaynaklarının üzerine kapak pasolarının tozaltı kaynak yöntemi ile uygulanmasının kaynaklanabilirlik ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

API borularında aranılan kimyasal ve mekanik özellikler API 5L standardında belirtilmiştir [1]. Deneysel çalışmalarda farklı kalınlıklarda X65 ve X70 plaka parçaları V kaynak ağzı açılarak farklı kaynak yöntemleri uygulanarak kök pasolar birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmeler hacimsel hataların tespiti için tahribatsız muayene yöntemlerinden manyetik partikül, ultrasonik ve radyoskopi yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Tahribatsız muayene sonrasında kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarının tespiti için tahribatlı muayene yöntemlerinden sertlik, çekme, çentik-darbe, eğme testleri, makro ve mikro analizleri yapılmıştır.

2. ÇELİK MALZEMELER

2.1. DEMİR VE ÇELİK TANIMI

Demir ve çelik üretiminin tarihsel serüveni ilk çağlardan başlamaktadır. Demirin varlığı milattan yaklaşık 1000 yıl önce dünyanın çeşitli bölgelerinde aynı zamanda keşfedilmiştir. Demirin tarih sahnesine çıkmadan önce de insanlığın onu nasıl ortaya çıkardıkları, nasıl işleyebildikleri ve silah, alet, edevata dönüştürebildikleri görülmektedir.

Farklı gelişme seviyeleri olsa da demir üretim süreçleri dünyanın farklı bölgelerinde eş zamanlı ilerlemiştir. Bu metalin üretimi ile ilgili bilgi ve tecrübeler uygarlıklar tarafından teknik, ekonomik vb. nedenlerden dolayı gizli tutulmuş ancak uzun zaman sonra diğer uygarlıklara yayılabilmıştır. Demir üretimi geçmişten günümüze cevheri ergitmek için kullanılan ocak tiplerine göre anlaşılmaktadır. Bu ocak tipleri aşağıda belirtilmiştir.

- Demirci ocağı
- Demirci fırını
- Akışkan yataklı fırın ve odun kömürlü yüksek fırın
- Kok kömürlü yüksek fırın
- Direkt redüksiyon tesisleri
- İzabe tesisleri

Ocak taşı, kil, ya da kayaların ayrılmış parçalarından üretilen, kısmen derin olan demirci ocaklarında, ham demir işlenebilir forma odun kömürü karıştırılarak getirilmiştir.

Bu işlemde, gang cürufta erimiş cevherin üzerine yapışmış, demir ise katı halde indirgenmiştir. İlk olarak, fırınlar doğal hava akımı ile çalıştırıldı. Üfleme için gereken hava daha sonra elle veya ayakla çalışabilen körükler vasıtası ile sağlanmıştır. Bunlardan çeşitli dövülebilir demirler ve cevher külçeleri ve odun kömürü içeren artık cüruf elde edilmiştir. Bu “ham demirler” kırılmış ve elde edilen parçalar elle dövülerek çeşitli aletler üretilmiştir. Orta Çağlara kadar bu süreç fazla değişmemiştir [2].

Su değirmenlerinin MS 10. yüzyılda kullanılmaya başlanması demirin elde edilmesinde yeni bir çıkış açmıştır. Demir üretim fırınları, suyun kullanımı ile birlikte cevher

yataklarına değil suyun olduğu vadilere taşınmıştır. Su değirmenleriyle çalışan üfleyiciler daha yüksek hava basınçları üretebildiğinden, daha büyük fırınlar inşa edilebilmiştir. Bu fırınlar 100 kilografa kadar ulaşan dövme demirden ve kalıntı cüruftan oluşan, işlem görmemiş (ham) demir olarak bilinen parçalar üretebilmiştir. Bu yerler “demirci fırınları” olarak bilinir. İşlem görmemiş demir parçalarının daha sonra işlenmesi, su değirmenleri tarafından işlenen büyük dövme körükler sayesinde de mümkün olmuştur.

Demir cevherinin izabe edilmesi için gerekli olan yüksek erime sıcaklıkları MS 12. yüzyılda ısının kullanımında gerçekleştirilen gelişme ile mümkün olabilmıştır.

Bu gelişme yüksek fırınların başlangıcı olmuştur. Elde edilen ve çoğunluğu sıvı olan ürün başlangıçta istenmeyen bir ürün olarak kabul edilmiş ve bu nedenden dolayı adına “pig” (domuz) denilmiştir. Günümüzde “pik” olarak bilinen ham demirin adı buradan gelmektedir. Bununla birlikte, sıvı metal olarak bilinen sıvı demir, modern çelik üretiminde önemli bir rol oynamıştır [2].

İlk zamanlarda sıvı metalin üretildiği fırınlara “akışkan yataklı fırınlar” denilmiştir. Bu fırınların boyutları yükseldikçe, “yüksek fırın” ifadesi daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek fırınlarda odun kömürü 18. yüzyılın başlarına kadar kullanılmıştır.

Geçmiş dönemlerde katı halde üretilen demir uygulamalarının aksine, içyapısında bulunan yüksek karbon sebebiyle katı haldeki pik demir dövülemez. Saflaştırma veya rafine etme işlemlerinden sonra ancak kullanılabilmiştir. Bugün de bu işleme “rafine etme” adı vermeye devam etmektedir. Rafine etme işlemi, karbon ve eser elementlerin ilave hava akımının oluşturduğu oksidasyon ile yakılmasından meydana gelmektedir.

Buna göre, artık uygun bir son ürün üretmek için iki işlem gerekmektedir. Demir cevherlerinin indirgenerek sıvı metale dönüştürülmesi ve daha sonra rafine edilerek dövülebilir (çekilmiş) demir, yani çelik elde etmektir. Rafinasyon “rafinasyon ateşi” olarak bilinen ateşte yapılmaktadır.

Odun kaynaklarındaki azalma, yüksek fırınlarda kok kömürüne geçişe neden olmuştur. Kömür, ilk olarak 1709 yılında, İngiltere'deki A. Darby tarafından kullanılmıştır. Kok kömürü ile çalışan ilk yüksek fırın 1796 yılında Almanya'nın Gleiwitz şehrinde kullanılmaya başlanmıştır.

Kok teknolojisinin yaygın kullanımı ve buhar makinelerinin kullanımı ile birlikte yüksek fırınlardan elde edilen verim o kadar artmıştır ki, üretim sonrası aşamalarda, rafinasyon

fırınlarında çelik üretimi ve ardından şekillendirme işlemlerinde zorluklar başlamıştır. Bu zorluklar, 1784 yılında Britanya'da Henry Cort tarafından keşfedilen ve üretimden sonra haddehaneye birlikte uygulanan “karıştırarak yumuşatma” prosesi olmuştur.

Bu keşif ile birlikte üretim işleminin sorunsuz devam etmesini sağlamanın yanında, çelik üretiminde odun kullanımından kok kömürüne geçişi de sağlamıştır. Buradaki öncelik, kömürden, üretilen çelik malzemeye istenmeyen kükürt difüzyonundan kaçınmak olmuştur. Çelik üretimi esnasından kükürt difüzyonu malzemede sıcak çatlamalara neden olmaktadır. Böylece Cort, sıvı metalin sadece oksijen bakımından zengin yanıcı gazlarla temas ettiği bir yansız (hava) fırını tasarlamıştır.

Saflaştırma işlemi esnasında sıvı metal karıştırılır ve çelik bilye formuna getirilir. İlk sıvı çelik 1740 yılında B. Huntsman adlı bir İngiliz tarafından, hazneli fırın kullanılarak üretilmiştir. 19. yüzyılın başlarında bu işlem Almanya’da da kullanılmaya başlamıştır. Çelik malzemenin hazneli fırında işlem görmesi bir ön ergitme operasyonudur. Burada karbürleşmiş, yani “kaynaştırılmış” çelik ergitilmiş ve sıvı hâle getirilmiştir [2].

Çelik malzemelerin seri üretimine 1856 yılında İngiliz Henry Bessemer tarafından başlanmıştır. Kok kömürlü yüksek fırınlarda üretilen sıvı metal miktarındaki artış, artık verimli bir çelik üretim tekniği ile desteklenmiştir. Bessemer tarafından bulunan proseste, sıvı metale alttan hava püskürtülmektedir. Bu, eser miktardaki elementlerin ekzotermik bir yanma işlemi ile kolayca ve hızlı bir şekilde atılmasını sağlar. Sonuç olarak homojen sıvı çelik elde edilmiştir. Bessemer prosesi “konverter” adı verilen armut biçimli bir fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisindeki refrakter kaplamalar silikon asidi içerir.

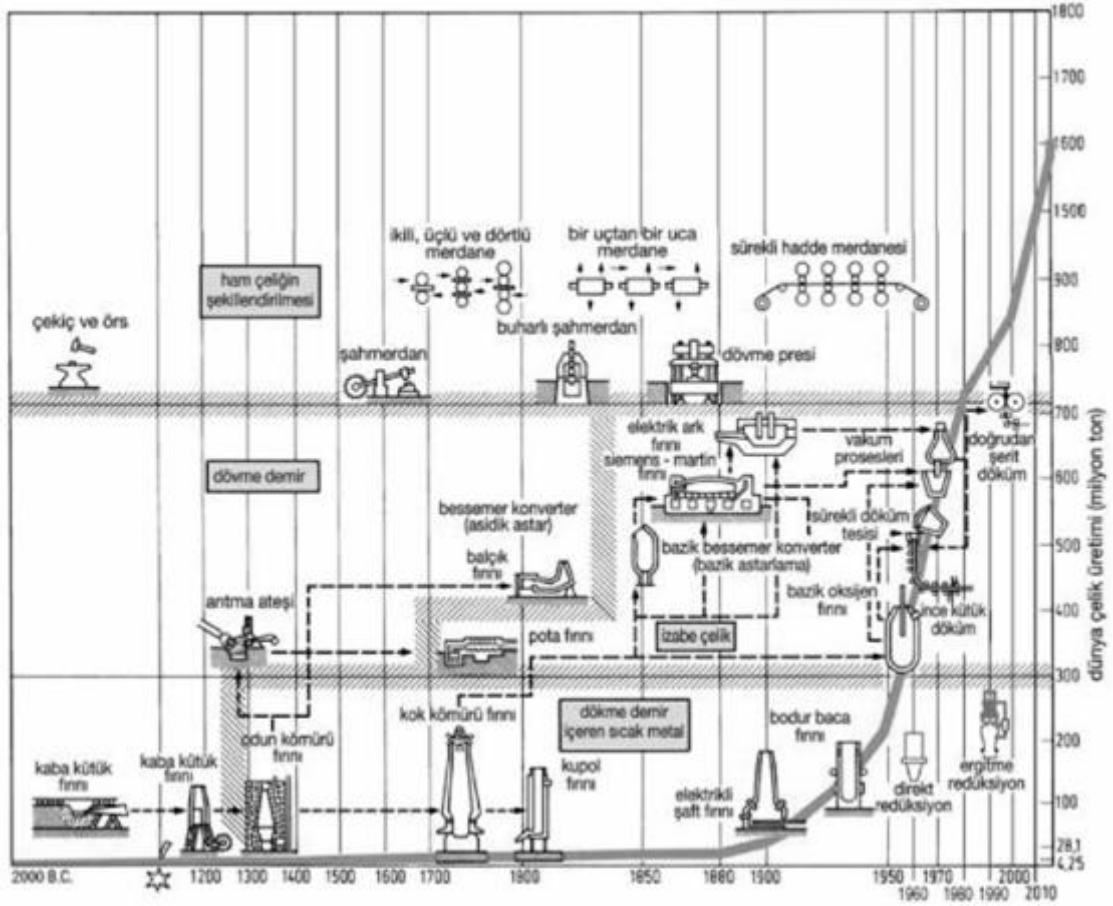
Çelik üretimi açısından, bu asidik kaplama, yalnızca çok nadir bulunan düşük fosforlu sıvı metallerin rafine edilmesi için uygundur. 1879'da İngiltere'den Sidney Gilchrist Thomas, bazik bir dolomit kaplı dönüştürücü kullanarak yüksek fosforlu sıvı metalleri rafine etmeyi başardı. 1860'li yıllarda, çelik üretimi için başka bir etkin süreç geliştirilmiştir. Bu süreçte, sıvı metal ve / veya hurdaları çeliğe dönüştürebilen sıcak hava ile ısıtılan demirci fırınları kullanılmıştır. İngilizce konuşulan yerlerde “açık hazneli bir fırın” olarak bilinen bu teknik, Almanya'da keşfedenlerin adını alarak Siemens-Martin süreci olarak yeniden adlandırılmıştır.

Çelik üretiminde gerekli olan ısı, elektrik üretimin fazla ve uygun maliyetlere gelmesiyle birlikte elektrik gücünden sağlanmaya başlanmıştır. Elektrik enerjisi ile ısı üretimi için yapılan denemelerin 1850'li yıllara kadar gittiği bilinmektedir. Bugün ise çelik

üretiminde kullanılan elektrik ark ocakları büyük bir yere sahiptir.

Henry Bessemer tarafından yüksek saflıkta oksijenin kullanılmasının rafinasyon işlemini hızlandırabildiği bilinmektedir. Ancak, o zaman yeterli saflıkta oksijenin üretilmesi mümkün olmaması nedeni ile bu fikrin gerçekleştirilmesi gerçekçi bulunmamıştır. Yüksek saflıkta oksijen ancak 1930'larda üretilmiştir. Üstten hava üfleme yöntemi ile çelik üretim prosesi (BOF) II. Dünya Savaşı sonrası yaygınlaşınca Thomas ve Bessemer'ın yöntemlerinin yerini almıştır. Günümüzde Almanya'da, çelik üretimi tamamıyla BOF (1957'de devreye giren ilk BOF tesisi) ve elektrik ark ocaklarında gerçekleştirilmektedir [2]. Çeliğin sıvı metal işlemi olmadan üretildiği "doğrudan" üretim yöntemi, çeşitli doğrudan indirgeme işlemlerinin çoğalmasıyla daha da önem kazanmıştır. Sıvı haldeki çelik malzeme oldukça fazla karbon içeriğine sahip olduğundan, üretimi metalürjik anlamda dolambaçlıdır. Çelik üretiminde 19. yüzyılda yaşanan gelişmeler, haddehanede ve dövme teknolojisinde hızlı bir gelişme sağlamıştır. Seri çelik üretiminin 19. yüzyılın ortalarında ortaya çıkması, sanayi topluluğundan yeni ürünlere hızla artan ihtiyacı karşılayabilecek seri çelik şekillendirme yöntemlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Haddehane teknolojilerindeki meydana gelen büyük gelişmelerden sonra normal levhalardan zırh levhalarına kadar geniş yassı parçalar, ray, kiriş, filmaşın, tüp ve boru imalatına uygun imalat işlemleri devreye alınmıştır. İmalat etkinliğini ve hızını daha da artırma getirisi olarak, 19. yüzyıl sonunda, ilk önce filmaşın ve sonra yassı ürünler için sürekli haddehaneler devreye girmiştir.

İlk sıcak şerit haddeleme sistemi 1937'de Almanya'da faaliyetine başlamış, ardından sürekli sıcak haddehane tesisi ilk defa 1953'te inşa edilmiştir. 150 yıl öncesinde geliştirilen çelik üretim süreçleri ve işlemlerinin sonucu olarak çelik imalatı yüksek büyüme oranlarına ulaşmıştır. Ancak, bu tarihi gelişmeler diğer teknolojik gelişmeler bağlamında değerlendirilmesi gerekmiştir. Buhar gücünün kullanılmaya başlanması ile birlikte, buharlı motorların ve araçların kullanımı çelik üretim tesisleri için hızlandırıcı etki yaratmıştır. Taş kömüründen üretilen bol miktardaki kok kömürü, metalürjik işlemler için ideal bir yakıt ve indirgeyici madde olmuş ve demiryolları ile buhar gemilerindeki gelişmeler çelik için yeni ve büyük pazarlar yaratmıştır [2].



Şekil 2.1. Çelik üretimi ve şekillendirme teknolojilerinin gelişimi [2].

Çelik malzeme içyapısında bulunan karbon, çeliğin tüm mekanik özelliklerini belirleyen temel elementtir. Farklı oranlardaki karbon içeriği ve farklı metaller ile yaptığı alaşımlar ile çelik, endüstride büyük bir kullanım yelpazesine sahiptir [3].

Saf haldeki demiri endüstriyel kullanıma hazır hale getiren etken büyük oranda karbon elementi içeriğine sahip olmasıdır. Çelik, içermiş olduğu farklı oranlardaki karbon miktarına göre sementit ile saf demirden oluşan alaşımdır. Çelik malzemeler sadece karbon değil aynı zamanda diğer katkı alaşım elementlerini de içermektedir. Bu malzemelerde eğer karbon içeriği yüksek ise çelik malzeme sert ve kırılğan bir yapıdadır. Çünkü sementit sert, kırılğan ve şekillendirme özelliği çok çok zor olan bir fazdır. Eğer karbon içeriği az ise çelik malzeme yüksek karbonlu içeriğine göre daha yumuşak ve şekillendirme özelliği daha kolaydır. Düşük karbon içeriğine sahip çelik malzemelerin dövülebilirlik özelliği ile birçok imalat alanında kullanımı yaygındır. İmalatın özel durumlarına göre çelik içerisindeki karbon oranının özellikle % 2 ve üzerinde olması istenir. Aynı zamanda farklı alaşım elementleri ile de zenginleştirilmiş ve mekanik özellikleri çok daha iyi bir hale getirilmiş olabilir. Bu alaşımlar dahi çelik malzeme

gurubuna dâhildir. Doğada saf halde bulunan demir sadece demir filizinden oluşmamakta farklı elementlerle özellikle oksijenle bileşik halinde bulunmaktadır. Bazen de çelik üretiminde % 0,8 oranından fazla olmamak şartıyla manganez ve silisyum içermesi de istenmektedir. Fakat kükürt ve fosfor elementlerinin çelik içerisinde yüksek oranda olması kesinlikle istenmez ve mümkün mertebe bu elementler sistemden uzaklaştırılmalıdır [3].

2.2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRMASI

Çelik, sert, güçlü, mavimsi gri metal alaşımıdır, dünyada en yaygın kullanılan malzemelerden biridir, en önemli mühendislik ve inşaat malzemesidir. İnşaat, altyapı, köprülerde ve ev aletlerinde kullanılan başlıca hammaddedir. Çok yönlü, sağlam ve esnektir. Özelliklerini kaybetmeden tekrar tekrar geri dönüştürülebilir [4]. Çeliğin temeline inildiğinde, pek çok tür, yapı ve özellikte çelik olduğu görülmektedir.

2.2.1. Üretim Yöntemlerine Göre Çelikler

Çelikler üretim yöntemlerine göre aşağıda belirtildiği şekilde sınıflandırılmaktadır.

- Bessemer-Thomas yöntemiyle üretilen çelik,
- Siemens-Martin yöntemiyle üretilen çelik,
- Elektrik ark ve elektrik endüksiyon fırınlarında üretilen çelik,
- Potada ergitilerek üretilen çelik,
- Oksijenli konverter yöntemiyle üretilen çelik,
- Vakum yöntemiyle üretilen çelik [5].

2.2.2. Kullanıldığı Bölgeye Göre Çelikler

Üretilen tüm çelikler belli bir amaca göre üretilmiş ve kullanılmaktadır. Bunların sınıflandırılması aşağıda belirtilmiştir.

- Yapı çelikleri
- Takım çelikleri
- Soğuk iş çelikleri
- Yay çelikleri
- Hız çelikleri
- Yüksek sıcaklık çelikleri
- Paslanmaz çelikler [5]

2.2.3. Kimyasal Bileşimlerine Göre Çelikler

Çelikler alaşım durumlarına göre üçe ayrılırlar;

- Sade karbonlu çelikler (alaşımsız çelikler)
- Düşük ve orta alaşımlı çelikler
- Yüksek alaşımlı çelikler [6]

2.2.4. Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Göre Çelikler

- Isıya dayanıklı çelikler
- Manyetik çelikler
- Korozyona dayanıklı çelikler
- Paslanmaz çelikler [6]

2.2.5. Metalografik Yapılarına Göre Çelikler

- Ferritik çelikler
- Ferritik ve perlitik çelikler
- Perlitik çelikler
- Östenit çelikler
- Martenzitik çelikler
- Ledeburitik çelikler
- Beynitik çelikler [6]

2.2.6. Sertleştirilme Yöntemlerine Göre Çelikler

- Yağ çelikleri
- Su çelikleri
- Hava çelikleri [6]

3. YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLER

3.1. YDDA ÇELİKLERİN TANIMI VE ÖNEMİ

YDDA çelikleri İkinci Dünya Savaşı yıllarında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) geliştirilmiştir.

YDDA çelikleri, sıcak haddelenmiş ya da normalleme uygulanmış durumda 275 MPa'dan yüksek akma gerilimlerine ulaşan düşük karbonlu çok az alaşımlanmış çelikler olarak tanımlanırlar. YDDA çelikleri, eşdeğer C-Mn çeliklerine göre daha üstün mekanik özellikler sergilerler. Tümüyle sıcak haddelenmiş durumda kullanılırlar. Petrol ve doğalgaz borularında kullanılan çeliklere denetimli haddelemeler de uygulanarak mekanik özellikleri daha da iyileştirilir [7].

1970'li yıllardan bu yana çelik üretim kapasitesi baz alınarak değerlendirme yapılacak olursa, en önemli gelişme mikro alaşımlı çeliklerde, yapısal çeliklerinin düşük mekaniksel özelliklerinde yaşanmıştır. Bu yıllardan sonra mikro alaşımlı çelikler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile de çeliklerin birçok mekanik özelliği daha iyi hale getirilmiştir.

Mikro alaşıma sahip çelik malzemeleri literatür bilgileri ve piyasa terminolojisi kullanılarak çeşitlendirmek gerekirse bu çelikler;

- Mikro alaşımlı çelikler,
- Perlitçe fakir çelikler,
- İnce taneli çelikler,
- Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (YDDA),
- Z ste çelikleri veya ze çelikleridir.

Mikro alaşımlı çeliklerin gelişme kronolojisi incelenecek olursa, bu çeliklerin içermiş oldukları perlit miktarı (az perlitli, perlitsiz vb.) mikro alaşımlı çeliklerin gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Şekil verme, kaynaklanabilme kabiliyeti ve tokluk açısından mikro alaşımlı çeliklere ilave edilen karbon miktarına bağlı olarak bu mekanik özellikler daha iyi bir hale getirilebilir. Mekanik özelliklerin daha iyi olması, otomotiv endüstrisi

için, kalıcı şekil vermede yüksek dayanımlı ve hafif parçaların üretiminde istenilmektedir. Düşük karbon oranına rağmen bu çeliklerde mikroalaşım elementleri niobyum (Nb), vanadyum(V), titanyum(Ti)'un tane inceltici ve sertleştirici etkileri yanında kontrollü haddelemeyle akma sınırı 500 N/mm^2 'ye ulaşabilmektedir [8].

Mikro alaşımlama yöntemi, adından da anlaşılacağı üzere çeliklerde minimum miktarda alaşımlama ile çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi demektir. Mikro alaşımlama yöntemi genelde, çok düşük karbonlu çelik malzemelerden, ötektoid bileşime sahip çeliklere kadar geniş bir alanda uygulanabilmektedir. Nb, Ti ve V (toplam % 0,25) gibi yaygın olarak kullanılan elemanlar, tek veya çift ve üçlü kombinasyonlarda mikroyapıda oluşan karbonitrid çökeltileri ile tane boyutunu incelterek birlikte tokluk ve dayanım miktarını arttırmaktadır. İlave çökelti sertleştirme mekanizmasıyla, dayanım bir kez daha artmaktadır. Mikro alaşımlama için alüminyum (Al), molibden (Mo) ve bor (B) da kullanılmaktadır.

Mikro alaşımlı çelikler, farklı sertleşme mekanizmalarının ve uygun termomekanik işlemlerin aynı anda uygulanmasıyla yüksek mukavemet, yüksek tokluk, düşük sıcaklıkta gevrek kırılma emniyeti, mükemmel kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci gibi farklı özelliklere sahip bir malzeme grubudur. Yassı ve dövme ürünler şeklinde üretilmektedir. Uygulama çoğunlukla yassı ürünlerde (gaz ve petrol boru hatları, açık deniz yapıları) yapılmaktadır. Son yıllarda, otomotiv endüstrisi için dövme ürünlerin üretiminde bir gelişme kaydedilmiştir. Günümüzde, bu çelikler kontrollü haddelenmiş plakalarda, levhalarda, profillerde, dövme ürünleri olan çubuklarda ve barlarda kullanılmaktadır.

Yassı ürünlerde, mikro alaşımlama ile birlikte uygun bir termomekanik işlem de gereklidir. Bu işlemde kontrollü haddeleme ile, genellikle $1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilen ön deformasyona düşük sıcaklıklarda ($700^\circ\text{C} - 800^\circ\text{C}$), son bir deformasyon ilave edilmektedir. Mikro yapının ince taneli ferrit ve beynitten oluşmasını sağlayabilmek için haddeleme sonrası farklı soğuma hızları kullanılmaktadır. Soğutma hızlarına bağlı olarak, düşük miktarda perlit veya martensit de elde edilir. Yassı ürünlerin geliştirilmesi standart yumuşak çeliklerden C-Mn tipi YDDA çeliklerine doğru kaymıştır. Alaşım element toplamları mikro alaşımlı çeliklerde genellikle % 2'yi geçmez. Çoğunlukla, bu değer manganez hariç, % 0,1-0,2 arasındadır. Günümüzde mikro alaşımlama yöntemiyle kullanılan C-Mn- (V / T : / Nb) tip YDDA çeliklerinin ana bileşimi %0,05 – 0,15 C, % 0,3 Si ve % 1,5 Mn'dir.

Nb, Ti ve V elementlerinden birini veya kombinasyonunu içeren, karbon miktarı ortalama %0,10 seviyesine düşürülmüş yapı çeliklerine termomekanik haddelenmiş çelikler denilmektedir. Kalınlığın artırılması (ve daha yüksek dayanım) için manganez miktarı artırılır ve / veya nikel ve bakırla alaşımdırılmaktadır. Hızlı soğurulmuş halde, karbon miktarı ortalama % 0,07'ye düşürülmektedir. Genel olarak, kaynaklanabilirlik açısından, gerekli karbonitritil çökeltme dağılımını sağlayan Ti / Nb katkı maddesi eklenir.

Mikro alaşımlı çeliklerin mukavemet özellikleri, ıslah edilmiş C-Mn tipi yapısal çeliklerinkilere benzemektedir. Mikro alaşımlı çeliklerin yüksek tokluğu, tümüyle ince taneli yapılarından kaynaklanmaktadır. Mikro alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık dayanımı özellikleri ile soğuk deformasyon vb. işlem özellikleri 35 N/mm lik mukavemet için normalize ve 500 N/mm kuvvetindeki normalleştirilmiş C-Mn tipi yapısal çeliklere benzemektedir.

Bir başka tokluk göstergesi olan kırılma tokluğu, mikro alaşımlı çeliklerde geleneksel çeliklere göre daha yüksektir. Mikro alaşımlı çeliklerin kullanım aralıkları genellikle -100°C ila 300°C arasındadır. Yüksek kırılma güvenliğinin ve olumsuz koşullarda bile güvenilir kaynağının olmasından dolayı geleneksel yapısal çeliklere göre daha fazla tercih edilmektedir [9].

Mikro alaşımlı çeliklerinin üretimi dört adımda gerçekleşmektedir:

1. Mikro alaşımlama,
2. Östenitleme,
3. Sıcak haddeleme,
4. Kontrollü soğutma.

Çeliğe kazandırılmak istenen mekanik özellikler, burada verilen üretim adımlarının sırayla veya birbirleri ile ilişkili olarak uygulanması sonucu sağlanabilir. Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerin bir çoğu ferrit+perlit yapısında, bir kısmı ise ferrit+beynit yapı ile temperlenmiş veya sadece beynitik yapıda görülebilmektedir [8].

4. YDDA ÇELİKLERİN KAYNAKLARI

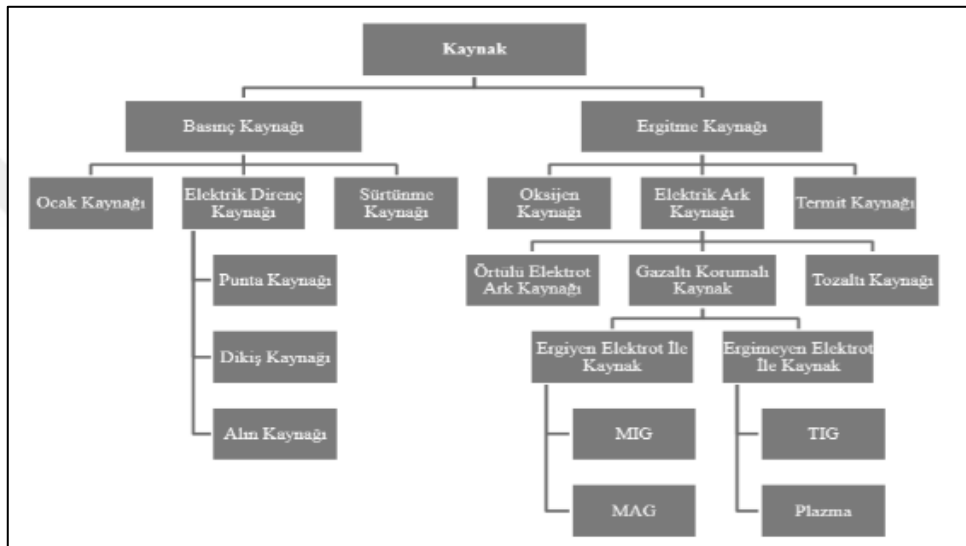
YDDA çeliklerinin birleştirilmesi için birleştirme yöntemi olarak kolaylığı, pratik olması, güvenli ve ekonomik olması nedeniyle kaynaklı birleştirme seçilmektedir [1].

Kaynak; aynı veya benzer alaşımlı maddelerin ısı, basınç ya da ikisinin de kullanılması ile ek kaynak malzemesi olsun veya olmasın malzemenin sınırlı kısmında yapılan birleştirme işlemidir [10]. Çelik yapı imalatında, üretimi gerçekleştirme esnasında kullanılan bütün kaynaklı birleştirme yöntemlerinde, kaynağı yapılan metalin kaynak bölgesinin, aynı metalin ergime sıcaklığına kadar bir sıcaklıkta tavlama işlemi gerekmektedir. Bu tavlama işlemi takip eden metalin soğuması durumu, metalürjik olarak metalin içyapısında değişiklik meydana getirdiği gibi, kaynak esnasında ulaşılan sıcaklık, kaynak dikişi, kaynak dikiş cürufu, ana malzeme ve kaynak yapılan ortam şartlarında bazı kimyasal reaksiyonların oluşmasını da kolaylaştırır. Elektrik arkı sayesinde veya yanıcı gaz karışımı alevinin oluşturduğu sıcaklık ile ergimiş durumdaki metali (kaynak dikişi), önceden hazırlanan kaynak birleştirme bölgesi (kaynak ağzı) içine dökülür. Bu işlem sırasında, kaynaklanan malzemenin kaynak dikişine bitişik kısımlarında, metalin erime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar, değişik sıcaklık derecelerinde ısıdan etkilenmiş bölgeler ortaya çıkar. Isıdan etkilenen bu bölgelerde, kaynaklı birleştirme esnasında ortaya çıkan ısıdan dolayı mekanik özellikler ve içyapı, ana malzemenin mekanik özellikleri ve içyapısından daha farklı özelliklere sahip olur. Isıdan dolayı değişiklik gösteren bu bölgelerde, ana malzemenin korozyon direnci ve gerilme ile şekil değiştirme miktarına göre farklı yapılar görülmektedir. Kaynaklı birleştirme yapılan bir çelik malzemedeki kaynak bölgesini; Erime bölgesi (EB) ve ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) olarak ikiye ayırmak mümkündür. Erime bölgesi, kimyasal birleşim olarak esas metal ve kaynak metali karışımından oluşur. Isı tesiri altında kalan bölgeyse, kaynaklı birleştirme esnasında ortaya çıkan sıcaklık farklarından etkilenmiş ve metalürjik anlamda içyapı değişimine uğramış olan bölgedir. ITAB, kaynak dikişi ve ana malzemenin birleştiği çizgiden başlayarak, kaynaklı birleştirme işlemi esnasında ortaya çıkan sıcak çevriminin ana malzeme özelliklerini etkilediği hatta değiştirdiği bölgedir. Çeliklerin kaynağında bu bölgede sıcaklık 700°C ile 1450°C arasında değişmektedir. Bu bölgede ulaşılabilen en yüksek sıcaklık değeri ile ana

metalden farklı içyapı ve mekanik özelliklere sahip bölgeler görülebilmektedir.

Kaynaklı birleştirme işlemi sırasında ısı tesiri altında kalan bölgede sıcaklık ani olarak artmakta ve sonra da parça kalınlığına, kaynağa uygulanan enerjiye ve kaynaklanan metallere uygulanan ön tav sıcaklığına bağlı olarak da hızlı bir biçimde düşmektedir. Bu hızlı ısınma ve hızlı soğumanın bir sonucu olarak, kaynaklanan metalik malzemenin birleşimine göre, sert ve kırılğan bir bölge oluşur. Bu bölge kaynak bağlantısının en kritik bölgesidir ve mikro çatlak, makro çatlak ve kırılmalar bu bölgede oluşmaktadır [11].

YDDA çeliklerinde kullanılan kaynak türleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Kaynak türlerinin gösterimi [12].

4.1. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ

Sınırlı erime ve akım seviyesi, örtülü elektrot kullanılarak gerçekleştirilen ark kaynağında kaynak hızının belirli bir limitte kalmasına etki eden faktörlerdir. II. Dünya Savaşı'nın olduğu yıllarda sanayinin gelişmesiyle birlikte ihtiyaçlar artmış ve bu ihtiyaçları karşılayabilmek için yeni kaynak yöntemleri arayışına girilmiştir. Bu arayışın sonuçlarından biri olan toz altı kaynak yöntemi 20.yüzyılın ikinci çeyreğinde Avrupa'da kullanılmaya başlanmış ve yüksek erime gücü ve kaynak hızına sahip oluşuyla günümüz sanayisinde kullanımı önde gelen yöntemlerden olmuştur [13].

Metalik bir malzemeyi ısı veya basınç ya da her ikisini birden kullanarak ve aynı türden ergime aralığına sahip bir malzeme ekleyerek veya eklemeyerek yapılan birleştirme işlemine metal kaynağı, malzemeyi sadece sıcaklığın etkisi ile bölgesel olarak ergitip, bir ek kaynak metali kullanarak (ya da kullanmayarak) birleştirme işlemine ergitme kaynağı

kullanılmasının yanında kaynak kalitesi açısından oldukça verimlidir. Tozaltı kaynağının uygulama alanları Çizelge 4.1’de ve karakteristik kaynak parametreleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Tozaltı kaynağının uygulama alanları [15].

ENDÜSTRİ	KONSTRÜKSİYON TİPİ	DİKİŞ(KAYNAK) TİPİ
Gemi İnşası	Panel Konstrüksiyonu	Alın ve Köşe Kaynağı
	Bölüm Konstrüksiyonu	Alın ve Köşe Kaynağı
Boru Üretimi	Borular	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Konstrüksiyon Boruları	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Spiral Borular	Çevresel Kaynak
Kap İnşası	Kimyasal Reaktörler	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Kolonlar	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Basınçlı Kaplar	Boyuna ve Çevresel Kaynak
Kazan İnşası	Silindirik Kazan Kabuğu	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Kolektörler	Boyuna ve Çevresel Kaynak
	Gaz Güvenceli Boru Duvarı	Boyuna Kaynak
Vinç ve Köprü İnşası	Kiriş	Alın ve Köşe Kaynağı
	Taban Döşeme	Alın ve Köşe Kaynağı
	Profiller	Alın ve Köşe Kaynağı
Çelik Yapı	Kalın Duvarlı ve Uzun Kirişli Konstrüksiyon Parçalı	Alın ve Köşe Kaynağı

Çizelge 4.2. Tozaltı kaynağının karakteristik sınır değerleri [15].

Malzemeler	Alaşimsız, düşük ve yüksek alaşımli çelik, ince taneli yapı çelikleri, östenitik çelikler
Kaynak Akım Şiddeti (A)	200-2000 (tercihen 500-1000)
Kaynak Gerilimi (V)	25-45
Kaynak Hızı (cm/dak.)	15-200 (maksimum 400)
Tel Elektrot Çapı (mm)	1,6-8 (tercihen 4-6)
Ergitme gücü (kg/saat)	3-40 (maksimum 75)
Levha Kalınlığı (mm)	En az 2 (tercihen ≥ 6)

4.1.2. Avantajları

Tozaltı kaynak yönteminin avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek kaynak hızı, kaynak parametreleri uygun seçildiğinde hatasız ve güzel görünümlü kaynak dikişleri elde edilir.
- Kaynak arkı, kaynak tozu tarafından örtüldüğünden ark ışınlarından korunmak için maske kullanmaya gerek yoktur.
- Kaynak esnasında zararlı metal tozlan ve duman çıkarmaz.
- Sıçrama kaybı yoktur.
- Koçan atmadan ileri gelen kaynak malzemesi zayıtı yoktur.
- Derine işleme kabiliyeti iyi olduğu için daha dar ve daha derin kaynak ağızlarında kaynak yapılabilir. Bu özelliği, daha az işçilik ve daha az kaynak malzemesi kullanımı demektir.
- Gerekli toz tutma önlemleri alındığında tek taraflı kaynakta kaynak ağızı açmadan 16 mm kalınlığa kadar, iki taraflı kaynakta ise 30 mm kalınlığa kadar kaynak yapabilme imkânı sağlar.
- Kaynak tozu, kaynak dikişinin özelliklerini etkileyecek şekilde alaşımlandırılabilir. Böylece ucuz ve alaşımsız bir elektrotla alaşımlı bir toz kullanarak istenen özellikte daha ekonomik kaynak dikişleri elde edilebilir.
- Yarı otomatik, tam otomatik uygulamalara uygun olduğu gibi istenirse elle uygulama imkânı da vardır.
- Küçük bir değişiklikle gaz altı kaynağına dönüştürülebilir [16].

4.1.3. Kısıtlamalar

Tozaltı kaynak yönteminin kısıtlamaları aşağıda sıralanmıştır.

a) Büyük ergime banyosu (düşük kaynak hızlarında)

- İri dallantılı kristalizasyon
- Uygun olmayan döküm yapı
- Dikiş ortasında segregasyonlar
- Sıcak çatlak oluşumu tehlikesi

b) Banyo altlığının yetersiz olması durumunda erimiş metalin aşağı akma tehlikesi,

c) Kaynak banyosunun görülebilir olmaması ve kaynak sırasında sadece sınırlı düzeltmelerin yapılabilmesi nedeniyle düzgün kaynak ağızı hazırlığı gerektirmesi,

d) Yardımcı donanım olmadan sadece yatay ve oluk pozisyonlarındaki uygulamalar mümkün olmasıdır [15].

4.1.4. Kaynak Tozları

Tozaltı kaynağında kullanılan tozlarda aranılan şartlar:

- Kaynak pasosunu uygun bir yüzey formunda yapabilmeyi mümkün kılmasıdır.
- Kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini iyi yönde etkilemeli
- Gözeneklerin oluşmasını engellemeli
- Arkı kararlı hale getirmeli
- Kaynak metalini cüruf oluşturarak çevre atmosferinden korumalı
- Su almamalı (hidroskobik olmamalı)
- Zararlı buharlar çıkarmamalı [15].

Ucuz ve alaşımsız elektrotlar ile alaşımlı kaynak tozları kullanılarak daha ekonomik kaynak dikişleri oluşturabilmek için kaynak tozları alaşımlandırılabilir.

Toz içindeki Al_2O_3 , CaF_2 , CaO , MnO , MgO , SiO_2 , TiO_2 elementlerin miktarı elektrottakilerle ters orantı göstermektedir. Küçük, orta ve büyük boyuttaki tozlar toz kaynağında kullanım için belirlenmiş sınıflardır. Toz ebatının da kaynak değerleriyle ilişkili olarak seçilmesi gerekmektedir. Hız ve akım dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerdir.

Kaynak sırasında ortaya çıkan gazlar, kaynak metali katılaşmadan önce kaynak dikişinden ayrılmalıdır. Aksi halde kaynak dikişinde hapisolan gazlar gözenek oluşumuna ve bazen de çatlamalara neden olabilir. Toz tane büyüklüğü yeteri kadar iri olursa gazların dikişten ayrılması daha rahat olur. Kaynak hızı yüksekse, toz tane büyüklüğü orta veya kaba olmalıdır.

Kaynağın hızı arttıkça kaynak banyosu küçülecektir ve katılaşma hızlı olacağından gazlar dikişten çok kısa sürede çıkması gereklidir. Bu nedenle, kaba toz kullanılması yararlıdır [12].

4.1.5. Kaynak Elektrotları

Toz altı kaynak yönteminde kullanılan çıplak elektrotlar, kaynak teli diye adlandırılır. Toz altı kaynak telleri, elektrik ark ocaklarında üretilen, kimyasal yapısı ile kaynak yerinin metalurjik güvenliği bakımından yüksek mangan (Mn) içeren özel çeliklerden imal edilirler. Çeşitli amaçlar için genellikle dairesel kesitli olarak 1,2 - 1,4 - 1,6 - 2,0 - 2,4 -3,2 -4,0 - 5,0 ve 6,0 mm çaplarında imal edilirler. Kaplama kaynakları için lama

şeklinde (dikdörtgen kesitli) imal edildiği de olur. Dairesel kesitli olanlar bakırla kaplanmış olarak kangal halinde piyasaya verilir. Çıplak telin bakırla kaplanmasının üç nedeni vardır. Bunlar aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir.

a- Soğuk çekme esnasında passız ve temiz hale gelen teli, kullanım anına kadar oluşacak pası korumak,

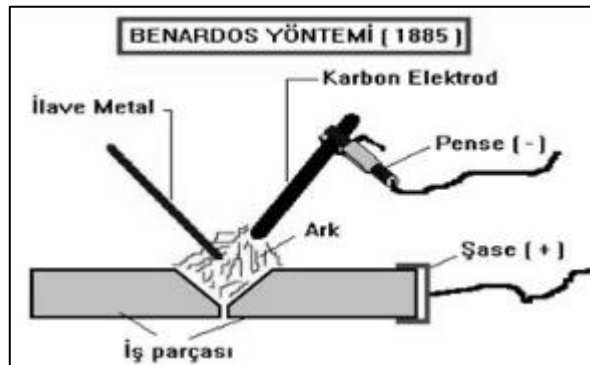
b- Bakırın iyi bir elektrik ileticisi olmasından dolayı, telin kontakt elemanlarına temasında iyi iletkenlik sağlayarak, temas yüzeylerinin ısınmasını ve enerji ziyanını önlemek,

c- Bakırın yumuşak olmasından dolayı, kaynak esnasında devamlı ilerleyen tel, kontakt elemanlarının temas yüzeylerinde aşınmasına sebebiyet vermez.

Yüksek Mn'lı olarak imal edildiğini ifade ettiğimiz kaynak tellerinde fosfor (P) ve kükürt (S) miktarlarının her birinin % 0,03'ten fazla olmaması gerekir [16].

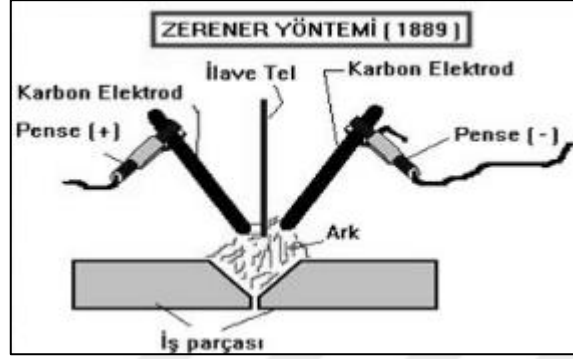
4.2. ELEKTRİK ARK KAYNAK YÖNTEMİ

Elektrik ark kaynaklı birleştirmenin kısaca tarihi incelenecek olursa manuel olarak yapılan ark kaynakların 3 farklı yöntem ile yapıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerin ilki 1880'li yıllarda uygulanan Şekil 4.3'de gösterilen Bernardos yöntemidir. Bu yöntemde iş parçası üzerinde karbondan imal edilen bir elektrot ile ark oluşturularak ısı ortaya çıkarılır. Oksi-gaz kaynak yöntemine benzer şekilde oluşan ark içerisinde ilave tel beslemesi yapılarak kaynaklı birleştirme sağlanmış olmalıdır. Bu yöntemde göze çarpan ilk dezavantaj kaynak dikişi üzeri ve kaynak bölgesi dış atmosferdeki zararlı gazlardan koruyamadığı için kaynak dikişinin mekanik özellikleri çok düşük olmaktadır. Bir başka dezavantaj ise karbon elektrottan çıkan karbondioksit ve karbonmonoksit zehirli gazlarının açığa çıkmasıdır.



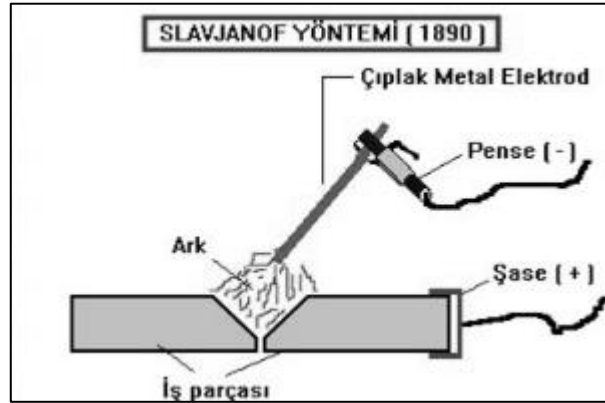
Şekil 4.3. Bernardos kaynak yöntemi [17].

Şekil 4.4'te gösterilen ve 1890'lu yıllarda Zerener'in tarafından bulunan yöntemde ise, ark oluşumu iki adet karbon elektrot arasında oluşturulmaktadır. Elektrotlar arasında bulunan manyetik bobin yardımı ile oluşturulan arkın iş parçası üzerine gönderilmesi sağlanmaktadır. Bernardos yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de oksî-gaz kaynağı gibi ilave tel kullanılmaktadır.



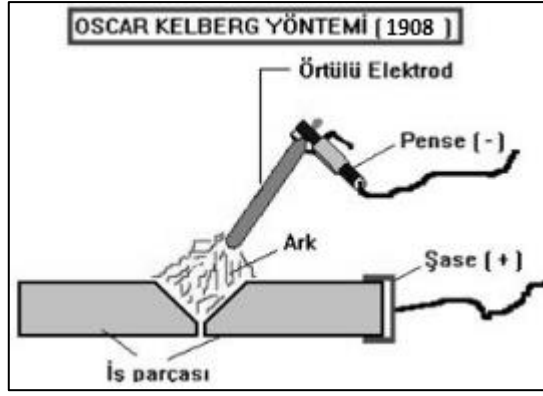
Şekil 4.4. Zerener kaynak yöntemi [17].

Şekil 4.5'te gösterilen Slavianoff kaynak yöntemi 19. yüzyıl sonlarına doğru Slavianoff tarafından bulunmuştur. Slavianoff usulü olarak adlandırılan formda iş parçası ile ark oluşturarak eriyen metalik elektrot kaynak ağızını doldurur. Ancak bu yöntemde, kaynak banyosuna havanın etkisi önlenememiştir.



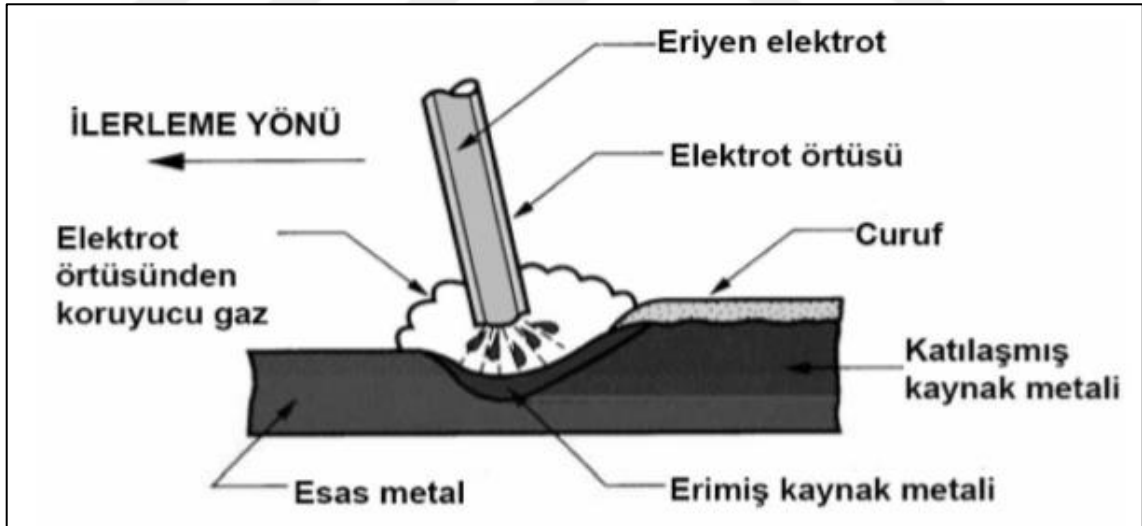
Şekil 4.5. Slavianoff kaynak yöntemi [17].

Şekil 4.6'da gösterilen Oscar Kelberg kaynak yöntemi, havanın kaynak banyosunu etkilemesini engelleyici elektrot örtüsü 20. yüzyıl başlarında Oscar Kelberg tarafından bulunması ile keşfedilebilmiştir.



Şekil 4.6. Oscar Kelberg kaynak yöntemi [17].

Genelde eriyen elektrotlardan faydalanılarak uygulanan ark kaynağı, kaynak endüstrisinde en çok tercih edilen kaynak metodudur. Ark, uygulama parçası ve elektrot arasında oluşur ve ana metal oluşan ark etkisiyle seri bir şekilde eriyerek birleşme sağlar. Böylelikle eriyen elektrotlar kaynak aşamasında tükenmektedir. İletken malzemelerle tasarlanan sarf elektrotlar, bu tasarımla üzerlerinden geçen akımı iletebilmektedir. Şekil 4.7’de de görüldüğü üzere cüruf ilerleme yönünün aksi istikametinde oluşmuş, katı kaynak metali erimiş kaynağın soğumasıyla ortaya çıkmıştır [18].



Şekil 4.7. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi [18].

4.2.1. Avantajları

Elektrik ark kaynak yönteminin avantajları aşağıda belirtilmiştir.

- Örtülü elektrot ark kaynağı açık ve kapalı alanlarda uygulanabilir.
- Elektrot ile ulaşılabilen her noktada ve pozisyonda kaynak yapmak mümkündür.

- Diğer kaynak yöntemleri ile ulaşılamayan dar ve sınırlı alanlarda kaynak yapmak mümkündür.
- Kaynak makinesinin güç kaynağı uçları uzatılabildiği için uzak mesafedeki bağlantılarda kaynak yapılabilir.
- Kaynak ekipmanları hafif ve taşınabilir.
- Pek çok malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerini karşılayacak örtülü elektrot türü mevcuttur. Bu nedenle kaynaklı birleştirme bölgesi ana malzemenin sahip olduğu özelliklere sahip olabilir [15].

4.2.2. Kısıtlamalar

Elektrik ark kaynak yönteminin kısıtlamaları aşağıda belirtilmiştir.

- Örtülü elektrot ark kaynağının metal yığıma hızı ve verimliliği pek çok ark kaynak yönteminden düşüktür. Elektrotlar belli boylarda çubuklar şeklindedir. Bu nedenle elektrot tükendiğinde kaynağı durdurmak gerekir.
- Her kaynak pasosu sonrasında kaynak dikişi üzerinde oluşan cürufu temizlemek gerekir.

4.2.3. Elektrot Örtüsünün Görevleri

Elektrot örtüsü aşağıdaki görevleri sergilemektedir.

- Arkın düzgün oluşmasını ve kararlılığını sağlamak,
- Kaynak banyosunu (metalini) havanın olumsuz etkilerinden korumak,
- Kaynak metalinin hızlı soğumasını engellemek,
- Değişik pozisyonlarda rahat yakma ve damla geçişine olanak sağlamak,
- Kaynak dikişine form kazandırmak (O_2 ile),
- Gerekğinde kaynak metalini alaşımlandırmak.

4.2.4. Elektrot Tipleri ve Genel Özellikleri

Rutil elektrotlar

Elektrot örtüsünün büyük bir kısmını (yaklaşık % 35) titanyum dioksit (TiO_2) oluşturur. Bu oksit cüruf oluşumunun yanı sıra ark kararlılığını sağlar. Rutil örtülü elektrotlar en yaygın kullanılan genel amaçlı elektrot türüdür. Kaynak metalinin hidrojen miktarı yüksek olup yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağında problem yaratabilmektedir.

Özellikleri:

- Örtünün yaklaşık %50'si rutildir.
- Kullanımları kolaydır.
- Son derece kararlı ark oluşturmaktadır.
- Orta derecede O₂ içermektedirler (dikiş profilleri düzdür).
- Cürufu kolay kalkmaktadır.
- 20 mm'den kalın parçaların soğuk kaynakları için uygun değildir.
- Yüksek mukavemetli çelikler için uygun değildir.
- Genellikle DA akım negatif (-) kutupta ve AA akımda kullanılmaktadır.

Bazik elektrotlar

Örtüsünde büyük miktarda CaF₂ ve CaCO₃ gibi kalsiyum bileşikleri bulundurmaktadır. Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklı birleştirilmesinde içeriğindeki düşük hidrojenden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer elektrot türleri ile karşılaştırıldığında bazik karakterli elektrotların mekanik özellikleri daha iyi olduğu görülmektedir. Kaynaklı birleştirmede zorluk yaşanan kaynak pozisyonlarının hemen hemen tümünde rahatlıkla kaynak yapılabilmesi için önemli bir elektrot türüdür.

Özellikleri:

- Kalsiyum bileşiklerinden oluşan bir örtüye sahiptir.
- 400°C'de kurutulmuş bazik elektrotun H₂ içeriği 10ml/100gr'dır. Bu özelliğinden dolayı "hidrojen kontrollü elektrot" olarak adlandırılmaktadır.
- Genellikle DA pozitif (+) kutupta kullanılmaktadır.
- Kalın örtülü, damla geçişleri küçük ve orta büyüklükte olduğundan dolayı dikiş görünümleri çok düzgündür.
- Neme karşı çok hassas olduklarından, orijinal paketlerinden çıkarılarak açıkta bekletilmiş elektrotlar kurutulmuş olarak kullanılmaktadır.
- Soğukta kaynağa olanak vermektedir.
- Kaynak dikişlerinin darbe dayanımları yüksek, sünek-gevrek geçiş sıcaklığı düşüktür.
- İyi bir el becerisine sahip kaynakçıya gereksinim vardır. Çünkü kaynak sırasında ark boyu diğer elektrotlara göre daha kısadır.
- Cürufu rutil örtülü elektrotlar kadar kolay kalkmamaktadır.
- O₂ içerikleri düşük olduğundan dolayı dikiş profilleri dışbükey görünümdedir.

Selülozik elektrotlar

Selülozik tip elektrotların çıplak tel üzerinde bulunan kaplama örtüsü içinde kaynak esnasında yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan yanma ile gaz haline dönüşen organik maddeler bulunmaktadır. Örtü ağırlığının % 30'unu selüloz oluşturmaktadır. Kaynak esnasında organik maddelerin ayrışması arın etrafında hidrojen ortamının oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle de yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağında hidrojen içeriği fazla olduğundan selülozik tip elektrot kullanılmamaktadır. Bütün kaynak pozisyonlarında kullanılabilir özellikle sıvama kaynağı adı verilen yukarıdan aşağıya doğru olan kaynaklı birleştirmelerde etkili sonuçlar vermektedir.

Özellikleri:

- Selüloz içeren bir örtüye sahiptir.
- Ark atmosferinde H₂ bulunduğundan nüfuziyetleri diğer elektrotlara nazaran %70 daha fazladır.
- Dikiş profilleri dış bükey görünümündedir.
- Çevresel ilerlemedeki pozisyon değişiklikleri ve özellikle yukarıdan aşağıya dik pozisyonlardaki üstünlüğünün yanı sıra kök pasalarda gözenek bırakmama özelliği mevcuttur.
- Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklarında kullanılmamaktadır.
- Genellikle DA akım ve pozitif (+) kutupta kullanılmaktadır [15].

4.3. MIG/MAG KAYNAK YÖNTEMİ

Erimiş kaynak banyosunun bir gaz yardımı ile korunması fikri çok eskidir. İlk kez 1926'da tanıtilen Alexander yönteminde, kaynak dikişi metanol gazı ile korunmuş ve daha sonra 1928'de Arcogen yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, elektrot ve oksii-asetilen alevi birlikte kullanılmaktadır. Burada torç alevi, dikişi havanın etkisinden korumasına rağmen günümüzde bu prosedürlerin her ikisi de kullanılmamaktadır. Diğer taraftan, kaynak metalinin atmosferin etkilerine karşı korunması sistematik olarak tekrar araştırılmış. 1926'da De Weinmann ve Langmuir in koruyucu gaz olarak hidrojeni kullanması ile ark atomu yöntemi kullanım alanına girmiştir.

İnert bir gazın kaynak banyosunda koruyucu gaz olarak kullanılması 1930 yılında ABD Patent No. Hobart ve Devers tarafından patenti alınarak bilinirliği artmaya başlamıştır. 1940 yılına gelindiğinde Nortrop Aircraft Company Inc. Firması bu gazı magnezyum ve

alaşımalarının kaynaklarında kullanmıştır.

Koruyucu gaz olarak ilk önce helyum gazı kullanılmaya başlanılmıştır. 1942'de Linde Air Product Company ve Union Carbide and Carbon Corporation şirketi tarafından, hem helyum hem de argon gazı kullanılarak hafif metaller ve alaşımlarının kaynakları yapılabilmektedir. İnert gazlar dışındaki kaynak bölgesinde karbondioksit gibi aktif bir gazın kullanımı ile ilgili ilk çalışma 1952'de başlanmıştır. Bugün, donanımı aynı olan ekipmanla, çeşitli inert gazları ve aktif gazları kullanan çeşitli gaz altı ark kaynağı yöntemleri vardır [19].

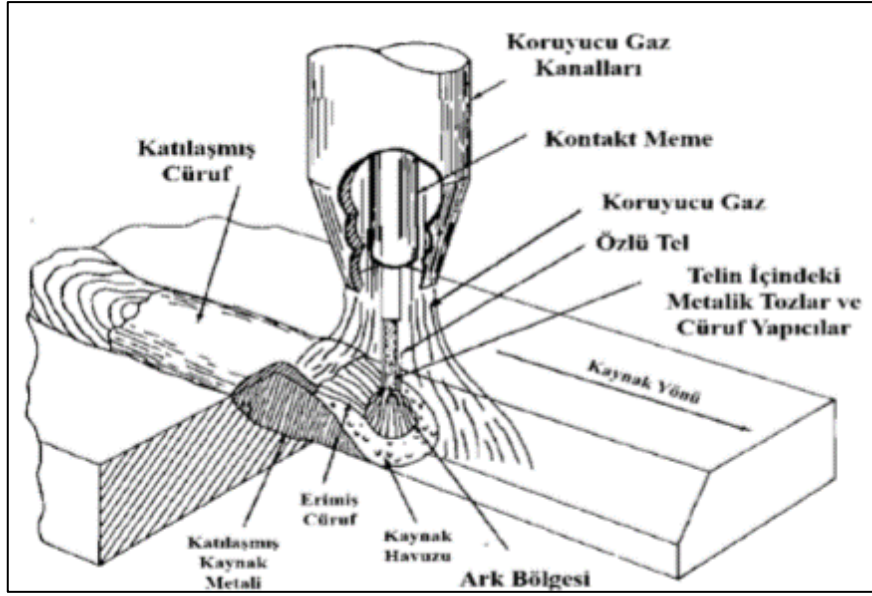
Gaz altı kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gazların birinci derecedeki fonksiyonu, ergiyen kaynak metalini atmosferde bulunan azot ve oksijenin olumsuz etkisinden korumaktır. Çünkü kullanılan gazın cinsi ve kompozisyonu birleştirilen parçaların özelliklerinin belirlenmesinde en önemli faktörlerden biridir. Kullanılan gazın akışı, hızı, kimyasal özellikleri, kaynak esnasında metal akışını, kaynak banyosu yapısını, ark damlasının formunun belirlenmesinde oldukça önemlidir. Günümüzde gaz altı kaynak yöntemlerinde kullanılan gazlar genellikle Ar gazı ve argon gazının O₂, He, H₂, CO₂ gazları ile karışım gazları kullanılmaktadır. Tercih edilen gaz ve kompozisyonu birleştirilen parçanın mekanik özellik ve mikro yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Seçilen gazın cinsi ve kompozisyonu birleştirilen malzemenin mikro yapısına ve mekanik özelliklerine önemli şekilde etki etmektedir. Ayrıca bu yöntem de ilave metalde kullanılırken yine kullanılacak olan malzemenin kimyasal içeriği ile yakın olan bir çıplak elektrot kullanılmaktadır [20].

Kaynak bölgesinin koruyucu gaz atmosferi altında bulunduğu bu kaynak yönteminde kaynak ısısı, ergiyen elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark ile sağlanır.

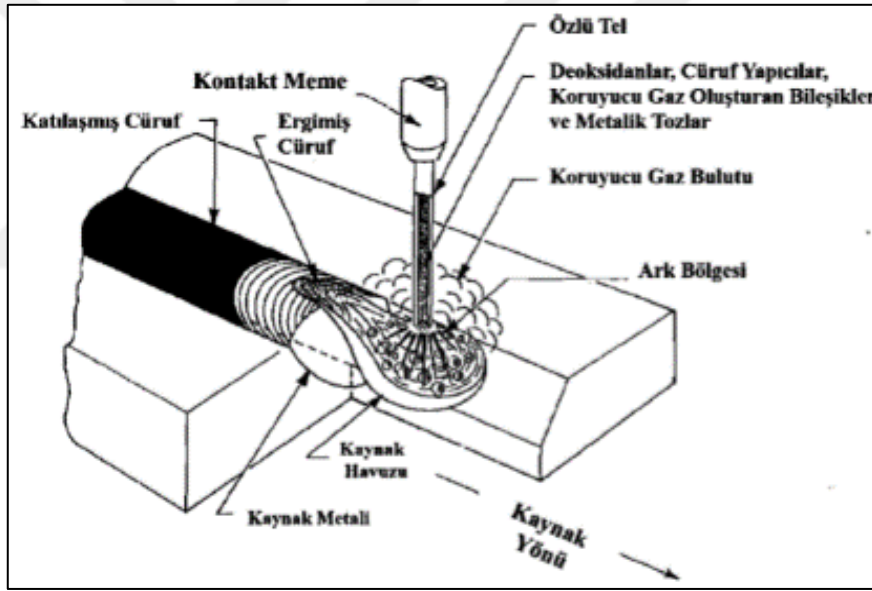
MIG (Metal İnert Gaz); Kaynak, soy gaz atmosferi (Ar, He veya ikisinin karışımı) altında yapılır.

MAG (Metal Aktif Gaz); CO₂ gibi soy gaz grubuna dâhil olmayan aktif gaz atmosferi altında yapılır [12].

MIG-MAG kaynak yöntemleri Şekil 4.8, Şekil 4.9'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Gaz korumalı özlü tel kaynak ark bölgesi [18].



Şekil 4.9. Kendinden korumalı özlü tel kaynak ark bölgesi [18].

4.3.1. Avantajları

Yöntemin yaygın olarak kullanılma sebebi, sağladığı avantajlardan kaynaklanmaktadır. Bu üstünlükler aşağıda belirtilmiştir;

- Tüm ticari metallerin ve alaşımların kaynağında kullanılabilecek tek eriyik elektrot kaynağı yöntemidir.
- Her pozisyonda kaynak yapılabilir. Tozaltı ark kaynağında bu mümkün değildir.
- Metal ark hızı elektrik ark kaynağına göre oldukça yüksektir.

- Sürekli elektrot beslenmesi ve yüksek metal yığılma hızı nedeniyle, kaynak hızları elektrik ark kaynağına göre yüksektir.
- Sürekli elektrot beslemesi nedeniyle, kaynak duruşu yaşamadan uzun kaynak dikişleri çekilebilir.
- “Püskürtme iletimi” kullanıldığında, elektrik ark kaynağı ile karşılaştırıldığında daha derin nüfuziyet sağlanmaktadır. Bu şekilde, iç köşe kaynaklarında aynı kuvveti sağlayan daha küçük bir kaynak dikişi çizmek mümkündür.
- Yoğun cüruf bulunmadığından, pasolar arası temizliği için gereken süre minimumdur. Bu avantajlar yöntemi özellikle yüksek üretim ve otomatik kaynak uygulamaları için uygun hale getirmiştir.

4.3.2. Kısıtlamaları

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi gaz altı kaynağının kullanılmasını zorlaştıran bazı sınırlamalar da mevcuttur. Bu sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır:

- Kaynak donanımı, elektrik ark kaynağına nazaran, daha karmaşık, daha pahalı ve bir yerden başka bir yere taşınması daha zordur.
- Kaynak torcunun elektrik ark kaynağı pensesinden daha büyük olması nedeniyle ve kaynak metalinin koruyucu gazla etkin bir şekilde korunması amacıyla torcun bağlantıya 10 ila 19 mm arasında değişen yakın bir mesafeden tutulması gerektiği için, bu yöntemin ulaşılması güç olan yerlerde kullanılması pek mümkün değildir.
- Kaynak arkı koruyucu gazı bulunduğu yerden uzaklaştıran hava akımlarından korunmalıdır. Bu nedenle, kaynak alanının etrafı hava akımına karşı muhafaza altına alınmadıkça, yöntemin açık alanlarda kullanılması mümkün değildir.
- Göreceli olarak yüksek şiddete ısı yayılması ve ark yoğunluğu nedeniyle, kaynakçılar bu yöntemi kullanmaktan kaçınmaktadır.

4.3.3. MIG-MAG Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar

Gaz altı kaynak yöntemlerinin üç tür sarf malzemesi vardır, bunlar; elektrik enerjisi, koruyucu gaz ve kaynak metalidir. Kaynak bölgesinin kimyasal yapısını ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli bileşenler kaynak telinin kimyasal yapısı ve koruyucu gaz türüdür. Koruyucu gazdan beklenen özellik tüm gaz altı kaynak metodlarında olduğu gibi ark bölgesini atmosferden gelecek olumsuzluklardan korumasıdır. Gaz altı kaynaklarında inert ve aktif gazlar veya belirli oranlarda karışımları kullanılmaktadır.

Asal gazlar genellikle demir haricindeki metallerin kaynağındaki aktif ve asal gaz

karışımları ise çelik kaynaklarında kullanılmaktadır. Kaynatılan metal veya alaşımın türü, kaynak dikişinden beklenen mekanik özellikler, tedarik edilebilirlik ve gazın maliyeti, kaynak hızı, ark karakteristiği ve metalin damla geçiş biçimi, parça kalınlığı, gereken nüfuziyet ve kaynak dikişinin biçimi gibi faktörler kaynak uygulaması için uygun gazı seçerken göz önünde bulundurulması gereken detaylardır.

- **Asal Gazlar**

Asal gazlar kimyasal bir reaksiyona girmeyen gazlardır. Helyum ve argon koruyucu gaz kaynağı yöntemlerinde en çok tercih edilen gazlardır. Helyumun havaya göre hafif oluşu gaz tüketimini olumsuz olarak etkilemektedir. Yani gaz tüketimi helyumun hafif oluşuyla artmaktadır. Diğer yandan korucu gaz niteliğinde oluşuyla kaynak dikişlerinde derin nüfuziyet elde edilmektedir. Argon ise korucu gaz olarak kullanıldığında kaynak dikişlerinde dikişin merkezinde derin, kenarında ise az nüfuziyet görülmektedir. Argon gazının oluşturduğu ark, helyuma nazaran daha düşüktür. Argon, Al ve Cu esasl malzemelerin kaynağı için uygun olsa da çeliklerin kaynağı için diğer gazlarla karıştırılarak kullanılırsa daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

- **Karbondioksit (CO₂) Gazı**

Karbondioksit renksiz, kokusu ve özgül ağırlığı 1.997 kg/m³ olan bir gazdır. Havadan takriben 1,5 misli daha ağırdır. Basınçlı tüplerde kullanılır. Karbondioksit tüpleri 15°C'de takriben 65 atmosfer basınçta doldurulur. Bu şartlarda tüpün ihtiva ettiği gaz sıvı haldedir. Kullanma sırasında sıvı haldeki karbondioksit gaz haline geçer. Karbonun yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit, endüstriyel çapta, yanıcı gazların, akaryakıt ve kokun yanma ürünü olarak, kireç taşının kalsinasyonu, amonyak üretimi ve alkolün fermantasyonunda da yan ürün olarak elde edilir. Buharlaştırma esnasında tüp daima bir buharlaştırma ısısına ihtiyaç duyar, bu bakımdan standart bir tüpten bir anda çok fazla gaz çekebilme olanağı yoktur. Zira buharlaştırma ısısının çekilmesi sonucu sıcaklık düşer ve sıvı karbondioksit zerrecikleri karbondioksit karına dönüşür, çıkış borusunu ve dedantörü tıkar. Bu bakımdan bir tüpten sürekli olarak 12 lt/dak'dan daha büyük debiler çekilmemesi gereklidir, sürekli olmamak koşulu ile bu değer 17 lt/dak'ya kadar çıkabilir. Bu debiden daha fazla gazın gerekli olduğu hallerde, birden fazla tüpün bir manifold ile bağlanarak kullanılması gereklidir. Soğuk iklimlerde ise karbondioksit karı zerreciklerin çıkış ağzını tıkamaması için, buraya bir elektrikli ısıtıcı konması hararetle tavsiye edilen bir husustur. Tüp içinde karbondioksitin çok büyük bir kısmının sıvı halde bulunması nedeni ile hiçbir zaman bu tüpler eğik veya yatay durumda kullanılmamalıdır. Karbondioksit tüpleri daima kullanma esnasında dik durumda tutulmalıdır. Birçok aktif gazın kaynakta koruyucu gaz

olarak kullanılmaya uygun olmamalarına karşın, karbondioksit arz ettiği çok sayıda üstünlük dolayısı ile az alaşımli ve sade karbonlu çeliklerin gaz altı kaynağında çok geniş çapta bir uygulama alanı bulmuştur [21].

Karbondioksit ile düşük akım şiddetleri ve ark gerilimlerinde kısa ark ile yüksek akım değerlerinde ise uzun ark damlalı metal geçişi ile kaynak yapmak mümkün olabilmektedir. Karbondioksit atmosferi altında yapılan, diğer bir deyimle koruyucu gaz olarak karbondioksit, kullanılan kaynak yöntemine Metal Aktif Gaz kelimelerinin baş harflerinden faydalanılarak MAG adı verilmiştir. Alüminyum, magnezyum ve alaşımları gibi kolaylıkla oksitlenen malzemelerin kaynağında CO₂ gibi aktif bir gazın kullanılmamasına rağmen, bu gaz çeliklerin kaynağında yeni imkânların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Karbondioksit, argon gibi mono atomik elementer bir gaz olmadığından, arkın yüksek sıcaklığında CO ve O ayrışır. Serbest kalan oksijen kaynak banyosundaki elementlerle birleşir; ark sütunu içinde iyonize olan gaz kaynak banyosuna doğru gelir ve bir miktarı tekrar karbondioksit haline geçer. Dolayısıyla ayrışma esnasında almış olduğu ısıyı tekrar verir. Bu da dikişte nüfuziyetin artmasına neden olur. Banyo içerisinde demir oksit ayrıca mangan ve silisyum tarafından redüklenir. Mangan ve silisyum kaybı kaynak telinin bileşimi tarafından karşılanır. Bu bakımdan çeliklerin kaynağında MIG yöntemi için üretilmiş teller MAG yönteminde kullanılamaz. Kaynak esnasında oksidasyonla kıyıp olan bir miktar alaşım elementinin dikişte oluşturduğu ince cüruf tabakası MAG kaynağında kolayca kalkabilmektedir [21].

- Karışım Gazları

Her gaz ve gaz karışımının ark atmosfer yapısı üzerinde etkisi kaçınılmazdır. Helyum ve argon koruyucu gaz niteliğindedir. Kendilerine oksijen ya da karbondioksit eklenerek oksitleyici, hidrojen eklenerek redüktif edici bir atmosfer oluşturabilmektedir. Oksijenin sebep olduğu bu oksitleyici yapı alüminyum, zirkonyum, silisyum ve mangan gibi elementlerin kaynak teli üzerindeki kullanımıyla dengelenir. Böylelikle inci taneli metal geçişinde etken olmaktadır [21].

Kullanılan birçok gaz ve gaz bileşimlerine bağlı olarak ark atmosferi değişmektedir. Helyum ve argon koruyucu gaz niteliğindedir. Kendilerine oksijen ya da karbondioksit eklenerek oksitleyici, hidrojen eklenerek redüktif edici bir atmosfer oluşturabilmektedir. Oksijen veya karbondioksit gazlarının argon ile karıştırılmasıyla ekzotermik bir reaksiyonun bir sonucu olarak, kaynak banyosunun sıcaklık değeri artar ve kaynak banyosunun yüzey gerilimi azalır, böylece kaynak banyosunun akıcılığı artar ve içerideki gazlardan arındırılır. Ek olarak, koruyucu gazdaki oksijenin varlığı, düşük akım

yoğunluklarında ince taneli ve kısa devre damlacıklarının (sprey ark) oluşmasına da neden olur. Oksijen, oksijen afinitesi çok yüksek olan mangan, silikon, alüminyum, titanyum, zirkonyum gibi elementlerinin kaynak teli üzerindeki oksidasyon etkisini artırarak dengelenir. Oksijen ve karbondioksit, çeliğin MIG kaynağında argon gazıyla karıştırılarak, oksijenin kolayca çözünerek oksitlerin oluşumunu sağlar, erime esnasında damlalar yüzey gerilimini zayıflatarak ve ince yapılı bir metal geçişi sağlar [21].

4.3.4. Kaynak Elektrotları

Elektrot, kaynak dikişinin mekanik ve kimyasal karakterlerini belirleyen temel faktördür. Bu bölümde, Elektrik Ark Kaynağı uygulamalarında ve yukarıda değinilen yöntemlerdeki kaynak elektrotları ve özellikleri aktarılmaktadır:

Örtülü elektrotlar

Selülozik, Bazik ve Rutil örtülü elektrotlar şeklinde üç başlıkta toplanmaktadır:

- Selülozik örtülü elektrotlar

% 30'u selülozdan oluşan örtü yandığında CO ve CO₂ koruyucu gaz olarak ortaya çıkmaktadır. Oluşan güçlü arkten kaynaklı, bu örtünen nüfuz etme oranı diğer örtülü elektrotlara kıyasla daha yüksektir. Bu tarz elektrotlar arkın çevresinde hidrojen atmosferi meydana getirdiğinden, hidrojen kırılabilirliği olasılığı olan çeliklerin birleştirilmesinde önerilmez.

- Bazik örtülü elektrotlar

Ciddi bir bölümü CaF₂ ve CaCO₃ gibi kalsiyum bileşiklerinden oluşan örtü düşük hidrojen içeriğiyle bütün kaynak pozisyonlarına uygun olduğu belirtilmektedir. Mekanik açıdan diğerlerine göre üstünlük göstermektedir. Rutubete duyarlı olmaları uygulama öncesinde kurutulmalarını gerektirmektedir. Örtü içeriğindeki CaCO₃, kaynak aşamasında CO₂ ve CaO olarak ayrışmaktadır. Bu sürecin sonunda CO₂ zararlı gazlar havuzundan uzaklaştırılırken, CaO cürufa geçmiştir.

- Rutil örtülü elektrotlar

Yaklaşık % 35'i TiO₂ olan örtüde cüruf ve yüksek ark kararlılığı gözlenebilmekte ve her pozisyonda kaynak için uygundur. Bazik örtülüde belirtildiği gibi bu türde de kurutulmuş muhafazası önemlidir. 1330°C – 1365°C dolaylarında katılaşır, kahve-siyah arasında bir renk değişimine sahip olduğu görülmektedir. Kaynak dikişinin düzgünlüğü ve yığılan dikişin oksijen içeriğinin orta seviye oluşu birbiriyle ilişkilidir.

- Örtülü elektrot üretimi

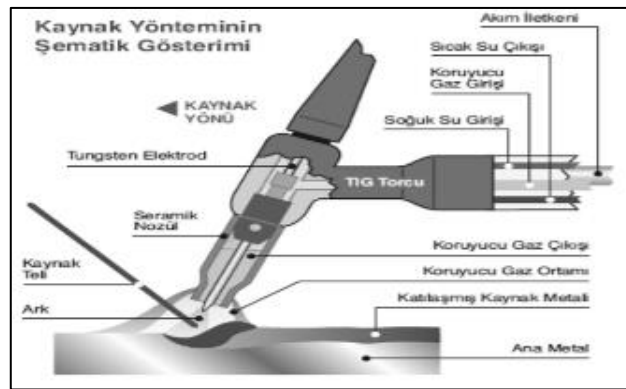
Filmaşınların tel çekme yöntemi ile plastik şekillendirme yöntemi ile elde edilmektedir. Toz camsuyu ile birlikte karışım olan k bileşenindeki kuru, bu karışım sonrası yaşa çevrilmektedir. Sıkıştırma yöntemi kullanılarak çekirdek telin üstünde uygulanıp, tel üstünde tutunması sağlanmaktadır [18].

4.4. TIG KAYNAK YÖNTEMİ

Koruyucu bir asal gaz atmosferi altında kaynak yöntemi uygulaması ilk defa II. Dünya Savaşı'nda uçaklarda kullanılan bazı magnezyum parçalarının birleştirilmesinde başlamıştır. Bugün ise en çok aranan yöntemlerden birisi haline gelmiştir. Bu yöntemde, kaynak edilen parça ile eriyen elektrot (tungsten veya alaşımları) arasında oluşturulan bir elektrik arki, kaynak için gerekli sıcaklığı sağlar. Atmosferin kaynak bölgesine olan olumsuz etkilerine mâni olabilmek için banyo ve elektrot, kaynak esnasında bir asal gaz akımı ile örtülür. TIG kaynağında başlangıçta helyum sonralarında ise argon gazı kullanılmaya başlamıştır.

TIG kaynağı paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve diğer demir dışı metaller gibi kaynak işlemi zor olan metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlave tel kaynak bölgesine aynı oksii-asetilen kaynağında olduğu gibi verilir [22].

TIG kaynağı olarak bilinen bu yöntemde; Metali eritmek için ısı enerjisi, tungsten elektrotu ile iş parçası arasında oluşan ark tarafından sağlanır; kaynak bölgesi, helyum veya argon gibi inert bir gazla korunur. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, ark yalnızca elektrik iletkeni ve ark taşıyıcısı ve bileşen olarak işlev gören tungsten elektrotu arasında yanmaktadır. Kaynak teli, yan taraftan veya kaynak bölgesine doğru konumlandırılmış bir çubuk şeklindedir.



Şekil 4.10. Tungsten inert gaz kaynağı şematik gösterimi [23].

Elektrodun standartlara göre korumak için yüksek oranda (% 99,95) inert gaz tüketimi gereklidir. Karışım gazları ayrıca bazı metaller ve çelik alaşımlarının kaynakları için kullanılmaktadır. TIG kaynak yönteminin endüstride çok kullanılmasının en önemli nedeni, ısı girişi ve kaynak metali miktarının birbirinden bağımsız olmasıdır. Bu, TIG kaynak işleminin ince parçalara uygulanmasını kolaylaştırır ve bu nedenle pozisyon kaynağı için tercih edilir. Plazma Ark Kaynağı ve TIG Kaynağı yöntemleri karşılaştırıldığında benzerlikler ortaya çıkmaktadır. Her iki yöntemde de, ark çözünmeyen tungsten elektrotu ile iş parçası arasında oluşturulur. Bununla birlikte, plazma ark kaynağında penetrasyon miktarı daha yüksek olduğundan, daha az kaynak ağızı hazırlama gereklidir. Düşük ısı girişi nedeniyle daha az eksenel çarpılma oluşmaktadır [18].

4.4.1. Avantajları

- Yüksek bir kaynak hızının sağlanması
- Verilen ısının belirli bir bölgeye tesir etmesi
- Isı distorsyonlarının azlığı
- Mekanik özelliklerin iyi korunması
- Temiz kaynak dikişlerinin elde edilmesi
- Kaynak sonrası temizliğe ihtiyaç duyulmaması
- Kolay bir şekilde mekanize edilmesi

4.4.2. Kısıtlamalar

- Tungsten elektrotun kaynak dikişine karışması
- Oksit kalıntıları
- Gözenek oluşumu
- Yetersiz erime
- Uç krater çatlaklarının oluşması [23].

5. YDDA ÇELİKLERİN KAYNAK TESTLERİ

5.1. TAHRİBATSIZ TESTLER

“Tahribatsız testler inceleme yapılacak olan malzeme ya da parçanın bütünlüğüne zarar vermeden yapılan test türleridir. Tahribatsız test yöntemleri malzemelerin içerisinde görünmeyen veya malzeme yüzeyine açık süreksizliklerin tespitinde kullanılmaktadır. Seçilecek yöntem, incelenen malzemenin cinsine ve aranan hata türüne göre belirlenmektedir. Her bir yöntemin diğerine göre üstün tarafları olup, genellikle birbirlerinin tamamlayıcısı durumundadırlar” [15].

Gelişen teknoloji ile birlikte ürünlerden beklenen kalite değeri arttığından, bu değeri karşılamak üzere yapılan kalite kontrolleri önemini arttırmıştır. Bu kontroller, tahribatlı veya tahribatsız olarak gerçekleştirilmektedir. Tahribatlı testlerin tamamlayıcısı niteliğinde olan tahribatsız testler, söz konusu malzemenin fiziksel veya kimyasal yapısını bozmadığından, tahribatlı testlere göre daha ucuzdur [24]. Tahribatsız muayene bilimi gerek kaynak öncesinde gerek kaynak sonrasında kullanılan yoğun bir işlem matematiği ile farklı test yöntemleri ve bunların uygulamalarını kapsayan geniş bir çalışma alanıdır. Kullanılan yöntem ve teknikler açısından elektromanyetizma, akustik veya termal emisyon, yüksek enerjili radyasyon, yapısal penetrasyon gibi farklı fiziksel olgulara dayanmaktadır [25]. Bu özelliğinden dolayı mekanik malzemelerden medikale, metal imalat sektöründen polimer endüstrisine pek çok alanda ve türde olduğu görülmektedir [26].

5.1.1. Gözle Muayene

Bazıları tarafından tahribatsız muayenenin atası olarak görülen Dr. Robert Mc. Master, insan bedenini en eşsiz hasarsız muayene test cihazı olarak tanımlamıştır [27]. Endüstride kullanılan ilk tahribatsız muayene yöntemi olarak kabul edilirken, resmi olarak kabul edilen son yöntemdir. Geliştirilmesi, 1980’lerin başında EPRI tarafından desteklenmiştir [26]. Görsel muayene yüzey kontrolü amaçlı en fazla kullanılan tahribatsız muayene (TM) yöntemidir. Uygulanması kolay, düşük maliyetli ve diğer birçok TM yöntemlerinden önce yaygın olarak kullanılır. Endoskoplar ya da optik cihazlar gibi yardımcı ekipmanlar ile veya bunlar kullanılmadan yapılabilir.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, otomasyonla birlikte yüksek hızlarda diğer TM yöntemleri için hazırlanan uygulama standartlarının çoğunda, görsel incelemenin yapılması ve ilk önce bulguların kaydedilmesi gerekmektedir. Bu yöntem tüm metalik veya metalik olmayan malzemelere uygulanabilmektedir. Denetim yüzeylerinin erişilebilirliğine bağlı olarak, gerekirse endoskoplar gibi yardımcı cihazlar da uygulanabilir. Çoğu durumda, yüzey temizliğinin muayene yüzey hazırlığı olarak yapılması arzu edilmemektedir. Aksine, yüzey beklenen kusurların en iyi görüneceği şekilde olmalıdır. Muayene, yeterli aydınlatma koşullarında ve uygun görüş açılarında yapılmalıdır.

Gözle muayene sonucunda;

- Yanma olukları
- Uygun olmayan dikiş boyutları
- İç köşe dikişlerinin asimetrisi
- Yüzey çatlakları
- Yüzeye çıkmış gözenekler
- Kraterler
- Yeniden başlama noktaları
- Kök pasoda nüfuziyet azlığı veya fazlalığı,

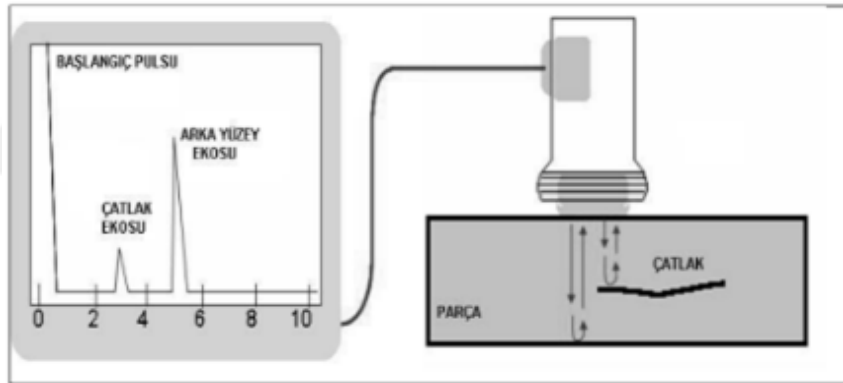
gibi hatalar rahat bir biçimde tespit edilebilir. Ancak yöntemin etkinlik derecesi kişiden kişiye değişebilir [28].

5.1.2. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik dalgaların malzeme içi hataların bulunmasında kullanılması ilk defa II. Dünya Savaşı'ndan önce su yolu ile ses dalgalarının deniz altına gönderilmesi, batan nesnelerin tespit ve karakterize edilmesinde kullanılmıştır. 1929 ve 1935 yıllarında Sokolov metal nesneleri incelemek adına ultrasonik dalgaların kullanılabilirliğini incelemiştir. Ardından 1931 yılında Mulhauser katılardaki kusurların tespitinde çift güç çevirici kullanmış ve bu konuyla ilgili patent almıştır. 1940 yılında Firestone ve 1945 yılında Simons isimli iki bilim adamı darbeli eko tekniğinden faydalanan ultrasonik test cihazı geliştirmişlerdir [29]. Ultrasonik dalgaların malzeme içi hataların bulunmasında kullanılması ilk defa 1931 yılında bir Alman patenti ile başlar. İlk ticari cihazlar 1940'lı yıllarda endüstriye yayılmaya başlamıştır. Elektroniğin gelişiminin bu tekniğin pratik bir muayene metodu olarak gelişmesinde büyük katkısı olmuştur. Özellikle boyutsal anlamda daha geniş iş parçalarında düzlem kaynaklı kusurların daha hassas biçimde tespitini sağlamaktadır. Bu

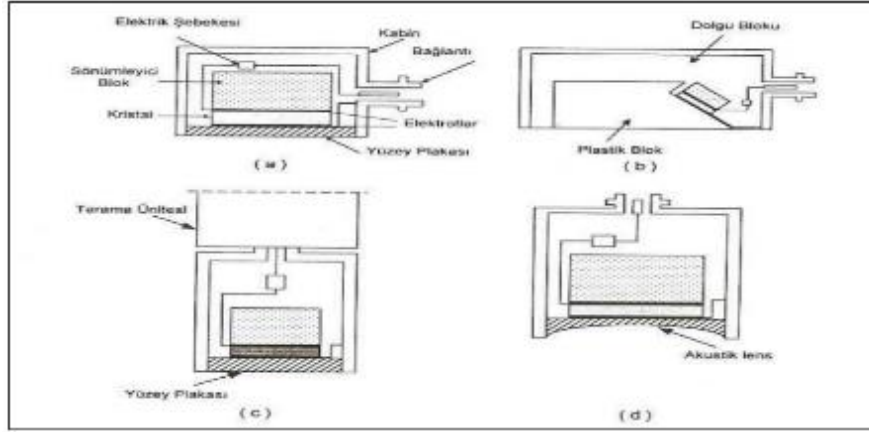
yöntemle, parça içerisindeki çatlaklar, boşluklar ve birtakım benzeri süreksizlikler tespit edilebilmektedir [30].

Artık TM'nin temel yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Hacimsel yöntemlerden biri olan ultrasonik kontrolün test prensibi, test materyali ortamında prob tarafından üretilen yüksek frekanslı ses dalgalarının yayılmasına ve bir süreksizlikten sonra ses dalgasının proba geri dönmesine dayanır. Ultrasonik dalgalar ($f = 0.14\text{--}10\text{ MHz}$), probta ters bir piezoelektrik etkisi olan kısa darbelerle üretilir ve malzeme içine girişi sağlanır. Ses dalgaları malzeme içinde ilerlerken bir arka duvara ulaştıklarında yansıma yaparlar. Eko o anda pasif durumdaki proba geldiğinde, yeniden elektriksel bir sinyale dönüşür ve ultrasonik muayene cihazına iletilir. Sinyalin yoğunluğuna göre uçuş zaman ekseninde bir gösterge oluşturur. Şekil 5.1'de ekranın sağ tarafında arka duvar yankısı belirtilmektedir. Sol sinyal mesafe et kalınlığı ile oluşan yankının başlangıç darbesi birbirlerine karşılık gelmektedir. Arka duvar yankısından önce solda bir yankı oluşması halinde malzemede süreksizlik olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.1. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi [28].

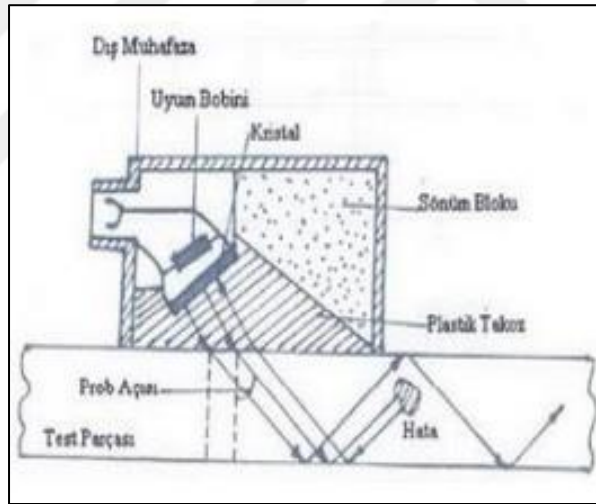
Şekil 5.2'de verildiği gibi problemler çeşitli şekillerde olabilirler; normal doğrultuda ses dalgaları demeti gönderen problemler, boyuna dalgalar üretir ve bunlarla çalışırlar. Açık problemlerde ise kristal, normalde bir açı ile yerleştirilmiştir ve bir geliş açısı ile ses dalgası demeti gönderirler. Böylece, test parçasının içine belirli bir açı ile ilerleyen enine veya yüzeyi izleyen yüzey dalgaları gönderilebilir.



Şekil 5.2. Ultrasonik test problemleri a) Normal (düz prob) b) Açılı prob c) Daldırma probu d) Odaklama probu [28].

5.1.2.1. Kaynak Dikişi Muayenesi

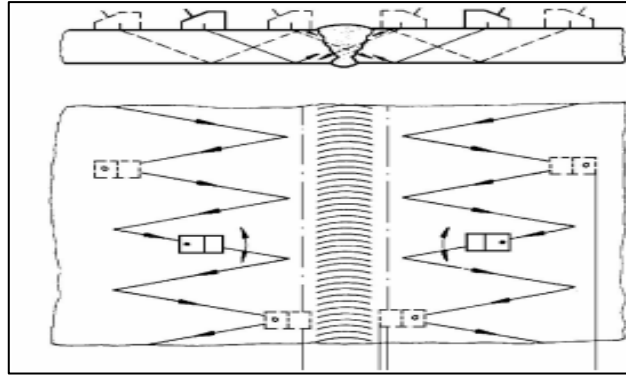
Normal bir prob ile sadece düzgün kaynak dikiş yüzeyleri muayene edilebilmektedir. Bu yüzden genelde açılı problemler aracılığıyla kaynak dikişleri muayene edilebilmektedir.



Şekil 5.3. Açılı Probu'nun temel yapısı [32].

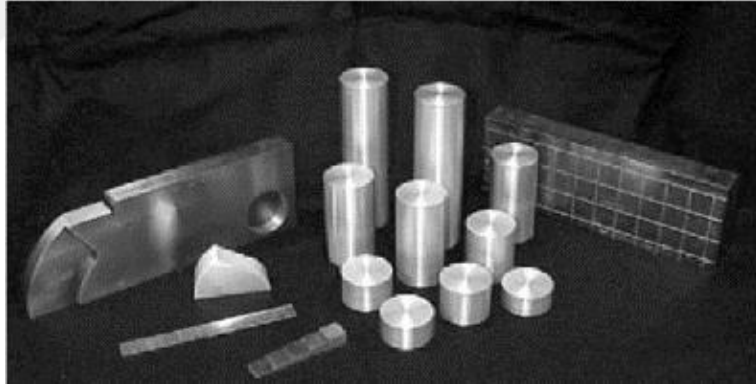
Eğik bir şekilde kristal dönüştürücü takozla yapıştırılan açılı probun şematik yapısından eğik bir şekilde kaynağın yanından malzeme içine nüfuz eden ses demeti dolaylı ya da direkt olarak tüm süreksizliklere ulaşabilir. Ses hızlarının çeliklerde max. giriş açısı 70° dir.

Konumunda sorun olan yansıtıcıların tespiti için farklı geliş açıları (ör. 45° ve 70°) kullanılarak ek taramalar yapılabilirken, geliş açısı 90° olan bir prob kullanılarak yan duvardaki kaynak problemleri tespit edilebilir.



Şekil 5.3. İncelenen parça üzerindeki prob konumuna göre yansıma şekilleri [32].

Ultrasonik muayeneye hatayla ilgili direk bir görüntü alınamadığından tanımlı hataları içeren blokların kullanımı tavsiye edilir. Yandan açılmış delikler (YAD) ve disk şeklinde yansıtıcılar referans (DSY) olarak kullanılarak muayenedeki parçadan alınan hata yankıları üzerinde karşılaştırma yapılabilir. Yansıtıcının doğru bir şekilde konumlandırılmasında ultrasonik muayene kullanılabilir. Açısı bilinen prob aracılığıyla yansıtıcı derinliği ve proba yatay yöndeki mesafesi hesaplanabilirken, günümüz sayısal ultrasonik muayene cihazları bu hesaplamaları kendileri yapmaktadır [28].



Şekil 5.4. Ultrasonik muayenede kullanılan çeşitli kalibrasyon blokları [32].

5.1.2.2. Tespit Edilebilen Süreksizlikler

Şekil ve konum hata tespitinde önemli detaylardır. Düşük enerjili bir yansıma ses dalgasının aşırı dağılmasına sebep olan süreksizlikler arasından proba ulaşabilen tek süreksizdir. Buna bağlı olarak oluşan görüntünün boyutu gerçeğine göre oldukça küçük boyutta kalabilir. Benzer detaylara aşırı pürüzlü yüzeye sahip küresel kalıntılar üzerinde de ulaşılabilir. Şartların uygun olması durumunda ise yetersiz nüfuz etme, çatlak ve çentikler, ergime hataları, teras çatlakları, esas metaldeki katmer ve gözenek grupları gibi hatalar tespit edilebilir [28].

5.1.2.3. Yöntemin Avantajları ve Kısıtlamaları

Yüzey altı süreksizliklerinin tespitinde kullanılabilir olması ultrasonik yöntemin en önemli özelliğidir. Hacimsel hataların tespitinde kullanılan diğer yöntem olan X-Ray metoduna göre avantajı ise hiçbir çevresel risk oluşturmaması, canlı sağlığına zarar vermemesidir. Ayrıca tüm malzemelere uygulanabilir olması bir diğer büyük avantajıdır. Doğrudan temas gerektirmeyen yöntemler olmasına rağmen birçok durumda prob ile malzeme arasında hava bulunmaması için kuplaj malzemesi kullanmak şarttır. Bu ortamlar su veya viskozitesi yüksek jel kullanılır. Ses dalgalarına paralel hataların tespit edilmesi olanaksızdır [28].

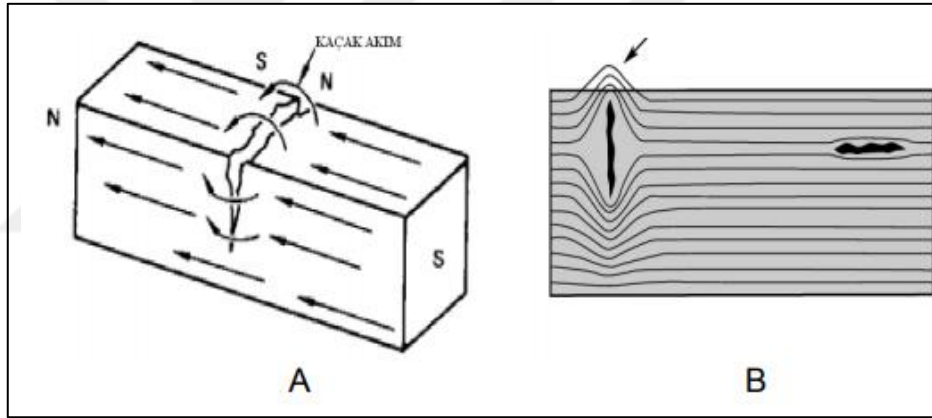
Çizelge 5.1. Yöntemin avantaj ve kısıtlamaları [28].

AVANTAJLAR	KISITLAMALAR
Yüksek çalışma derinliği	Operatör eğitiminin kapsamlı olması
Küçük hata tespitinde yüksek hassasiyet	Uygulama esnasında temas sıvısı gerekliliği
Hızlı uygulama	Ses dalgasına paralel hataların saptanamaması
Karmaşık parçaların kontrol edilebilirliği	Geometri kısıtlaması
Malzeme özelliklerinin tespit edilebilirliği	Pahalı bir metot olması
Tüm malzemelere uygulanabilirlik	
Taşınabilir olması	
Tamamen emniyetli bir sistem olması	

5.1.3. Manyetik Partikül Muayenesi

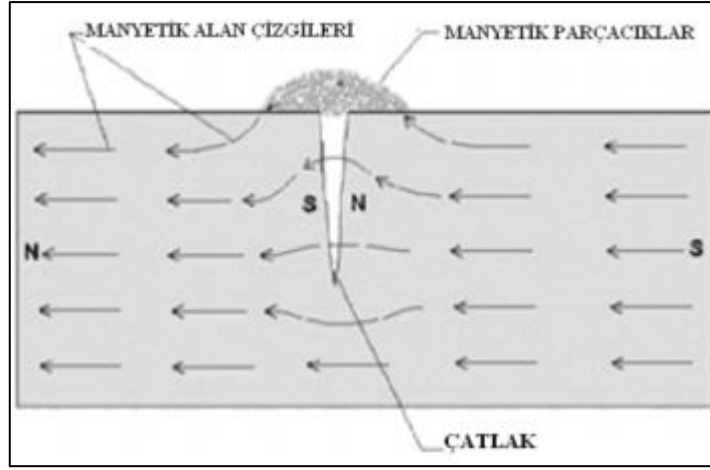
Bu yöntemin tarih içindeki gelişimi incelendiğinde, 1868 yılına kadar gidildiği görülmektedir. Savaşlarda bombardıman silahları olarak kullanılan topların namlu kısımlarının mıknatıslanması ve namlu boyunca manyetik bir pusula kaydı yapılması ile kusurların tespiti sağlanmıştır [26]. 1920'lerin başında William Hoke, manyetik parçacıklarının manyetizma ile kusurları bulma aracı olarak kullanabileceğini fark etmiş

ve manyetize bir malzemedeki yüzey ve yüzey altı kusurunun manyetik alanın parçalanmasına ve parçanın ötesine uzanmasına sebep olduğunu görmüştür. Muayene edilecek parçalara çok ince bir şekilde uygulanan ferromanyetik tozun kusurların üzerinde birikmesiyle o kusurları daha da görünür hale getirmiştir [31]. 1930'ların başında da buhar endüstrisi tarafından tercih edilen bu yöntem, petrol ve beyazlatma yönteminin yerini almıştır [26]. Manyetik parçacık metodu ferromanyetik malzemelerde yüzey ve yüzeye yakın bölgelerdeki süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Manyetik parçacık testi prensip olarak, malzeme sürekliliğindeki bir değişimle sapan manyetik alan çizgilerinin esasına dayanır. Uygunsuzluk bir manyetik alan sızıntısı oluşturur. Manyetik parçacık muayenesi iki manyetizasyon metodundan oluşmaktadır. Birincisi çift prob kullanan direkt manyetizasyon metodu, diğeri ise yoke ve bobin kullanan endirekt manyetizasyon metodudur. Direkt manyetizasyon metodunda normalde doğru akım (DA) veya alternatif akım (AA) kullanılmaktadır.



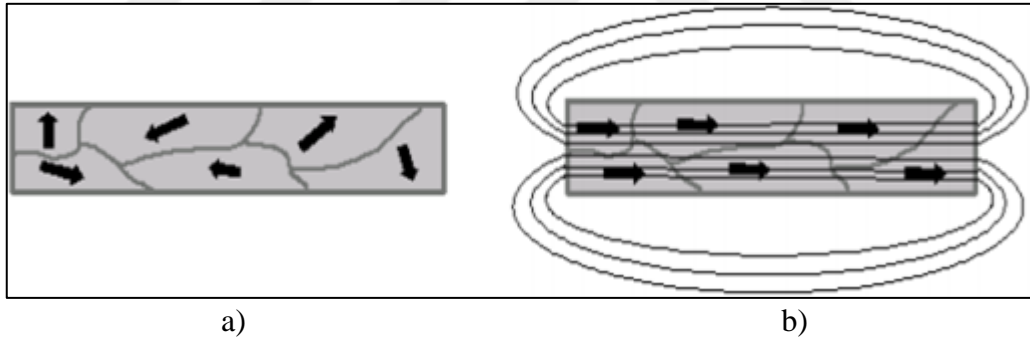
Şekil 5.5. Manyetik alan çizgileri A) yüzeysel B) yüzey altı [32].

Muayenesi yapılacak parça ya da kaynağın özelliği, kullanılacak manyetizasyon tekniği, manyetik akım yoğunluğu ve yönü, akım türü, yüzeye yakın olan süreksizliklerin saptanmasındaki önemli faktörlerdir. Şekil 5.6'da manyetik alanda mevcut olan bir hatanın boşluk alan çizgilerini engelleyerek saptıracaktır. Böylelikle, yoğun bir kaçak akım oluşarak hata büyüklüğü ve oluşan kaçak akımın büyüklüğü arasında doğru orantı oluşacaktır. Manyetik alanının hatalı bir malzeme yüzeyine uygulanma durumunda yüzeye serpilmiş ferromanyetik tozların etkisiyle kaçak akımların geçişinde bağlantı oluşumu sağlanır. Sonuç olarak var olan süreksizlerin yer tespiti sağlanır. Şekil 5.7'de şematik görümlü manyetik parçacık yöntemi görülmektedir.



Şekil 5.6. Manyetik parçacık yönteminin şematik görünümü [32].

Manyetik parçacık yöntemi ferromanyetik malzemelere uygulanabilmektedir. Ek olarak, süreksizlik, uygulanan manyetik alan yönüne paralel konumlandığında tespit edilemez. Mıknatıslanma akımları parça büyüklüğü arttığında artmaktadır. Uygun bir muayene için parça yüzeyinin pürüzsüz olması gereklidir. İnceleme yüzeyinde herhangi bir boya veya kaplama olması durumunda muayene doğru sonuç vermeyecektir.



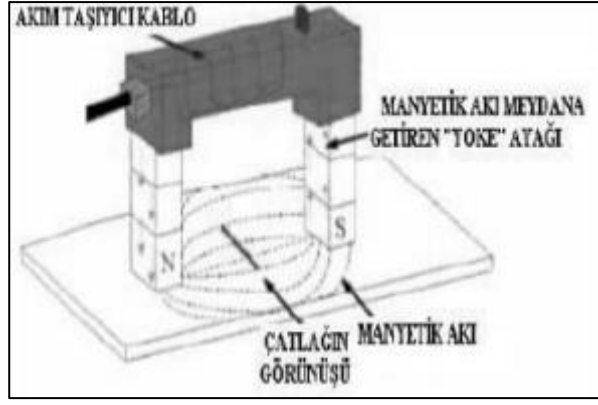
Şekil 5.7. Metalik malzemelerin manyetik davranışı a) manyetik olmayan malzeme b) manyetik malzeme [32].

5.1.3.1. Mıknatıslanma

Muayene yapılacak yüzeyin mıknatıslanabilmesi için üç ana faktör mevcuttur.

- Boyunduruk ile Mıknatıslanma

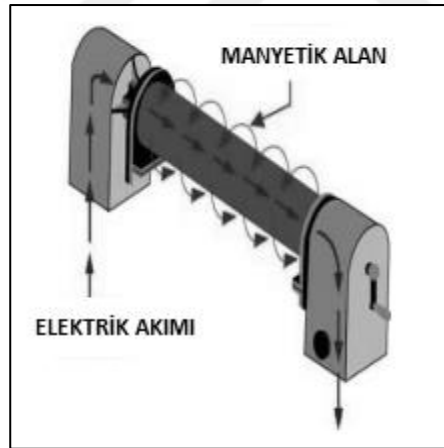
Bu mıknatıslanma tekniği kaynaklı birleştirmelerin muayenesinde en kullanışlı olanıdır. Manyetik akının dış yüzeyden akışının gerçekleşebilmesi için manyetik alan devresinin tamamlanacağı şekilde elektromıknatıs kutupları yerleştirilir. Alan çizgilerine dik doğrultuları olan süreksizlikler böylelikle en iyi şekilde görüntülenebilir.



Şekil 5.8. Elektro bobin ile manyetikleştirme [32].

- İçinden Akım Geçen Kablo ile Mıknatıslanma

İzole bir iletken iletken kablo aracılığıyla etrafı sarılarak ya da sarma değmesi gerekmeksizin sabit bir sarıma yerleştirilen muayene parçasında iletken üzerinden geçen akımın etkisiyle iletken çevresinde dairesel bir manyetik alan oluşur. (Şekil 5.10). Elektromıknatıs içinde ki demir çekirdek ve buradaki muayene parçası benzer oluşuyla doğrultuları akıma paralel yönde olan hatalar görülür.



Şekil 5.9. İçinden akım geçen kablo ile manyetikleştirme [32].

- Parça İçinden Akım Geçirerek Mıknatıslanma

Muayene parçasından elektrik akımı geçerek kutupları birleştiren çizgiye dik pozisyonda bir manyetik alan oluşur. Bu sayede akım yönüne paralel doğrultulardaki hatalar görüntülenir. Bu tekniğin uygulanış aşamasında ark yanıklarının oluşma riski vardır ve dikkat edilmelidir. Hataların belirlenmesinde uygulanan manyetik akı yönünün rolü önemlidir. Herhangi bir yön beklentisi oluşmaması durumunda, mıknatıslanma işleminin

kaynak eksenini ile 45° olacak şekilde yapılması tavsiye edilmektedir [32].



Şekil 5.10. Parça içinden akım geçirerek manyetikleştirme [32].

5.1.3.2. Yöntemin Avantajları ve Kısıtlamaları

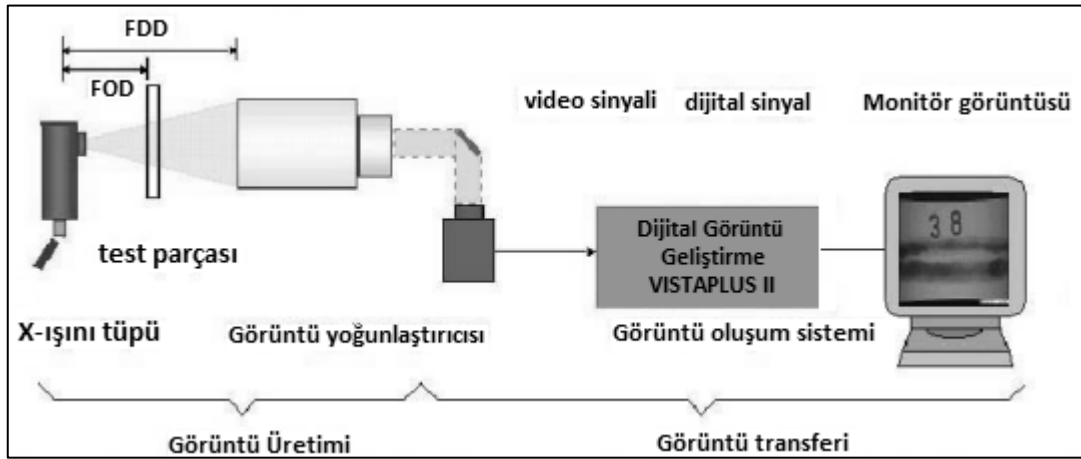
Söz konusu yöntem öncelikle süreksizlerin tespitinde oldukça duyarlı ve güvenilir bir tekniktir. Yüzeyde olabilecek boya-kaplama gibi unsurlara rağmen çalışabilmektedir. Bu teknik sayesinde çatlakların derinliği üzerine bilgi tecrübeli bir operatör tarafından sağlanır. Sıvı penetrant testine göre en büyük farklarından biri manyetik parçacık kontrolünde yüzeye çok yakın yüzey altı süreksizlikleri de tespit edilebilir [28].

Çizelge 5.2. Yöntemin avantaj ve kısıtlamaları [28].

AVANTAJLAR	KISITLAMALAR
Kesin ve güvenilir.	Ferromanyetik malzemelere uygulanabilir.
Uygulaması kolay	Yalnızca yüzeydeki ve yüzeye çok yakın süreksizlikler bulunabilir.
İndikasyonlar direk malzeme üzerindedir.	Demanyetizasyon gereklidir.
Operatör için daha az eğitim yeterlidir.	Büyük parçalar için yüksek akım gereklidir.
Parça boyut ve şekline neredeyse hiçbir kısıtlama yoktur.	Elektrik kontağında parçaya zarar verme riski vardır.
Boya gibi manyetik olmayan kaplamalar yeteri kadar ince ise doğrudan uygulanabilir	Bazı parçaları birden fazla kontrol etmek gereklidir.
Düşük maliyetlidir.	İşlem sonucunun kesinliği doğrudan operatörün tecrübe ve bilgisine bağlıdır.

5.1.4. Radyoskopi Muayenesi

Dijital radyografi, bir malzemenin radyografik görüntüsünün direkt bilgisayara aktarılıp değerlendirilen veya görüntü işleme tekniklerinin görüntüleme plakalarından bilgisayara aktarılarak uygulandığı bir radyografik inceleme yöntemidir. Dijital radyografide anında görüntüleme işlemine radyoskopi denilmektedir. Bu yöntem artık dökümlerin, karma geometri parçalarının ve hafif metal alaşımlarından yapılan kaynaklı boruların otomatik muayenesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.11. Dijital radyoskopi sistemi [33].

Bir radyoskopi sistemi genelde görüntü oluşturucu ve görüntü aktarıcı olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Görüntü oluşturucu bir radyasyon kaynağı, muayene malzemesi ve görüntü kuvvetlendiriciden oluşur. Görüntü aktarıcısı ise optik kamera, dijital dönüştürücü ve monitör veya bilgisayardan meydana gelir. En basit radyoskopi sistemi floroskopi düzeneğidir. Bu düzenekte x ışını tüpü, floresan ekran ve CCD kamera kombinasyonundan oluşan bir kutu buna bağlı bilgisayar vardır. Muayene malzemesinden geçen x ışını floresan ekran üzerinde oluşturduğu görüntü CCD kamera aracılığı ile bilgisayara aktarılır ve burada istenilen değerlendirme işlemi uygulanarak gerekirse görüntü elektronik ortamda arşivlenir.

Bu yöntem son yıllarda geliştirilen ve gelecekte yaygın olarak kullanılacak tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Prensip olarak normal film radyografisine benzemekle birlikte, bu yöntemde görüntü radyografik film yerine direkt olarak monitöre aktarılmakta ve değerlendirme monitör üzerinden yapılmaktadır. Ayrıca radyoskopi muayene yönteminin normal film radyografisine göre pek çok üstünlükleri vardır. Bunlar;

1. Film ve banyo masrafı yoktur.
2. Çekim esnasında görüntü alındığından hızlı bir yöntemdir.
3. Büyütme yapılarak ince detaylar ve küçük hatalar kolayca tespit edilir.
4. Karmaşık geometriye sahip parçalarda ince ve kalın bölgeler aynı anda incelenir.
5. Çekim esnasında parça hareket ettirebildiğinden, yüzey hataları ve iç hatalar aynı hassasiyette tespit edilebilir.

Bu yöntem, ilk aşamada yatırım maliyetinin yüksek olması bir kısıtlama oluştursa da uzun vadede oldukça ekonomik ve etkili bir tahribatsız muayene yöntemidir [33].

5.2. TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahribatlı muayeneler; malzemelerin çekme, kırma, eğme vb. kalıcı şekil değişikliklerine karşı göstereceği dayanımı belirlemek için uygulanan muayene yöntemleridir. Tahribatlı muayeneler, uygulaması kolay ve sonuçlara hızlı ulaşmayı sağlayan ancak deney sonunda malzemenin bir daha üretimde kullanılamayacak şekilde bozan deneylerdir [15].

5.2.1. Çekme Deneyi

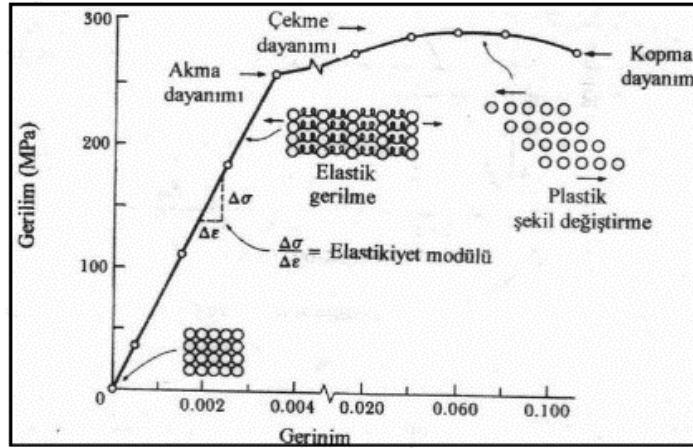
Malzemelerin mukavemeti hakkında temel tasarım bilgisini belirlemek ve malzemeleri özelliklerine göre sınıflandırmak için çekme deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır. Standartlara göre hazırlanan deney numunesinin belirli bir hız ve sabit sıcaklıkta kırılana kadar bir ekseninde çekilmesine çekme deneyi denilmektedir.

Deney esnasında, standart numuneye sürekli artan bir çekme kuvveti uygulandığında, numunenin uzaması aynı anda kaydedilir. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin mekanik özelliklerinin sağlıklı bir şekilde elde etmek için; Numune materyali tamamen temsil etmeli, üretim şekli (döküm, kaynak, sıcak dövme veya soğuk dövme haddeleme) bilinmeli ve numunenin alınma şekli uygun olmalıdır. Çekme deneyinde numuneye yük uygulandığında, numunenin uzaması ikiye ayrılır;

- Elastik uzama: Yük numuneye uygulanmaya başladığında, akma sınırına ulaşana kadar bir miktar uzama meydana gelir. Yük numune üzerinden kaldırıldığında, bu uzama kaybolur ve orijinal durumuna geri döner.

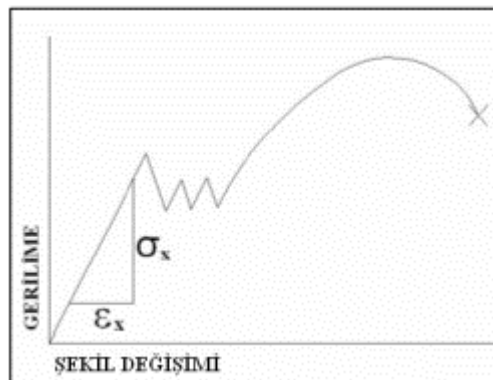
- Plastik uzama: Yükün akma sınırından sonra uygulanmaya devam etmesi durumunda numunenin kalıcı deformasyonu gerçekleşir. Bu, yük kaldırıldığında numunenin daha önceki durumuna geri dönemeyeceği anlamına gelmektedir.

Çekme deneyi sonucunda, gerilme–birim şekil değiştirme diyagramından malzemeye ait, elastisite modülü, elastiklik sınırı, akma dayanımı, çekme dayanımı, kesit daralması ve yüzde uzama, rezilyans, tokluk gibi özellikler bulunur.



Şekil 5.12. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri [34].

Elastisite modülü (E), çekme diyagramının elastik kısmını oluşturan eğrinin eğimine eşittir. Belirgin akma göstermeyen ahşap, kauçuk, deri gibi bazı malzemelerin çekme diyagramı böyle bir eğri bulunmadığından sabit bir E değeri yerine, belirli bir noktadaki teğetin eğimi alınır. Bu durumda $E = \sigma/\epsilon$ olan orandır. Şekil 5.13’de E değerinin tespiti gösterilmiştir. Elastiklik sınırı (σ_e), malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında plastik uzamanın görülmediği veya yalnız elastik değişimin meydana geldiği en yüksek gerilme değerine eşittir. Akma dayanımı (σ_a), uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşın, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzensüzlük gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir. Belirgin akma göstermeyen numunelerin akma sınırı % 0,2’lik plastik uzamaya denk gelir. Şekil 5.14’de akma noktalarının tespitini göstermektedir.

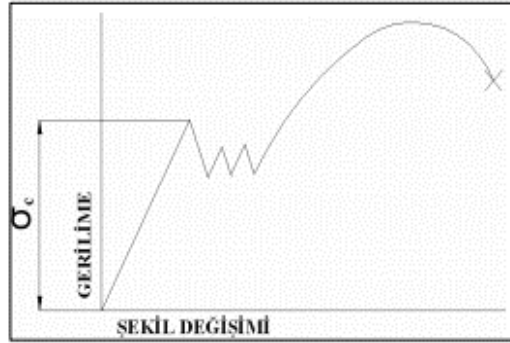


Şekil 5.13. Elastisite modülü tespiti [34].

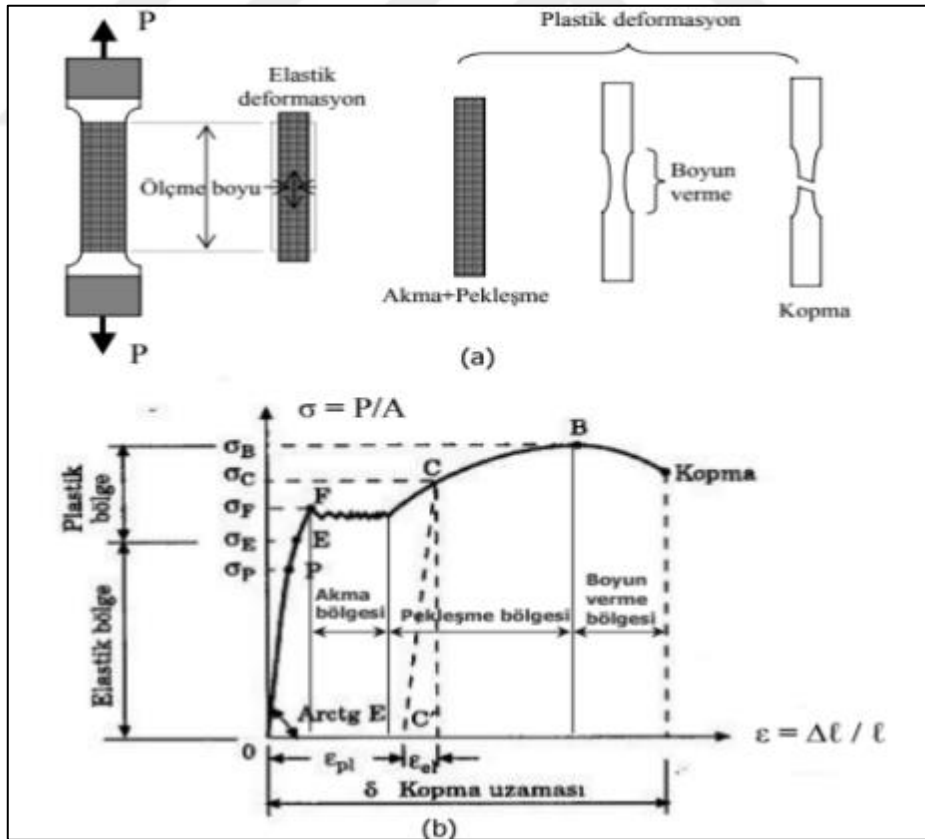
Şekil 5.15'de ve Şekil 5.16'da gösterilen çekme dayanımı (σ_c), bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilme değeri olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup,

$$\sigma_c = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad (5.1)$$

formülü ile bulunur. Burada F_{maks} malzemeye uygulanan en yüksek kuvveti, A_0 ise malzemenin ilk kesit alanını gösterir.



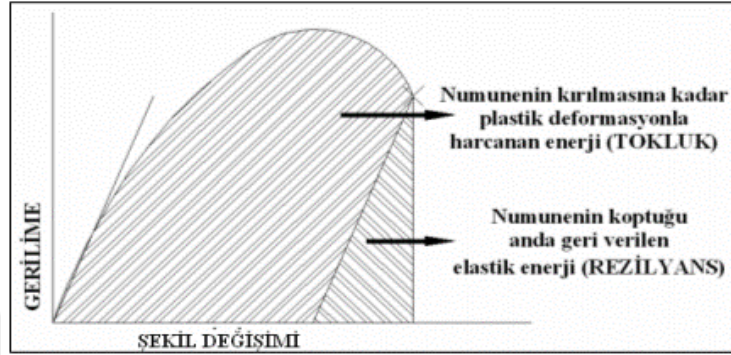
Şekil 5.14. Çekme diyagramında akma dayanımının gösterimi [34].



Şekil 5.15. Çekme diyagramında çekme noktasının gösterimi [54].

Kesit daralması ve yüzde uzama, numunenin kesit alanında meydana gelen en büyük yüzde daralma veya büzülme miktarıdır, yüzde uzama ise çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı olarak tanımlanır.

Şekil 5.17’de gösterilen tokluk, numunenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjiye denir. Genellikle gerilme-birim uzama eğrisinin altında kalan alanın hesaplanır.

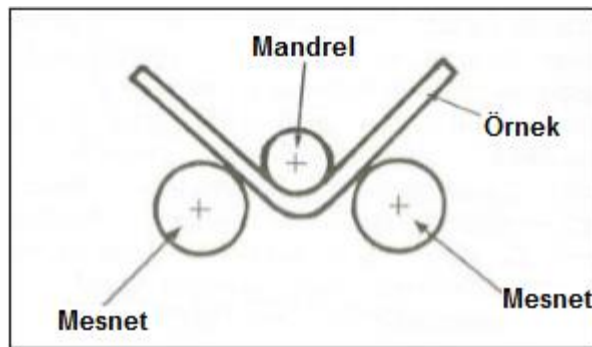


Şekil 5.16. Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjisinin(rezilyans ve tokluk) belirlenmesi [34].

Rezilyans, Numunenin yalnızca elastik şekil değişimi için harcanan enerji veya elastik şekil değişimi sırasında numunenin depolandığı enerji anlamına gelir. Bu enerji, gerilme-birim uzama eğrisinin elastik kısmının altında kalan alanına eşittir ve malzeme kırıldığında bu enerji geri verilir [34].

5.2.2. Eğme Deneyi

Malzemelerin eğme zorlanmalarına karşı gösterdiği davranış olarak tanımlanır. Şekil 5.18’de gösterildiği gibi iki mesnet üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen veya yuvarlak kesitli deney numunesinin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan şekil değişimine eğilme denir.



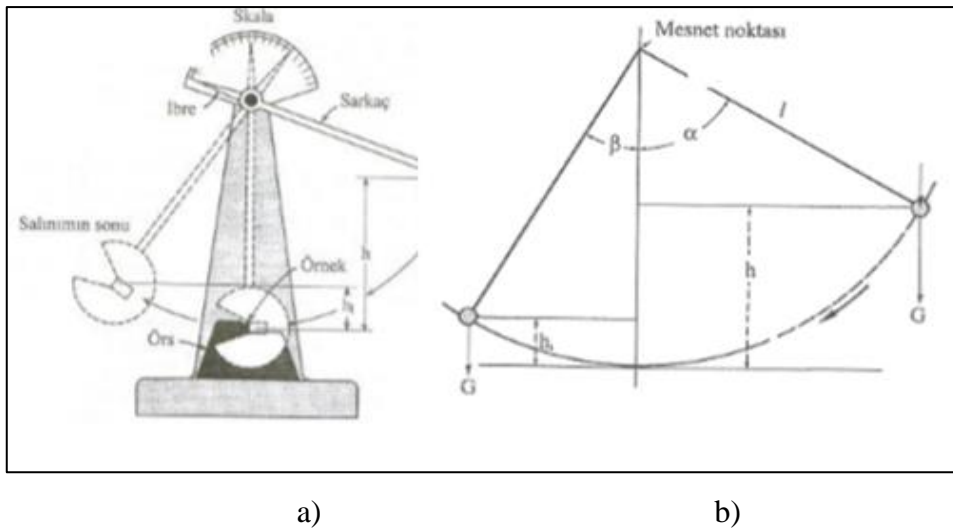
Şekil 5.17. Eğme deneyinin genel prensibi [35].

5.2.3. Çentik Darbe Deneyi

Çentik darbe deneyi de denilen bu yöntemde belli ölçülere sahip, tam orta kısımlarına çentik açılmış deney parçalarının bir sarkaç ucundaki çekiç aracılığıyla kırılmasıdır. Kırma deneyleri, malzemelerin darbe dayanımlarını veya kırılma enerjilerini ölçmek için yapılır. Uygulamada iki çeşit darbe deneyi vardır. Bunlar Charpy ve Izod deneyleridir. Charpy deneyinde, Şekil 5.21’de görüldüğü gibi iki mesnet koluna yatay olarak yaslanmış basit bir kiriş durumundaki çentik tabanına, bir sarkaç ucundaki çekiçle darbe yapıp numunenin kırılmasıyla harcanan enerji ölçülür. Şekil 5.21’de görüldüğü gibi Izod darbe deneyinde dikey olarak kavrama çenesine bağlanan numuneye belli bir yükseklikteki sarkacın ucundaki çekiç ile darbe uygulanıp kırılması ile harcanan enerji ölçülür. Çentik ve izod deney numunelerinin ebatları Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

5.2.3.1. Kırma enerjisi hesabı

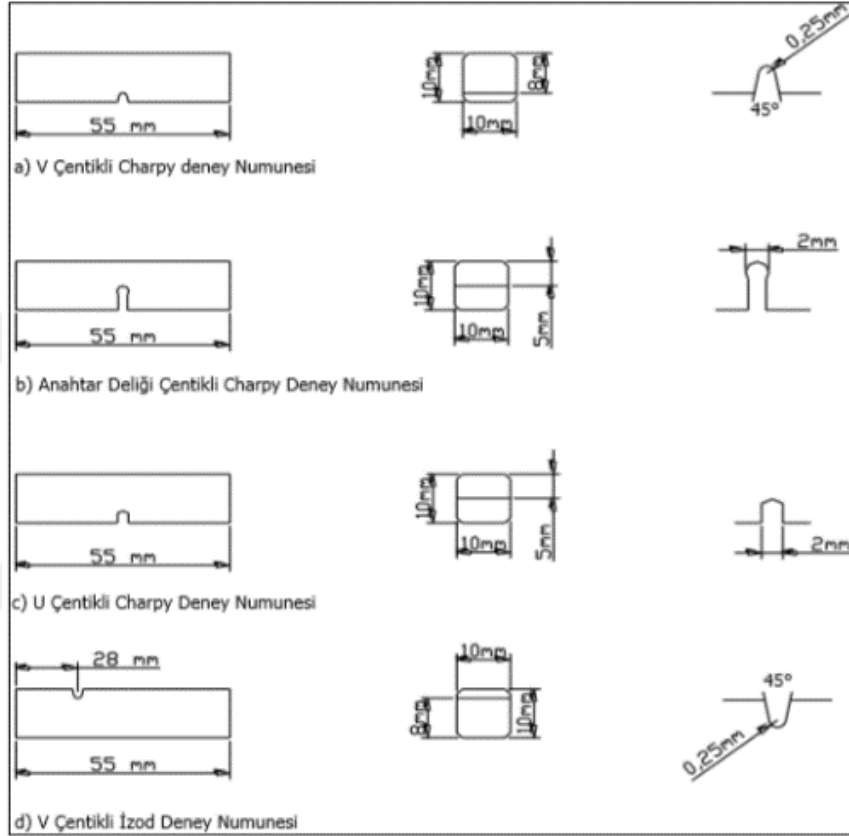
Darbe deneylerinde çoğunlukla kullanılan darbe test cihazı şekil 5.19’de görülmektedir. Charpy test cihazının çalışma prensibi G ağırlığında bir sarkaç, h yüksekliğine çıkarılırsa potansiyel enerjisi $G \times h$ olur. Daha sonra bu sarkaç serbest olarak bu yükseklikten bırakılıp düşey bir düzlem içerisinde numuneye çarparak kırar ve diğer yönde h_1 yüksekliği kadar yukarı çıkar ve potansiyel enerjisi $G \times h_1$ olur. Sarkacın ilk potansiyel enerjisi ile son durumdaki potansiyel enerjisi arasındaki fark numunenin kırılması için gereken enerjiyi verir.



Şekil 5.18. Darbe deneyinin şematik gösterimi a) darbe deneyinin şematik gösterimi b) çalışma sistemi [35].

Darbe deneyinde standart çentik içeren bir örneğin darbe etkisiyle kırılması için gerekli enerji joule cinsinden ölçülür. Kırılma enerjisi aşağıdaki bağıntı ile bulunur. Kırılma Enerjisi = $G.h - G.h_2 = G (h_1-h_2) = G \cdot l \cdot (\cos \beta - \cos \alpha)$ burada h düşme yüksekliği, h₂ çıkma yüksekliği, G sarkaç ağırlığı, l sarkaç boyu, α düşme açısı, β yükselme açısıdır. Darbe direncinin birimi joule 'dür [35].

5.2.3.2. Darbe Test Numuneleri



Şekil 5.19. Çentik ve izod deneylerinde kullanılan çentikli örnekler [35].



Şekil 5.20. Çentik ve izod numunelerinin test bölgesine yerleştirilmesi [35].

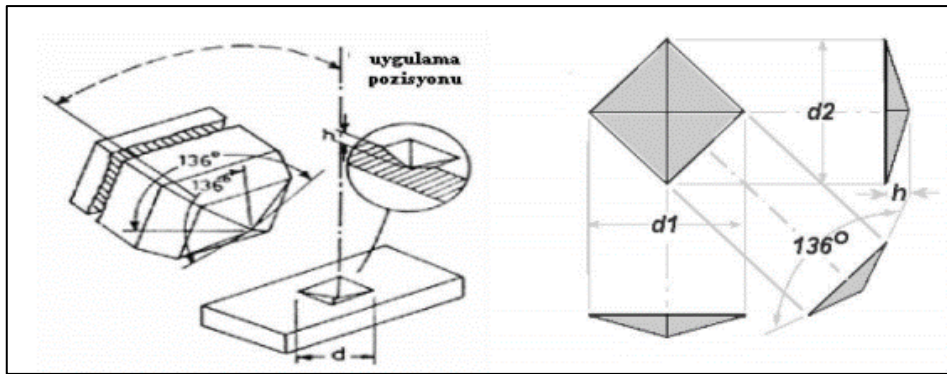
5.2.4. Sertlik Deneyi

Bir malzemenin çizilme, kesme, aşınma ve delinmeye karşı direnci sertlik olarak adlandırılır. Bilimsel olarak, malzemenin dislokasyonuna veya plastik deformasyona direnci, sertlik olarak ifade edilir. Soğukta sertleşme ve ısıtma işlemi sonucu tüm metallerde ve özellikle çelikte sertlik geniş sınırlar içinde değişir. Malzemenin içyapısı hakkında bilgi edinebilmek için sertlik değerlerinden faydalanılır. Bu nedenden dolayı malzemelere sertlik deneyleri çok fazla uygulanmaktadır. Sertlik deneyinde, bir malzemenin yüzeyine batırılan bir uca veya kesici takıma karşı gösterilen mukavemet ölçülmektedir. Sertlik ölçüm yöntemleri aşağıda belirtildiği gibi üç gruba ayrılmaktadır.

- Brinell sertlik ölçme yöntemi
- Rockwell Sertlik Ölçüm yöntemi
- Vickers sertlik ölçme yöntemi

Bu çalışmada, sertlik deneyleri makro deney numunesi üzerinden vickers sertlik ölçüm metoduna göre yapılmıştır [34].

Sertlik ölçme yöntemlerinden duyarlılığı en iyi olan yöntem vickers'dir. Diğer yöntemlere göre harcanan zaman daha fazla ve mikro sertlikleri ölçmede daha verimlidir. Yöntemde kare zeminli, elmaştan yapılmış, piramit şeklinde batıcı uç kullanılmaktadır. Piramit ucun tepe açısı 136 derecedir. Belirli bir F yükü ile malzeme yüzeyine bastırılan batıcı uç şekilde de görüldüğü gibi bir eşkenar dörtgen oluşturur.



Şekil 5.21. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi [36].

Malzemede meydana gelen iz üzerinde d köşegeninin uzunluğu, d_1 ve d_2 köşegen uzunluklarının ortalaması olarak ölçülür. Uygulanan kuvvet ve hesaplanan köşegen uzunluğu aşağıdaki denklemde yerine konarak vickers sertlik değeri hesaplanır.

$$Hv = \frac{1.8544F}{d^2} \quad (5.2)$$

Vickers sertlik testinin oldukça doğru sonuçların alınabilmesi, en geniş ölçme aralığına sahip olması ve tüm metal yüzeyler için tek bir uç kullanılması gibi avantajları vardır. Ayrıca değişen kuvvetler altında sert ve yumuşak metallere ait sertlik ölçümleri için de kullanılabilir. Vickers sertlik testinin dezavantajı ise izin büyüklüğünün optik olarak ölçülmeye ihtiyaç duymasındır. Ölçüm için kullanılacak cihaz mikroskop ve sertlik kontrol cihazının birleşimidir. Dolayısıyla izin görünebilmesi için test noktasının çok iyi parlatılması gerekmektedir [36].

5.2.5. Makroskobik Muayene Deneyi

Makro kesit incelemesi kaynaklı birleştirmeden alınan numune kesitin maksimum 10X büyütme ile incelenmesidir. Bu test yöntemi ile alın kaynaklarında nüfuziyet, süreksizlikler (çatlak, gözenek, ergime noksanlığı vb.) belirlenebilir. Genellikle numune metalografik olarak hazırlandıktan sonra bir dağlayıcı tarafından dağlanarak mikroskop altında inceleme gerçekleştirilir [37].

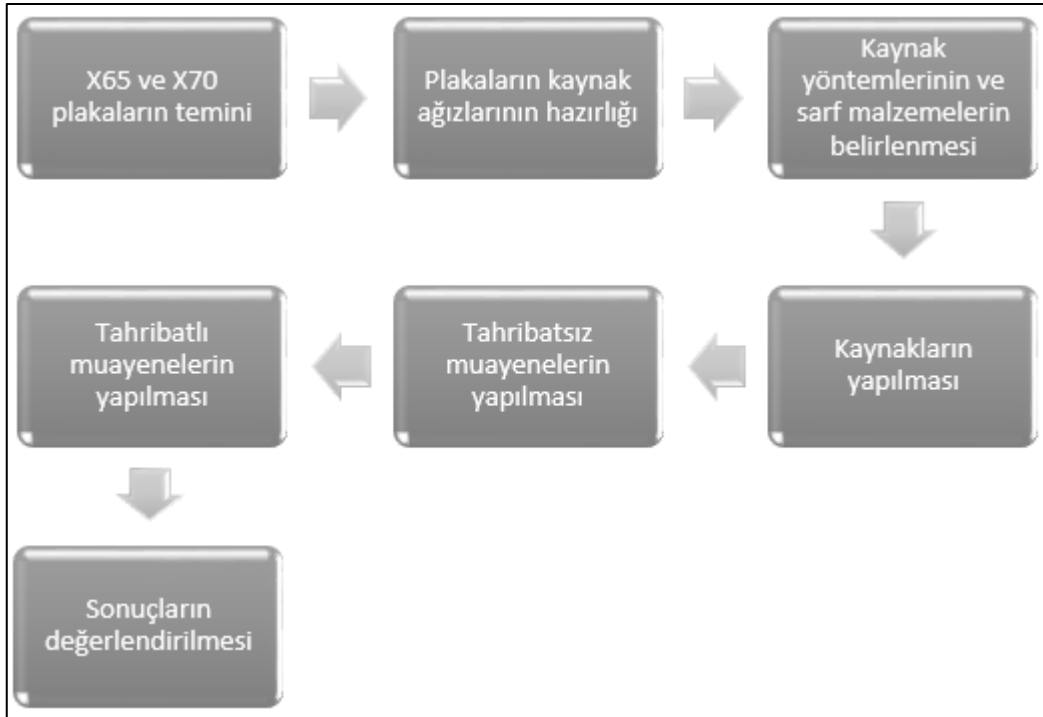
5.2.6. Mikroskobik Muayene Deneyi

Metalografik muayenede iki tip optik mikroskop kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi 50 büyütme oranına kadar büyütme yapabilen Stereo mikroskoplardır. Stereo mikroskop ile tane yapısından ziyade belirli bir bölge makro olarak incelenir. Özellikle kaynaklı imalat yapılmış parçalar Stereo mikroskop ile incelenir. İkinci optik mikroskop ise günümüzde 2500 büyütme oranına kadar çıkabilen metal mikroskoplarıdır. Metal mikroskoplar ile bir numunenin belirli bir bölgesinin içyapısı mikroskobik olarak incelenir. Burada temel amaç o incelenen bölgenin dokusu hakkında bilgi edinmektir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda X65 ve X70 kalite çelik plakalar V kaynak ağızı açılarak kök bölgeleri üç farklı kaynak yöntemi ile birleştirilip kalan kısımları toz altı kaynak yöntemi ile kaynatılmıştır. Kaynak sonrası plakalar tahribatlı ve tahribatsız muayenelerden geçirilerek kaynaklanabilirlik ve mekanik özellikler incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda takip edilen iş akış planı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. İş akış planı.

6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

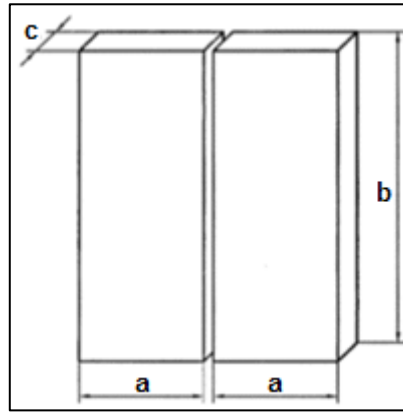
6.1.1. Ana Malzeme

Kaynaklarda kullanılacak ana malzemeler günümüzde petrol ve gaz boru hatlarında yaygın olarak kullanılan ince taneli, düşük alaşımlı X65 ve X70 kalite çeliklerden seçilmiştir.

Çizelge 6.1. X65 ve X70 kalite çeliklerin kimyasal bileşikleri (% Kütle).

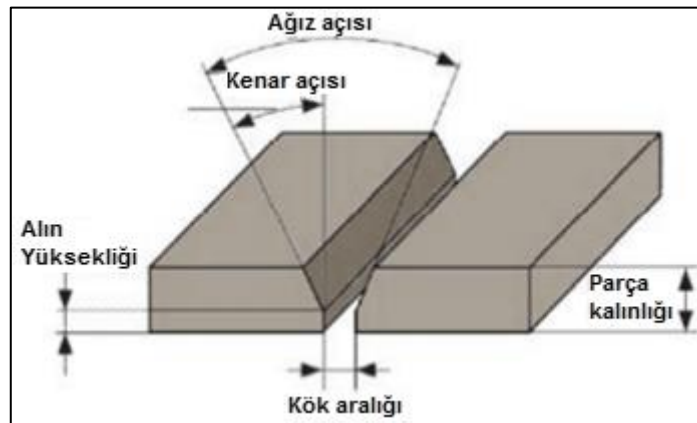
Kalite	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti
X65	0,065	0,15	1,38	0,015	0,007	0,037	0,057	0,005	0,04	0,019
X70	0,071	0,19	1,54	0,01	0,0008	0,25	0,01	0,011	0,01	0,018

Deneylerde kullanılan plaka ölçüleri TS-EN 15614-1[38] standardında belirlenmiş genişlik 300 mm, uzunluk 400 mm'den büyük olarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.2. Plakalarda tam nüfuziyetli alın kaynağı için deney numuneleri. a: numune genişliğinin yarısı, b: numune uzunluğu, c: numunenin kalınlığı [15].

Deneyde kaynatılacak plakalar (kalınlık x 150 x 450mm) ebatlarında iki parça olarak hazırlanıp Şekil 6.3'de verilen v tipi kaynak ağzı açılmıştır.



Şekil 6.3. Genel v tipi kaynak ağzı görünümü [18].



a)



b)

Şekil 6.4. Deney plakalarının gösterimi a) 6,7 mm plaka b) 16,87 mm plaka.

6.1.2. Seçilen Dolgu Malzemeleri

Kök kaynaklarında üç farklı kaynak metodu kullanıldığından deneylerde de üç farklı dolgu malzemesi, kalan kısımların dolgusunda tozaltı kaynak yöntemi kullanılmıştır.

1. Örtülü Elektrot Ark Kaynak metodunda Gedik Kaynak A.Ş. firmasında üretilen kimyasal bileşimi ve mekanik değerleri Çizelge 6.2’de gösterilen TS EN ISO 18275-A [39]: E 55 6 2 Ni Mo B 42 H5 Tempo B70S tipi 3,25 mm çapında bazik elektrot,

Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan bazik elektrotun kimyasal ve mekanik özellikleri.

%C Ağırlık	%Si Ağırlık	%Mn Ağırlık	%P Ağırlık	%S Ağırlık	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
0,033	0,234	0,713	0,009	0,013	587	662

2. Gaz altı kaynak metodunda Gedik Kaynak A.Ş. firmasında üretilen kimyasal bileşimi ve mekanik değerleri Çizelge 6.3’de gösterilen TS EN ISO 18276-A:06: T 62 4 Mn1.5Ni P C 1 ELCOR R91 tipi 1,2 mm çapında özlü gaz altı kaynak teli

Çizelge 6.3. Deneyde kullanılan özlü telin kimyasal ve mekanik özellikleri.

%C Ağırlık	%Si Ağırlık	%Mn Ağırlık	%P Ağırlık	%S Ağırlık	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
0,057	0,348	1,143	0,012	0,015	661	737

3. TIG kaynak metodunda Gedik Kaynak A.Ş. firmasında üretilen kimyasal bileşimi ve mekanik değerleri Çizelge 6.4’de gösterilen TS EN ISO 636-A:09: W4Si1 SG3 tipi 3,20 mm çapında kaynak çubuğu,

Çizelge 6.4. Deneyde kullanılan TIG telin kimyasal ve mekanik özellikleri.

%C Ağırlık	%Si Ağırlık	%Mn Ağırlık	%P Ağırlık	%S Ağırlık	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
0,084	0,931	1,733	0,008	0,012	490	580

4. Tozaltı kaynak metodunda Gedik Kaynak A.Ş. firmasında üretilen kimyasal bileşimi ve mekanik değerleri Çizelge 6.5’de gösterilen TS EN ISO 14174 [40]: SA AB 1 68 AC H5 ELIFLUX BFB / S2Mo tel toz kombinasyonu seçilmiştir.

Çizelge 6.5. Deneyde kullanılan kombinasyonun kimyasal ve mekanik özellikleri.

%C Ağırlık	%Si Ağırlık	%Mn Ağırlık	%P Ağırlık	%S Ağırlık	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
0,066	0,382	1,396	0,021	0,010	490	600

6.1.3. Kaynak Kombinasyonları ve Kaynağın Yapılışı

Deneylerde çelik kaliteleri parça kalınlıklarına göre gruplandırma yapılarak kodlama yapılmıştır. Deney parçaları aşağıdaki Çizelge 6.6’ya göre hazırlanmıştır.

Çizelge 6.6. Kaynak kombinasyonları.

Plaka Kodu	Kalınlık (mm)	Çelik Kalitesi	Kaynak Metodu Kök	Kaynak Metodu Kalan
PL-1	16,87	X70	Örtülü Elektrot Ark Kaynağı	Tozaltı Kaynağı
PL-2			Gaz altı Kaynağı Özlu Tel	Tozaltı Kaynağı
PL-3			Gaz altı Kaynağı TIG	Tozaltı Kaynağı
PL-4	6,70	X65	Örtülü Elektrot Ark Kaynağı	Tozaltı Kaynağı
PL-5			Gaz altı Kaynağı Özlu Tel	Tozaltı Kaynağı
PL-6			Gaz altı Kaynağı TIG	Tozaltı Kaynağı

Deney parçalarının kaynakları tek bir kaynakçı tarafından yapılmıştır.

Pasolar arası sıcaklıklar infrared termometre ile 100°C-150°C arasında ölçülmüş, her bir paso sonrasında kaynak yüzeyi hassas bir şekilde temizlenmiştir. Her bir paso için kullanılan kaynak parametreleri kayıt altına alınmıştır.

Kök kaynakları ve kalan kısımlar tozaltı kaynakları tamamlandıktan sonra parçalar arkadan yarılarak kök kaynakları tekrar yapılmıştır.

Çizelge 6.7. 16,87 mm plakaların kaynak parametreleri.

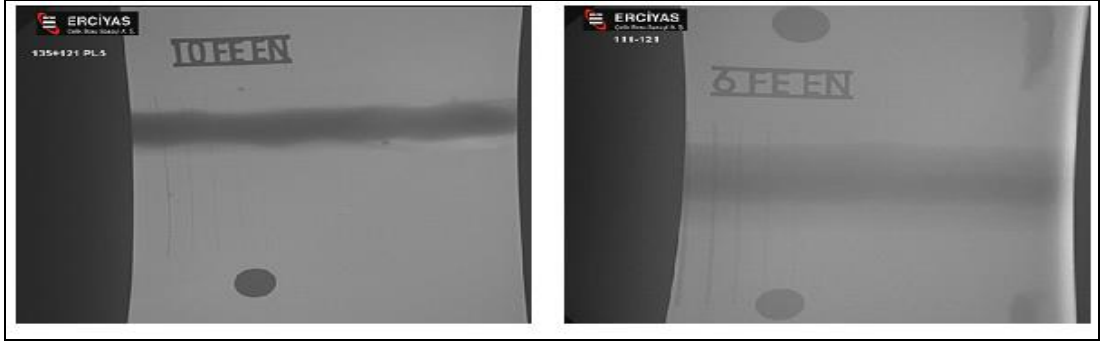
Deney Plakası	Kaynak Pozisyonu	Kaynak Yöntemi	Paso	Dolgu Malzeme Çapı	Akım (A)	Gerilim (V)
PL-1	PA	Elektrik Ark Kaynağı	Kök	3,25	100-120	22-24
			Sıcak	3,25	110-130	22-24
			Dolgu	3,25	110-130	22-24
		Tozaltı Kaynağı	Dolgu	3,20	500-520	27-29
			Dolgu	3,20	500-520	27-29
			Dolgu	3,20	500-520	27-29
			Dolgu	3,20	500-520	27-29
		Elektrik Ark Kaynağı	Arkadan Yarma	3,25	120-140	33-35
PL-2	PA	Gaz Altı Kaynağı Özlü Tel	Kök	1,20	180-200	24-26
			Sıcak	1,20	200-220	26-28
		Tozaltı Kaynağı	Dolgu	3,20	490-510	27-29
			Dolgu	3,20	490-510	27-29
			Dolgu	3,20	490-510	27-29
			Dolgu	3,20	490-510	27-29
		Gaz Altı Kaynağı Özlü Tel	Arkadan Yarma	1,20	220-240	29-31
		PL-3	PA	Gaz Altı Kaynağı TIG	Kök	3,20
Sıcak	3,20				170-190	15-17
Tozaltı Kaynağı	Dolgu			3,20	370-390	27-29
	Dolgu			3,20	510-530	28-30
	Dolgu			3,20	510-530	28-30
	Dolgu			3,20	510-530	28-30
	Dolgu			3,20	510-530	28-30
Gaz Altı Kaynağı TIG	Arkadan Yarma			3,20	190-210	16-18

Çizelge 6.8. 6,7 mm plakaların kaynak parametreleri.

Deney Plakası	Kaynak Pozisyonu	Kaynak Yöntemi	Paso	Dolgu Malzeme Çapı	Akım (A)	Gerilim (V)
PL-4	PA	Elektrik Ark Kaynağı	Kök	3,25	115-135	32-34
		Tozaltı Kaynağı	Sıcak	3,20	370-390	25-27
		Elektrik Ark Kaynağı	Arkadan Yarma	3,25	110-130	33-35
PL-5	PA	Gaz Altı Kaynağı (Özlü Tel)	Kök	1,20	180-200	24-26
			Sıcak	1,20	180-200	24-26
		Tozaltı Kaynağı	Dolgu	3,20	370-390	25-27
		Gaz Altı Kaynağı (Özlü Tel)	Arkadan Yarma	1,20	180-200	24-26
PL-6	PA	Gaz Altı Kaynağı (TIG)	Kök	3,20	180-200	15-17
		Tozaltı Kaynağı	Sıcak	3,20	370-390	25-27
		Gaz Altı Kaynağı (TIG)	Arkadan Yarma	3,20	160-180	13-15

6.2. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Deney parçalarının kaynak işlemleri tamamlandıktan sonra kaynaklara tahribatsız muayene metotlarından ilk olarak Gözle Muayene, ardından sırası ile Şekil 6.5’de Dijital radyografi, Şekil 6.6’da Ultrasonik ve Şekil 6.7’de Manyetik partikül muayene metotları uygulanmıştır. Tüm tahribatsız muayene kontrolleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 [41] standardına göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiş Erciyas Çelik Boru Laboratuvarı’nda ISO 11484 [42] standardına göre sertifikalandırılmış kontrol personelleri tarafından yapılmıştır.



a)

b)

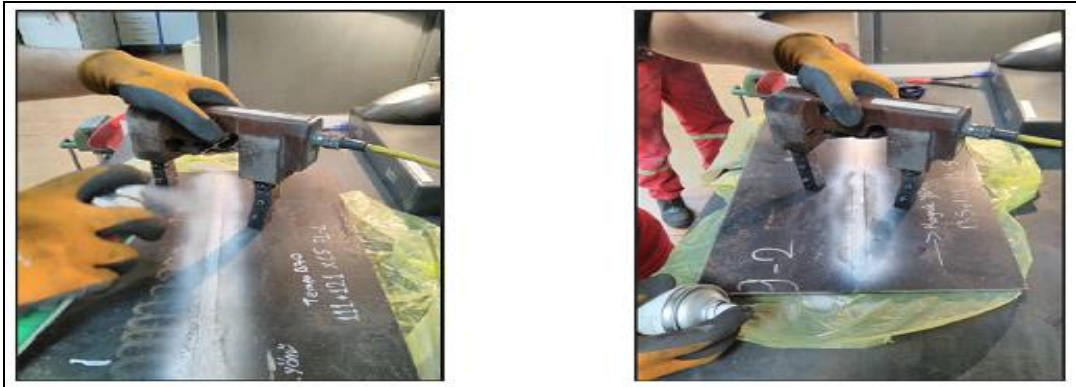
Şekil 6.5. Dijital radyografi muayene görüntüleri a) 16,87 PL-5 görünümü b) 16,87 mm PL-4 görünümü.



a)

b)

Şekil 6.6. Ultrasonik muayene görüntüleri a) 16,87 mm PL-6 ön yüzey b) 16,87 mm PL-6 arka yüzey.



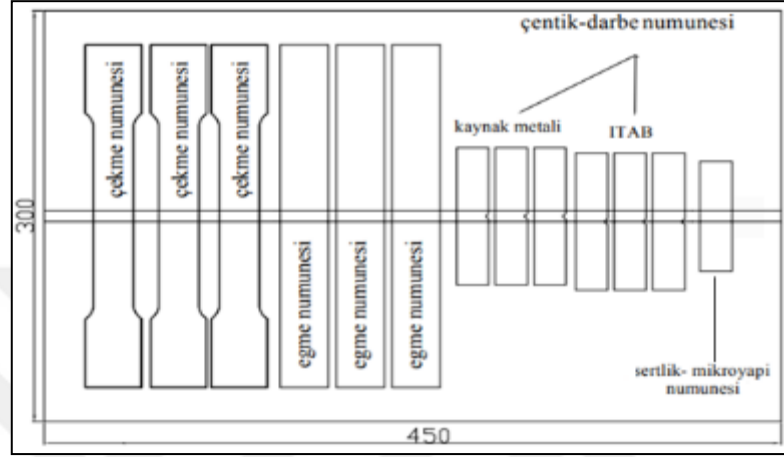
a)

b)

Şekil 6.7. Manyetik partikül görüntüleri a) PL-3 ön yüzey b) PL-3 arka yüzey.

6.3. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Tahribatsız muayene sonrasında tüm plakalar Şekil 6.8’de belirtilen tahribatlı testler için malzeme ısıdan etkilenmeyecek şekilde sulu şerit testerede kesilmiştir. Tüm plakaların kaynak esnasında başlangıç ve bitiş kısımlardan 2 cm’lik bölgeler kaynak baş ve sonu olduğu için çıkartılarak atılmıştır.



Şekil 6.8. Kaynaklı test plakalarından çıkarılan numuneler.

6.3.1. Enine Çekme Test Numuneleri

Kaynaklı birleştirme yapılan 6,7 ve 16,87 mm’lik plakaların çekme deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiş olan Şekil 6.9’da gösterilen Noksel ve Erciyas Çelik Boru Laboratuvar’larında yapılmıştır.



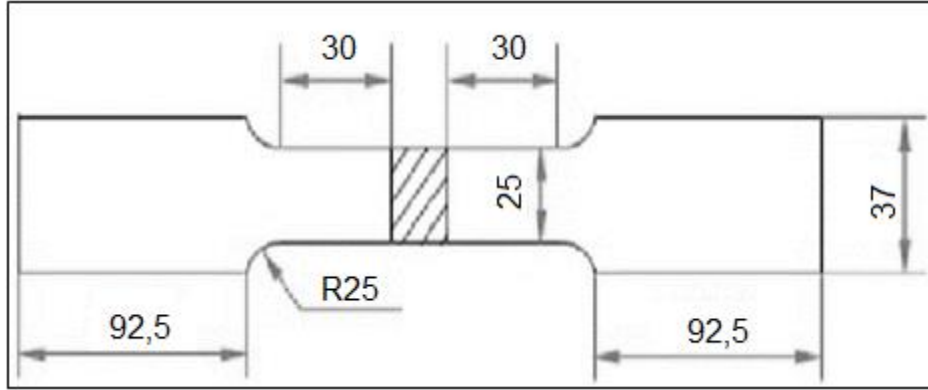
a)

b)

Şekil 6.9. Çekme test cihazları a) Çekme Test Cihazı (20 ton) b) Çekme Test Cihazı (60 ton).

Her kalınlık için üçer adet kaynaklı çekme testi TS EN ISO 4136 [43] standardına uygun olarak yapılmıştır.

Çekme numunelerinin ölçüleri Şekil 6.10'da verilen ölçülere göre hazırlanmıştır.



Şekil 6.10. Çekme test numune ebatları.

6.3.2. Enine Eğme Test Numuneleri

Kaynaklı birleştirme yapılan 6,7 ve 16,87 mm'lik plakaların yan eğme deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiş olan Erciyas Çelik Boru Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 6.11'de gösterilen eğme test cihazında yapılmıştır.



Şekil 6.11. Zwick eğme test cihazı.

Her kalınlık için üçer adet kaynaklı yan eğme testi ASTM A 370 [44] standardına uygun olarak yapılmıştır.

6.3.3. Çentik Darbe Test Numuneleri

Kaynaklı birleştirme yapılan 6,7 ve 16,87 mm'lik plakaların çentik darbe deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiş olan Erciyas Çelik Boru Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 6.12'de gösterilen çentik darbe test cihazında yapılmıştır.

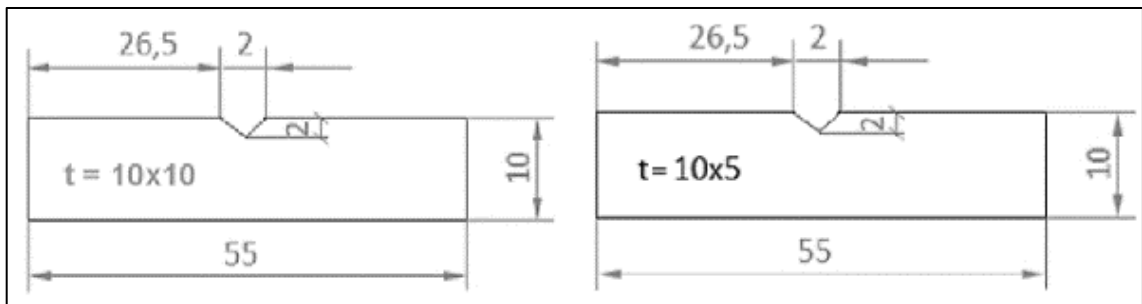


Şekil 6.12. Zwick çentik darbe test cihazı.

Her bir deney plakasından 3 adet kaynak bölgesinden ve 3 adet ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) den numuneler çıkartılarak 0°C altında test gerçekleştirilmiştir. Çelik kalitelerinin tanımlı olduğu API 5L standardında çentik darbe test sıcaklığı 0°C olarak gösterildiği için bu sıcaklık seçilmiştir.

Şekil 6.13b'de gösterilen 6,7 mm lik plakalardan yarım numune 5x10x55 mm

Şekil 6.13a'da gösterilen 16,87 mm plakalardan tam numune 10x10x55 mm ebatlarında çentik numuneleri hazırlanmıştır.



a)

b)

Şekil 6.13. Çentik test numune ebatları a) tam numune b) yarım numune.

Çentik bölgelerinin doğru açılabilmesi için numuneler 600 – 1000’lik zımparalar ile zımparalandıktan sonra çuha bezi ile son yüzey hazırlaması yapılmıştır. Daha sonra numuneler % 2’lik nital çözeltisine daldırılarak 10 saniye bekletilmiş ve görünür duruma gelen kaynak ve ITAB bölgeleri marker kalem ile işaretlenmiştir. Daha sonra işaretli bölgelerden çentik açılmıştır.

Açılan çentiklerin boyutları ASTM A370 standardında verilen toleranslar içinde olup olmadıkları yatay profil metre cihazı ile doğrulanmıştır.

6.3.4. Sertlik Test Numuneleri

Kaynaklı birleştirme yapılan 6,7 ve 16,87 mm’lik plakaların sertlik deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAK tarafından akredite edilmiş olan Erciyas Çelik Boru Laboratuvarı’nda EmcoTest Durascan 70 marka Şekil 6.14’de sertlik ölçüm cihazı ile makro numunesi üzerinden sertlik noktaları belirlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14. Sertlik ölçüm cihazı.

Vickers sertlik ölçümleri HV5 uç ile tüm plakalar için kaynakların kök, orta ve kep bölgelerinden 3 hat belirlenerek malzeme, ITAB, kaynak, ITAB, malzeme şeklinde ve her bölgeden 1 er mm aralıklar ile 5 adet ölçüm alınmıştır.

6.3.5. Makroskopik Muayene Numuneleri

Farklı kök kaynak metotları kullanılarak birleştirme sonrası kaynak bölgesinde oluşan değişiklikleri incelemek amacı ile 200-400-600 ve 1200’lük zımpara ile zımparalandıktan sonra keçe ile parlatılmış ardından % 2’lik nital çözeltisi ile dağlanarak makro incelemeler yapılmıştır.

Makro inceleme deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAÇ tarafından akredite edilmiş olan Erciyas Çelik Boru Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

6.3.6. Mikroskopik Muayene Numuneleri

Mikroskopik muayene deneyleri çentik darbe test numunelerinin kırılan ITAB ve kaynak yüzeylerinden 100X ve 200X büyütme yapılarak incelenmiştir.



Şekil 6.15. Test metal mikroskop cihazı.

Mikro inceleme deneyleri TS EN ISO/IEC 17025-2012 standardına göre TÜRKAÇ tarafından akredite edilmiş olan Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DUBİT) Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 6.15'de gösterilen metal mikroskop cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. TAHRİBATSIZ TEST SONUÇLARI

Deneylerde kaynatılan tüm parçalar yüzeysel hataların tespiti için TS EN ISO 5817 [45] standardı Sınıf B seviyesine göre görsel muayene ve TS ISO 10893-5 [46] standardı manyetik parçacık muayene kontrolüne, hacimsel hataların tespiti için TS EN ISO 10893-11 [47] standardı ultrasonik muayene ve TS ISO 10893-7 [48] standardı dijital radyoskopi muayene kabul kriterlerine göre kontrollere tabi tutulmuşlardır. Yapılan kontrollerde tüm plakaların uygun olduğu görülmüştür.

7.2. TAHRİBATLI TEST SONUÇLARI

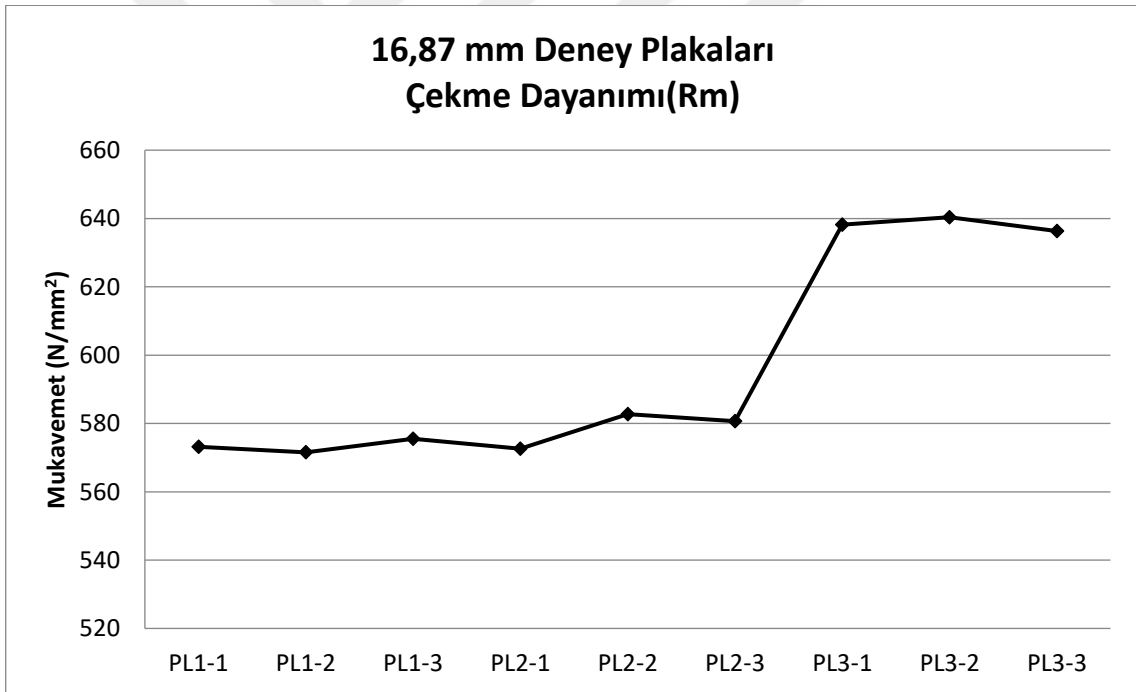
Tahrifatlı testlerden enine çekme ve eğme deneyleri, sertlik deneyi, makroskobik ve mikroskobik muayene deneyleri, kırık yüzeylerin muayene deneyleri ile kaynaklı plakaların mekanik mukavemetleri ve kaynaklı birlikleri incelenmiştir.

7.2.1. Enine Çekme Deney Sonuçları

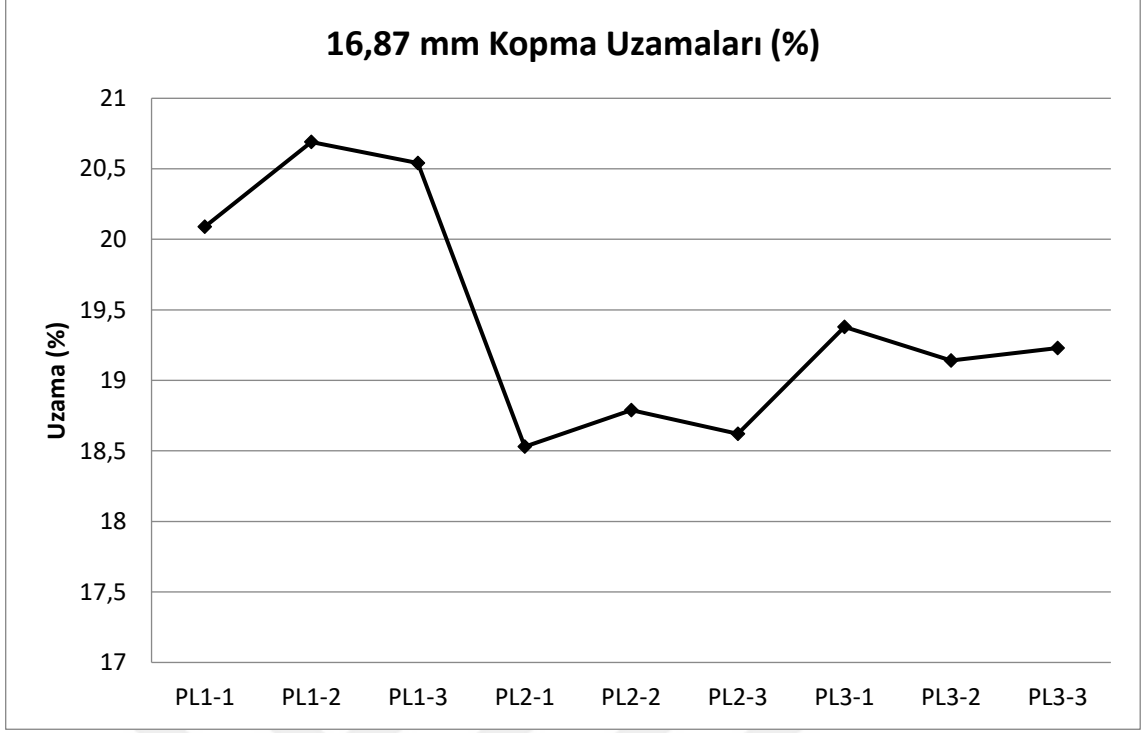
Deney plakalarının her birinden TS EN ISO 4136 standardında belirtilen numune ölçülerine göre üçer adet çekme test numunesi olmak üzere toplamda 18 adet numune hazırlanmıştır. Deney numuneleri oda sıcaklığında Zwick marka test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 7.1 ile Çizelge 7.2’de sayısal verileri ve kopma bölgeleri, Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de ise grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1. 16,87 mm enine çekme deneyleri sonuçları.

Numune No	Çekme Day. (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Kırılma Bölgesi
PL1-1	573,17	20,09	Ana Malzeme
PL1-2	571,54	20,69	Ana Malzeme
PL1-3	575,50	20,54	Ana Malzeme
PL2-1	572,57	18,53	Ana Malzeme
PL2-2	582,75	18,79	Ana Malzeme
PL2-3	580,64	18,62	Ana Malzeme
PL3-1	638,20	19,38	Ana Malzeme
PL3-2	640,37	19,14	Ana Malzeme
PL3-3	636,28	19,23	Ana Malzeme



Şekil 7.1. 16,87 mm deney plakaları çekme dayanımları (Rm).

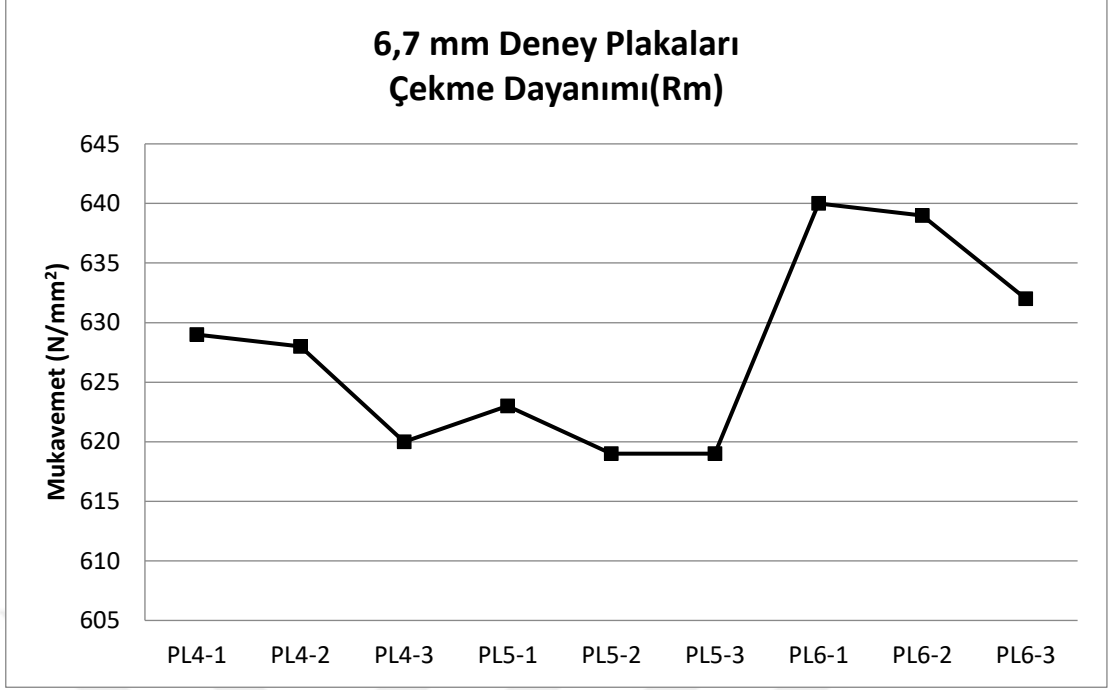


Şekil 7.2. 16,87 mm kopma uzamaları (%).

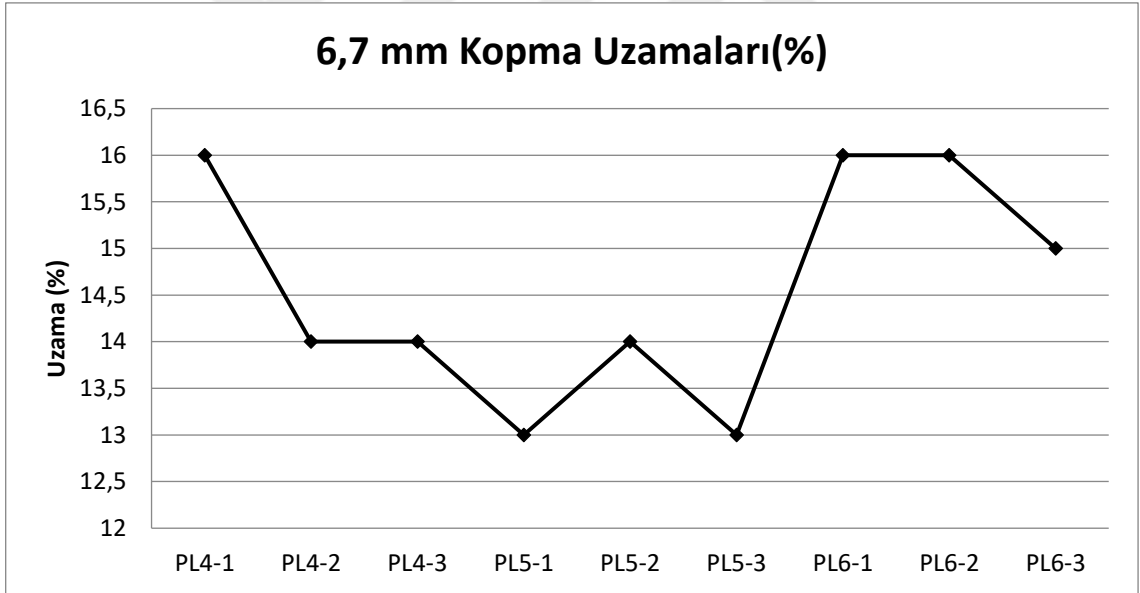
16,87 mm kalınlıktaki kaynaklı çekme test numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında numunelerin ortalama değerlerindeki farkların %10'dan az olduğu bu farkın numunelerin işlenmesindeki tolerans farklılıklarının olabileceği ön görülmüştür.

Çizelge 7.2. 6,7 mm enine çekme deneyleri sonuçları.

Numune No	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Kırılma Bölgesi
PL4-1	629	16	Malzeme
PL4-2	628	14	Malzeme
PL4-3	620	14	Malzeme
PL5-1	623	13	Malzeme
PL5-2	619	14	Malzeme
PL5-3	619	13	Malzeme
PL6-1	640	16	Malzeme
PL6-2	639	16	Malzeme
PL6-3	632	15	Malzeme



Şekil 7.3. 6,7 mm deney plakaları çekme dayanımları (Rm).



Şekil 7.4. 6,7 mm kopma uzamaları (%).

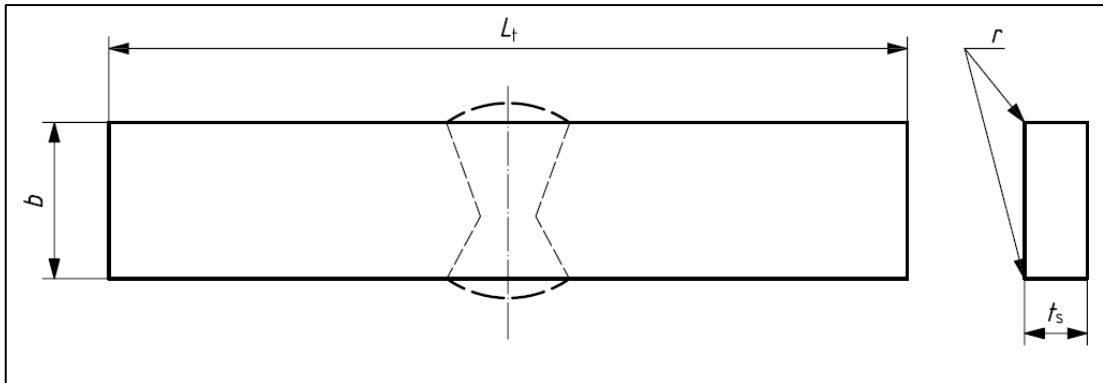
6,7 mm kalınlıktaki kaynaklı çekme test numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında numunelerin ortalama değerlerindeki farkların %3'den az olduğu bu farkın numunelerin işlenmesindeki tolerans farklılıklarının olabileceği ön görülmüştür.

Çekme deney sonuçları incelendiğinde kopmanın tüm numunelerde ana malzemenin olduğu, kaynaklı bölgenin sağlam olduğu tespit edilmiştir. Bu da kaynaklı numunenin çekme mukavemetinin ana malzemenin çekme mukavemetinden yüksek olduğunu

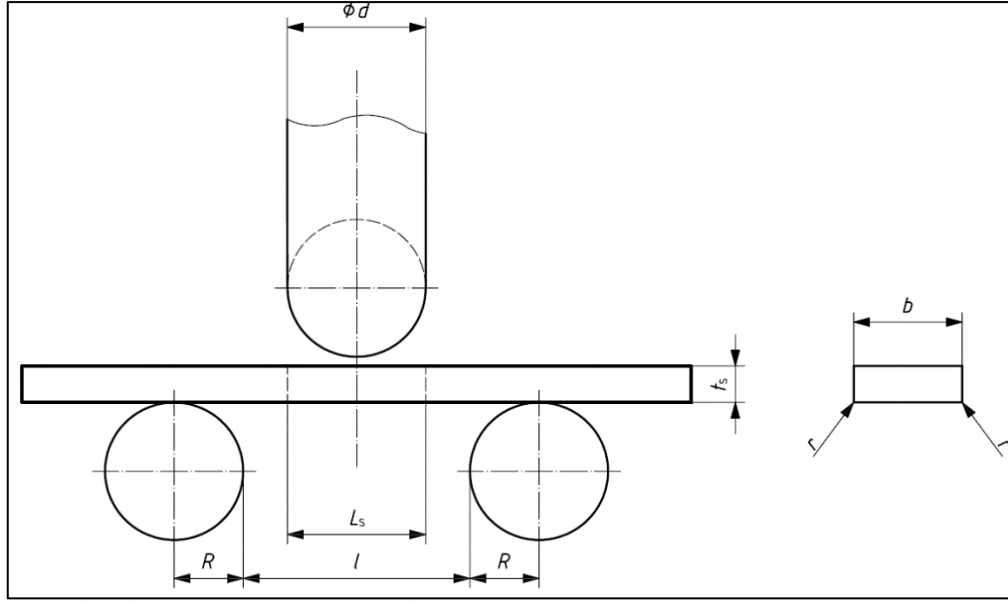
göstermektedir. Bunun sebebi çekme testi esnasında kaynaklı bölgenin deformasyonu önlemesi olarak düşünülebilir. Literatürde, aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme testleri sonucu, eğer çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzemenin hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterdiği belirtilmektedir [49]. Çekme numuneleri TS EN ISO 4136 standardına uygun hazırlandığından, kaynaklı numunelerdeki kaynak bölgesinin sert olmasından dolayı deformasyon bu bölgelerin dışında oluşmuştur. Deformasyonun dar bir bölgede oluşmasından dolayı dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının nedeni kaynaklı bölgenin çekme testi esnasında deformasyona uğramamasıdır. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu mukavemet çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olmuştur.

7.2.2. Enine Yan Bükme Deney Sonuçları

Deney plakalarının her birinden üçer adet bükme test numunesi olmak üzere toplamda 18 adet numune hazırlanmıştır. TS EN ISO 5173 [50] standardında belirtilen numune ölçülerine göre hazırlanan numuneler enine yan bükme testine tabi tutulmuşlardır. Şekil 7.5’de enine yan bükme numunesine ait kalınlık, genişlik ve boy bilgilerinin tanımlaması verilmiştir. Şekil 7.6’da da bükme testi için gerekli olan mandrel çapı ve mesnetler arası mesafeyi gösteren tanımlama verilmiştir.



Şekil 7.5. Enine yan bükme test numunesi ölçüleri t_s : Numune Kalınlığı, b : Numune Genişliği, L_t : Numune Boyu [50].



Şekil 7.6. Nokta eğme test düzeneği. t_s : Numune kalınlığı / ϕd : Mandrel çapı / R : Mesnetlerin yarıçapı / l : Mesafe / L_s : Kaynak genişliği[50].

TS EN ISO 5173 standardına göre “b” ölçü değeri $10 \pm 0,5$ mm olmalıdır. “ t_s ” numune kalınlığı 6,7 ve 16,87 mm olarak belirtilmiştir. Deneyde kullanılacak test numunesinin uzunluğu en az $L_t \geq L + 2R$ olmalıdır.

Makaralar arasındaki mesafe $d + 2t_s + 3 \leq l \leq d + 3t_s$ arasında olmalıdır.

Test numunelerinin eğme açısı standartta belirtilen % 20 uzamadan büyük malzemeler için 180° olmalıdır.

Çizelge 7.3. 6,7 mm enine yan bükme numune ölçüleri ve sonuçları.

Plaka No	Numune No	(mm)					(°)	Sonuç
		t_s	b	L_t	R	d	Açı	
PL1	PL1-1	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL1-2	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL1-3	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
PL2	PL2-1	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL2-2	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL2-3	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
PL3	PL3-1	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL3-2	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
	PL3-3	16,87	10	350	24	40	180	Uygun
PL4	PL4-1	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL4-2	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL4-3	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
PL5	PL5-1	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL5-2	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL5-3	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
PL6	PL6-1	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL6-2	6,7	10	350	24	40	180	Uygun
	PL6-3	6,7	10	350	24	40	180	Uygun

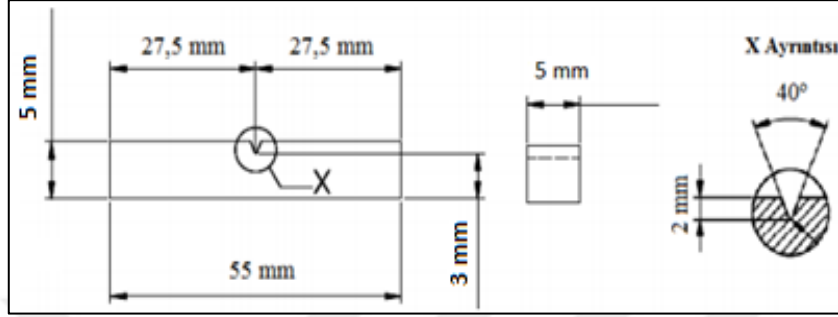
Eğme testi sonucunda herhangi bir hasar olmaması, malzemenin gevrekleşmemiş olduğunu, dolayısıyla kaynak işlemleri esnasında ani ısı girdisi veya gereğinden fazla sıcaklığa maruz kalmadığını göstermiştir [20]. Buna ek olarak kullanılan sarf malzemelerin kaynak bölgesinde yeterli seviyede elastik yapıya sahip olduğunu gösterir [12].

7.2.3. Çentik Darbe Deney Sonuçları

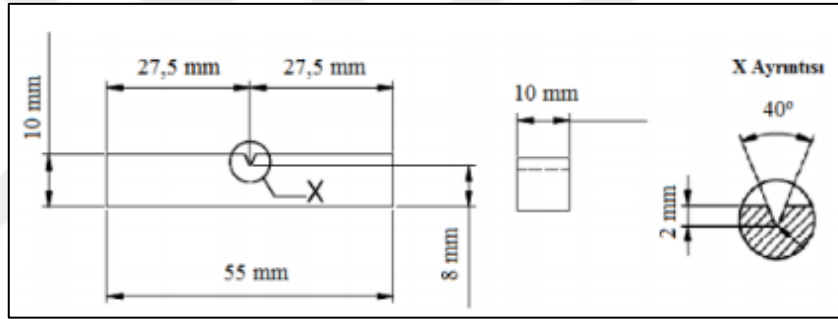
Çentik darbe deneyleri hem 6,7 mm plakalardan hem de 16,87 mm plakalardan yapılarak elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilerek incelenmiştir.

PL-4, PL-5, PL-6 olarak kodlanan 6,7 mm kalınlıktaki kaynaklı plakalardan elde edilen numuneler 5x10x55 mm boyutlarında işlenerek çentik açılmak üzere hazırlanmıştır.

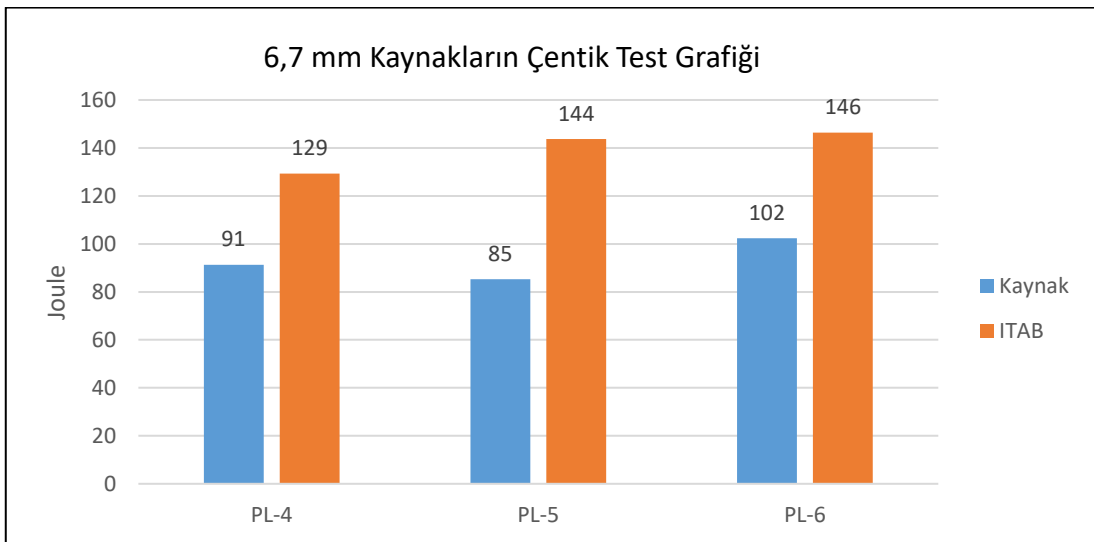
PL-1, PL-2, PL-3 olarak kodlanan 16,87 mm kalınlıktaki kaynaklı plakalardan elde edilen numuneler 10x10x55 mm boyutlarında işlenerek çentik açılmak üzere hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin 3 adedi ITAB, 3 adedi kaynak metali, 3 adedi ana malzeme olmak üzere her bir plaka kaynağından toplam 9 adet çentik darbe test numunesi hazırlanmıştır. Numune ebatları Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de gösterilmektedir.



Şekil 7.7. Çentik numune boyutları – 6,7 mm.

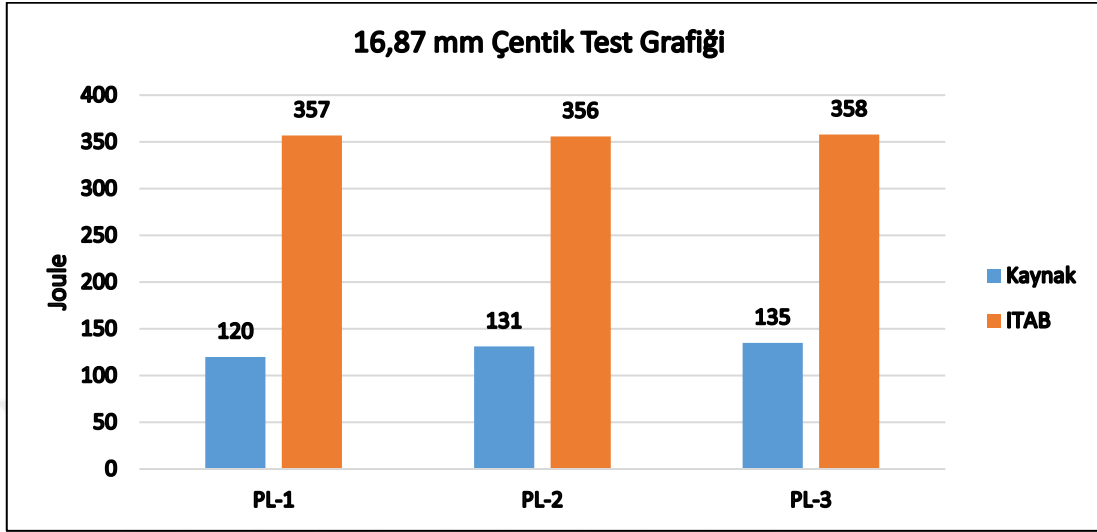


Şekil 7.8. Çentik numune boyutları – 16,87 mm [12].



Şekil 7.9. 6,7 mm kaynaklarının çentik test grafiği.

PL-6'dan elde edilen çentik deney sonuçlarının diğer sonuçlara göre daha dayanıklı olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10. 16,87 mm kaynaklarının çentik test grafiği.

Grafik incelendiğinde PL-3'den elde edilen çentik deney sonuçlarının diğer plakalarda yapılan kaynak metotlarının sonuçlarından daha iyi sonuçlar alındığı görülmektedir.

Test sonuçları incelendiğinde, en yüksek değer ITAB bölgesinde olduğu bir sonraki değer ise kaynak metalinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, ITAB ve kaynak metalinden ölçülen tokluk değerleri, bu bölgelerden ölçülen sertlik değerleriyle ters orantılıdır. Yani sertlik değeri arttıkça, tokluk değeri düşmektedir. Bu çalışmada kaynak metalinden alınan çentik darbe değerleri, ITAB'dan alınan değerlere göre daha düşük bulunmuştur.

Kaya ve arkadaşları [51], farklı kalınlıklarda, Grade A kalite gemi saçlarının tozaltı ark kaynak metodu kullanarak birleştirerek yaptıkları çalışmada, ITAB'daki ölçülen tokluk değerlerinin kaynak bölgesinden elde edilen tokluk değerlerine göre daha yüksek olduğu bunun yanında sertlik değerlerinin ise kaynak metalinin sertlik değerlerinden düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çentik darbe deney sonuçları elde edilen sertlik sonuçları ile kıyaslandığında kaynak bölgesinin sertlik değerleri yüksek olmasına rağmen tokluk değerlerinin düşük olduğu, ITAB'ın sertlik değerlerinin düşük olmasına rağmen tokluk değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, çalışmada, özellikle tozaltı ark kaynak yönteminde, ITAB'ın kırılman olmasına rağmen, kaynak metalden daha sert olduğu vurgulanmaktadır.

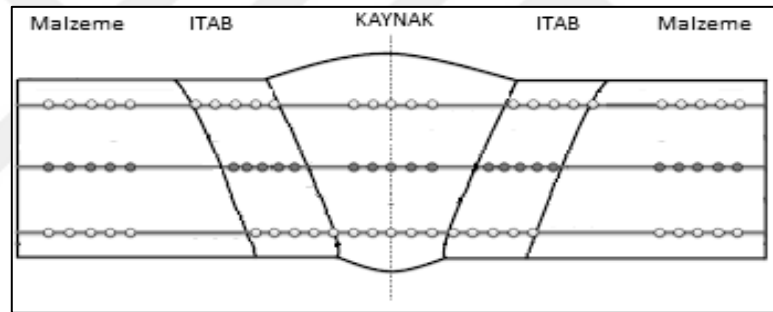
7.2.4. Sertlik Deney Sonuçları

Düşük karbonlu, düşük alaşımlı çeliklerin kaynağı sonrasında ITAB'da çatlak oluşmaması için sertliğin 350 HV değerini aşmaması önerilmektedir [52].

Sertlik deneyleri HV5 vicker's ölçüm metodu ile yapılmıştır. Her numune üzerindeki malzeme, ITAB, kaynak bölgelerinde eşit aralıklar ile beşer ölçüm alınarak sonuçlar kayıt edilmiştir. Elde edilen bu değerler sayesinde sertlik grafikleri oluşturulmuştur. Sertlik ölçümleri hem 16,87 mm hem de 6,7 mm kalınlıktaki makrolar üzerinden ayrı ayrı yapılarak incelenmiştir.

Ölçümler makro parça üzerinden sol taraftan başlayarak malzeme, ITAB, kaynak, ITAB ve malzeme olmak üzere toplam beş bölgeden ölçümler alınmıştır. Her bölgeden 1 mm aralıklar ile toplam 5 ölçüm alınmıştır.

Sertlik ölçümleri kep, orta ve kök kısımlarını içerecek şekilde ve her bölgeden toplam 25 adet ölçüm alınmıştır. Ölçüm noktaları Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.11. Deney numunelerinin sertlik noktaları.

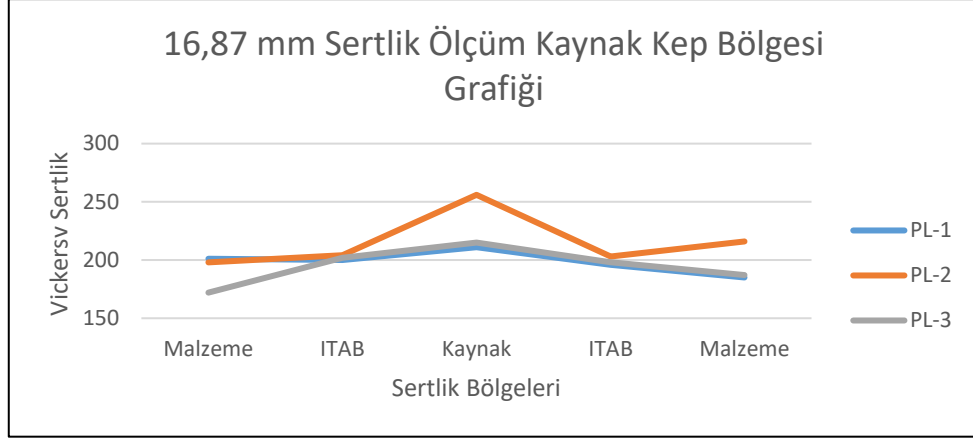
7.2.4.1. 16,87 mm Kalınlıktaki Deney Numunelerinin Sertlik Ölçümleri

PL-1 : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

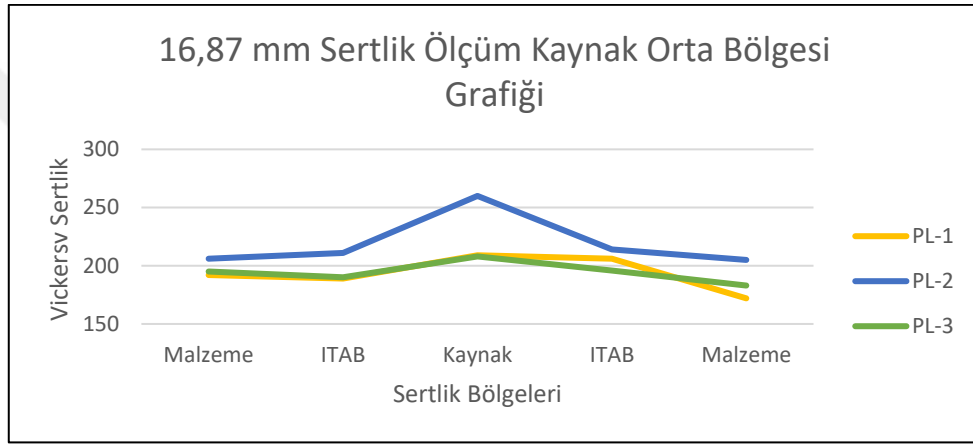
PL-2 : Gaz metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

PL-3 : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

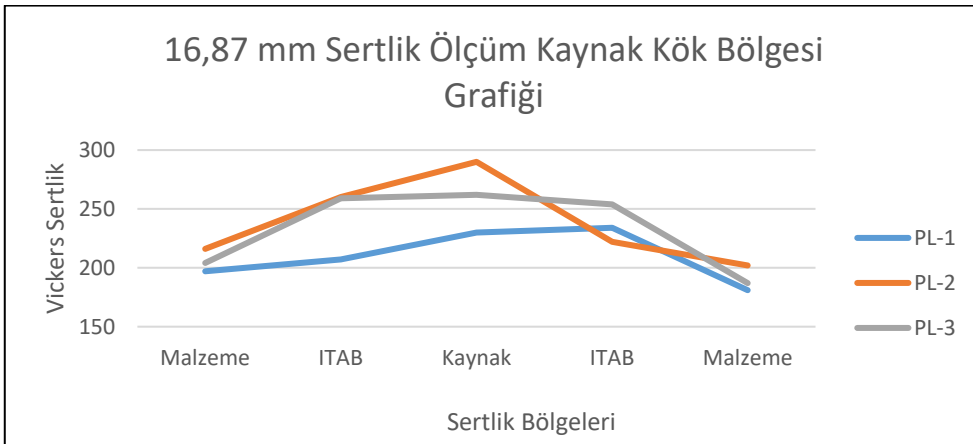
olarak kodlanan makro parçalar üzerinden alınan sertlik ölçüm grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.12. 16,87 mm kaynak kep bölgesi sertlik ölçümü.



Şekil 7.13. 16,87 mm kaynak orta bölgesi sertlik ölçümü.



Şekil 7.14. 16,87 mm kaynak kök bölgesi sertlik ölçümü.

Kaynak kep ve orta bölgeleri tozaltı ile kaynatıldığından sertlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kaynak kök bölgelerindeki sertlik farkları kaynakçının kaynak esnasında oluşturduğu ısı girdilerinin farklı olmasından dolayı oluştuğu düşünülmektedir.

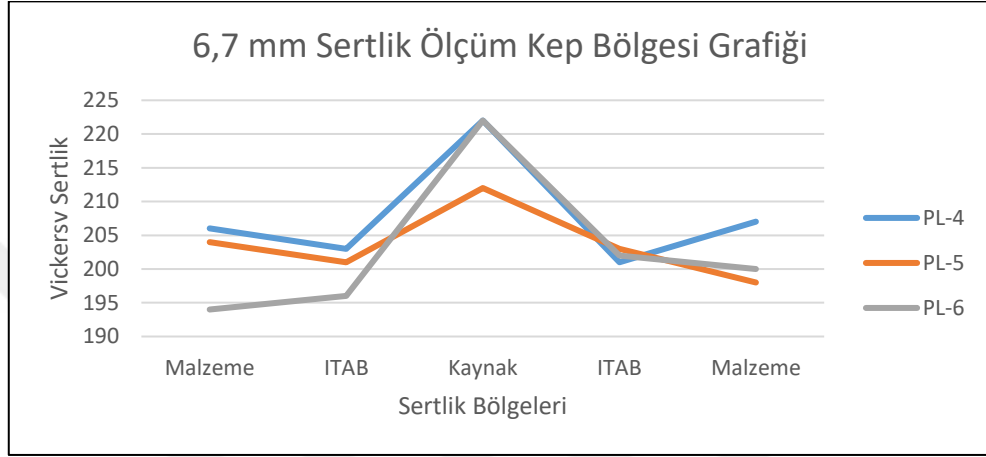
7.2.4.2. 6,7 mm Kalınlıktaki Deney Numunelerinin Sertlik Ölçümleri

PL-4 : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

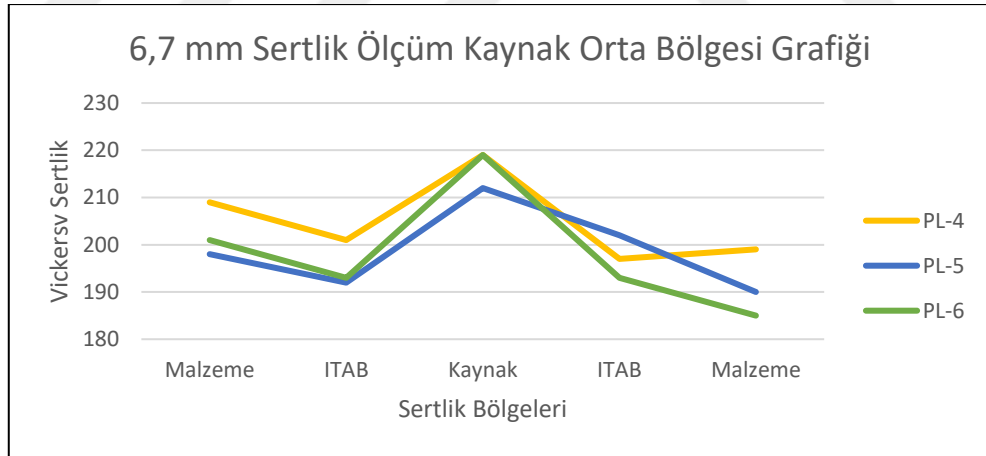
PL-5 : Gaz metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

PL-6 : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağı

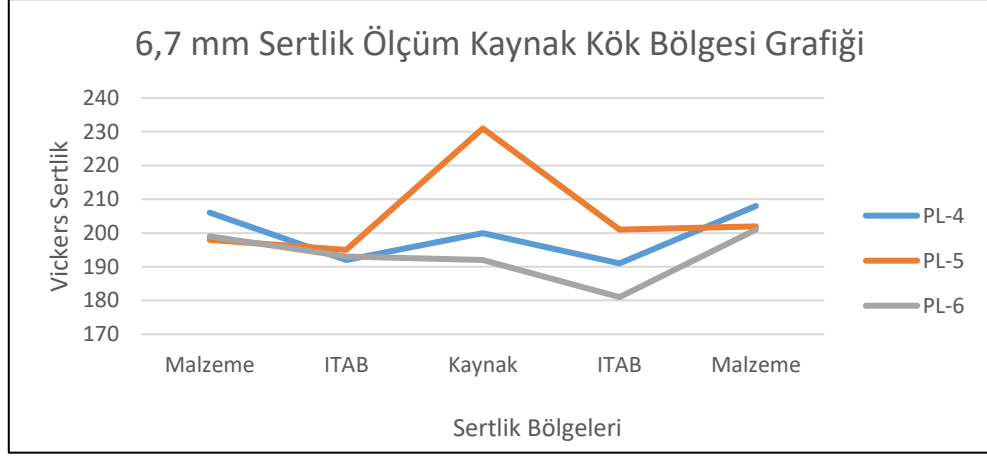
olarak kodlanan makro parçalar üzerinden alınan sertlik ölçüm grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.15. 6,7 mm kaynak kep bölgesi sertlik ölçümü.



Şekil 7.16. 6,7 mm kaynak orta bölgesi sertlik ölçümü.



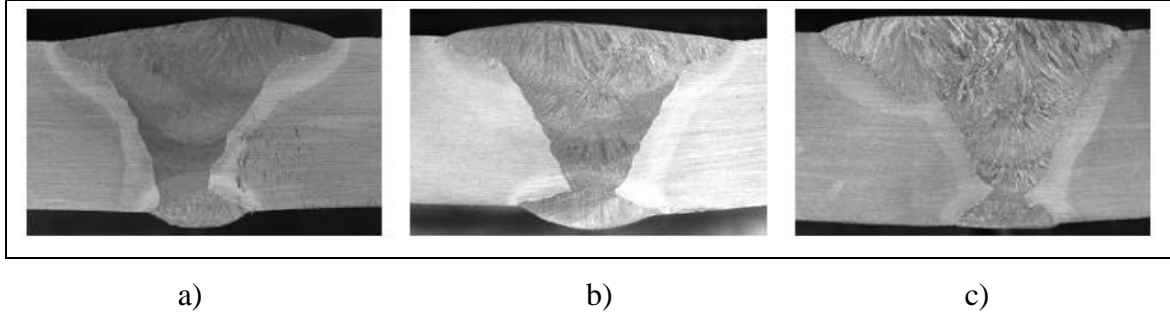
Şekil 7.17. 6,7 mm kaynak kök bölgesi sertlik ölçümü.

Kaynakların kep ve orta bölgeleri tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatıldığından dolayı sertlik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Kök bölgelerinden elde edilen değerler kendi içinde sınıflandırıldığında PL-5'in sertlik değerlerinin diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Kaynak kök bölgelerindeki sertlik farkları kaynakçının kaynak esnasında oluşturduğu ısı girdilerinin farklı olmasından dolayı oluştuğu düşünülmektedir.

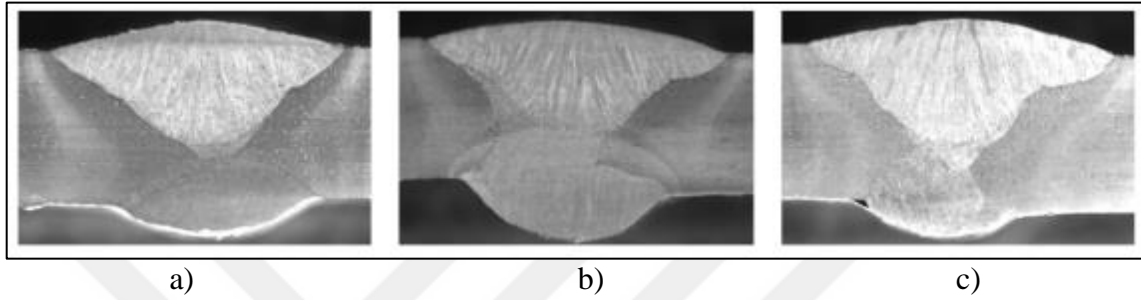
Sertlik grafikleri genel olarak incelendiğinde, kaynak metalinde en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar ayrıca çekme testlerinde ana metalden kırılan malzemenin sonucunu da desteklemektedir. ITAB sertliği kaynak metalden daha az olmasına rağmen, kaynak uygulaması sırasında ısı girişi nedeniyle sertliği genel olarak ana metalinkinden daha yüksektir. Isı girdisinin ITAB'dan ana metale doğru azalmasından dolayı sertlik değerleri düşük olduğu görülmüştür.

7.2.5. Makroskobik Muayene Sonuçları

Makro inceleme yapılabilmesi için plaka üzerinden kaynak yönüne dik pozisyonda numuneler çıkartılarak 200-400-600 ve 1200'lük zımpara ile zımparalandıktan sonra keçe ile parlatılmış ardından % 2'lik nital çözeltisi ile dağlanarak makro incelemeler yapılmıştır. Makro inceleme ile ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB), kaynak içyapısında oluşan değişimleri gözlemlenebilmiştir.



Şekil 7.18. 16,87 mm deney numunelerinin makro görüntüleri a) PL-1 b) PL-2 c) PL-3.



Şekil 7.19. 6,7 mm deney numunelerinin makro görüntüleri a) PL-4 b) PL-5 c) PL-6.

Makro yapılar incelendiğinde kaynak bölgesinde çatlaklara, yırtılmalara, boşluklara, ergime/nüfuziyet azlığına, cüruf kalıntılara ve yanma oluklarına vb. hataların olmadığı görülmüştür. Makro yapılar da kaynak bölgesinin kaynak metali, ITAB ve ana malzeme olarak ayırt edilebildiği görülmektedir. Ayrıca, kaynak metalinin tanelerinin ısı akış yönüne doğru yönlendiği ve nüfuziyetinin tam sağlandığı görülmektedir.

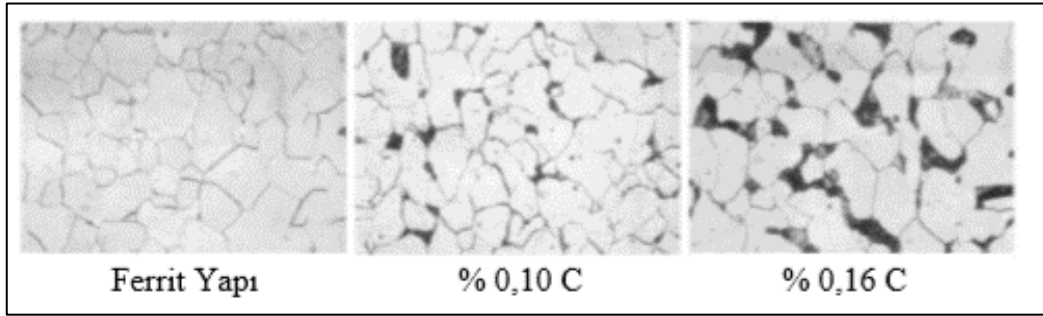
Makro yapılar da dikkat edilen diğer bir husus da ITAB'ın geniş bir alana yayılmış olmasıdır. Kaynak esnasında kaynak hızının yavaş olması, yüksek ısı girdisine ve dolayısı ile geniş bir ITAB ve kaynak metali oluşumuna neden olmuştur.

7.2.6. Mikroskobik Muayene Sonuçları

Makro yapı incelemede gördüğümüz yapıyı daha detaylı incelemek amacıyla ve kaynak bölgesinde meydana gelen değişiklikleri daha detaylı analiz edebilmek için parçalara mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Mikro yapı incelemek amacıyla tüm kalınlığındaki numuneler 1200 zımpara ile zımparalanıp çuha bezi ile tekrar parlatılıp % 2 Nital ile dağlanmıştır.

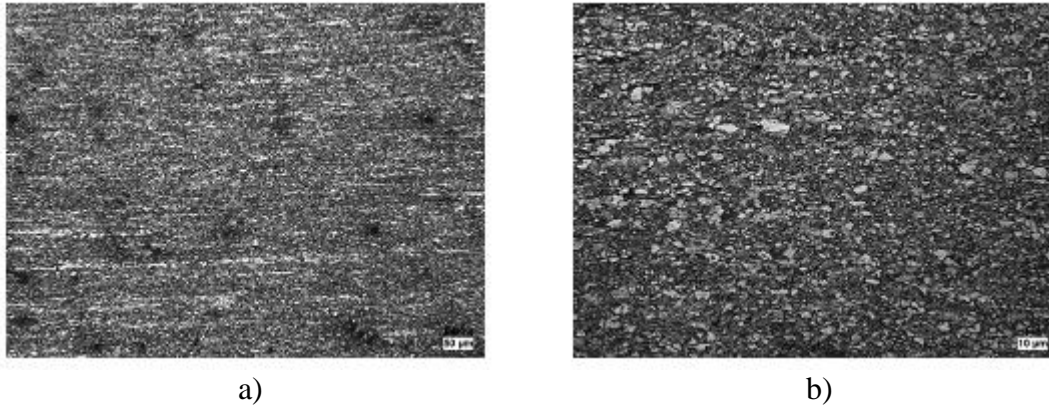
Numunelerin her birisi için esas metal, ITAB, ergime sınırı, kök pası, kaynak orta bölgesi olmak üzere 5 farklı bölgeden mikro yapı görüntüleri alınmıştır. Dağlanan parçaların mikro yapı görüntüleri Nikon Eclipse MA100 cihazı ile 100X ve 200X mercekler

kullanılarak alınmıştır. Dağlanan parçalar Şekil 7.20'de ki mikro yapılar ve çeşitli kaynaklardaki benzer görüntülerle kıyaslanmıştır.

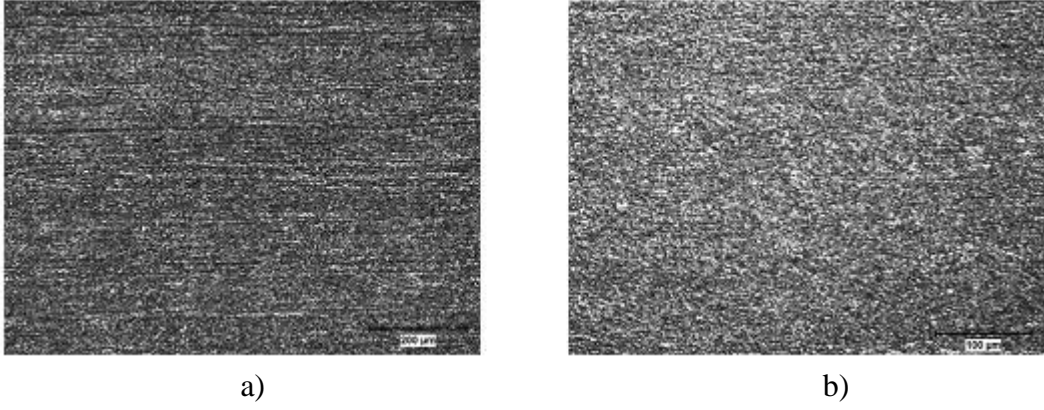


Şekil 7.20. Karbon oranlarına göre ferrit yapının mikro yapı görüntüsü [22].

Sıcaklığın içyapıyı ve dolayısıyla metalin özelliğini etkilediği bölgeye ITAB denir. Sınırları kaynak metali ile ana metalin birleştiği sınırdan başlayarak ana malzemenin içine doğru genişlemektedir. Çeliklerin kaynağında bu bölgede sıcaklık 1450°C ile 700°C arasında değişmektedir. Bu bölgede erişilen sıcaklığa bağlı olarak çeşitli içyapı ve özellik gösteren bölgeler mevcuttur [22].

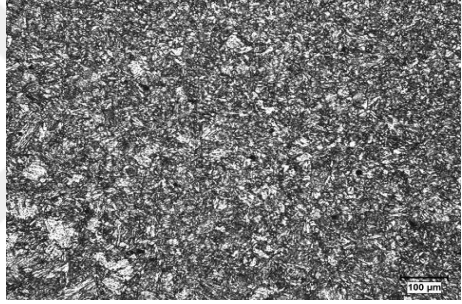
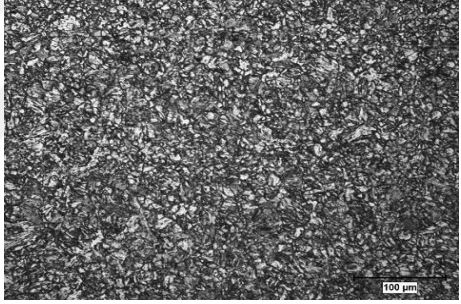
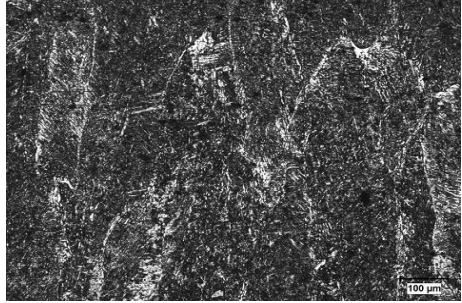
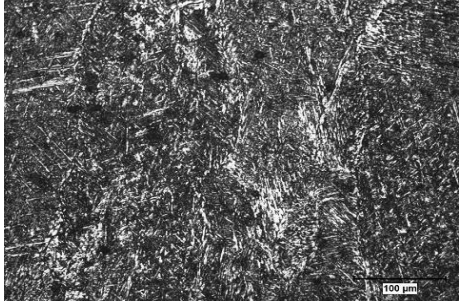
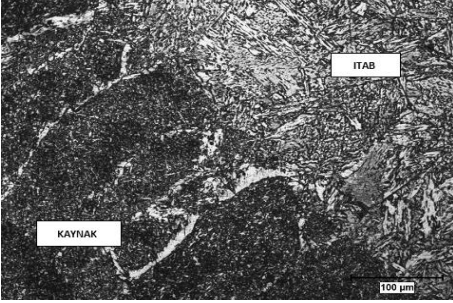


Şekil 7.21. X70 Kalite çeliklerin mikro yapısı a)100X büyütme b)200X büyütme

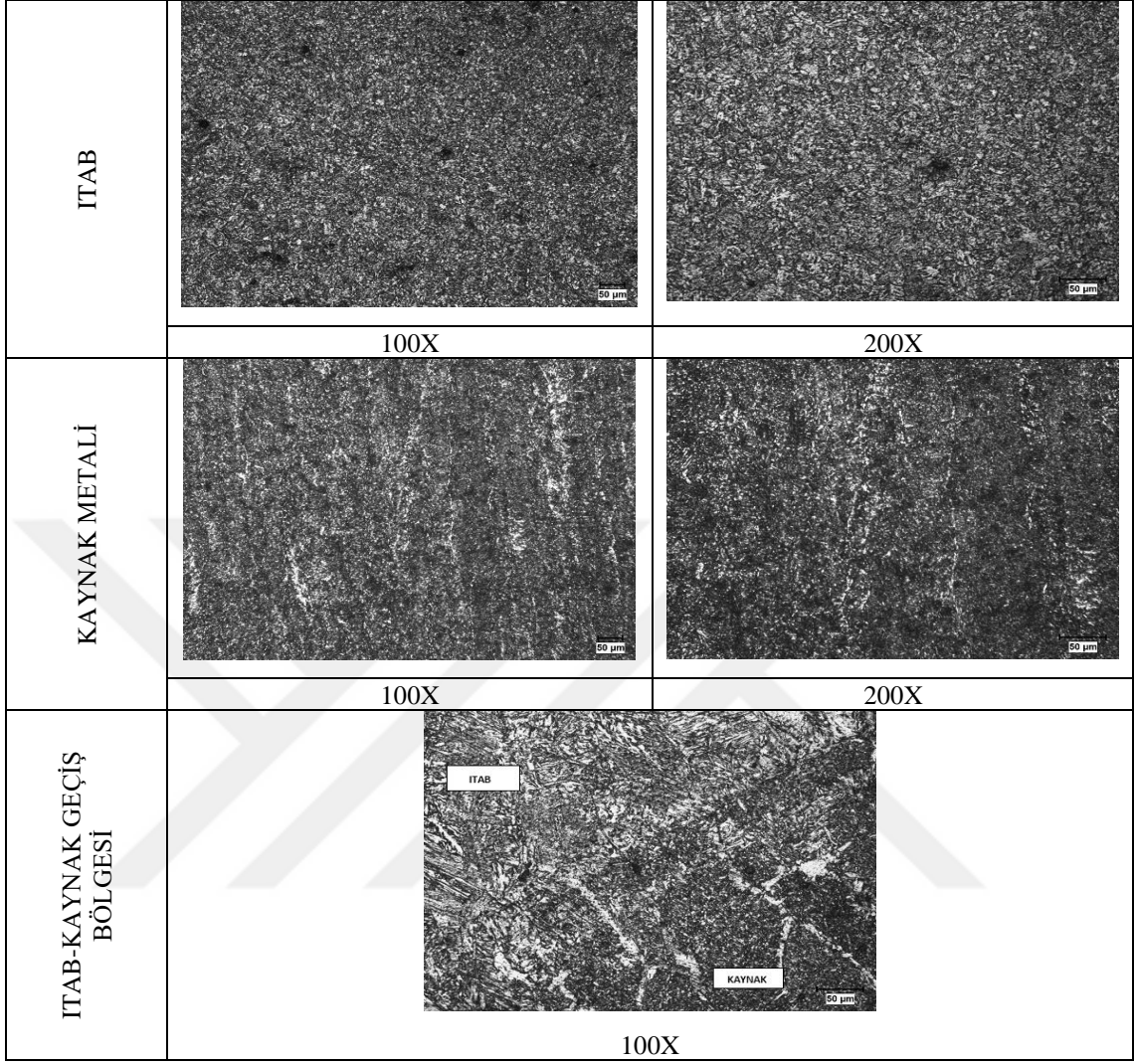


Şekil 7.22. X65 Kalite çeliklerin mikro yapısı a)100X büyütme b)200X büyütme.

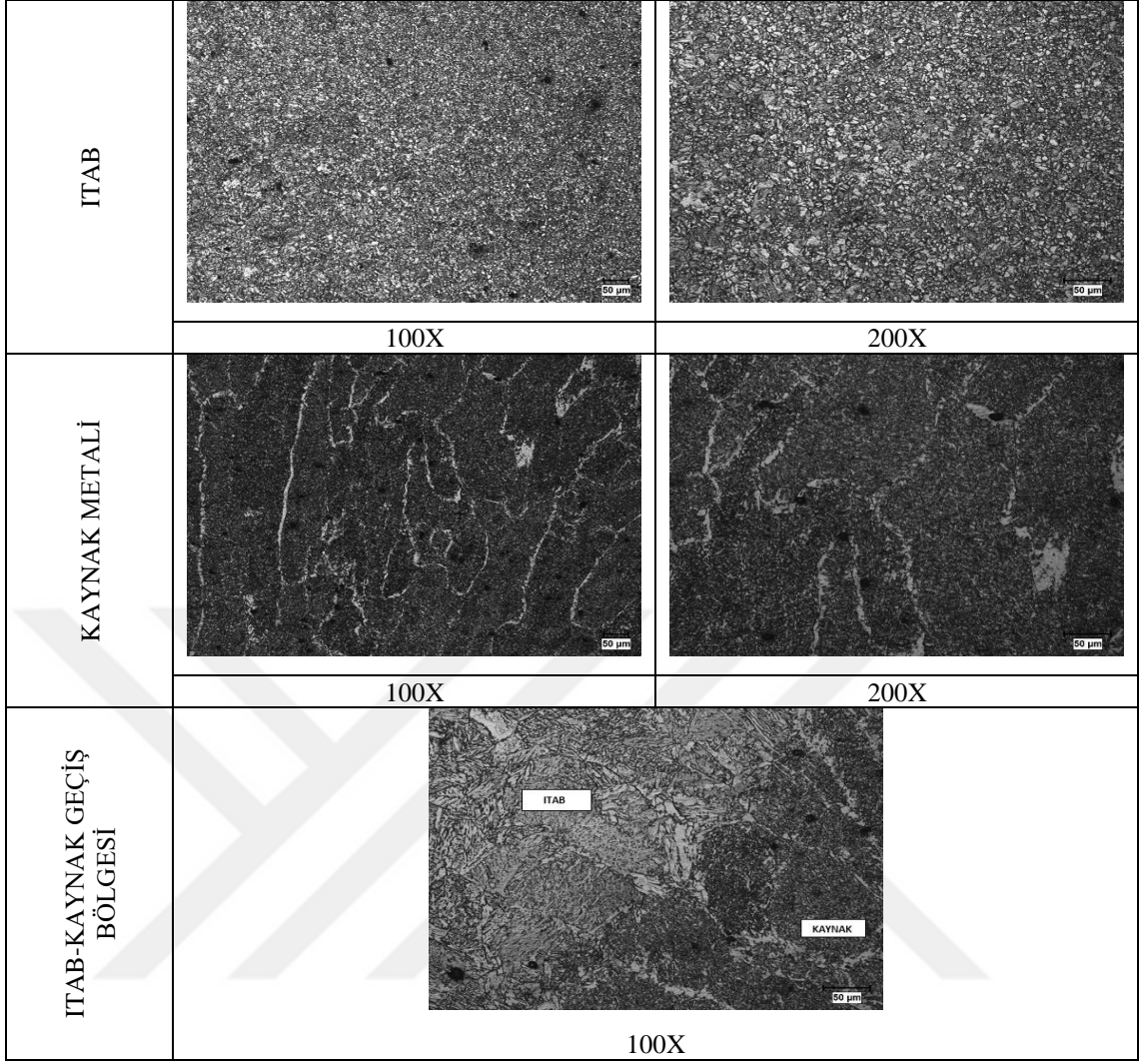
Ana malzeme görüntülerinde, YDDA çelik yapısında yoğun ferrit ve düşük miktarda perlit yapısı olduğu görülmektedir. Elde edilen görüntüler malzemenin literatürde de belirtildiği gibi ince tane yapısına sahip olduğunu doğrulamaktadır.

ITAB		
	100X	200X
KAYNAK METALİ		
	100X	200X
ITAB-KAYNAK GEÇİŞ BÖLGESİ		
	100X	

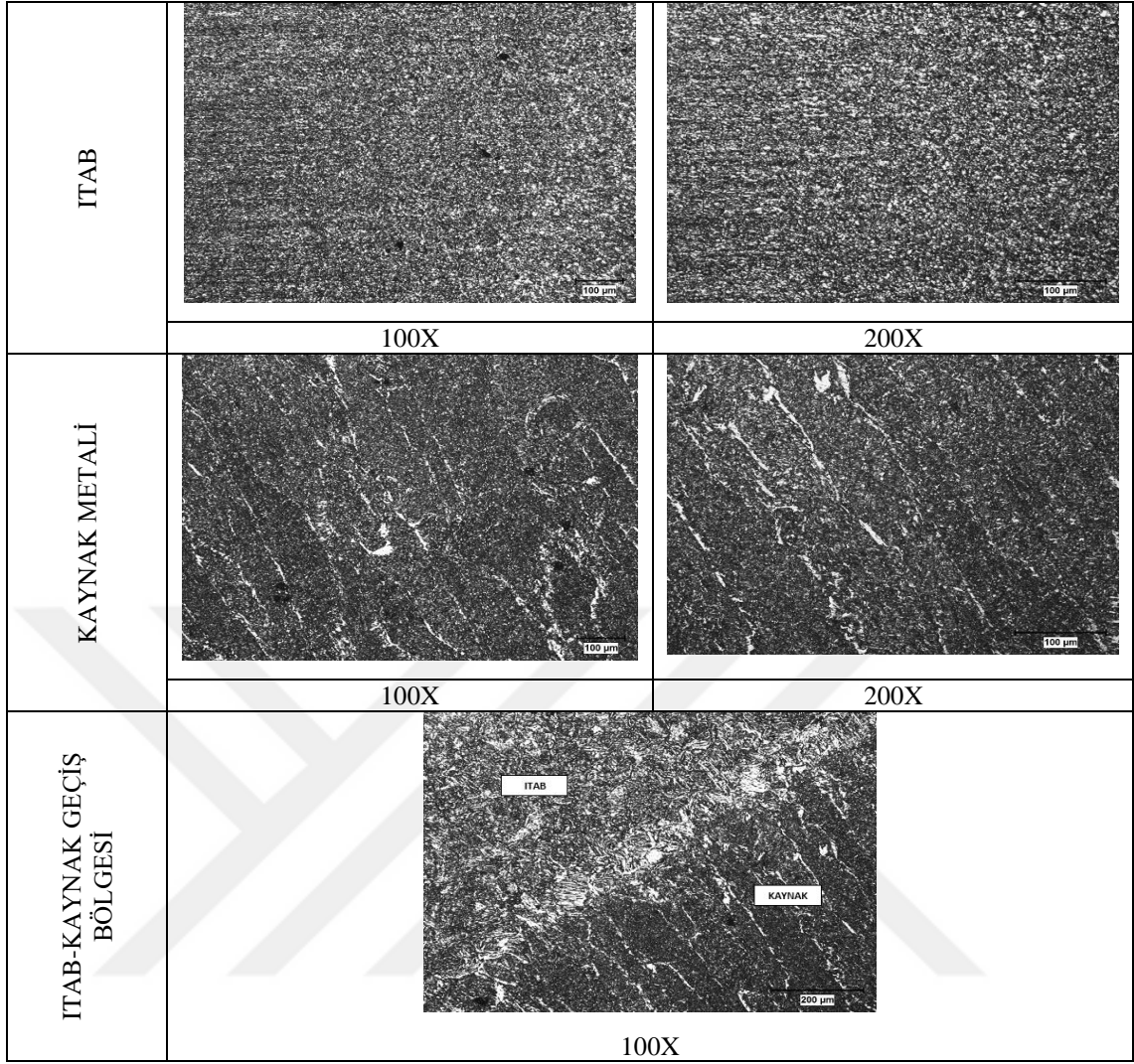
Şekil 7.23. PL-1 Mikro yapı görüntüleri.



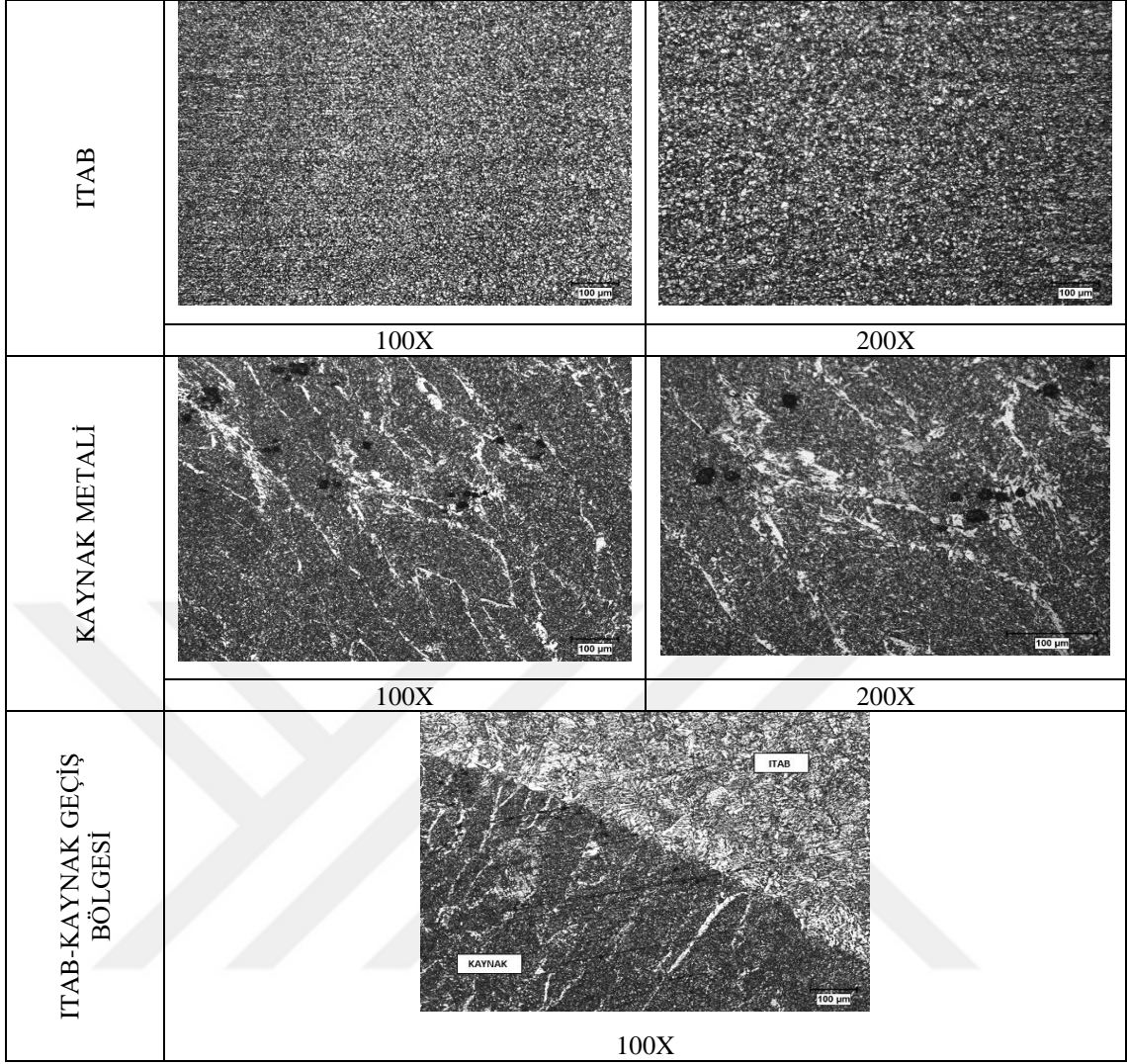
Şekil 7.24. PL-2 Mikro yapı görüntüleri.



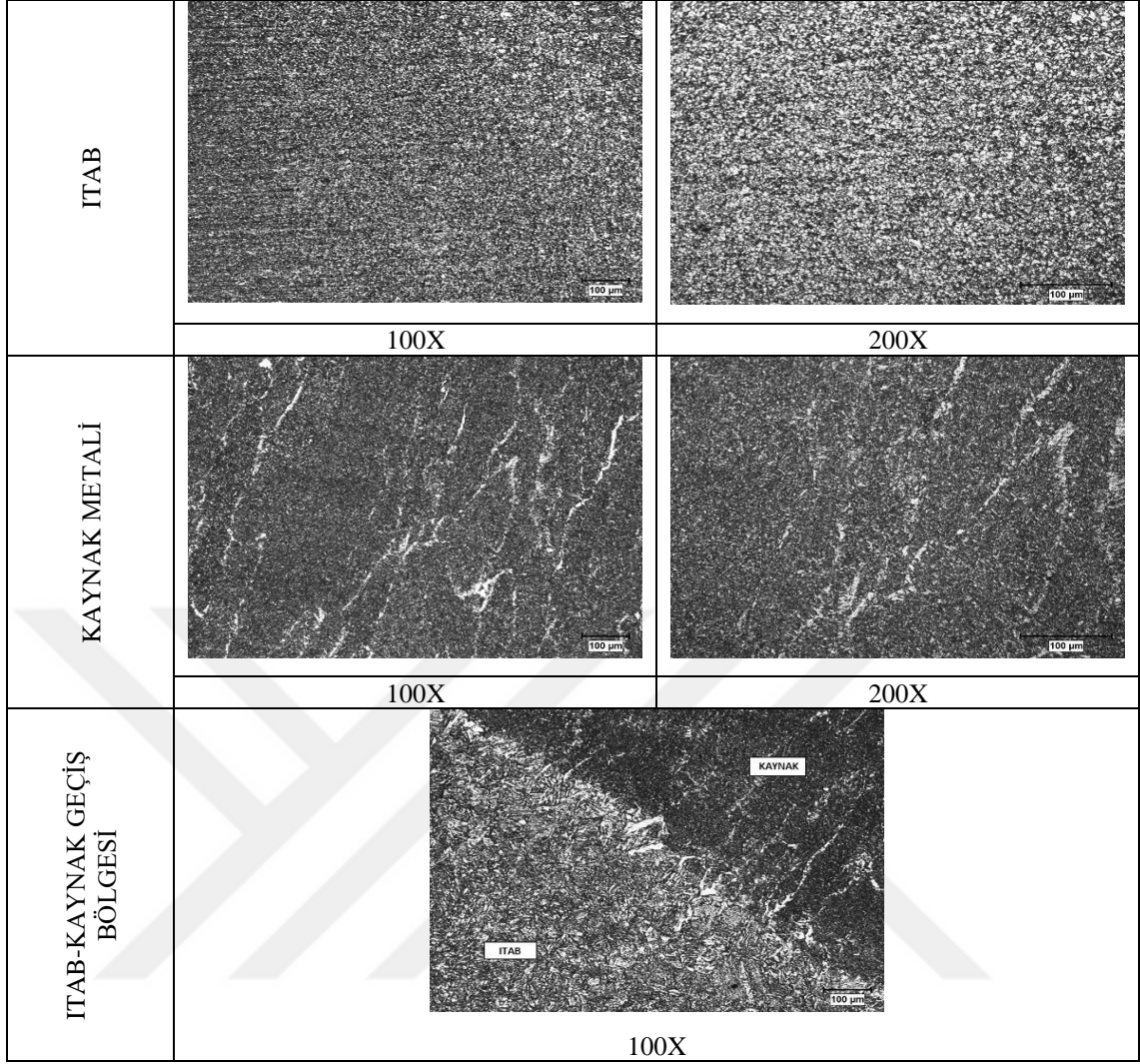
Şekil 7.25. PL-3 Mikro yapı görüntüleri.



Şekil 7.26. PL-4 Mikro yapı görüntüleri.



Şekil 7.27. PL-5 Mikro yapı görüntüleri.



Şekil 7.28. PL-6 Mikro yapı görüntüleri.

Şekil 7.23-7.28’de ITAB, kaynak metali ve ITAB–kaynak metali geçiş bölgelerinin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Elde edilen görüntüler değerlendirildiğinde, tüm görüntülerde genel olarak kaynak metalleri, ITAB’lar ve kaynak geçiş sınırına bitişik bölgelerin birbirlerine benzedikleri görülmüştür. Bunun yanında ITAB ve kaynak metali görüntülerinde kaynak metaline doğru incelen ferritik ve perlitik yapılar görülmektedir. Görüntülerdeki beyaz alanlar “ferrit”, siyah alanlarda ise ince taneli “perlitik” yapılarıdır. Ek olarak ITAB ve kaynak metalinden elde edilen mikro yapı fotoğraflarında değişik oranlarda ötektoid öncesi ferrit fazı, tane sınırlarında uzun veya geniş Widmanstatten yapıları ile tane içi Widmanstatten yapıları görülmektedir [34].

Mikro yapı görüntülerinde, genel olarak ITAB’da, tane boyutunun arttığı, kolonsal formda olduğu ve malzemeye doğru uzadığı görülmektedir. İlâveten yapılan araştırmalarda, yüksek ısı girdisinin soğumayı ve katılaşmayı yeterli derecede yavaşlattığı, bu durumun oluşan yapıların daha fazla kabalaşmasına neden olduğu

belirtilmiştir [34]. Ayrıca soğuma esnasında kaynak metalinde oluşan tanelerin kaynak metali merkezine doğru yönlendikleri görülmektedir.

7.2.7. Kırık Yüzeylerin Muayene Sonuçları

Farklı kök kaynak metotları kullanılarak birleştirilen deney numuneleri çentik darbe test sonrasında kırılan ITAB ve kaynak yüzeyleri 300X ve 1000X büyütme altında taramalı elektron mikroskopunda (TEM) incelenmiştir. Yapılan incelemeler ve elde edilen görüntüler iki farklı grupta ve her bir kaynaklı birleştirme için incelenmiştir.

16,87 mm kalınlığındaki numunelerin muayene yüzeyleri:

PL-1-KO : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

PL-1-ITAB : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık yüzeyi

PL-2-KO : Gaz Metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

PL-2-ITAB : Gaz Metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık yüzeyi

PL-3-KO : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

PL-3-ITAB : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık yüzeyi

6,7 mm kalınlığındaki numunelerin muayene yüzeyleri:

PL-4-KO : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

PL-4-ITAB : Örtülü elektrot ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık yüzeyi

PL-5-KO : Gaz Metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

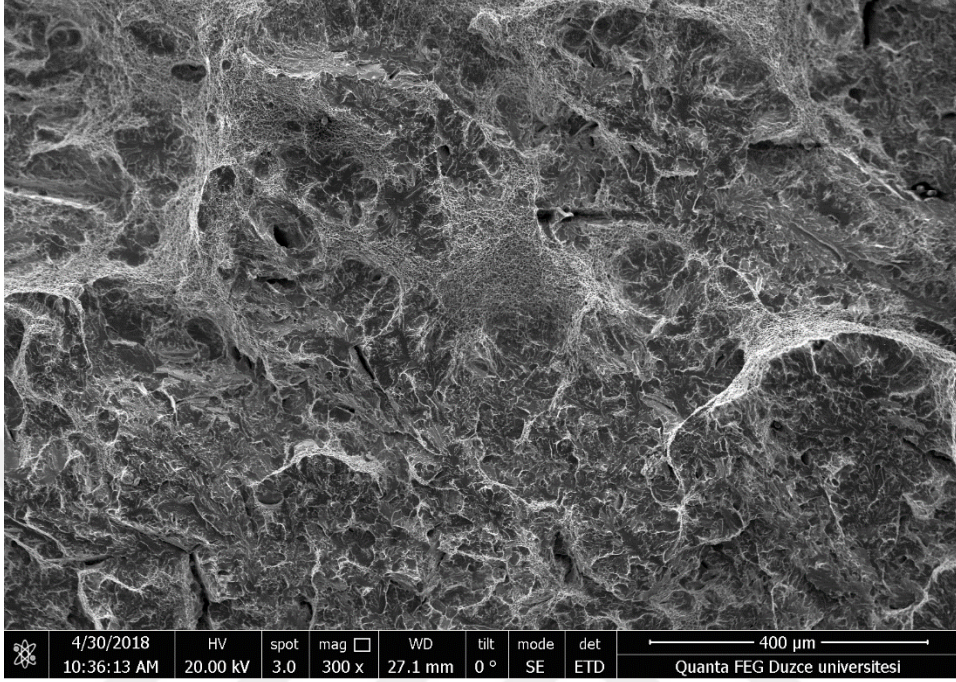
PL-5-ITAB : Gaz Metal ark kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık yüzeyi

PL-6-KO : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağının kaynak orta bölgesinin kırık yüzeyi

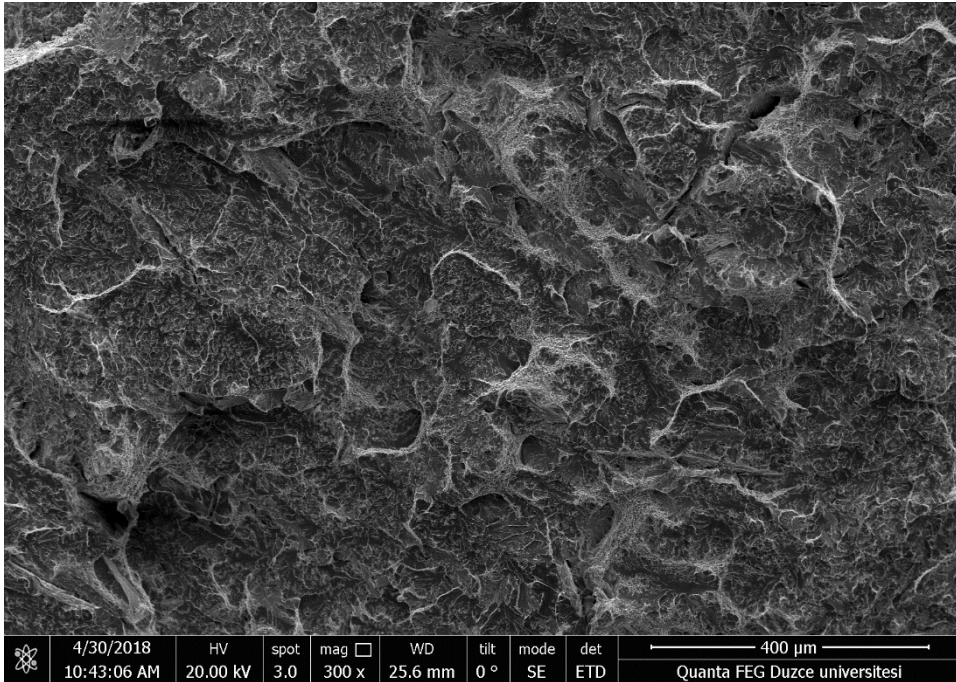
PL-6-ITAB : Tungsten inert gaz kaynağı üzeri tozaltı kaynağının ITAB bölgesinin kırık

yüzeyi

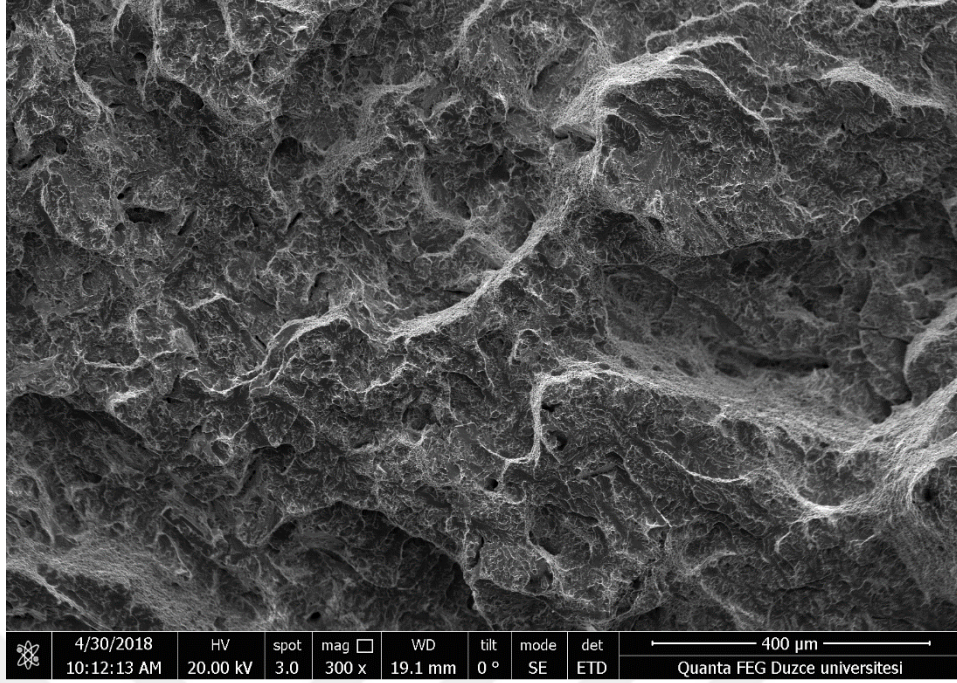
7.2.7.1. *PL-1&PL-2&PL-3 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi*



Şekil 7.29. PL-1-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



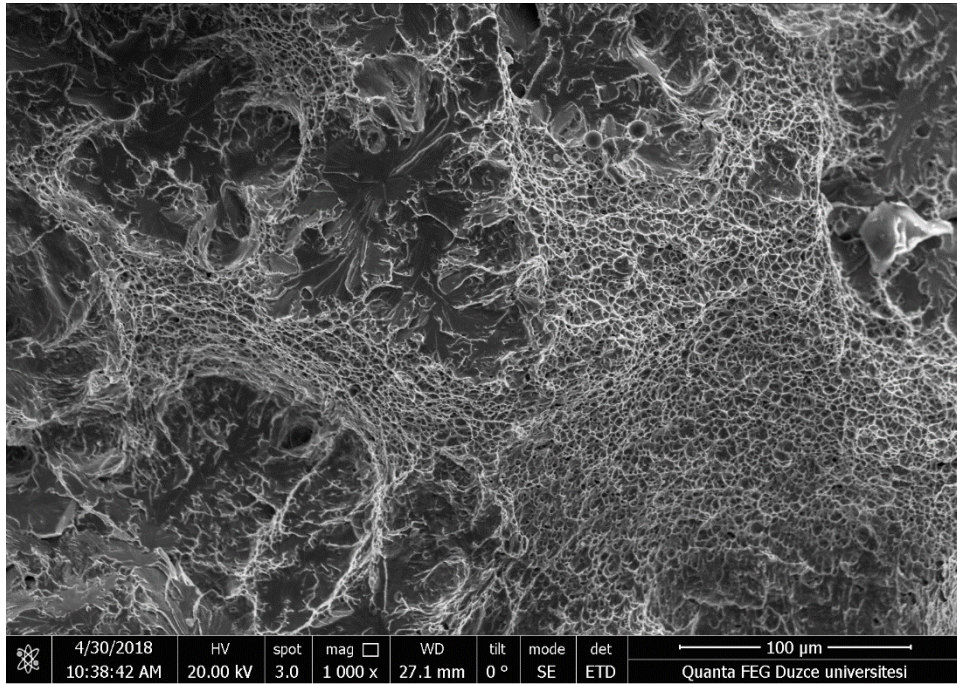
Şekil 7.30. PL-2-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



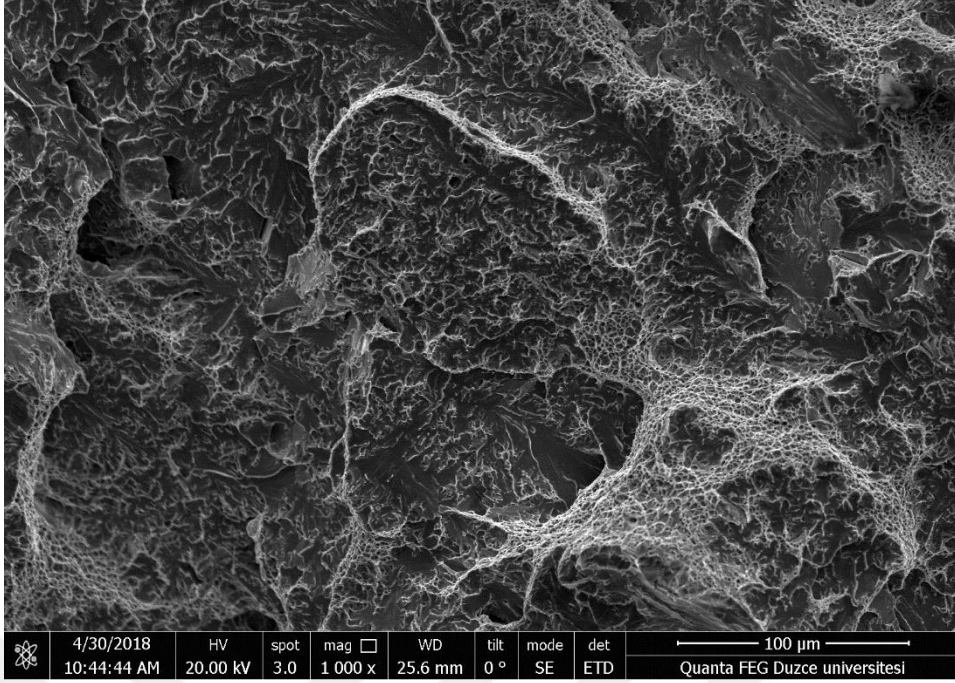
Şekil 7.31. PL-3-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.

Kaynak ortalarında kırık yüzeylerin pürüzlü, girintili ve çıkıntılı, beyaz ağımsı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.29’da görülen mikro boşluklar Şekil 7.30 ve Şekil 7.31’de görülen boşluklara oranla olduğu görülmektedir.

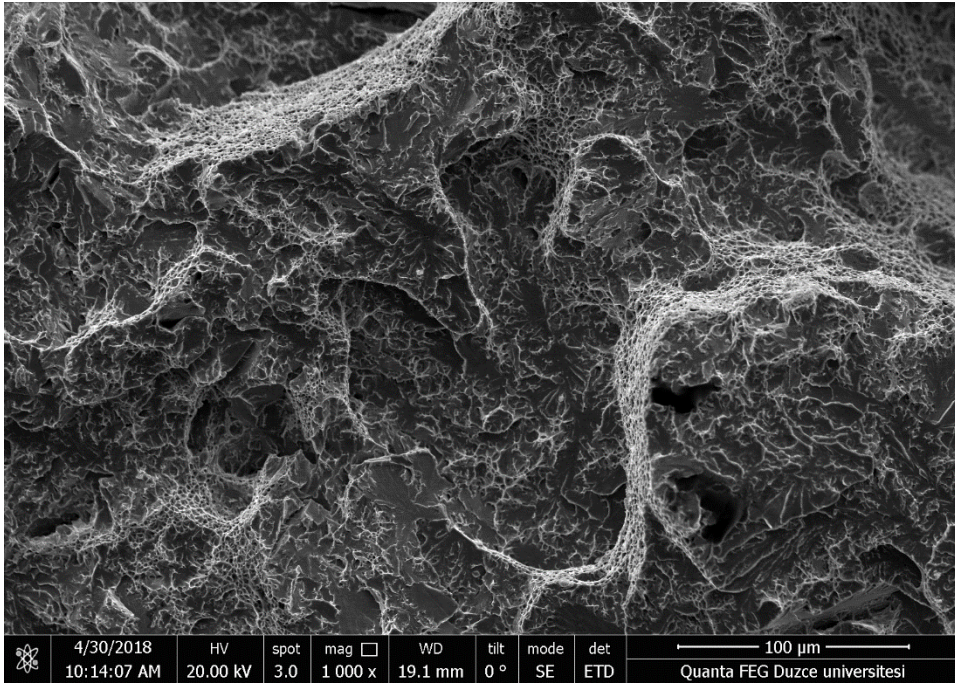
7.2.7.2. PL-1&PL-2&PL-3 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.32. PL-1-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



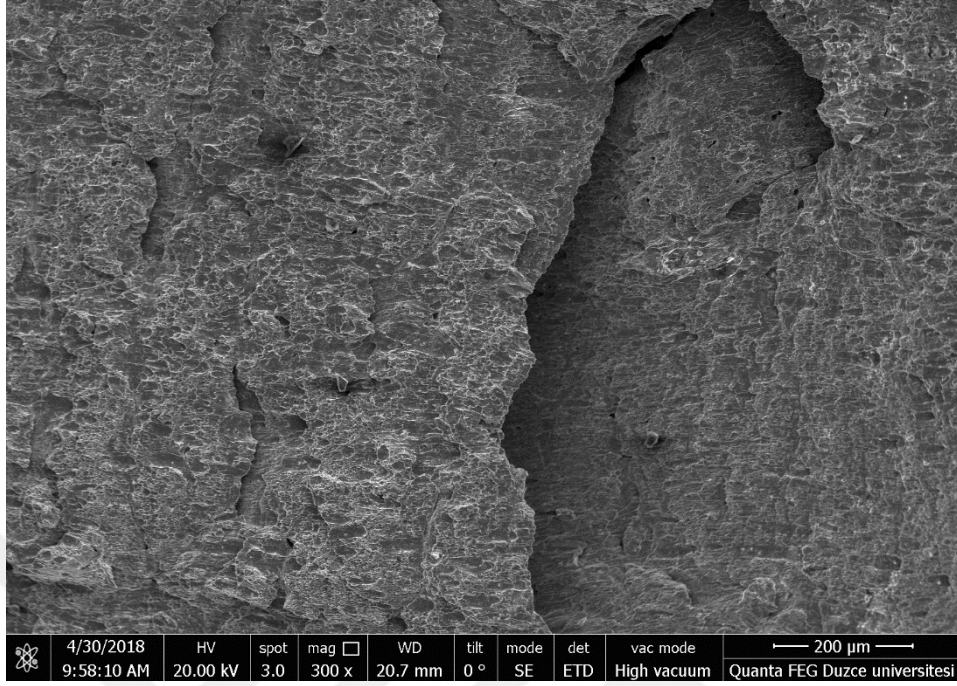
Şekil 7.33. PL-2-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



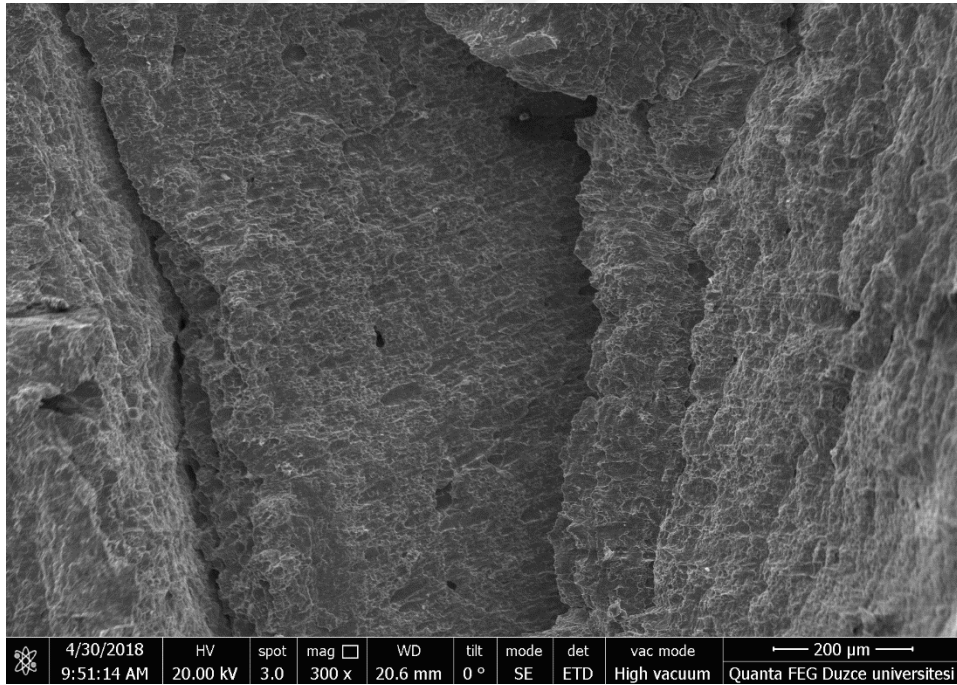
Şekil 7.34. PL-3-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.

Kaynak ortaları daha yakından incelendiğinde yüzeydeki pürüzlü yapı ve beyaz ağimsı görüntü daha belirgin olduğu, bölge bölge klivaj (kristalin yapı) ve dimple (lifli yapı) kırılma türlerinin olduğu görülmektedir. Şekil 7.31’de görülen dimple kırılma yüzeylerinin Şekil 7.32 ve Şekil 7.33’de görülen kırılma yüzeylerinden daha fazla olduğu görülmektedir.

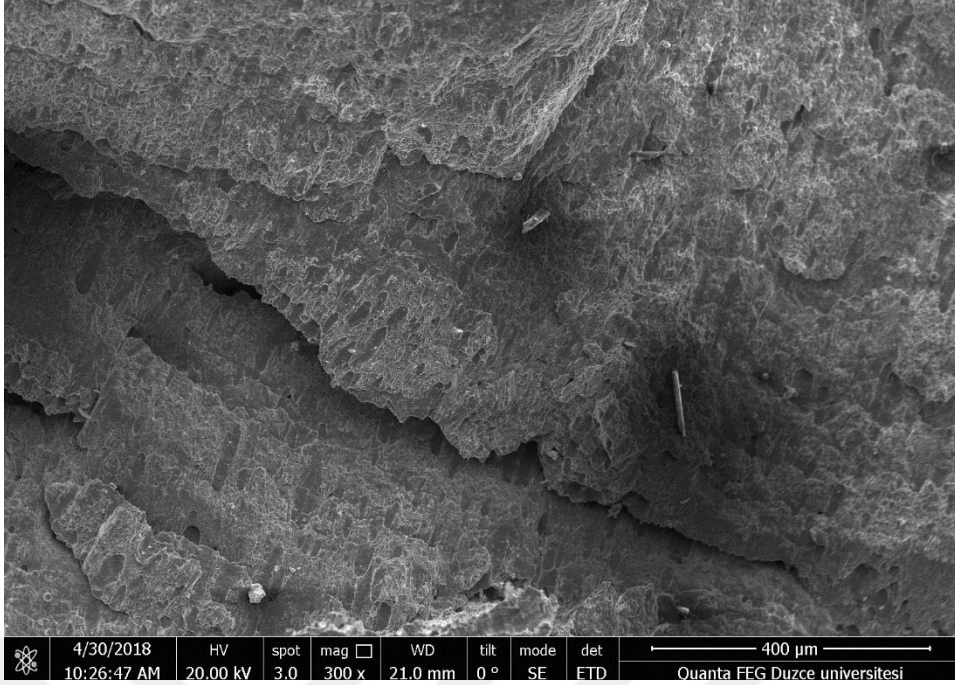
7.2.7.3. PL-1&PL-2&PL-3 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.35. PL-1-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



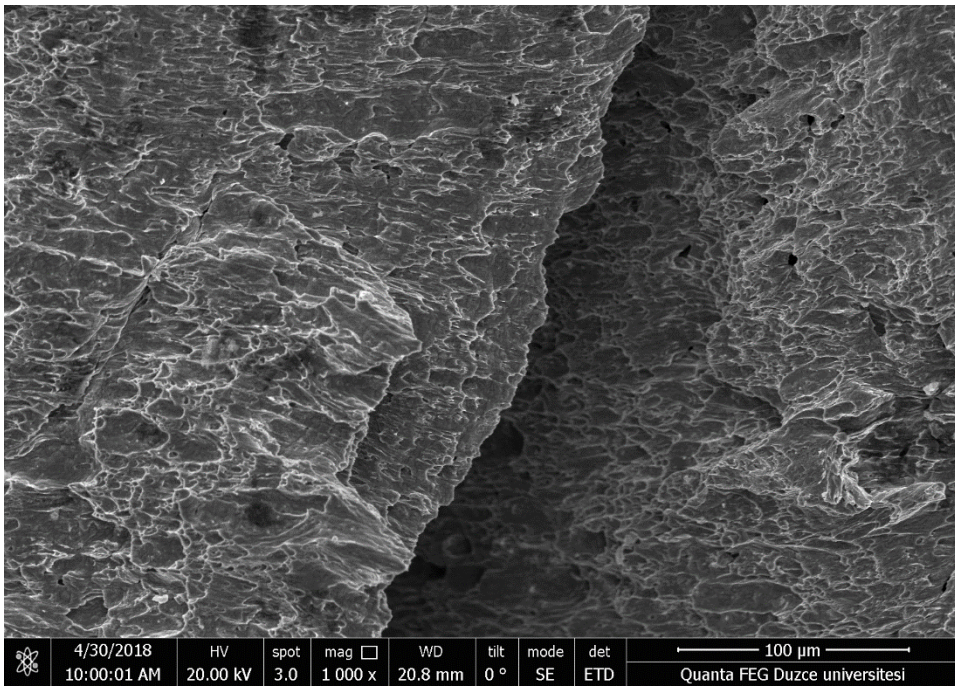
Şekil 7.36. PL-2-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



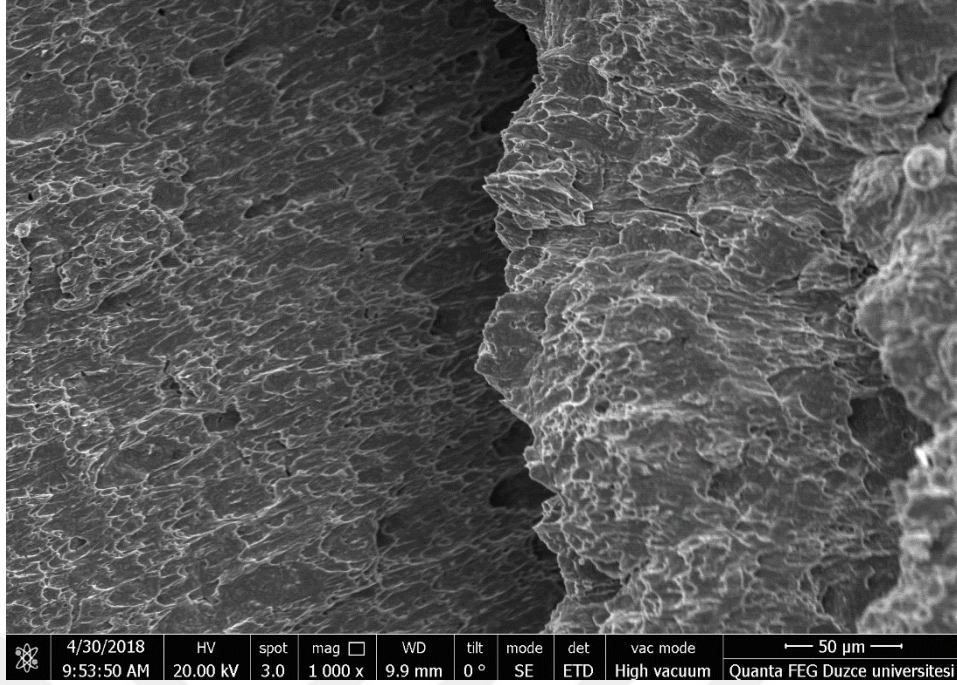
Şekil 7.37. PL-3-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.

ITAB bölgeleri incelendiğinde her üç görüntüde de kırık yüzey katmanları görülmektedir. Şekil 7.35, Şekil 7.36 ve Şekil 7.37’de kırık yüzeylerde kırılmanın belli bir yöne doğru olduğu görülmektedir.

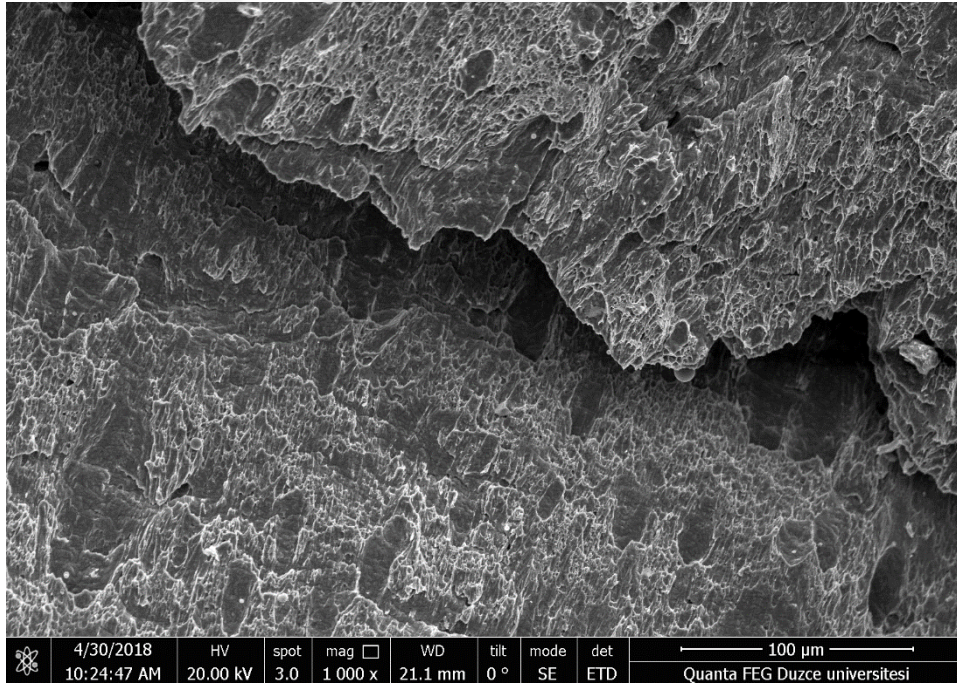
7.2.7.4. PL-1&PL-2&PL-3’ların ITAB Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.38. PL-1-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



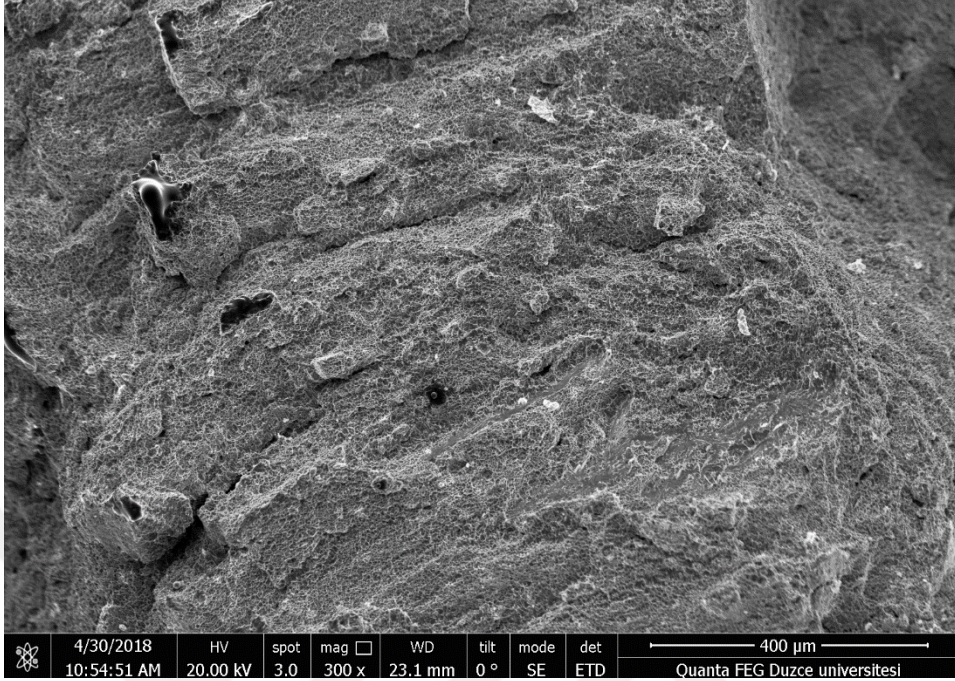
Şekil 7.39. PL-2-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



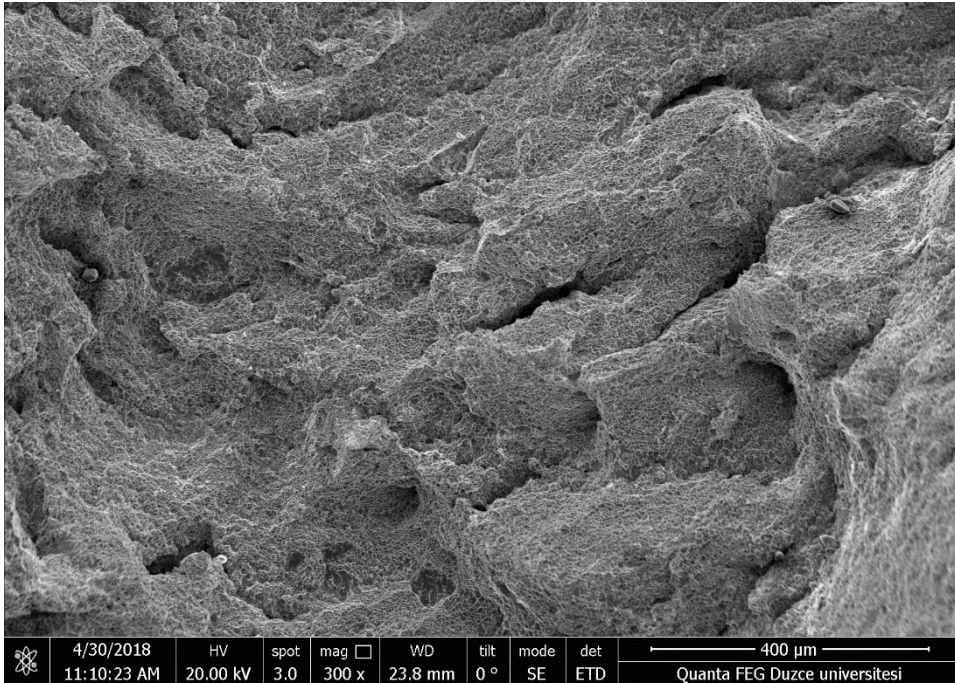
Şekil 7.40. PL-3-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.

ITAB bölgeleri daha yakından incelendiğinde her üç görüntüde çöküntüler olduğu, kırılmanın belli bir yönde olduğu ve yüzeyin girintili, çıkıntılı olduğu görülmektedir. Şekil 7.38, Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'daki ITAB kırık yüzey görüntülerinin birbirine benzediği görülmüştür.

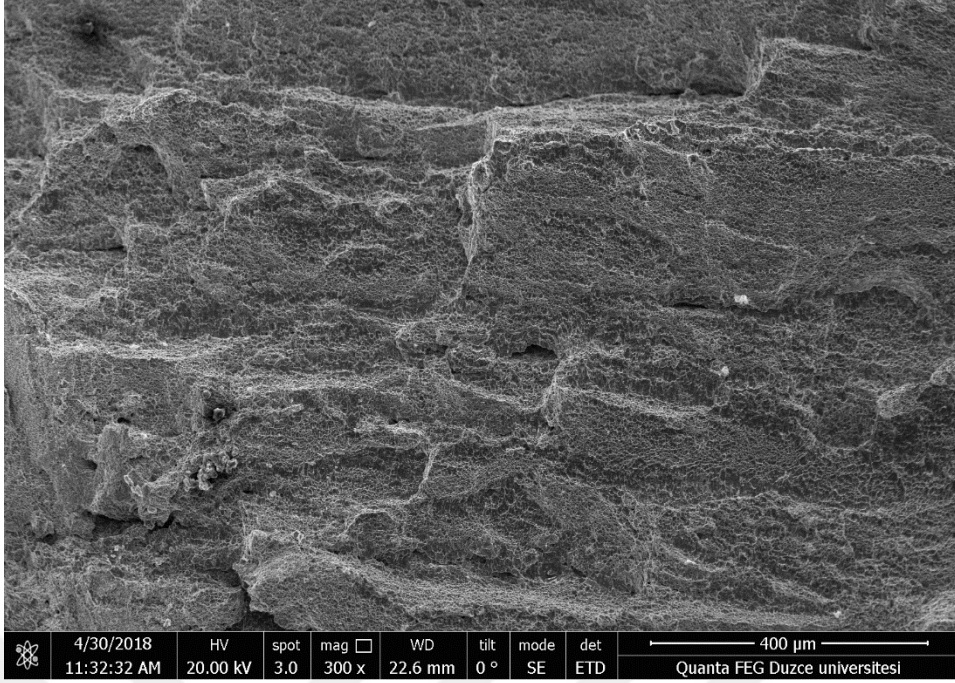
7.2.7.5. PL-4&PL-5&PL-6 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.41. PL-4-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



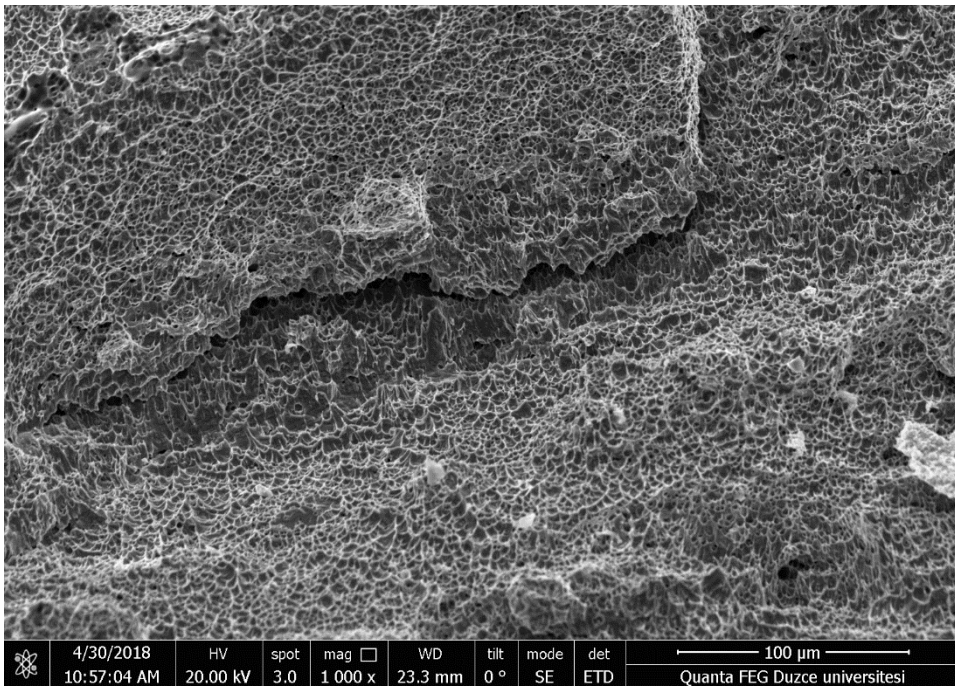
Şekil 7.42. PL-5-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



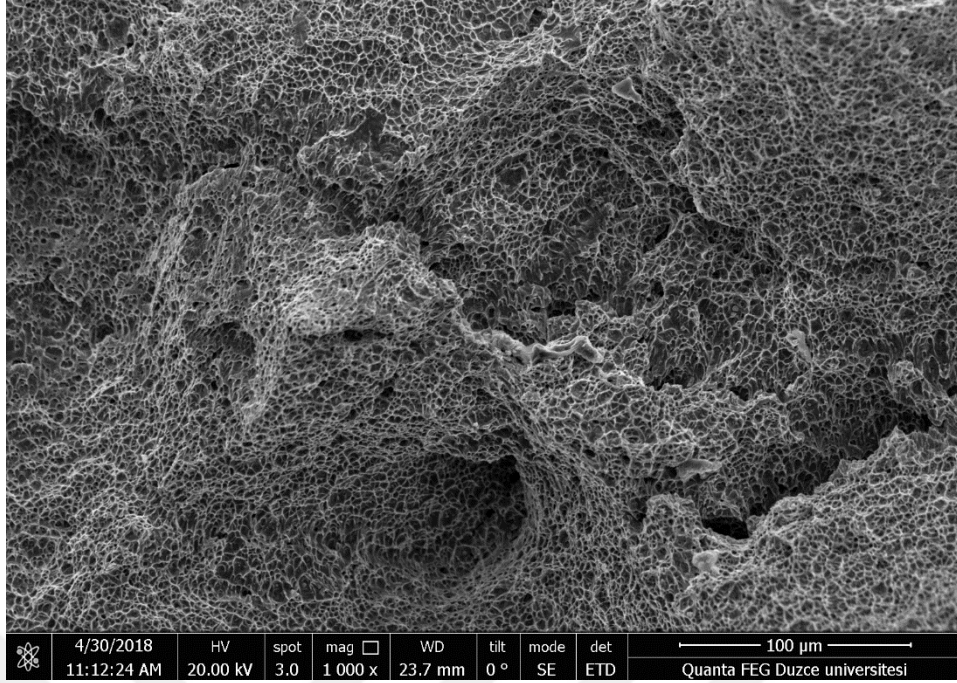
Şekil 7.43. PL-6-KO numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.

Kaynak ortalarında yüzeylerin pürüzlü, girinti, çıkıntılı bir yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 7.42'deki görüntüde daha çok girintili, çıkıntılı bir yüzey olduğundan Şekil 7.41 ve Şekil 7.43'deki görüntülere göre daha sünek bir kırılma olduğu görülmektedir.

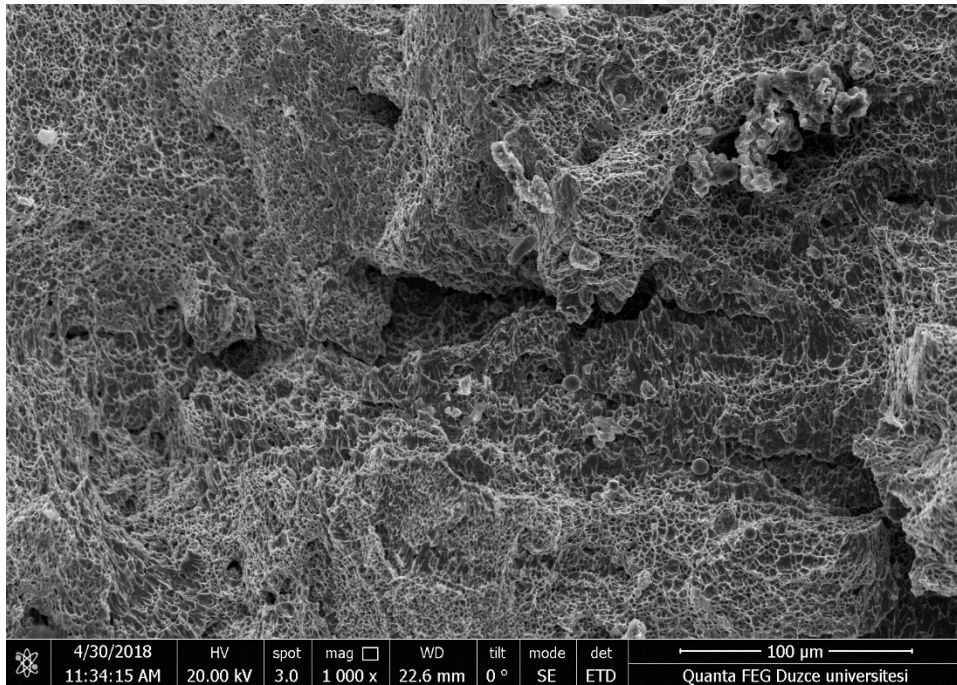
7.2.7.6. PL-4&PL-5&PL-6 ların Kaynak Ortası Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.44. PL-4-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



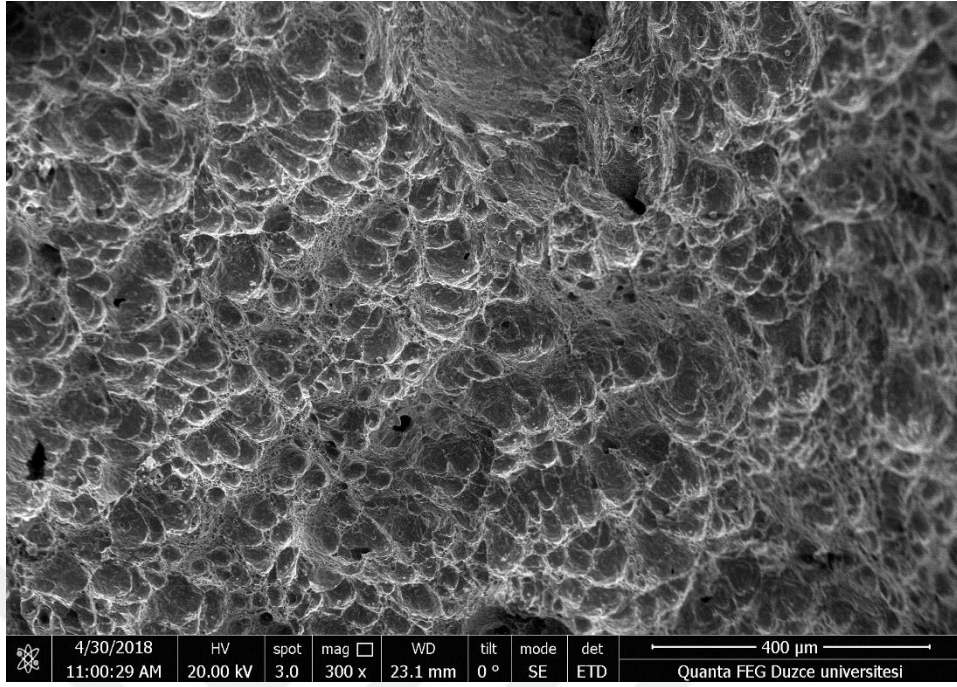
Şekil 7.45. PL-5-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



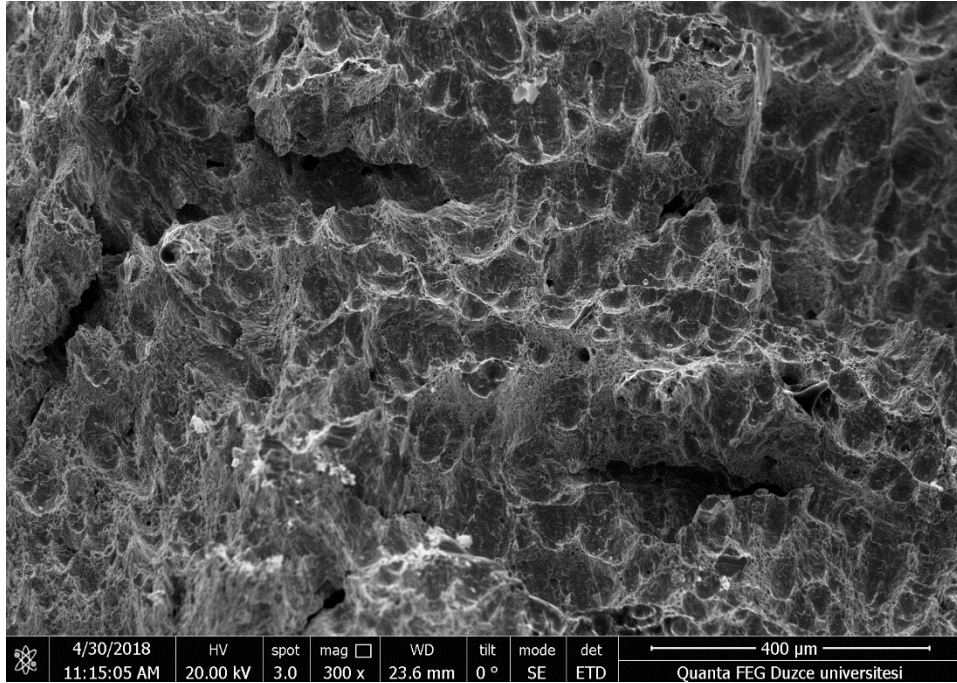
Şekil 7.46. PL-6-KO numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.

Kaynak ortaları daha yakından incelendiğinde her üç yüzeyinde pürüzlü, girinti ve çıkıntılı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 7.44, Şekil 7.45 ve Şekil 7.46'da görülen yüzeylerde dimple kırılma yüzeyleri daha belirgin olduğu görülmektedir.

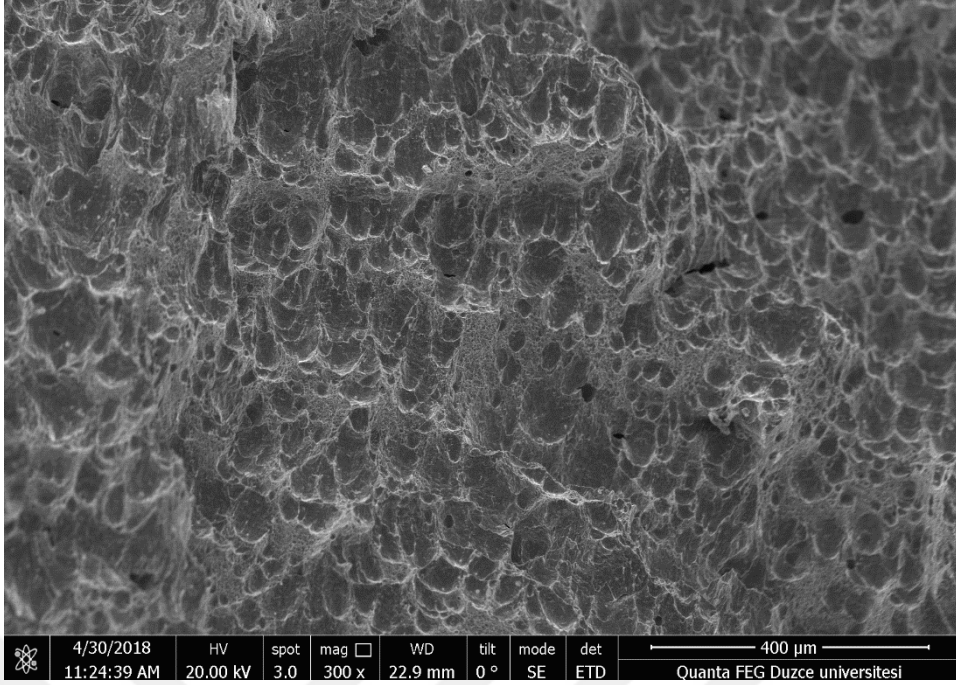
7.2.7.7. PL-4&PL-5&PL-6 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 300X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.47. PL-4-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



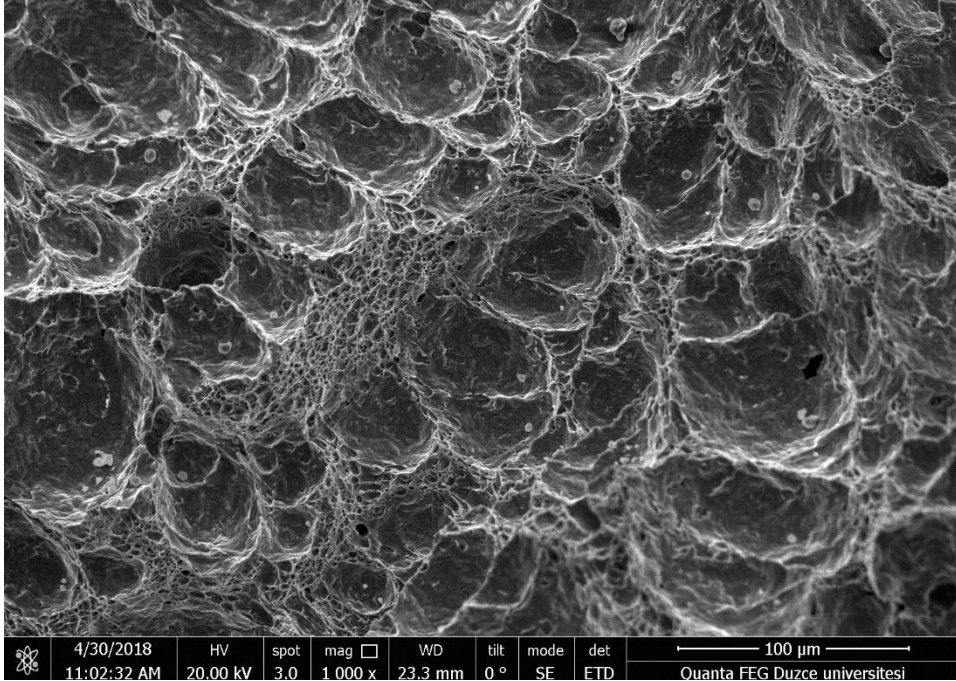
Şekil 7.48. PL-5-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.



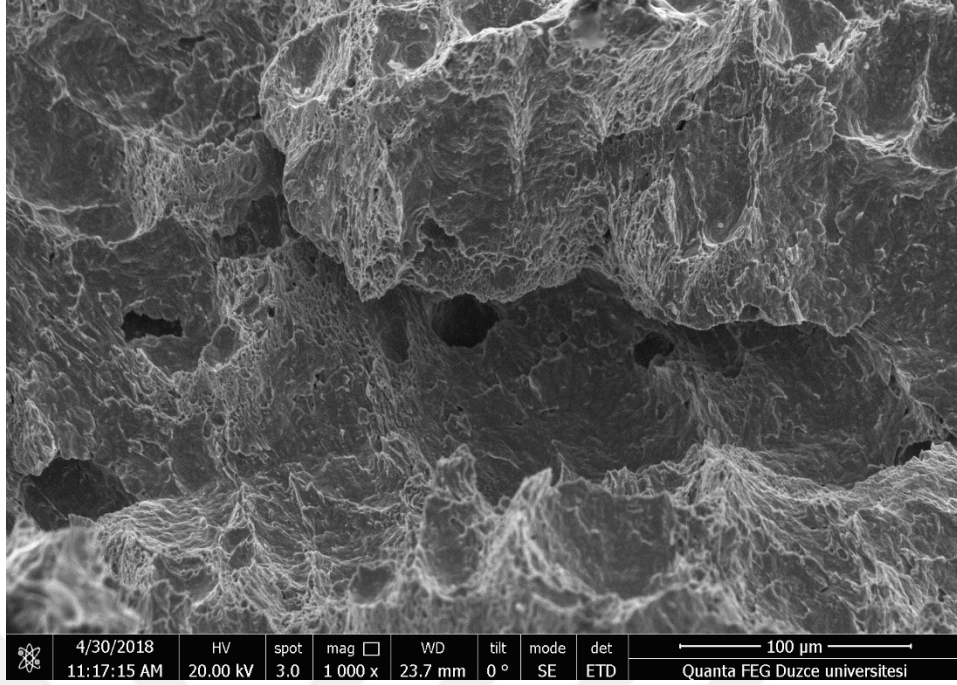
Şekil 7.49. PL-6-ITAB numunesinin 300X kırık yüzey görüntüsü.

ITAB bölgeleri incelendiğinde Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49’da yüzeylerde çok miktarda boşlukların ve dimple’ların olduğu görülmektedir.

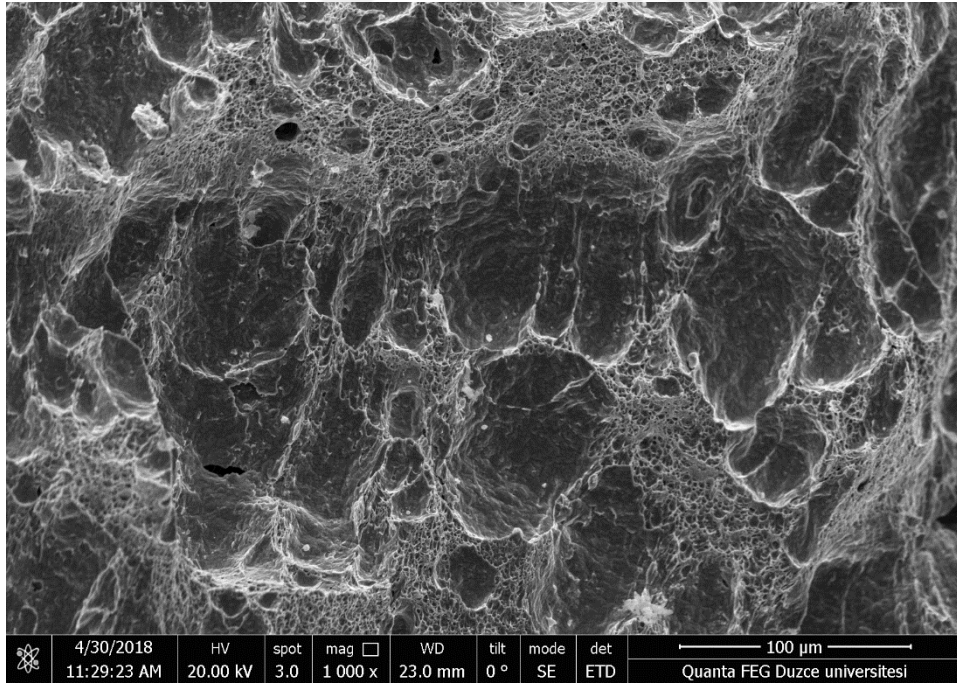
7.2.7.8. PL-4&PL-5&PL-6 ların ITAB Kırık Yüzeyinin 1000X Büyütme Altında Muayenesi



Şekil 7.50. PL-4-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



Şekil 7.51. PL-5-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.



Şekil 7.52. PL-6-ITAB numunesinin 1000X kırık yüzey görüntüsü.

ITAB bölgeleri daha yakından incelendiğinde her üç görüntüde de dimple'ların daha belirgin olduğu görülmektedir. Yüzeylerdeki iğnemsî ve ağ şeklindeki yapıların sünek kırılmaya neden olduğu görülmektedir. Görüntüler karşılaştırıldığında Şekil 7.50 ve Şekil 7.52'deki yüzey görüntülerinin Şekil 7.51'deki yüzey görüntüsünden daha fazla iğnemsî, ağ şeklinde olduğu görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada kaynak çeşitleri ve kaynakların tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri tanıttıldıktan sonra API çeliklerinin tozaltı kaynağında farklı kök paso uygulamasının kaynaklanabilirliğe ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Parça kaynak işlemlerinde değişken olarak farklı kalınlıklar, farklı kaliteler ve farklı kök kaynak teknikleri kullanılmıştır. Kaynak yapılan plakaların boru hatlarında kullanılan yüksek mukavemetli 6,7 mm kalınlığındaki X65 kalite çelik ve 16,87 mm kalınlığındaki X70 kalite çeliklerin farklı kök kaynaklarının kaynaklanabilirliğe ve mukavemet özelliklerine etkilerinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Tüm deney plakalarının tahribatsız muayenelerinde herhangi bir yüzeysel veya hacimsel hataya rastlanmamıştır.
- Çekme ve çentik deneyleri kök kaynakları TIG kaynak metodu ile yapılan PL-3 ve PL-6 plakalarının diğer plakalara göre % 10 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- Sertlik sonuçları incelendiğinde, sonuçların birbirlerine yakın oldukları ve en sert bölgenin kaynak bölgesinde 290 HV5 olduğu görülmüştür.
- Yan bükme test sonuçları tüm numunelerde uygun olduğu herhangi bir süreksizlik olmadığı görülmüştür.
- Makro deney numuneleri incelendiğinde herhangi bir nüfuziyetsizlik, gözenek, çatlak, curuf kalıntısı vb. hata türlerine rastlanmamıştır.
- Mikro yapı görüntülerinde, genel olarak ITAB'da, tane boyutunun arttığı, kolonsal formda olduğu görülmektedir. Malzemelerin ise ince taneli, ferlit ve perlitli yapıya sahip olduğu görülmüştür.
- Kırık yüzey analizlerinde kırılma yüzeyleri birbiriyle kıyaslandığında tüm yüzeylerde klivaj ve dimple kırılma türlerinin olduğu görülmüştür.
- Bu sonuçlara göre seçilen numune, kaynak parametreleri ve sarf malzemelerin kaynaklanabilirlik ve mekanik mukavemet açısından uygun olduğunu göstermektedir.

8.2. ÖNERİLER

Seçilen kök kaynak metotları özellikle gaz borusu imalatlarında iki borunun alın altına birleştirmelerinde önem arz etmektedir.

Bu neden ile yapılan bu çalışmanın bir adım ileri götürülerek boru formunda ve robotik kaynak metotları kullanılarak incelenmesi önerilmektedir. Önerilen bu çalışmada;

- Deneylerde kullanılan malzeme tipinin sabit tutularak farklı kalınlıkların deney sonuçlarına etkisi üzerine bir araştırma yapılabilir.
- Kaynak esnasında oluşan ısı girdileri belli bir aralıkta tutularak kaynak mukavemet değişimleri araştırılabilir.
- Farklı kök kaynaklarının -10°C , -20°C ve -30°C derecelerde göstereceği mukavemetler karşılaştırılabilir.

9. KAYNAKLAR

- [1] M. Gel ve S. Apay “API Çeliklerinin Tozaltı Kaynağında Farklı Kök Kaynak Uygulamalarının Mekanik Özelliklere Etkisi” 4. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi, Antalya, Türkiye, 2018, ss. 1937-1943.
- [2] Anonim, (2018, 5 Kasım). *Demir ve Çelik Üretiminin Kısa bir Tarihçesi* [Online]. Erişim : <https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/86/demir-ve- celik-uretiminin-kisa-bir-tarihcesi.html>.
- [3] S. Karagöz, “Malzeme Bilgisi” *Ders Notları*, Aydın, 2008.
- [4] R. Fıaz. (2011, April 26). *Imtisal-E-Noor* [Online]. Erişim: https://www.academia.edu/5560166/classification_of_steel.
- [5] Anonim, (2019, 12 Ocak). *Çeliklerin Genel Olarak Sınıflandırılması* [Online]. Erişim: <http://madenturk.org/forum/index.php?topic=702.0;wap2>
- [6] Ataçelik Döküm. (2018, 10 Aralık). *Çeliklerin Genel Olarak Sınıflandırılması* [Online]. Erişim: http://www.atacelik.com/celik_dokum_bilgisi.html
- [7] E. Tekin, “API standardı petrol ve doğalgaz boruları çeliklerine genel bir bakış” *Metalurji*, c. 162, ss. 23, 2012.
- [8] Z. Tas, “Examination of Mechanical Properties and Weld Zone of X70 Pipe Steel After Welding,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 6, sayı. 07, ss. 148–152, 2017.
- [9] E. Yaylacı. (2018, 20 Kasım). *Otomotiv Sanayinde Kullanılan Mikroalaşımli Çeliklerin Üretim Yöntemleri* [Online]. Erişim: <http://eyupyaylaci.com/otomotiv-sanayinde-kullanilan-mikroalasimli-celiklerin-uretim-yontemleri/>.
- [10] H. Çimenoğlu, *Kaynak Metalurjisi, Ders Notları*, İstanbul, 2009.
- [11] Y. S. Tama. (2018, 5 Kasım). *Çelik Yapı Uygulamalarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri, Üstünlükleri ve Sakıncalı Yönleri* [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/17588166-Celik-yapi-uygulamalarinda-kullanilan-kaynak-yontemleri-ustunlukleri-ve-sakincali-yonleri.html>.
- [12] E. Bal, “Doğal gaz boru hatları için yüksek gerilimli kaynak ana malzemesi teknolojisinin geliştirilmesi (BORKAY,)”Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [13] S. Anık, K. Tülbentçi, "Tozaltı kaynak tekniği", *Kaynak Teknolojisi II*, 1.baskı, İstanbul, Türkiye: Gedik Eğitim Vakfı, 2013, böl. 2, ss.2.
- [14] H.Ada, “Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.

- [15] B. Dündar, "Tozaltı kaynak yönteminde altlık olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin kaynak yeterliliklerinin ve maliyetlerinin karşılaştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [16] E. Kütahyalı, "Tozaltı Kaynak Yöntemi", *Kaynak Bilimi*, İstanbul, Türkiye: Oerlikon Yayını, 1988, sayı 2, ss 1–12.
- [17] S. Anık, K. Tülbentçi, "Elektrik Ark Kaynağı", *Kaynak Teknolojisi I*, 1.baskı, İstanbul, Türkiye: Gedik Eğitim Vakfı, 2013, böl. 1, ss. 2-3.
- [18] H. F. Çapın, "S235 JR alaşımlı çelik boruların dik pozisyonda orbital kaynak cihazı ile birleştirilmesi ve uygulamanın optimizasyonu," Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [19] S. Anık, M. Vural, "Gazaltı Ark Kaynak Yöntemleri," *Gazaltı ark kaynağı (TIG • MIG • MAG)*, 1.baskı, İstanbul, Türkiye: Gedik Eğitim Vakfı, 2010, böl. 3, ss.9-10.
- [20] E. Gündoğdu İş, B. Çiçek, E. Gümüş, E. Yılmaz, P. Topuz "Düşük karbonlu çeliklerde elektrik ark ve mag kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi" 2. *Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2015, ss.6.
- [21] H. Kurt, "Yüksek mukavemetli yapı çeliklerinde kaynaklı bölgenin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [22] İ. Kalkan, "Yüksek mukavemetli çeliklerde çok pasolu kaynağının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2018.
- [23] MEB, "Metal Teknolojisi," *TIG Kaynağı*, 1.baskı, Ankara, Türkiye: MEGEP Yayınları, 2011, ss. 10.
- [24] A. F. Akgün, A. Yıldırım, N. Baş, Tahribatsız Testlerde Malzeme Süreksizlikleri, *Ders Notları*, İstanbul, 1991.
- [25] M. Omar, "*Nondestructive Testing Methods and New Applications*," 1th edition, Rijeka, Hırvatistan: InTech, 2012.
- [26] T.Yağcı, A. Çiğdem, H.Durmuş, "Geçmişten Günümüze Tahribatsız Muayene Yöntemleri," *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, c. 3, sayı 27, ss. 1-50, 2018.
- [27] P. E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing*, 2nd ed., New Jersey, America: John Wiley & Sons, 2005.
- [28] A. E. İleri, "Demiryolu Araçları Bojilerinde Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Karşılaştırılması," Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmagazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2015.
- [29] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 2nd ed., New York, America: McGraw-Hill, 2003, ss. 301-415.

- [30] K.G. Boving. (2019, 18 Nisan). *NDE Handbook, Non-Destructive Examination Methods for Condition Monitoring* [Online]. Erişim: <https://play.google.com/books/reader?id=ZCGjBQAAQBAJ&hl=tr&pg=GBS.PA46>
- [31] NDT Resource Center. (2019, 18 Nisan). *History of Magnetic Particle Inspection* [Online]. Erişim: <http://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Introduction/history.htm>.
- [32] C. Seçin, “Tahribatsız muayene yöntemleri ve uygulama alanları,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2011.
- [33] S. Kaba, “Doğalgaz boru hatlarındaki kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [34] A. A. Akay, “Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2012.
- [35] MEB, "Metal Teknolojisi," *Tahribatlı Muayene*, 1.baskı, Ankara, Türkiye: MEGEP Yayınları, 2011, ss. 32.
- [36] C. İkinci, “Düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin sertlik ve mikro yapıları üzerine soğuma hızının etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fizik, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2011.
- [37] İ. BİNER, “Kaynaklı numunelerin tahribatlı testlerinin güvenilirliği ve cihaz kalibrasyonu”, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, Türkiye, 2015, ss. 125-130.
- [38] *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys*, ISO 15614, 2017.
- [39] *Kaynak Sarf Malzemeleri-Yüksek Mukavemetli Çeliklerin-Elle Metal Ark Kaynağı İçin Örtülü Elektrotlar - Sınıflandırma*, ISO 18275, 2012.
- [40] *Welding Consumables-Fluxes for Submerged Arc Welding and Electroslag Welding- Classification*, ISO 14174, 2012.
- [41] *Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yetkinliği için Genel Gereklilikler*, TS EN ISO/IEC 17025, 2017.
- [42] *Steel Products-Employer's Qualification System for Non-Destructive Testing (NDT) Personnel*, ISO 11484, 2009.
- [43] *Metalik Malzemelerin Kaynakları Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Enine Çekme Deneyi*, TS EN ISO 4136, 2011.
- [44] *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM A370, 2017.
- [45] *Kaynak - Çelik, Nikel, Titanyum ve Bunların Alaşımlarında Ergitme Kaynaklı (Demet Kaynağı Hariç) Birleştirmeler - Kusurlar için Kalite Seviyeleri*, TS EN ISO 5817, 2014.

- [46] *Çelik Boruların Tahribatsız Muayenesi-Bölüm 5: Yüzey Kusurlarının Tespiti için Dikişsiz ve Kaynaklı Ferromanyetik Çelik Boruların Manyetik Parçacık Muayenesi*, TS EN ISO 10893-5, 2011.
- [47] *Çelik Boruların Tahribatsız Muayenesi-Bölüm 11: Enine ve/veya Boyuna Kusurların Tespiti için Kaynak Edilmiş Çelik Borularda Kaynak Dikişinin Otomatik Ultrasonik Muayenesi*, TS EN ISO 10893-11, 2011.
- [48] *Non-Destructive Testing of Steel - Part 7: Digital Radiographic Testing of the Weld Seam of Welded Steel Tubes for the Detection of Imperfections*, TS EN ISO 10893-7, 2011.
- [49] N. Kahraman, B. Gülenç ve A. Durgutlu “Investigation of the effect of electrode extension distance on microstructural and mechanical properties of low carbon steel welded with submerged arc welding,” *G.Ü. Fen bilimleri Dergisi*, c. 18, sayı 3, ss. 473-480, 2005.
- [50] *Destructive tests on welds in metallic material-Bend tests*, TS EN ISO 5173, 2009.
- [51] K. İmdat, Y.Kaya, N. Kahraman, “Grade A gemi sacının örtülü elektrot ark kaynak yöntemi ile sualtı ve atmosferik şartlarda birleştirilebilirliğinin araştırılması,” *Politeknik Dergisi*, c. 21, sayı 3, ss. 543–552, 2018.
- [52] A. A. Akay, Y. Kaya, N. Kahraman “Tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilen X60, X65 ve X70 çeliklerin kaynak bölgesinin etüdü,” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 3, sayı 2, ss. 34–42, 2013.
- [53] Teknik İçerik. (2019, 20 Nisan). *Tozaltı Kaynağı Nedir?* [Online]. Erişim: <http://www.teknikicerik.com/toz-alti-kaynagi-nedir.html>.
- [54] Anonim, (2019, 25 Nisan). *Akma Sınırı ve Akma Dayanımı Nedir?* [Online]. Erişim: <https://insapedia.com/akma-siniri-ve-akma-dayanimi-nedir/>.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mahmut GEL
Doğum Tarihi ve Yeri : 07.06.1984 / Düzce
GSM No : 0 537 406 28 29
E-posta : mahmut_gel@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Düzce Üniversitesi Makine Mühendisliği	2019
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Müh.	2010
Lise	Özel Öncü Koleji	2004

Yayımlar

- Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Farklı kaynak Parametreleri Kullanılarak Birleştirilen API X70 PSL2 Malzemelerin Kaynak Bölgesinin İncelenmesi (Düzce Üniv. Bilim ve Teknoloji Dergisi/2018-Cilt6-Say.4)

Tezden Türetilen Yayınlar/Sunumlar

- API Çeliklerinin Tozaltı Kaynağında Farklı Kök Kaynak Uygulamalarının Mekanik Özelliklere Etkisi (International Academic Research Congress-INES 2018)