



T.C.

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARINDA KULLANILAN
BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Osman AKTAŞ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

OCAK-2017



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARINDA KULLANILAN
BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Osman AKTAŞ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

OCAK-2017

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARINDA KULLANILAN
BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Osman AKTAŞ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç.Dr.Selçuk MISTIKOĞLU danışmanlığında hazırlanan bu tez 13/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OY BİRLİĞİYLE kabul edilmiştir.




Doç.Dr.Selçuk MISTIKOĞLU

Başkan




Prof.Dr.Hakan YAVUZ
Üye



Yrd.Doç.Dr.Çağlar CONKER
Üye

Kod No: 32



Doç.Dr.Mustafa DEMİRCİ
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

13/01/2017

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.



OSMAN AKTAŞ

ÖZET

PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARINDA KULLANILAN BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, API 5L standartlarında boru üretimi için kullanılan çelikler incelenmiştir. İnceleme ile, üretim aşamalarındaki termomekanik haddeleme, hızlı soğutma, mikroalaşımlandırma gibi mekanik özellik iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca, dikişli borulardaki kaynak parametrelerinin ana metal, HAZ bölgesi ve kaynak bölgesinde oluşturduğu etkiler araştırılmıştır. Bunlara ilaveten, boruların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan muayene yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

DeneySEL çalışmalarda, API 5L standardında farklı ebatlarda üretilen hat borularından alınan kaynaklı ve kaynaklı olmayan numuneler incelenmiştir. Bu incelemede kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik – darbe ve eğme testleri uygulanmıştır.

2017, 139 sayfa

Anahtar Kelimeler: Boru hatları, API 5L, Boruların mekanik özellikleri, Çelik borular.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PIPES USED IN OIL AND GAS PIPELINES

In this study, steels used for pipe production in accordance with API 5L standards are investigated. In the investigation, methods used in improvement of mechanical properties are studied for production processes such as thermo-mechanical rolling, rapid cooling and micro-alloying. Also, as a part of the study, the effects welding parameters of the welded pipes have been investigated for base metal, HAZ zone and weld zones. In addition, detailed information on test methods on determination of mechanical properties for pipes are provided.

In the experimental part of the studies, different sizes of pipes produced accordance with API 5L standards have been tested for welded and non-welded samples. As a part of the tests, chemical analysis, hardness, tensile, notch-impact and bending tests are performed

2017, 139 pages

Key Words: Pipelines, API 5L, Mechanical Properties of Pipe, Steel Pipes.

TEŐEKKÖR

Bu çalışmanın hem uygulama aőamasına fayda sağlaması hem de üniversite - sanayi işbirliğinin gelişimine katkıda bulunması amacıyla bilgi ve tecrübeleriyle çalıőmama ışık tutan ve değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Doç. Dr. Selçuk MISTIKOğLU'na, çalıőmalarım süresince göstermiş olduğu destek, teşvik ve anlayış için BOTAŞ Petrol İşletmeleri Bölge Müdürlüğü'nde ve BOTAŞ Dörtyol İşletme Müdürlüğü'nde görev yapan değerli yöneticilerime ve desteklerini benden hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL.....	16
3.1. Petrol ve Doğalgaz Borularında Kullanılan Çelikler	16
3.2. Boru Hattı Çeliklerinin Üretiminde Mekanik Özellik İyileştirme Yöntemleri.....	20
3.2.1. Termomekanik Haddeleme	20
3.2.2. Hızlandırılmış Soğuma.....	22
3.2.3. Mikroalaşımlandırma	23
3.3. Petrol ve Doğalgaz Borusu Üretim Yöntemleri	26
3.3.1. Dikişsiz Boru Üretimi	26
3.3.2. Dikişli Boru Üretimi	26
3.3.2.1. Boyuna Dikişli Boru Üretimi	26
3.3.2.2. Spiral Dikişli Boru Üretimi.....	28
3.4. Dikişli Borularda kullanılan kaynak çeşitleri.....	32
3.4.1. Örtülü elektrod ark kaynağı	32
3.4.2. Gazaltı Ark Kaynağı	33
3.4.3. Tozaltı ark kaynağı.....	35
3.5. Kaynak Parametreleri ve Mekanik Özellik İlişkisi	36
3.5.1. Kaynak ağzı.....	37
3.5.2. Kaynak akım şiddeti.....	40
3.5.3. Ark gerilimi	40
3.5.4. Kaynak hızı	41
3.5.5. Kaynak düzlemi ve elektrod açısı	46
3.5.6. Serbest tel uzunluğu ve elektrodlar arası uzaklık.....	48

3.5.7. Kaynak Metalurjisi.....	51
3.5.8. Kaynak bölgesinin içyapısı	52
3.5.9. Kaynak sırasında oluşan ısı çevrimler	54
3.5.10. Kaynak Hataları	65
3.5.10.1. Nüfuziyet yetersizliği	65
3.5.10.2. Yanma oluğu (çentik).....	66
3.5.10.4. Gözenek oluşumu.....	67
3.5.10.5. Kalıntılar	69
3.5.10.6. Çatlak oluşumu	70
3.5.10.7. Geometrik kaynak hataları	76
3.6. Boruların Test ve Muayene Yöntemleri.....	78
3.6.1. Tahribatlı Test ve Muayeneler	79
3.6.1.1. Çekme Testi	79
3.6.1.2. Eğme Testi	84
3.6.1.3. Çentik Darbe Testi	86
3.6.1.4. Sertlik Testi	88
3.6.2. Tahribatsız Test ve Muayeneler	90
3.6.2.1. Ultrasonik Muayene	90
3.6.2.2. Radyografik Muayene	91
3.6.2.3. Sıvı Penetrant Testi	94
3.6.2.4. Manyetik Parçacık Testi.....	95
3.6.2.5. Girdap Akımı Testi	96
3.6.3. Hidrostatik Basınç Testi	97
3.6.4. Gözle Muayene	99
4. YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	100
4.1. Deney Sonuçları.....	103
4.1.1. API 5L X42 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları.....	103
4.1.2. API 5L X52 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları.....	108
4.1.3. API 5L X60 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları	113
4.1.4. API 5L X65 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları	118
4.1.5. API 5L X70 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları.....	123

5. ARAŞTIRMA BULGULARI	128
5.1 Makroyapı bulguları.....	128
5.2. Mikroyapı bulguları	129
5.3. Çekme deneyi bulguları	129
5.4. Sertlik deneyi bulguları	131
5.5. Çentik - darbe deneyi bulguları.....	132
5.6. Eğme deneyi bulguları	133
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	134
6.1. Sonuçlar.....	134
6.2. Öneriler.....	134
7. KAYNAKLAR.....	136
ÖZGEÇMİŞ	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Deney Parametreleri.....	101
Çizelge 4.10. Çentik - darbe deney sonuçları (X52, 12.34 mm).....	112
Çizelge 4.11. Eğme deneyi sonuçları (X52, 12.34 mm)	112
Çizelge 4.12. Kaynak metali kimyasal analizi (X60, 11.91 mm)	113
Çizelge 4.13. Çekme deneyi sonuçları (X60, 11,91 mm)	116
Çizelge 4.14. Çentik - darbe deney sonuçları (X60, 11.91 mm).....	117
Çizelge 4.15. Eğme deneyi sonuçları (X60, 11.91 mm)	117
Çizelge 4.16. Kaynak metali kimyasal analizi (X65, 11.91 mm)	118
Çizelge 4.17. Çekme deneyi sonuçları (X65, 11,91 mm)	121
Çizelge 4.18. Çentik - darbe deney sonuçları (X65, 11.91 mm).....	122
Çizelge 4.19. Eğme deneyi sonuçları (X65, 11.91 mm)	122
Çizelge 4.2. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri	102
Çizelge 4.20. Kaynak metali kimyasal analizi (X70, 19.65 mm)	123
Çizelge 4.21. Çekme deneyi sonuçları (X70, 19,65 mm)	126
Çizelge 4.22. Çentik - darbe deney sonuçları (X70, 19.65 mm).....	127
Çizelge 4.23. Eğme deneyi sonuçları (X70, 19,65 mm)	127
Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan S3Mo kaynak telinin kimyasal analizi	103
Çizelge 4.4. Kaynak metalinin kimyasal analizi (X42, 4.76 mm)	103
Çizelge 4.5. Çekme deneyi sonuçları (X42, 4.76 mm)	106
Çizelge 4.6. Çentik - darbe deney sonuçları (X42, 4.76 mm).....	107
Çizelge 4.7. Eğme deneyi sonuçları (X42, 4.76 mm)	107
Çizelge 4.8. Kaynak metali kimyasal analizi (X52, 12.34 mm)	108
Çizelge 4.9. Çekme deneyi sonuçları (X52, 12.34 mm)	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türkiye'deki Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları (Alsancak, 2010)	1
Şekil 1.2. BP Deepwater Horizon petrol sızıntısı (Leifer, 2012)	3
Şekil 3.2 Tane büyüklüğünün mekanik özelliklere etkisi (Tekin E., 2012).....	21
Şekil 3.4. Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı ile boyuna dikişli boru üretimi	27
Şekil 3.5. Spiral dikişli boru üretim makinesi.....	30
Şekil 3.6. Spiral dikişli boru makinesinde banda silindirik biçim verme	31
Şekil 3.7. Spiral dikişli boru üretim akış diyagramı	31
Şekil 3.9. Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak ağzı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki (Şirin, 2004).	39
Şekil 3.10. Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi (Şirin, 2004)	42
Şekil 3.12. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee, 1983).....	44
Şekil 3.13. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nüfuziyet derinliğine etkisi (ASM Handbook Committee, 1983).....	45
Şekil 3.14. Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluşu arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee, 1983).....	46
Şekil 3.15. Elektrod eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi (Tülbentçi, 1998)	47
Şekil 3.16. Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi.....	48
Şekil 3.17. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi (Şirin, 2001) ...	50
Şekil 3.18. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler (Ada, 2006)	51
Şekil 3.19. Ergime bölgesindeki tanelerin durumu (Ada, 2006).....	53
Şekil 3.20. a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi b) ITAB bölgesindeki ısı yayılımı (Şirin, 2004).	56
Şekil 3.22. Kalınlık, ısı girdisi ve soğuma süresi arasındaki ilişki (Linnert, 1994).....	62
Şekil 3.23. Nüfuziyet yetersizliği (Yıldız, 2000).	66
Şekil 3.24. Yanma oluşu (Yıldız, 2000).	67
Şekil 3.25. Gözenek türü kaynak hataları (Şirin, 1997).....	69
Şekil 3.26. Kalıntı türü hatanın oluşumu (Ada, 2006).....	70
Şekil 3.27. Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü (Ada, 2006)	70
Şekil 3.28. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası (Ada, 2006)	71

Şekil 3.29. Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi (Şirin, 1997)	76
Şekil 3.30. a) İşlerlik ısıdan etkilenen bölge arasındaki ilişki.....	77
Şekil 3.31. Çekme testi numunesi	79
Şekil 3.32. Çekme testi uygulaması	80
Şekil 3.33. Test sonrası	80
Şekil 3.34. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri (Asarkaya, 2006)	81
Şekil 3.35. Çekme diyagramı	82
Şekil 3.36. Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi	83
Şekil 3.37. Eğme testi numunesi	84
Şekil 3.38. Eğme testi uygulaması	85
Şekil 3.39. Bükülmüş numuneler	85
Şekil 3.40. Çentik darbe testinin şematik gösterimi (Süzen, 2009)	87
Şekil 3.41. Çentik darbe test numunesi ve cihazı.....	88
Şekil 3.42. Sertlik Testi Şematik Gösterimi	89
Şekil 3.43. Sertlik testi numunelerinde belirlenen sertlik ölçme bölgeleri	90
Şekil 3.44. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi (Seçim, 2011)	91
Şekil 3.45. X ışını ile radyografik muayene (Kaba, 2009).....	92
Şekil 3.46. Gama ışını ile radyografi çalışmasının şematik gösterimi (Kaba, 2009).....	94
Şekil 3.47. Flüoresan penetran (girici) sıvıyla ultraviyole ışınları altında yapılan test resimleri.....	95
Şekil 3.48. Manyetik parçacık deneyinin uygulama biçimleri.....	96
Şekil 3.49. Girdap akımları kontrolünde oluşan manyetik alan ve akımlar.....	97
Şekil 3.50 Hidrostatik basınç test makinesi	98
Şekil 4.1. Kaynağın makro görüntüsü (X42, 4.76 mm).....	104
Şekil 4.2. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X42, 4.76 mm).....	105
Şekil 4.3. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X42, 4.76 mm)	106
Şekil 4.4. Kaynağın makro görüntüsü (X52, 12.34 mm).....	109
Şekil 4.5. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X52, 12.34 mm).....	110
Şekil 4.6. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X52, 12.34 mm)	111

Şekil 4.7. Kaynağın makro görüntüsü (X60, 11.91 mm).....	114
Şekil 4.8. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X60, 11.91 mm).....	115
Şekil 4.9. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X60, 11.91 mm)	116
Şekil 4.10. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11.91 mm).....	119
Şekil 4.11. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X65, 11.91 mm).....	120
Şekil 4.12. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11.91 mm)	121
Şekil 4.13. Kaynağın makro görüntüsü (X70, 19.65 mm).....	124
Şekil 4.14. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X70, 19.65 mm).....	125
Şekil 4.15. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X70, 19.65 mm)	126
Şekil 5.1. Ana malzemedan ve kaynaklı bölgeden alınmış çekme deneyi sonuçları...	130
Şekil 5.2. Eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü	133

SİMGELER VE KISALTMALAR

BTC: Bakü – Tiflis – Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı

TANAP: Trans Anadolu Doğalgaz Boru Hattı

API: American Petroleum Institute

ITAB: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

HIC: Hidrojen Nedenli Çatlama

NACE: The Worldwide Corrosion Authority

DIN: German Institute for Standardization

ASME: The American Society of Mechanical Engineers

TIG: Tungsten Inert Gas

ISO: International Organization for Standardization

AISI: American Iron and Steel Institute

AFNOR: Association Française de Normalisation

HSLA: High Strength Low Alloy steel

ASTM: American Society for Testing and Materials

1. GİRİŞ

Bugün kullanılan doğal gaz ve petrol boru hatlarının tarihi, ekonomik değeri olan ilk petrol kuyusunun 1859 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde açılmasından sonra başlamıştır. O tarihten itibaren uzak mesafelere petrol ve gaz ürünlerini taşımak için faydalanılabilecek en kolay ve ucuz yolun boru hatları olduğu herkes tarafından kabul edilmiştir. Bundan dolayı, petrol ve gaz ürünlerinin keşfedildiği 1859 yılından bu yana, pazarın büyüdüğü yere bağlı olarak her yıl binlerce kilometrelik boru hatları döşenmektedir. Yaklaşık olarak; Dünya petrol rezervinin %67'sine ve Dünya doğal gaz rezervinin %40'ına Orta Doğu ve Orta Asya ülkeleri sahiptir. Gelişmenin vazgeçilmez unsuru olan enerjinin, küreselleşen dünyada kaynaklarından, talep merkezlerine ulaştırılmasında boru hatları en güvenli ve en verimli yoldur. (Sevim, 2012)

Günümüzde gelişmekte olan toplumlar için petrol ve doğalgaz; para ve refah anlamı taşır. Petrol ve doğalgaz dışında hiçbir kaynağı olmayıp da zenginlik ve refaha kavuşabilmiş Orta Doğu ve Orta Asya'da pek çok ülke vardır. Ülkemiz yapılmış veya yapılması planlanan boru hatları sayesinde bu ülkeler ile talep merkezleri arasında coğrafi köprü haline gelmiştir. Jeopolitik öneme sahip ülkemizdeki bu boru hatları Şekil 1.1. de verilmiştir.



Şekil 1.1. Türkiye'deki Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları (Alsancak, 2010)

Irak'ın Kerkük ve çevresindeki petrol sahalarından başlayıp, Türkiye'nin güneyindeki Adana iline bağlı Yumurtalık ilçesinden Akdeniz'e ulaşan; 40" ile 46" çaplarında ve 986 km ile 890 km uzunluklarında paralel iki ayrı hattan oluşan toplam 70,9 milyon m³/yıl kapasiteli Irak – Türkiye Ham Petrol Boru Hattı bulunmaktadır.

Azerbaycan'ın Hazar havzasından çıkardığı Ham Petrolü Gürcistan üzerinden Türkiye'nin Akdeniz kıyılarına taşıyan 50 milyon m³/yıl kapasiteli Bakü-Tiflis-Ceyhan Ham Petrol Boru Hattı Temmuz 2006 yılında hizmete girmiştir. Tüm uzunluğu boyunca gömülü olan boru hattının (toplam uzunluğu 1.768 km), Gürcistan'da 249 km'si, Azerbaycan'da 443 km'si, ve Türkiye'de ise 1.076 km'si yer almaktadır. Boru hattının çapı Azerbaycan ve Türkiye genelinde 42" Gürcistan'da ise 46" dir. Türkiye'nin son bölümünde (Ceyhan Deniz Terminali'ne doğru) eğimden dolayı boru hattının çapı azalarak 34" e inmektedir.

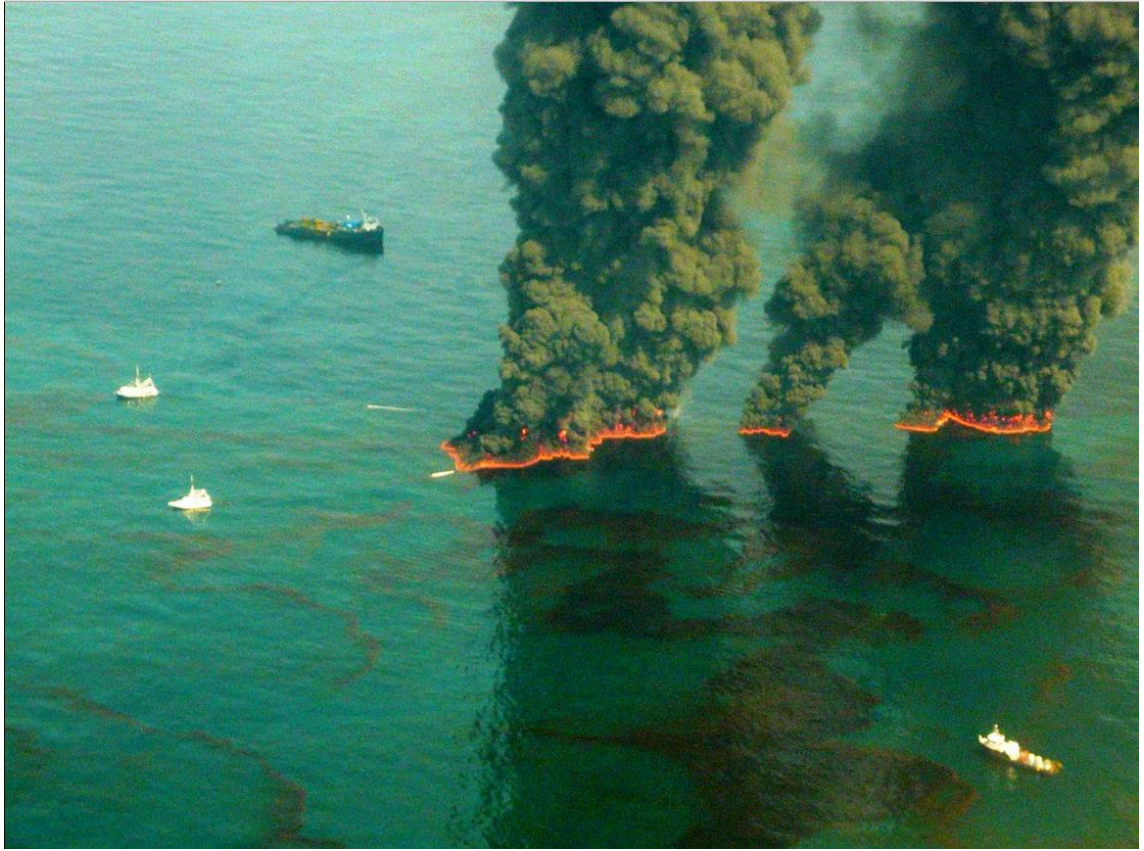
Ayrıca yakın zamanda ülkeler arası antlaşması imzalanan ve Azerbaycan'dan çıkartılan doğalgazı BTC koridorunu kullanarak Gürcistan üzerinden Türkiye'ye oradan da Avrupa'ya taşımayı sağlayacak olan Trans Anadolu Doğalgaz Boru Hattı (TANAP) projesi inşaat çalışmaları devam etmektedir.

Ülkemizde jeopolitik öneme sahip boru hatlarının yanında Rusya, İran ve Azerbaycan gibi ülkelere satın aldığımız doğalgazın ülkemize taşınmasını sağlayan ana iletim boru hatları da bulunmaktadır.

Ülke sınırları içerisinde faaliyet gösteren; Güney Doğu Anadolu bölgesinden çıkarılan petrolün Akdeniz'e taşındığı Batman-Dörtyol Ham Petrol Boru Hattı, Tüpraş İç Anadolu Rafinerisi'nin ihtiyacını sağlamak için inşa edilen Ceyhan-Kırıkkale Ham Petrol Boru Hattı ve Ulusal iletim şebekemiz vasıtasıyla ithal ettiğimiz doğal gazın tüketim noktalarına ulaştırılmasını sağlayan yaklaşık 13 bin km uzunluğunda doğal gaz dağıtım şebekesi bulunmaktadır. Doğalgazın ulaştırılmadığı il ve ilçelerde de boru hatları inşaat ve proje aşamasındadır.

Ülkemizdeki ulusal ve uluslararası hatların yanında Ortadoğu ve Orta Asya ülkelerinde de büyük kapasiteli birçok petrol ve doğalgaz iletim hatları bulunmaktadır.

Dünyadaki mevcut petrol ve doğalgaz boru hatlarında yanıcı ve patlayıcı materyaller taşınması sebebiyle deformasyon kaynaklı birçok kaza meydana gelebilmektedir. Ayrıca petrol boru hatlarında oluşan bu kazalar sonucunda petrol sızıntısı ciddi çevre felaketleri oluşturabilmektedir. Şekil 1.2. Bu nedenle petrol ve doğalgaz boru hatlarının mekanik dayanımı hayati önem arz etmektedir.



Şekil 1.2. BP Deepwater Horizon petrol sızıntısı (Leifer, 2012)

Dünyada enerjiye olan ihtiyacın artması yüksek taşıma kapasitesine sahip yüksek basınçlı boru hatlarının inşasını gerektirmiştir. Boru hatlarının en uygun çözüm olarak kullanılmaya başlamasından sonra bu konuda çeşitli araştırmalara geçilmiş, malzeme ve üretim yöntemlerinin gelişmesi sonucunda yüksek mukavemetli malzemelerden ince et kalınlığına sahip büyük çaplı boruların kullanılmasına başlanmıştır. Yüksek

mukavemetli boru çeliklerinin geliştirilmesi ile söz konusu boruların kaynak teknolojilerinde de ilerlemeler kaydedilmiştir.

Günümüzde üretilen petrol ve doğalgaz boruları API (American Petroleum Institute) tarafından hazırlanan ve değişik periyotlarda güncellenen API Spec. 5L'ye göre imal edilmektedir. API standartlarına göre üretim yapan imalatçılar, üretim ve muayene yöntemlerini bu standartlarda belirtilen üretim şartları ve test değerlerine göre yapmakla yükümlüdür. Bu yükümlülüğü üstlenmeyi taahhüt eden üreticiler API sertifikasını alma hakkına sahip olurlar.

Ayrıca dikişli boru üretimi yapan imalatçılar, API standardına göre boru üretimi yapabilmek için aynı standartlara göre üretilen sıcak haddelenmiş yassı elik sac kullanmak zorundadır. Ülkemizde Ereğli Demir elik Fabrikaları boru imalatçılarının istediği kalitede yarı mamul olarak rulo sac üretimi yapabilmektedir. Demir-elik fabrikaları üretim aşamasında gerekli müdahaleleri yaparak API 5L standardının istediği kalitedeki sacı üretebilmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hakan ADA'nın 2006 yılında hazırladığı "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Tozaltı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde; Tozaltı kaynak yöntemiyle spiral dikişli boru üretimi için oldukça kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise, tozaltı kaynağı ile spiral dikişli olarak farklı malzemelerden petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların mekanik performansının incelenerek kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkilerinin araştırılması ve kullanılan malzemelerin birbiriyle mukayesesi amaçlanmıştır. API 5L standardında X65, X52, X70, X60 doğalgaz boruları ve farklı ebatlarda X65 petrol borularına kaynaklı birleştirme işlemleri uygulanmış ve bu birleştirmelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan malzemeler içerisinde en verimli mekanik test sonuçları X70 malzemedен imal edilen doğalgaz borusunda elde edilmiştir. (Ada, 2006)

Emre ATEŞ'in 2004 yılında yayımlanan "Spiral Kaynaklı Mikro alaşımlı Petrol ve Doğal Gaz Boru Hatlarının Üretim Prosesinin, Malzeme Özelliklerinin ve Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde; "Gelişen dünyada enerji ihtiyacı hızla artmaktadır. Bu neden ile bir taraftan mevcut enerji kaynaklarının işletilmesi ve üretimlerin ileriki yıllar için planlanması için çalışmalar yapılır iken diğer taraftan ihtiyaç duyulan enerjinin mevcut kaynaklardan taşınması için verimli sevkiyat alternatiflerinin gelişimi devam etmektedir. Soğuk bölgeler, çöller ve deniz diplerinde kullanım için dizayn edilebilen boru hatları en sık rastlanan örneklerdir. Bu gelişmeler ile birlikte petrol ve doğalgaz kaynaklarının gelişmiş ülkelere ulaştırılmasında boru hatları artan miktarda kullanılmaya başlanmıştır. Daha hızlı ve verimli bir sevkiyat sürdürebilmek için boru hattı malzemeleri, kaynak özellikleri tüm doğal koşullara göre ipte edilerek sürekli bir gelişim içerisinde bulunmaya başlamıştır. Bu gelişmelerin başında düşük alaşımlı yüksek dayanımlı (HSLA) çeliklerin kullanılması gelmektedir. Bu mikro alaşımlı çeliklerin (ör. X-42, X-52, X-65-X70-X90) gelişmesi ile birlikte yüksek dayanımlı çeliklerin kullanım miktarları büyük derecede artış göstermiştir.

Hammaddelerin dayanım ve tokluk özelliklerinin iyileştirilmesi mikroalaşımlama ve kontrollü haddeleme ile sağlanmıştır. Bu prosesler ile kaynak edilmeye uygun karbonlu ve yüksek dayanımlı çelikler üretilmiştir. Bu duruma paralel olarak tozaltı spiral kaynak için de parametre iyileştirmeleri beraber gelişmiştir. Nihai olarak ince et kalınlıkları kullanılarak (yüksek mukavemetli çeliklere doğru geçiş) daha yüksek basınçlar (yüksek transport hızlarına) sağlanmıştır. 1965'lerde ortalama 66 bar olan işletme basınçları artan çap ve çelik dayanımların artışı ile birlikte günümüzde 1400- 1600 mm'lik çaplara ve 150 bar'lık işletme basınçlara ulaşılmıştır.” değerlendirmelerine yer verilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise; Bakü-Ceyhan-Tiflis boru hattının Türkiye'de NOKSEL - BORUSAN MANNESMANN - ÜMRAN konsorsiyum ile üretimi yapılan 1067 x 15.88 mm'lik boruların kimyasal, mekanik, hammadde mikro ve makro yapı özellikleri ve kaynak parametreleri incelenmiştir. (Ateş, 2006)

M. Zeki MAHMUTOĞLU ve Hüseyin ÇİMENOĞLU'nun, 2003 yılında yayımlanan “% 0.03 Nb ve % 0.05 V'lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkisi” konulu makalesinde; Ar-Ge faaliyetleri kapsamında Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'de (ERDEMİR) üretilen API X60 kalite boru hattı çeliğinin, mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi konularında çalışılmıştır. Bu çalışmada Ferrit tane boyutu küçüldükçe; akma ve çekme mukavemeti ile sertliğin arttığı uzamanın ise değişmediği görülmüştür. (Mahmutoğlu, Çimenoğlu, 2003)

Kahraman ŞİRİN'in, 2004 yılında yayımlanan “Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Spiral Boru Üretiminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” konulu doktora tezinde; “Tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral dikişli çelik borular, doğal gaz ve petrol iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, özellikle yüksek işletme basınçları altında, doğal gaz hat borularının performansına yönelik kalite sistemleri her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, kaynak telinin ve tozunun türü, ek kaynak metal miktarı, kaynak geometrisi, kaynak hızı ve kaynak parametreleri yüksek kaynak güvenilirliğinin sağlanması için göz önüne alınması gereken oldukça önemli faktörlerdir. Tüm bunlar, kaynak işlemi öncesi kaynak tasarım çalışmasının önemini ortaya çıkarmaktadır. Özellikle, doğal gaz ve petrol iletim hat borularının tozaltı kaynak yöntemi ile

üretiminde, kaynak tasannu oldukça önemli bir yere sahiptir.” değerlendirmelerine yer verilmiştir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, tozaltı kaynağında kullanılan parametrelerden kaynak akım şiddeti, gerilim, tel çapı, kafa sayısı, kaynak ağız biçimi ve kaynak hızı gibi kaynak değişkenlerinin kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci aşamada ise kaynak metalinin, kimyasal bileşimi ve soğuma hızı gibi tokluk özelliklerini etkileyen faktörleri ele alınmıştır. Daha sonra, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, üretim öncesi kaynak tasarımına yönelik olarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sonuç olarak, olabilen en yüksek kaynak hızlarında yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde kaynak parametrelerinin seçimine yönelik bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. (Şirin, 2004)

Hüseyin UZUN’un 2002 yılında yayımlanan “Kaynaklı API 5L X65 Boru Hattı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu” konulu makalesinde; Petrol ve doğalgaz boru hatlarında yaygın olarak kullanılan ve tandem tozaltı kaynak metodu ile birleştirilen API 5L X65 dual fazlı çeliğin kırılma tokluğu tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu, çentikli üç nokta kırılma tokluğu deneyi kullanılarak belirlenmiştir. Çentik, hem kaynak dikişinin ortasına hem de ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) içerisinde içine gelecek şekilde açılarak deney uygulanmıştır. Her bir numuneye gerilim giderme tavlama uygulanarak, kırılma tokluğu değerlerinin nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gerilim giderme tavi uygulanmamış ve uygulanmış numunelerde, kaynak dikişinin kırılma tokluğu, ITAB bölgesinin kırılma tokluğundan daha yüksek çıkmıştır. (Uzun, 2002)

Emel TABAN ve Erdinç KALUÇ’un 2004 yılında yayımlanan “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler ve Kaynak Edilebilirliği” konulu makalesinde; Uzun yıllardan beri uluslararası ve ulusal petrol ve doğalgaz boru hatlarının yapımında, kullanılan alışılmış az alaşımlı çeliklerden üretilmiş boruların zaman içinde korozyona uğrayarak, onarılması güç hasarlar oluşturması ve tamiri ile değişim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle öncelikle günümüzden yirmi yıl önce geliştirilen duplex paslanmaz çeliklerin boru yapımında kullanımı gündeme gelmiş; ancak bu tür paslanmaz çeliklerin maliyetlerinin çok yüksek olması ve kaynaktan sonraki süreçte ortaya çıkan metalürjik problemler nedeniyle daha ekonomik ve yeterli korozyon direncine sahip süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin

geliştirilmesi gereksinimi doğduğundan ve Kaynak kabiliyetleri alışılmış martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha iyi olan bu tür çeliklerin, yüksek mukavemet ve düşük tokluk özelliklerinin yanı sıra yeterli korozyon direncine de sahip olduğundan bahsedilmiştir. Bu araştırmada, boru hattı yapımında kullanılmak üzere geliştirilen süpermartenzitik paslanmaz çelikler ve bunların kaynak edilebilirlikleri incelenmiştir. (Taban, Kaluç, 2004)

Süleyman YAVUZ'un 2007 yılında yayımlanan "Türkiye'de Boru Üretiminde Kullanılan DKP Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde; "Endüstride kullanım amacı ve kullanım yerine göre değişik malzemelerden, değişik usullerde boru imalatının önemli bir yeri vardır. Bu çalışmanın esas konusu dikişli borulardır. Dikişli boruların yetersiz olduğu yerlerde dikişsiz borularda kullanılmaktadır. Dikişli boruların maliyeti avantajlı iken, basınca dayanıklılığı dezavantajdır. Boru imalatında malzeme seçiminden, kalite kontrolü ve kullanıcıya arzına kır, tasarımcı, metalurjist, imalatçı gibi her dalda kişiler çalışır. Amaç her yönden kusursuz boru imalatıdır. Teknolojik gelişmelerle birlikte, çelik boruların kullanım yerindeki performansı ile ilgili kalite talepleri her geçen gün artmaktadır. Sahip oldukları boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi, kaynak güvenilirliği ve düşük üretim maliyetleri nedeni ile kaynaklı borular, artan bu kalite taleplerine kolaylıkla cevap verebilecek düzeye ulaşarak çok değişik alanlarda kullanıma girmiştir." değerlendirmelerine yer verilmiştir. Bu çalışmada Türkiye' de boru üretiminde kullanılan sacların mekanik ve kimyasal özellikleri incelenerek boru üretiminde kullanılan sacların kalitesi incelenmiştir. DKP sacların firma farklılıkları, farklı dökümler arasındaki farklılıklar, rulolar arasındaki farkların incelenmek ve kuvvet ile sekil değişimi arasındaki ilişkileri belirlemek amacı ile çekme deneylerinde kullanılmak üzere 0.6–0.8–1.0–1.2–1.5 mm kalınlıktaki saclardan hadde yönüne 0–45–90 derece ile üçer adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; çekme yönüne dik yönde ortalama akma gerilmesi 160 MPa olurken çekme yönünde ise 200 MPa'lı bulunmaktadır. Ortalama uzamaları da yaklaşık çekme yönüne dik olarak %20 civarındadır. Bununla birlikte çekme yönünde uzama %26–27 civarında, kopma uzama değerleri %30'u bulmaktadır. Ayrıca metalik sacların spektral v EDS analizleri yapılmış ve EDS analizleri sonucunda malzeme içinde yüksek miktarda kurşuna rastlanmıştır. Uzama oranlarının bu kır yüksek olmasında malzeme içerisindeki kurşun miktarının

fazlalığının da etkili olduğu değerlendirilmiştir. Kaynak bölgesini test etmek amacı ile katlama ve açma deneyleri yapılmış, bu deneyler sonucunda malzeme kaynak bölgesi test edilmiş, kaynakta hiçbir tahribat gözlemlenmemiştir. Mikro sertlikleri ölçülerek ana metal, ITAB ve kaynak bölgesi arasındaki farklılıklar incelenmiş kaynak sonrası ana metal ile kaynak metali arasında yaklaşık 100 vickers fark olduğu tespit edilmiştir. Bu sertlik farklı boru imalat sonrasında hemen yapılan normalizasyon işlemi ile ortadan kaldırılmaktadır. Bulunan deneysel sonuçlara göre ANSYS/LS-DYNA programı kullanılarak boru üretiminin teorik modeli oluşturulmuştur. Teorik model sonuçlarında farklı değerler araştırılmıştır. Bunların basında sacda meydana gelen gerilmeler, şekillendirmeler sırasında merdanelere gelen kuvvetler araştırılmıştır. Teorik model sonucunda elde edilen vonmises gerilmesi çıkarılmış ve bu sekle göre sac malzemede oluşan maksimum gerilme 211 MPa olduğu bulunmuştur. Bulunan sonuçlara göre boru üretim hattının tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Tasarlanan teorik modelde 4. istasyon en yüksek gerilmeye maruz kaldığı ve dolayısıyla sistemin bu istasyonda meydana gelen kuvvetlere göre tasarlanması gerektiği değerlendirilmiştir. (Yavuz, 2007)

A. Kadir UYSAL'ın, 2010 yılında yayımlanan "Petrol ve Doğalgaz Boru Hattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı" konulu doktora tezinde; sulu H₂S içeren asidik servis şartlarına maruz kalan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı hat borusu çelikleri ve onların kaynaklı birleşmelerinde meydana gelen hidrojen nedenli çatlama (HIC) davranışları üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda doğal gaz ve petrol boru hatlarının maruz kaldığı asidik ortamı temsil etmek amacıyla NACE TM 0284 standart deney çözeltisi kullanılmıştır. Bu amaçla yapılan deneylerde, doğal gaz ve petrol boru hatlarında kullanılan API 5L X60, X65 ve X70 çelikleri ile onların fabrikasyon (tozaltı ark - elektrik direnç kaynaklı) ve saha kaynak (lazer - elektrik ark) uygulamalarının asidik ortamlardaki davranışları iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Birinci yöntemde, gerilmemiş test numuneleri standart deney çözeltisine maruz bırakılarak sonuçları incelenmiştir. İkinci yöntemde ise, borulardan alınan kaynaklı numuneler deney çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra, oda sıcaklığında çekme, eğme ve sertlik testleri gibi API 5L'de tanımlanan bir dizi mekanik testlere tabi tutulmuştur. Farklı kaynak yöntemleri ile kaynaklı numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, gerilme uygulanmamış numunelerin yalnız ana malzeme bölgesinde hidrojen nedenli çatlamlar tespit edilirken, ikinci yöntem izlenerek yapılan

mekanik testler sonucunda ise kaynaklı numunelerin ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) ve kaynak bölgesinden çatladıkları veya koptukları görülmüştür. Sonuç olarak; çözültiden malzeme içerisine absorbe olan ve yapıda bulunan metalürjik süreksizliklerde (segregasyon, inklüzyon vb.) tuzaklanan hidrojenin, gerilmemiş deney numunelerin ana malzemelerinde dekohezyon mekanizması yoluyla hidrojen nedenli çatlama, gerilme uygulanan kaynaklı numunelerde ise plastisite mekanizması yoluyla gerilmenin yoğunlaştığı ITAB ve kaynak bölgesine taşınması sonucunda gerilmeli hidrojen çatlamaının bir türevi olan gerilme yönlenmeli hidrojen nedenli çatlamaına (SOHIC) neden olduğu saptanmıştır. (Uysal, 2010)

Ali Akın AKAY, Yakup KAYA ve Nizamettin KAHRAMAN'ın 2013 yılında yayımlanan "Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü" konulu makalesinde; Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü Petrol ve doğal gaz hatlarında kullanılan, düşük alaşımlı, ince taneli ve yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile iki farklı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere, öncelikle yüzey ve yüzey altı kusurların belirlenebilmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden gözle ve ultrasonik muayeneye teknikleri uygulanmış, sonrasında birleştirmelerin dayanımlarını belirlemek amacıyla, çekme ve eğme testi uygulanmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde sertlik ve makroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan gözle ve ultrasonik muayene sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda, tüm numunelerde kopma, ana malzemeden gerçekleşmiş ve bütün bağlantı dayanımları, ana malzemelerden daha yüksek bulunmuştur. Eğme testleri sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak, yırtık vb. hata görülmemiştir. Yapılan sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Makroyapı resimleri incelendiğinde kaynak bölgesinde çatlaklara, yırtılmalara, boşluklara, ergime/nüfuziyet azlığına, cüruf kalıntılara ve yanma oluklarına rastlanılmamıştır. Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, X70 malzemedeki kullanılan, S₂Mo teli ve P223 tozu en verimli mekanik test sonuçlarını vermiştir. (Akay, Kaya, Kahraman 2013)

Sabri KILINÇER'in 1998 yılında yayımlanan "Düşük Karbonlu Çeliklerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde Kimyasal özellikleri farklı olan 6 çeşit düşük ve orta karbonlu çelik malzeme, toz altı ark kaynak yöntemi ile 4 mm çapında OE S1 kaynak teli ve OP 1100 Algomera kaynak tozu kullanılarak kaynatılmıştır. Ana malzeme, ITAB kaynak metali mikro yapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak edilen malzemelerin, sertlik, çekme ve çentik darbe deneylerinde, artan karbon oranına bağlı olarak sertlik, akma ve çekme mukavemetinin arttığı bununla beraber % uzaman ve çentik darbe dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Çekme deneyinde % 0,24 C, %0,37 C ve % 0,46 C'lu malzemeler, kaynak metalinden kopmuş ayrıca %0,37 C ve %0,46 C'lu kaynaklı malzemelerin 180° eğme deneyinde ise birleşme bölgelerinde çatlama meydana gelmiştir. %0,15C, %0,17C ve %0,22C'lu malzemelerin kaynak edilebilirliğinin iyi olduğu görülmüştür. (Kılınçer, 1998)

Mehmet YILDIZ'ın 2000 yılında yayımlanan "Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi" konulu yüksek lisans tezinde; "Doğalgaz taşımacılığında kullanılan üç tip boru hattının malzeme özellikleri, üretimi ve kaynak işlemleri teferruatlı olarak ele alınmıştır. Bu boru hatları şunlardır; iletim hatları, dağıtım hatları, iç tesisat hatları. 21 mbar gibi düşük basınçlar altında çalışan ve bina içlerinde kullanılan hatlara akış yani iç tesisat hatları denir. İletim hatları, üretim alanlarından ana dağıtıcı firmalara gaz taşımak amacıyla kullanılan ve örnek olarak 70 bar gibi yüksek basınç altında çalışan büyük çaplı borulardan oluşan hatlardır. Dağıtım hatları ticari, evsel ve endüstriyel kullanıcılara doğalgaz taşımak için kullanılan hatlardır ve iletim hatlarına kıyasla daha düşük basınç altında çalışırlar. Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir. Kalifiye edilmiş üreticiler sattıkları boru üzerinde API kısaltmasını kullanma hakkına sahiptirler.

Hat borularının imalatında kullanılan ana standart API Spec 5L dir. Bu standart dikişsiz ve boyuna dikişli boruları kapsamaktadır. API Spec 5L Grade A, B, X kalite gruplarını ihtiva etmektedir ve daha önceleri ayrı yayınlar olan Spec 5LS ve 5LX, API Spec 5L'ye dahil edilmiştir. Tüm API hat boruları psi olarak verilen minimum akma mukavemetleri ile gösterilirler. Hat boruları imalatında uygulanan yöntemlere göre dikişli

ve dikişsiz olmak üzere iki şekilde üretilebilirler. Dikişsiz borular şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borulardır. Bu borular çeliklerin sıcak işlenmesi ile imal edilir.

Dikişli boru imalatında birçok farklı imalat yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler boru üzerindeki boyuna dikişin sayısına ve kullanılan kaynak ekipmanına bağlı olarak farklılık gösterir. Dikişli borulara örnek olarak, elektrik kaynaklı, toz altı kaynaklı, gaz metal ark kaynaklı, çift dikişli, spiral dikişli borular verilebilir. Hat borusu olarak seçilecek malzemelerin fabrikasyonu çok önemlidir. Hat borusu olarak kullanılacak malzemenin eğilebilme veya şekillendirilebilme kabiliyeti, kaynağa uygunluğu, ısı işleminin kolaylığı, nihai mikro yapısının uniform ve stabil olması çok önemlidir. Hat borusu için malzeme seçimi yapılırken servis ve ilgili standardın ön gördüğü koşulları sağlayan en ekonomik malzeme seçilmelidir.

Petrol ve doğalgaz boru hatlarının çok büyük bir kısmı kaynak işlemi ile birbirine birleştirilmektedir. Boru hatlarının inşasında en yaygın olarak kullanılan üç kaynak yöntemi, elle ark kaynağı, otomatik gaz kaynağı ve iç tesisat hatlarında oksiasetlen kaynak yöntemi olduğu için bu çalışmada bu yöntemler detaylı olarak ele alınmıştır. Boru hatları kaynaklan üzerindeki kontroller çok sıkı olduğundan dolayı, hem kaynak prosedürü hem de bu prosedürü kullanacak olan kaynakçı çok iyi derecede kalifiye olmalıdır. Boru hattı kaynaklan çok önemli ve özel bir özen gerektiren bir proses olduğu için, tamamlanmış kaynaklar çok hassas bir şekilde kontrol edilmelidir. Kaynak hatalarının sebepleri ve bunların önlenmesi için detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Doğalgaz ve petrol boru hatlarının kaynağında en yaygın olarak kullanılan standart API 1104 ve 1107'dir. Bu standartlar petrol ve doğalgaz hatları üzerinde yapılan kaynaklı birleştirmelerin yeterli kalite seviyesinde yapılabilmesi için gerekli olan şartları ihtiva etmektedir.

Boru hattı yapımında kullanılan ve genellikle 42 ile 70 ksi (290-483 Mpa) arasında akma mukavemetine sahip hat boruları, API 5L veya diğer ilgili standartlara göre üretilmiş mikro alaşımlı veya karbon-mangan çelikleridir. Saha koşullarında yapılan kaynak işleminde boru sabit pozisyonadadır ve kaynak işlemi borunun dışından tüm pozisyonlarda gerçekleştirilir. Kök paso yukarıdan aşağıya doğru elektroda salınım

hareketi yaptırmadan elle ark kaynak yöntemi kullanılarak yapılır. EXX10 tipi selülozik elektrodlar, tüm pozisyonlarda kullanılabilmesinden ve iyi bir nüfuziyete sahip olmasından dolayı boru hatları kaynağında yaygın olarak kullanılmaktadır. Saha koşullarında kök pasonun başarılı bir şekilde yapılabilmesi için kaynakçının kabiliyetli ve iyi eğitilmiş olması gerekmektedir.

Düşük hidrojen içerikli elektrodların nüfuziyet kabiliyeti zayıf olduğundan dolayı, boru hatlarının kaynağında pek kabul görmemektedir. Aynı zamanda bu elektrodların cürufları yukarıdan aşağıya pozisyonda kaynak metalinin önüne doğru akma eğiliminde olduğundan kaynak işlemini zorlaştırmaktadır. Kök paso diğer pasolara kıyasla ufak ve zayıf olduğundan dolayı borunun ufak bir hareketi bu pasonun çatlamasına neden olabilir. Buna ilave olarak, elektrod üzerindeki selülozik örtü ana metalin ısıdan etkilenmiş bölgesine hidrojenin girmesine neden olur ve bunun sonucunda ana metalin karbon eşdeğerine ve kaynak metalinin kök paso atıldıktan sonra soğuduğu sıcaklığa bağlı olarak, dikiş altı çatlakları oluşabilir. Bu nedenlerden dolayı, modern boru hattı kaynak uygulamaları sıcak paso kaynakçısı olarak bilinen diğer kaynakçılara gereksinim duymaktadır. Sıcak paso kaynakçısı kök pasonun tamamlanmasından sonra beş dakika içinde sıcak pasoyu yapmaya başlamalıdır. Dolgu pasosu kaynakçısı olarak bilinen diğer kaynakçılar son paso yani kapak paso hariç geri kalan gerekli kaynak işlemlerini yaparlar. Kapak paso olarak bilinen en son paso ilgili standartlarda belirtilen kaynak yüksekliğini yanma çentikleri oluşturmadan sağlaya 'bilecek yetenekli kaynakçılar tarafından yapılmalıdır. Ham petrol, doğal gaz, hidrokarbon ürünleri ve su dünyanın her yerinde Sibiryaya ve Alaska gibi soğuk bölgelerden Orta Doğudaki çöllere, Avustralya'ya, Güney Amerika'ya, Avrupa'ya boru hatları vasıtasıyla gittikçe artan miktarlarda taşınmaktadır.

Ürün akışını kesintiye uğratmadan ana hattın branşman almak veya hat üzerinde tamirat yapmak için körleme ve hot-tapping işlemi olarak bilinen teknikler geliştirilmiştir. Hot-tap işlemi canlı hattın yeni bir hat almak amacıyla canlı hat üzerine delik açmak için kullanılan delme makinasıyla yapılan işlem olarak tanımlanabilir. Bu işlem herhangi bir ürün sızıntısına veya kaçağına neden olmaksızın yapılabilir. Bu işlemde canlı hattaki gaz akışı geçici olarak durdurulur. Körleme işlemi hat içerisindeki akışı geçici olarak kesme işlemidir. Bu işlem boru hattı üzerine ilaveler yapılacağı

zaman yı hat üzerinde tamirat işlemleri yapılacağı zaman kullanılabilir. Fittings hat içerisinde akış söz konusu iken boru üzerine kaynaklanacağından dolayı, kaynak tekniği boru ve fittings arasında güvenilir bir bağlantı elde edebilmek için dikkatlice gözden geçirilmelidir.

Canlı hatlar üzerine yapılan kaynak işleminde boyuna ve çevresel kaynak olmak üzere iki tip kaynak dikişi mevcuttur. Boyuna kaynakların yapılması çok büyük zorluklar teşkil etmemektedir. Boyuna kaynakların aksine çevresel kaynaklar çok kritiktir. Yakıp delme hatası oluşma riskinden, hidrojen gevrekliği oluşma ihtimalinden ve gaz akışı ile ortaya çıkan soğuma etkisinden dolayı çevresel kaynakların kaynak koşulları zordur. Uygulama standartları ve kodlar bir yapının veya yapı bileşeninin amaca uygun kalitede üretilmesine olanak sağlarlar.” değerlendirmelerine yer verilmiştir.

Bu çalışmada, prosedür ve kaynakçı kalifikasyon testleri ile ilgili farklı ülkelere ait standartların içerikleri ve müsaade edilen kaynak hataları seviyeleriyle birlikte açıklanmıştır. Bu standartlara ilave olarak, boru hattı kaynağında kullanılan malzeme, elektrod ve tahribatsız muayene standartları da teferruatlı olarak anlatılmıştır. Verilen bir uygulama için, yeterli düzeyde kaynak kalitesi elde edebilmek için kaynak prosedürü ve kaynakçı kalifiye edilmelidir. Burada, kaynakçı ve kaynak prosedürü kalifikasyonu için alternatif yöntemler, DIN EN 287, 288, ASME EX, API 1104 ve 1107'e göre tanımlanmıştır. Boru hatları kaynağında sıklıkla karşılaşılan kaynak hatalarının karakteristik özellikleri ve bunların oluşmasına neden olan temel sebepler anlatılmıştır. Kaynakçıların kaynak esnasında minimum hata yapması için dikkat edilmesi gereken hususlar tanımlanmıştır. Boru hattı kaynakları, tamamlanmış kaynağın ilgili kaynak prosedürüne uygun olarak üretilip üretilmediğini ve ilgili standarda göre kabul edilip edilemeyeceğini tayin etmek için hem gözle hem de tahribatsız olarak muayene edilmelidir. Boru hatlarının tahribatsız muayenesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem radyografik test olduğu için bu yöntem ultrasonik, manyetik partikül, sıvı penetrant gibi boru hatlarının muayenesinde kullanılabilecek diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre daha teferruatlı olarak anlatılmıştır. (Yıldız, 2000)

Zakir TAŞ 2004 yılında yayımlanan “Termomekanik işlem görmüş mikroalaşımli çeliklerin kırılma mekaniği-kırılma tokluğu-açısından incelenmesi” konulu doktora tezinde; Mikro alaşımli çeliklerin yassı mamullerinde mikroyapı ile kırılma mekaniği özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Elastik plastik kırılma mekaniği metotlarıyla kırılma mekaniği özelliklerinin karakterizasyonu ön plana alınmış; bunun için J-integral konsepti kullanılmıştır. Mikroalaşımli çelikler, % 0.1 5 'ten daha az Nb, V ve Ti içeren çelikler olarak tanımlanmakta olup; değişik sertleştirme mekanizmalarının ve uygun termomekanik işlemlerin uygulanması ile dayanım, tokluk, kaynaklanabilirlik gibi çok iyi özellikler kombinasyonuna sahip bir malzeme grubudur. Bu çalışma çerçevesinde petrol ve gaz taşıyan borularda kullanılan X65/API-5L tipi mikroalaşımli çelikler kullanılmış; karşılaştırma amacıyla X60/API-5L ve X52/API-5L tipi mikroalaşımli çeliklerden de yararlanılmıştır. Mikroyapıları incelenmesi optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobuyla yapılmış; metalik olmayan kalıntı ve çökeltilerin dağılım ve büyüklüklerinin incelenmesi ise tarama elektron mikroskobunda, kısmen de optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme ve çentik darbe deneyleri uygulanmıştır. Kırılma mekaniği deneyleri üç noktadan eğme numunelerinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Çatlak mukavemet eğrilerinin elde edilmesine yönelik olarak deneylerde çoklu numune yöntemi kullanılmıştır. (Taş, 2004)

3. MATERYAL

3.1. Petrol ve Doğalgaz Borularında Kullanılan Çelikler

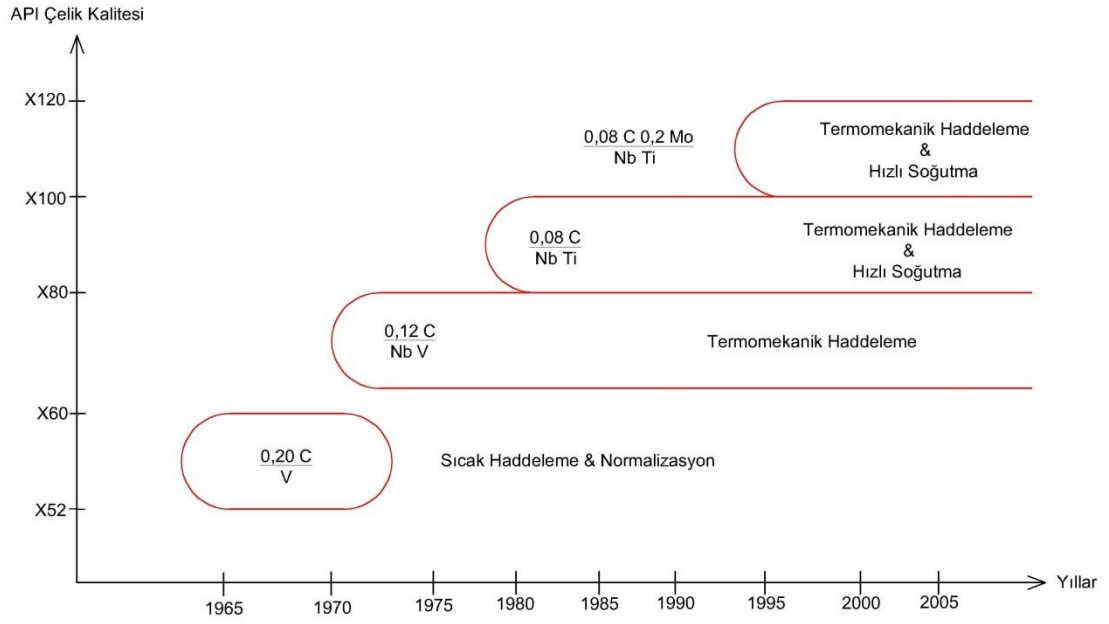
Tüm dünyada petrol ve doğalgaz taşınımında API standardı borular kullanılır. Bu standartta boruların imalatında kullanılan çelik saclar Grade A25, A, B, X42, X46... vs. şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma minimum akma mukavemetine göre yapılmaktadır. Örneğin; Grade A25 25.000 psi minimum akma dayanımına sahip sacı, Grade A 30.000 psi minimum akma dayanımına sahip sacı, Grade B ise 35.000 psi minimum akma dayanımına sahip sacı ifade etmektedir. Grade X42 ve X46 saclarındaki 42 ve 46 rakamları ise; sırasıyla borunun 42.000 ve 46.000 psi'lik minimum akma mukavemetine sahip olduğunu gösterir. Çizelge 3.1. Akma mukavemeti sacdan alınan test numunesinin çekme deneyine tabii tutulması ile belirlenmektedir. (API 5L, 2013)

Çizelge 3.1 API-5L'e göre boruların akma ve kopma mukavemetleri

<i>Malzeme Sınıfı</i>	Minimum Akma Mukavemeti		Minimum Kopma Mukavemeti	
	Psi	MPa	Psi	MPa
<i>A-25</i>	25400	175	45000	310
<i>A</i>	30500	210	48600	335
<i>B</i>	35500	245	60200	415
<i>X42</i>	42100	290	60200	415
<i>X46</i>	46400	320	63100	435
<i>X52</i>	52200	360	66700	460
<i>X56</i>	56600	390	71100	490
<i>X60</i>	60200	415	75400	520
<i>X65</i>	65300	450	77600	535
<i>X70</i>	70300	485	82700	570
<i>X80</i>	80500	555	90600	625
<i>X90</i>	90600	625	100800	695
<i>X100</i>	100100	690	110200	760
<i>X120</i>	120400	830	132700	915

Çeliklerde mukavemeti artırmanın en etkin yöntemi, karbon içeriğini artırmaktır. Ancak, karbon içeriği artırıldıkça tokluk ve kaynaklanabilirlik olumsuz etkilendiğinden boru hattı çeliklerinin geliştirilmesine, bir anlamda, tersten başlanılmıştır: Yani, tokluk ve kaynaklanabilirliği yüksek tutmak için çeliğin karbon içeriği düşük tutulmuş, mukavemetin düşmemesi içinde mikroalaşımlandırmalar yapılmıştır. (V, Ni, Mo, Cu, Cr, Ti, B vs.). Bu şekilde mükemmel kaynaklanabilirliği olan, tok ve mukavemeti yüksek boru hattı çelikleri elde edilmiştir.

Geçmiş 30 yılda, hat borusunun işlenmesi ve geliştirilmesi ile ilgili çeşitli talepler gelmiştir. Boru hattı ekonomisi açısından hat boruları, saha montajına ve kaynağa en iyi şekilde yanıt vermeli ve yüksek işletme basınçlarına izin vermelidir. Bu gereksinimler boru hattı çeliğinin yüksek mukavemete, tokluğa ve en uygun geometriye sahip olmasını zorunlu kılmaktadır. Şekil 3.1’de yüksek mukavemetli çeliklerin tarihsel gelişimi gösterilmektedir. 70’lerde, sıcak haddeleme ve normalizasyon, termomekanik haddeleme ile yer değiştirmiştir. Sonraki proses çelikleri niobyum (Nb) ve vanadyumla (V) mikroalaşımlandırarak ve karbon bileşimi azaltılarak üretilecek malzemelerin X70’e kadar yükselmesine olanak tanımıştır. 80’lerin ortasında, termomekanik haddeleme sonrasında hızlandırılmış soğutma işlemi geliştirilmiştir. Şekil 3.1. Bu yöntem yoluyla X80 gibi daha yüksek mukavemete ve karbon bileşimi azaltılarak mükemmel saha kaynaklanabilirliğine sahip malzemelerin üretilmesi mümkün kılınmıştır. (Uysal K., 2010)



Şekil 3.1 Yüksek mukavemetli çeliklerin gelişimi (Uysal K., 2010)

Ereğli Demir Çelik gibi yerli API çeliği üreten fabrikalarda X80'e kadar çelik üretimi yapılabilmektedir. Bu nedenle TANAP, NABUCCO gibi yerli üretim boru kullanımına ağırlık verilen Milli projelerde şartnameler genellikle X70 veya X80'e göre oluşturulmaktadır.

Boru hatlarında kullanılan malzemelerin mukavemetinin yükselmesi, hidrostatik testler sonucu ortaya çıkan işletme basınçlarının yükselmesini, dolayısıyla akış hızının ve boru hattı debisinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca boru hattı işletmeciliğinde taşınan petrol ve doğalgazın güvenli bir şekilde bir yerden başka bir yere iletilmesi çok önemlidir. Kullanılan boruların malzeme kalitesinin yüksek olması boru hatlarının dinamik yükler karşısında dayanıklı kalmasına olanak tanımıştır. Bu nedenle boru hattı çeliklerinin mukavemetlerinin geliştirilmesi için termomekanik haddelenme, mikro alaşımlandırma ve hızlı soğutma gibi yöntemler gün geçtikçe geliştirilmektedir.

Boru imalatında kullanılan çeliklerinde temel alaşım elementleri aşağıda sunulmuştur;

Karbon (C); Çeliğin en temel alaşım elementidir. Karbon miktarının artmasıyla birlikte alaşımsız çeliklerin dayanımı ve sertliği önemli ölçüde artar. Karbon miktarı arttıkça

çelikteki perlit oranı arttığından, çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırı artar. Ancak, % 0,8 ila 0,85 C'dan sonra dayanım daha fazla artmaz ve çelik giderek kırılganlaşır. Sertleştirilmiş çeliklerde en yüksek sertlik değerine (yaklaşık 67 RSDC) yaklaşık % 0,6 C düzeyinde ulaşılır ve karbon miktarının daha da arttırılmasıyla, ani soğutma sonrasında yapıda artık östenit kalacağından sertlikte artma meydana gelmez. Diğer taraftan, karbon miktarı arttıkça çeliğin sünekliği, dövülebilirliği, derin çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği azalır, ısıl işlemden çatlama ve deformasyon eğilimi artar. Bu nedenle boru hattı çeliklerinde karbon miktarı % 0,10'lara kadar düşürülmektedir. Çeliklerinin mukavemeti ferrit tane incelmesi, çökme sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi mekanizmalarının birlikte uygulanması ile arttırılmaktadır. Bu alternatif mukavemet arttırma mekanizmalarından dolayı, çeliklerinin mukavemetinin arttırılması perlit, martenzit veya beynitte olduğu gibi yüksek karbon (C) bileşimine bağlı değildir.

Mangan (Mn); Mangan, çeliğe genellikle cevherden intikal eder, fakat özellikleri iyileştirdiğinden belirli bir oranda çeliğin içerisinde bulunması istenir, hatta alaşım elementi olarak arttırılabilir. Çeliğin dayanımını artırır, fakat sünekliğini biraz azaltır. Manganın, çekme dayanımı ile akma sınırını arttırma etkileri birbirine benzer. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn artışı ile çekme dayanımı yaklaşık 100 MPa artar, % 3-8 Mn miktarları arasında artış daha azdır ve % 8 Mn miktarından itibaren düşme görülür. Çeliğin dövülebilirliğini ve sertleşebilirliğini iyileştirir. Kaynak kabiliyetini olumsuz olarak etkilemez, bu nedenle düşük karbonlu, fakat nisbeten yüksek dayanımlı kaynak edilebilir çeliklerde % 1,6 'ya kadar Mn ilave edilir. Yüksek mangan ve yüksek karbonlu çelikler östenitik yapıya sahiptirler ve aşınma dayanımları yüksektir. Çeliğin yüzey kalitesini iyileştirir. API çeliklerinde %2.10'a kadar kullanılmaktadırlar.

Silisyum (Si); Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılan temel elementlerden biridir. Çelikte bulunan silisyum miktarı, üretim tarzına bağlı olarak da değişir. Sakin dökülen alaşımsız çeliklerde, en fazla % 0,60 Si bulunur. Düşük alaşımlı çelikler, % 2'ye kadar Si içerirler. Ayrıca, % 14-15 Si içeren çeliklerde de korozyon dayanımı iyidir, fakat dövülemezler ve kırılgandırlar. Silisyum miktarı arttıkça, çeliğin tane büyüklüğü de artar. Boru hattı çeliklerinde %0,4 - %0,55 aralığında Si kullanılmaktadır.

Kükürt (S); Akma ve çekme mukavemetine etkisi yok denecek kadar azdır. İstenmeyen bir elementtir ve daima azaltılmaya çalışılır. Yeni gelişen teknolojilerle, bugün % 0,003 S değerine kadar inilebilmektedir. Ayrıca kaynaklanabilirliği kötü yönde etkiler. Çelik kalitelerinin belirtilmesinde sınırlanan element olarak fosforla birlikte birinci planda göz önünde tutulur. Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılma sebepleri olur. Bu olumsuz etki kükürdün manganla birleşmesi sağlanarak önlenir. Kükürt miktarı yükseldikçe, malzemenin tokluğu ve sünekliği önemli ölçüde azalır. Ayrıca kükürt, kaynak edilebilirliği ve sertleşebilirliği kötüleştirir.

Fosfor (P); Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır, yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılma yaratır. Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir. Ferritin dayanımını en fazla arttıran elementtir. Bu nedenle, düşük miktarlarda bulunsa bile çeliğin dayanımını ve sertliğini artırıcı, buna karşın şekillendirme yönünde sünekliği ve darbe dayanımını azaltıcı etki yapar. Bu etkiler, özellikle yüksek karbonlu menevişlenmiş çeliklerde daha fazladır. Çeliğin korozyon dayanımını iyileştirmesine karşın, kükürtle birlikte çelikte mümkün olduğunca az bulunmasına çalışılır ve çelik kalitesinin belirlenmesinde birinci planda rol oynar.

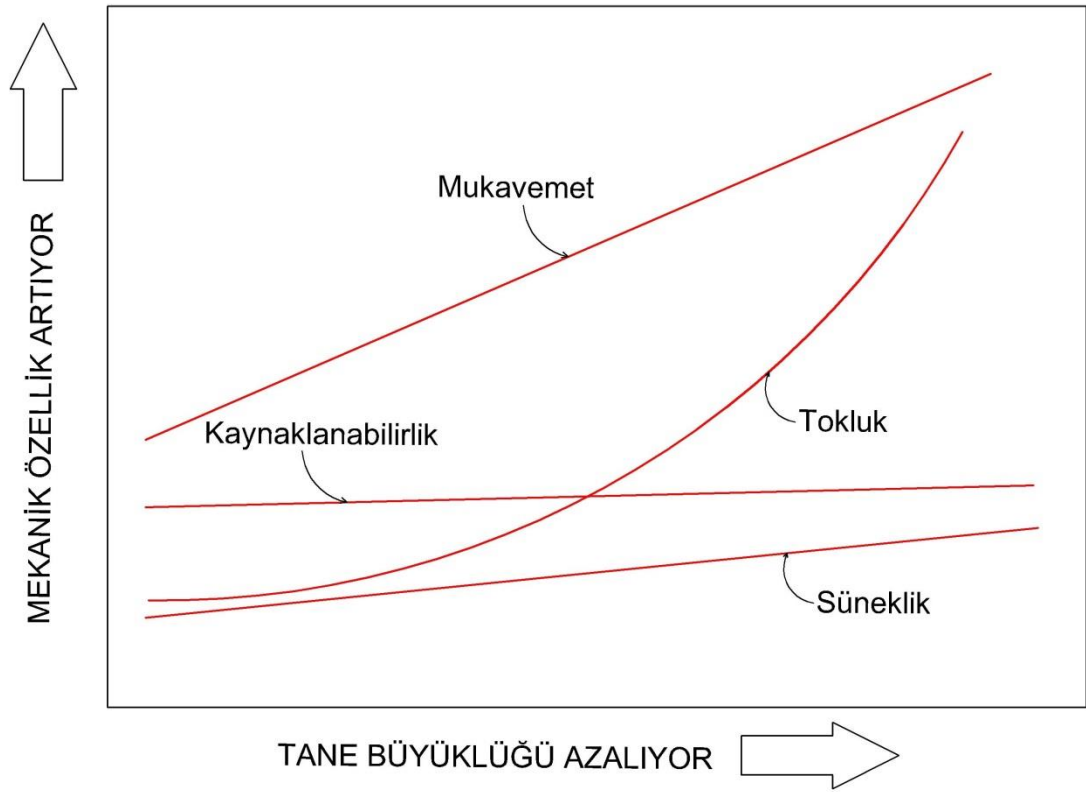
3.2. Boru Hattı Çeliklerinin Üretiminde Mekanik Özellik İyileştirme Yöntemleri

3.2.1. Termomekanik Haddeleme

API çelikleri çoğunlukla normalize edilmiş veya haddelenmiş durumda kullanılmaktadır. Haddeleme işlemi malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Haddelemenin yanı sıra su verme ve temperleme veya normalizasyon işlemleri kalın et kalınlıklarında tokluğu artırabilir veya bazı kalitelerin mukavemet sınırlarını genişletebilir. Bunlarla birlikte termomekanik haddeleme gibi özel haddeleme uygulamaları da geliştirilmiştir. (Tekin E., 2012)

Çelikler, genellikle sıcak deformasyon işlemleri sonucunda şekillendirilirler. Mevcut sıcak şekillendirme işlemlerinde çeliğin etkilendiği sıcaklık miktarı kontrol

edilememektedir. Bu durum çeliğin tanecik yapısında dolayısıyla mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Termomekanik Haddeme ise, malzemeleri şekillendirmek için uygulanan sıcak deformasyon işlemlerinin kontrollü bir biçimde uygulanmasını sağlamaktadır. Bu şekilde malzemenin tanecik yapısında meydana gelen değişiklikler kontrol altına alınarak mekanik özelliklerin artırılması sağlanmaktadır. (Şekil 3.2.) (Tekin E., 2012)



Şekil 3.2 Tane büyüklüğünün mekanik özelliklere etkisi (Tekin E., 2012)

Termomekanik Haddeme uygulamasıyla hem üretilen ürünlerin kalitesini yükseltmek hem de üretim safhalarının kısaltılmasıyla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Termomekanik Haddeme kavramından çok genel olarak, plastik şekil verme ile ısı işleminin uyumlu bir kombinasyonu anlaşılmalıdır. Termomekanik Haddeme uygulamaları temelde belirli bir reel yapıda plastik şekil verme esnasında meydana gelen kafes hatalarından yararlanma esasına dayanmaktadır. Plastik şekil verme duruma göre faz dönüşümünden önce, faz dönüşümü esnasında ve faz dönüşümünden sonra gerçekleşmektedir.

Termomekanik Haddeleme uygulamasıyla, metalik malzemelerde, sabit kalabilen ya da biraz azaltılabilen alaşım gereksinimiyle, kullanım ve işlenebilirlik özelliklerinin yükseltilmesi yanında metalürjide ve metal işleyen endüstrinin proses kademelerinde, enerjide, güç sarfında ve imalat safhalarında da azalma meydana gelmiştir. Termomekanik Haddeleme, ilk olarak alaşımli çeliklerde uygulanmıştır. Termomekanik Haddeleme, çelikten, yüksek mukavemetli alüminyum ve titan alaşımlarına kadar birçok metalde tane boyutu ve çökelti sertleşmesini kontrol altına almak amacıyla uygulanmaktadır.

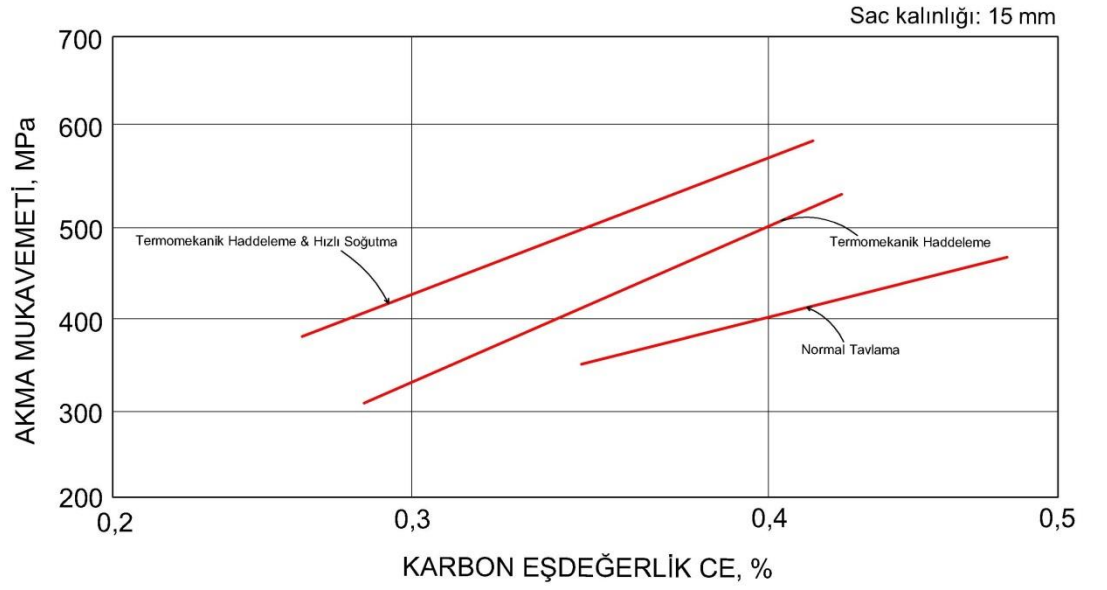
Termomekanik Haddeleme ile, konvansiyonel ısı işlem ve mekanik işlemlerin ayrı ayrı uygulanmasıyla elde edilemeyen mikroyapı ve mekanik özellikler sağlanır. Termomekanik Haddelemelerle genellikle malzemenin mukavemetinin artması ile birlikte süneklik ve tokluğunun artması amaçlanır. Bu işlemde, mikroyapıda plastik şekil vermeyle meydana gelen kafes hatalarından yararlanır. Bu yöntemle boru hattı çeliklerinde çok daha yüksek mukavemet ve tokluk değerleri elde edilmektedir. Mekanik özellikler için etkin olabilecek mekanizmalardan (dislokasyon sertleşmesi, katı çözültü sertleşmesi, tane sınırı sertleşmesi, çökeltme sertleşmesi) optimum olarak yararlanılabilmesi ve malzemenin beklentilerin farklı oranlarda müştereken en iyi oranlarda karşılanabilmesi için, malzeme bileşiminin ve termomekanik haddelemenin birbiriyle uyum içinde olması gerekir. (Taş Z., 2006)

Termomekanik haddelenmiş çeliklerde mikroyapıda istenen özelliklerin sağlanması haddeleme prosesi ile çok ilgilidir. Mikroyapıda, çelik özelliklerinde istenen yüksek mukavemet, süneklik ve kaynaklanabilirlik için ferrit tane boyutunu küçültmek en etkili yöntemdir. (Taş Z., 2006)

3.2.2. Hızlandırılmış Soğuma

1980'lerin ortasında, termomekanik haddeleme sonrasında hızlandırılmış soğutma işlemi geliştirilmiştir. Bu yöntem yoluyla, X80 gibi daha yüksek mukavemete ve karbon bileşimi azaltılarak mükemmel saha kaynaklanabilirliğine sahip malzemelerin üretilmesi mümkün kılınmıştır. Termomekanik haddeleme sonrası hızlandırılmış soğuma ile boru hattı çeliklerinin karbon eşdeğeri azaltılarak kaynaklanabilirliği ve tokluğu artırılmaktadır. Ayrıca termomekanik haddeleme sonrasında hızlandırılmış

soğutma yönteminde, termomekanik haddeleme sonrasında normal tavlama (menevişleme) yöntemine göre daha yüksek akma mukavemetine ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 3.3. Böylelikle belli bir akma veya çekme mukavemetinde, daha az alaşımlı, yani daha hesaplı (ucuz) kimyasal bileşime ulaşılmaktadır. Aynı zamanda daha düşük karbon eşdeğerliğinden ötürü kaynaklanabilirlik de iyileştirilmiştir. (Taş Z., 2006)



Şekil 3.3. Termomekanik haddeleme ve hızlı soğutma neticesinde sabit bir akma mukavemetinde karbon eşdeğerliliğin düşürülmesi (Taş Z., 2006)

3.2.3. Mikroalaşımlandırma

Boru hattı çeliklerinde mukavemet arttırıcı alaşım elementlerinin başında Molibden(Mo), Krom(Cr), Niobyum(Nb), Vanadyum(V), Titanyum(Ti), Bor(B) gelmektedir. Bu alaşım elementleri belirli oranlarda çelik ile alaşımlandırıldığında borunun mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır.

Molibden (Mo);Tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır. Meneviş gevrekliğini giderir. Meneviş sıcaklığından yavaş soğumalarda; bazı alaşımların tane sınırlarında karbür çökmesi meydana gelir, bu da kırılabilirliğe neden olur. Molibden bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir.

Kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı elementtir ve düşük alaşımlı çeliklerde genellikle krom ile birlikte % 0,15-0,30 arasında bulunduğunda çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve sıcağa dayanımı artırır.

Krom (Cr); Çelikte oksidasyona ve korozyona karşı dayanımı, aşınma direncini, sertleşebilirliği artırır. Karbür yapıcı element olduğundan, çekme dayanımını ve sıcağa dayanımı artırır, sünekliği düşürür. Ancak, bazı çeliklerde meneviş kırılabilirliği doğurabileceğinden, olumlu etkilerini iyileştirmek için nikel ve/veya molibden ile birlikte kullanılır.

Vanadium (V); Boru hattı çelikleri en çok %0,10 V içermekte ve soğutma sırasında ferrit içyapısında çökelen (5-100nm) nano boyutlu V(Siyanür) çökeltileri ile mukavemet yükselmektedir. V(CN) çökeli mi soğuma hızına çok bağımlıdır. Soğuma hızına ve dolayısıyla sac kalınlığına bağılı olarak, her bir %0.01 V, 5-15 MPa artış sağlayabilmektedir. Soğuma hızı, gerçekleşecek çökelim sertleşmesinin düzeyini belirler.

Örneğin, 170°C/dk düşük hızlarda V(CN) kolaylıkla irileşmekte ve mukavemet artışında etkin olamamaktadır. Çok hızlı soğutmalarda da daha az V(CN) çökelebildiğinden mukavemet artışı fazla olamamaktadır. (Tekin E., 2012)

Niobyum (Nb); Bunlarda mukavemet artışı çoğunlukla NbC çökeli mi ile sağlanır. %0.02-0.04 Nb düzeylerinde her bir %0.01 Nb, mukavemette 35-49 MPa artış sağlayabilir. Nb bu artışı hem tane küçültmesi hem de çökelim sertleşmesi ile sağlamaktadır.

Mukavemet artışına karşın tokluk düşmektedir. Bunu önlemek için %C aşağı çekilir. Bu çelikler haddelenirken hafif ezmelerden ve yüksek bitirme sıcaklıklarından kaçınılmalıdır. Aksi takdirde karışık tane büyüklüklü ya da Widmanstatten ferrit içerikli içyapılar oluşur ve tokluk düşer. (Aydın E., 2011)

Titanyum (Ti); Ti, tane küçültücü ve çökelim sertleştirici olduğu gibi aynı zamanda kalıntı biçim denetimi de sağlar. %Ti \leq 0.025 düzeylerinde, oluşturduğu TiN çökeltileriyle östenit tane büyümesini kısıtlar. Bu çelikler için yenilenme denetimli

haddeleme çok uygundur. TiN sıvıdan çökeldiğinden, çökelim sertleşmesi için aşırı büyüklüktedir. Eğer çeliğin bileşimindeki Ti artırılırsa önce (Mn,TiS) kalıntılar, daha sonra yumru biçimli $Ti_4C_2S_2$ bileşikleri oluşur. Çökelim sertleşmesine yol açan TiC çökeli mi bunları izler. Ancak, TiC çökeltilerinin çökelim sertleşmesi sağlayabilmesi için çökeltilerin <30nm büyüklüklerinde olması gerekir. Modern HSLA çelikleri kalıntı azotu (N) bağlamak amacıyla yaklaşık %0.025 civarında titanyum (Ti) içermektedir. Bu sayede ısı tesiri altındaki bölgede tane incelmeye ve her tarafta iyi bir tokluk elde edilebilir. (Tekin E., 2012)

Bor (B); Demir Bor ikili faz diyagramına bakıldığında metaller arası iki bileşik görülmektedir. Bunlar; FeB ve Fe_2B bileşikleridir. Ferrobor alaşımları FeB ve Fe_2B gibi metaller arası bileşiklerden oluşmaktadır. 1538 °C'de eriyen demir ve 2092 °C'de eriyen Bor'un oluşturduğu sistemde FeB ortorombik kristal yapıya sahip olduğu ve birim kafesin 4 Fe ve 4 B atomlarından meydana geldiği bilinmektedir.

Çeliğe ilave edilen çok düşük oranlardaki bor, hem yalın karbon çelikleri ve hem de alaşımlı çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmaktadır. Sertleştirmeyi arttırmak için çeliğin içine 5 - 15 ppm (maksimum 30 ppm) bor ilave edildiği bu güne kadar ki çalışmalarda görülmektedir. Bor, çeliğe ilave edilen diğer sertleştirici elementlerin, örneğin karbon, manganez, krom, molibden, v.b. sertleştirme derecesini de arttırmaktadır. Çeliğin içine çok az miktarda ilave edilmesi durumunda çeliğin sertliğini arttırması nedeniyle bor, çelikte kullanılan pahalı alaşım elementlerinin maliyetlerinde tasarruf sağlar. Alaşımlı çeliklere % 0,0010 - 0,0030 arasında bor ilave edilmesi, bu çeliklerin yapısında gerek duyulan Ni, Cr ve Mo miktarlarını düşürür.

Bor, çeliğin sertliğini karbür oluşturmak suretiyle artırır. Diğer karbür yapan elementlerle kıyaslandığında, çeliğe aynı derecede sertlik kazandırmak için çok az bor ilâvesi gerekir.

Birkaç yüz çeşit borlu çelik mevcuttur ve bunlar ISO, AISI, AFNOR ve DIN tarafından standartlaştırılmıştır. Borlu çeliklerin çoğu Mn ve Cr (% 0,5'e kadar) ile alaşımlandırılmıştır. Bazı hallerde Ni ve Mo içerirler. Karbon oranları, % 0,15 ile % 0,45 arasında değişir. Borlu çelikler başlıca sertleştirilmiş ve temperlenmiş, bazı hallerde ise yüzey sertleştirilmiş koşullarda kullanılırlar. (Aydın E., 2011)

3.3. Petrol ve Doğalgaz Borusu Üretim Yöntemleri

3.3.1. Dikişsiz Boru Üretimi

Dikişsiz borular şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borulardır. Bu borular çeliklerin sıcak işlenmesi ile imal edilir. Gerekirse, istenilen şekil, boyut ve özellikleri elde etmek için sıcak işlenmiş boruya, daha sonra soğuk veya sıcak haddeme uygulanabilir. Günümüzde dikişsiz borular X80 kalitesindeki çeliklere kadar uygulanabilmektedir. Boru üretiminde kaynaklı birleştirmenin bir etkisi olmasa da, sahada yapılan birleştirmeler çoğunlukla kaynaklı olmaktadır. Bu nedenle dikişli boru üretiminde istenen kaynaklanabilirlik özelliği, dikişsiz borularda da istenmelidir.

Spiral kaynaklı veya düz kaynaklı borularda kaynak dibinde oluşan ITAB bölgeleri dikişsiz borularda oluşmamaktadır. Bu durum dikişsiz boruların mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır.

3.3.2. Dikişli Boru Üretimi

Dikişli borular kaynak geometrisine göre, boyuna dikişli ve spiral dikişli olmak üzere ikiye ayrılır. Her sınıfta boyuna ve spiral dikişli borunun kaynak dikişi, ısıl işlem den geçirilmeli veya ITAB bölgesinde martenzit tanecik yapısı kalmayacak şekilde en az 538 °C (1000 °F) sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmalıdır.

3.3.2.1. Boyuna Dikişli Boru Üretimi

Boyuna dikişli borularda, boru malzemesi şekillendirme makaraları kullanılarak istenilen çapta dairesel olarak haddelenir. Haddeme sonucu sacın birleşim yeri kaynak ile birleştirilir.

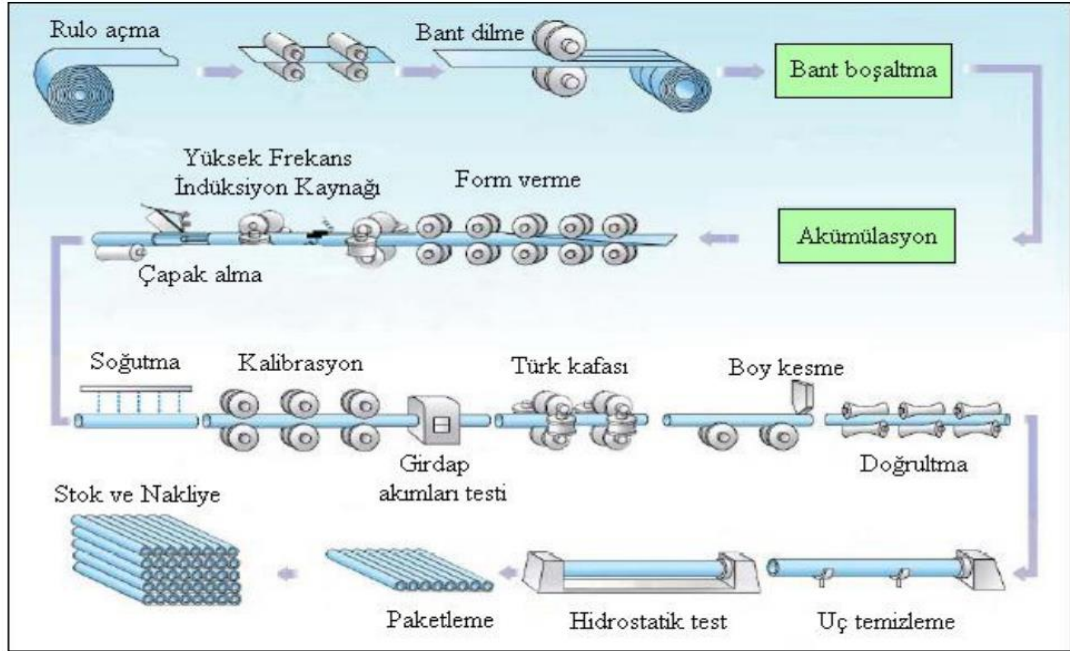
Bu yöntemde, boru çapına uygun ölçülerde üretilmiş olan sac plakalar kullanılmaktadır. Söz konusu bu sac plakalar, özel yöntemlerle kıvrıldıktan sonra (U ve O kıvrıma), öncelikle oldukça yüksek bir hızda punto kaynağına tabi tutulmakta ve daha sonra, bağımsız istasyonlarda önce iç sonra dış kaynak yapılmaktadır.

Boyuna dikişli boru üretiminin iyi yönleri şunlardır;

- Hem iç hem de dış kaynağın düz bir hat boyunca yapılması ile bir takım kaynak hatası oluşumları engellenebilmektedir.
- Geometrik kısıtlamaların ortadan kalkması nedeni ile aynı anda dört veya beş kafa birden kullanabilme imkânı 50 mm gibi oldukça kalın parçaların kaynak edilebilmesini olanaklı hale getirmektedir.
- Çok sayıda kafa kullanımı nedeni ile oldukça yüksek üretim hızlarına çıkılabilmektedir.
- Kaynak dikiş boyunun çok az olması, hem tel ve toz sarfiyatını azaltmakta hem de dikiş uzunluğunun az olması nedeni ile borunun basınç altındaki güvenilirliğini daha da arttırmaktadır.

Boyuna dikişli boru üretiminin kötü yönleri ise;

- Pahalı bir teknolojiye gereksinim duyulmaktadır.
- Boru çapının sac genişliğini doğrudan etkilemesi sebebiyle, istenilen ölçülerde sac bulunamamakta veya fire miktarı çok fazla olmaktadır. (Ada., 2006)



Şekil 3.4. Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı ile boyuna dikişli boru üretimi

3.3.2.2. Spiral Dikişli Boru Üretimi

Petrol ve Doğalgaz boru hattı borularında en çok tercih edilen üretim yöntemidir. Bu yöntemde; Rulo halinde bulunan saclar, şekillendirme makaraları kullanılarak istenilen çapta spiral olarak haddelenir. Haddeme sonucu sacın birleşim yeri içten ve dıştan kaynak ile birleştirilir.

Spiral kaynaklı boru üreten makineler de ana prensip, tahrik silindirleri tarafından itilen sac malzemeye, şekillendirme makaraları yardımı ile spiral bir hareket yaptırılmasıdır. Malzemenin sac olarak makine üzerinde ilerlediği bölümün, malzemenin kaynak sonrası boru olarak ilerlediği bölüm ile yaptığı açılı boru çapını belirleyen en önemli etkidir. Bu açılı makineye yerleştirilen bant genişliği ve elde edilmek istenen boru çapı göz önüne alınarak;

$$\sin\alpha = \frac{B}{\pi D} \quad 3.1$$

denklemleri ile belirlenir. Burada B: Bant Genişliği, D: Boru çapıdır.

Makine ayar açısı ile oynayarak, aynı çaplı boruyu farklı bant genişliklerinden elde etmek mümkündür.

Sac rulonun makineye yüklenmesinden sonra, üretim sürekliliğinin sağlanması için biten rulo ile yeni rulo uçları birbirine kaynak edilir. Bu işleme uç kaynak adı verilir. Uç kaynak işlemi tek ya da tandem kaynak yöntemi ile yapılır. Bantların özellikle son kısmındaki 1/3 lük kısmı diğer bölgelere kıyasla daha küçük bir sarım radyüsüne sahiptir. Hatasız bir kaynak elde etmek için, bantın kaynak noktasına gelmeden önce sarımdan kaynaklanan eğriliklerin giderilmesi gereklidir. Bu nedenle, bant çoğunlukla uç kaynağın hemen sonrasında tahriksiz bir role düzeneğinden geçirilerek doğrultma işlemine tabii tutulur.

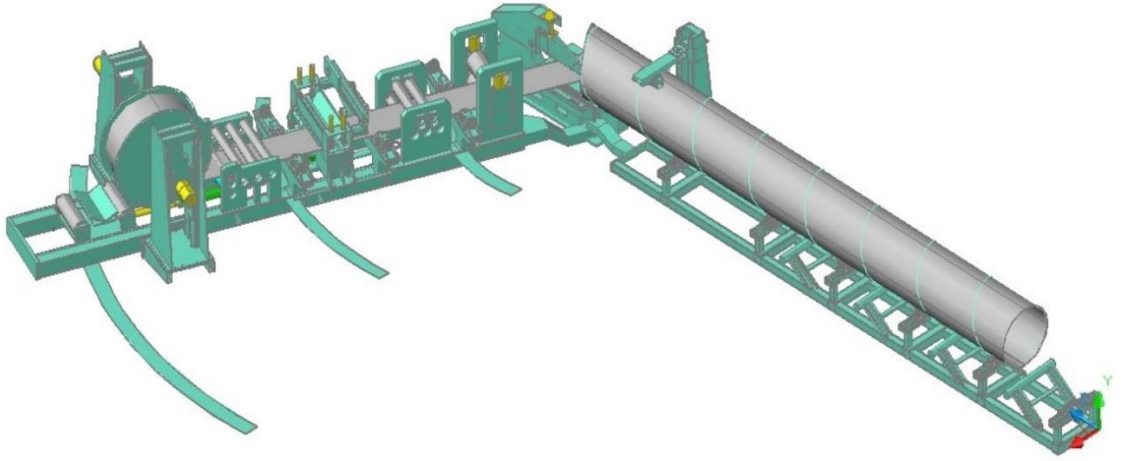
Boru çapını sabit tutabilmek ve iyi bir kaynak dikiş kalitesini elde edebilmek için önem taşıyan konulardan bir tanesi de bant genişliğinin sabit tutulmasıdır.

Bant genişliğinin öngörülenden daha dar olması halinde kaynak noktasında açma, geniş olması durumunda ise bindirme oluşur. Ayrıca, bant kenar yüzeyinin kalitesi iyi

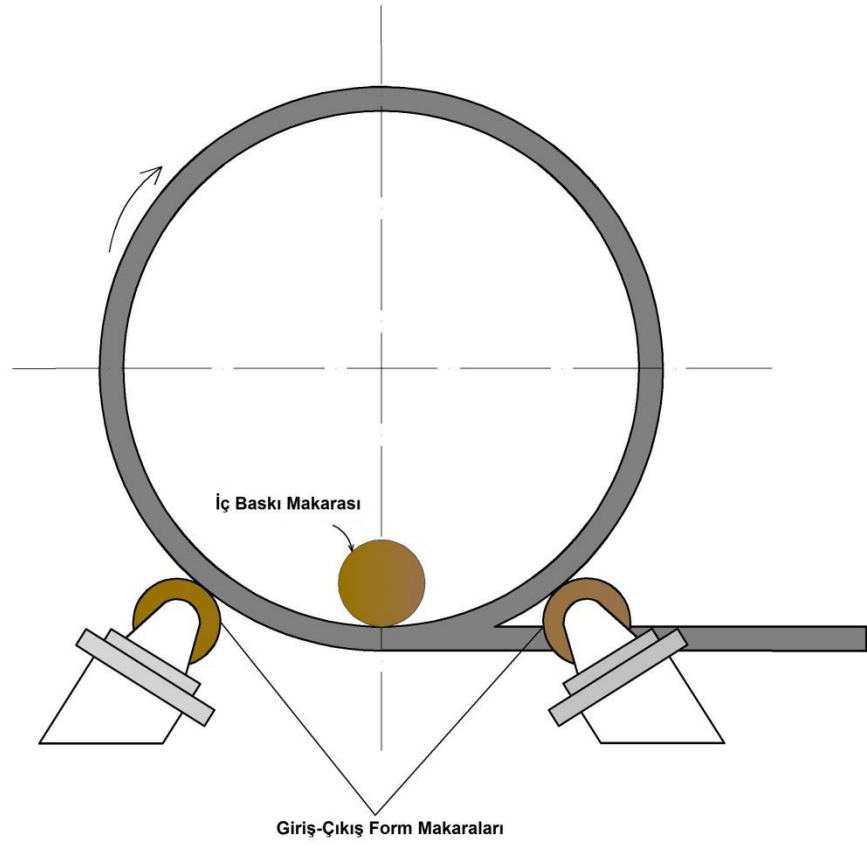
bir kaynak dikişi elde etmek için çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kenar kesme sonrası freze ile malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak ağzı açma işlemine geçilir. Bazı durumlarda, kaynak ağzı açılmadan önce bant kenarlarının belirli bir bölümü kesilerek çıkartılır (Şirin, 2004). Söz konusu bu kesme işlemi mekanik ya da ısı kesme yöntemi ile olabilir. Bant et kalınlığının değiştiği bölgelerde, kılavuz roleleler yardımı ile kesme ekseninin hassas bir şekilde ayarlanması gerekir. Aksi takdirde; kaynak ağzında oluşabilecek bozukluklar, o bölgelerdeki kaynak kalitesinin de bozulmasına yol açar. Açılacak olan kaynak ağzı, malzeme kalınlığına bağlı olarak I, Y veya X biçiminde olabilir.

Bandın ilerletilmesi tek ya da çift roleli tahrik grubu ile sağlanır. Role ile bandın temas yüzeyinde oluşan kuvvetin daha homojen yayılması nedeni ile çift roleli tahrik grubu daha avantajlıdır. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken konu, role grupları arasındaki paralelliğin ve çalışma sırasındaki senkronizasyonlarının çok hassas bir şekilde olması gerekliliğidir. Tahrik grubu ile biçim (form) verme grubu arasındaki uzaklığın çok fazla olması durumunda özellikle ince etli bantlarda düşey yönde sehim oluşabilir ve bant ilerlemesi kontrol altına alınamaz. Bu nedenle, tahrik rolleri olabildiğince biçim verme grubuna yakın olarak yerleştirilir. Bant sürekli olarak tahrik rollerini merkezleyecek şekilde makineye yerleştirilir ve tüm makine ekipman ayarları bunu sağlayacak şekilde yapılır. Biçim verme öncesi yapılan son işlem bant kenarlarının kıvrılmasıdır. Şekil 3.5,6. Çatılanma ve bindirme tipi hataların önlenmesi açısından, kenar kıvrırma son derece önemli bir işlemdir. Burada iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem; bandın her iki tarafında bulunan ve iki farklı radyüse sahip role kullanımınıdır. Daha etkin olan ikinci yöntem ise, iki ayrı rolenin bandın alt tarafında bir diğer rolenin ise bandın üst tarafında olduğu üçlü role grubu kullanımınıdır. Üçlü role kullanımının üstünlükleri; malzeme, boru çapı ve makine açısına bağlı olarak bant kenarlarını istenilen bir radyüste kıvrırma olanağı sağlamasıdır. Tüm bu işlemlerden sonra, biçim verme rollerinin yardımı ile banda spiral bir şekil verilir. Bandın spiral olarak şekillendirme işlemi üçlü kıvrırma role gruplarının yardımı ile yapılmaktadır. Tüm bu şekillendirme makaraları kendi içinde bir dizi bağımsız makaradan oluşmaktadır. Bu bağımsız makaralarının her biri çalışma sırasında makine açısı ile eş açıda olacak şekilde ayarlanmalıdır.

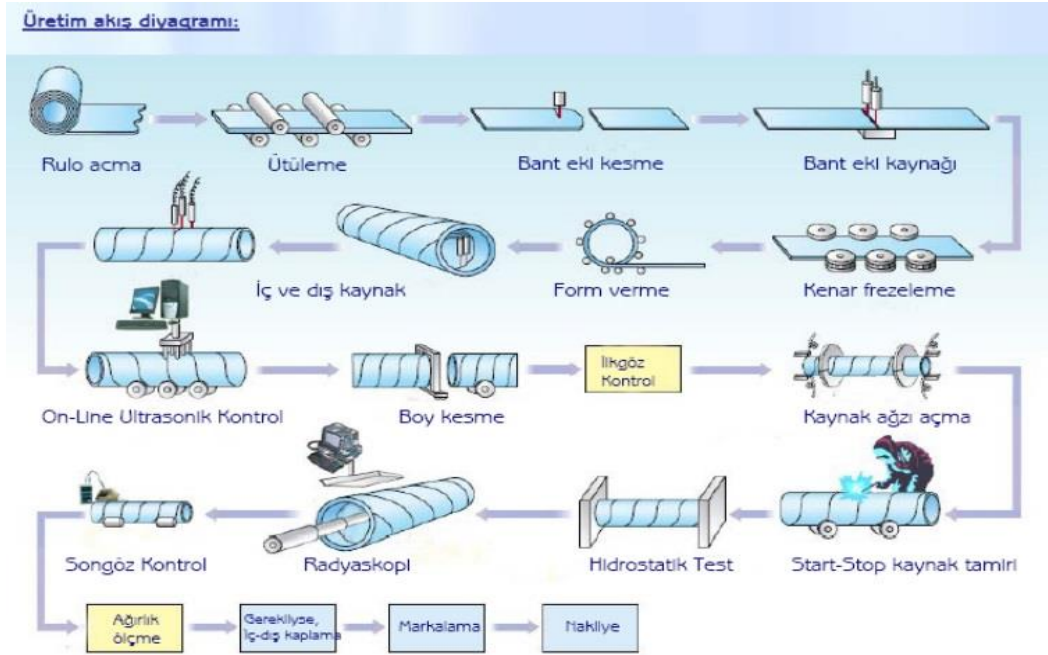
Elde edilen borunun çap, ovallık ve doğrusallık gibi boyutsal hassasiyetini sağlayabilmek için l role grubu ile yapılan şekillendirme sonrası kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar, boruya verilmiş olan şeklin mutlaka korunması gereklidir. Bu ise ancak ek bir destek şekillendirme ya da koruma grubu tarafından sağlanmaktadır. Bu koruma, boruya dıştan temas eden dış kafes makara grubu (endüstriyel uygulamada deveboynu olarak da adlandırılmaktadır) ya da borunun içine yerleştirilen malafa grubu ile sağlanmaktadır. Spiral dikili boru kaynağının ilk aşaması boruya spiral biçim verilen bölgede yapılan i kaynaktır. Şekil 3.7. Dış kaynak ise i kaynaktan ayrı olarak daha ileri bir aşamada yapılır. (Ada., 2006)



Şekil 3.5. Spiral dikili boru üretim makinesi



Şekil 3.6. Spiral dikişli boru makinesinde banda silindirik biçim verme



Şekil 3.7. Spiral dikişli boru üretim akış diyagramı

3.4. Dikişli Borularda kullanılan kaynak çeşitleri

Metalik bir malzemeyi ısı veya basınç ya da her ikisini birden kullanarak ve aynı türden ergime aralığına sahip bir malzeme ekleyerek (ya da 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” denilir. Kaynaklı bağlantı için gerekli olan ısının elektrodlar ve iş parçası arasında oluşturulduğu ve ark yardımıyla sağlandığı ergitme kaynak türüne ise “elektrik ark kaynağı” denir. Elektrik ark kaynağı, iki kutup arasında oluşan arkın ısı kaynağı olarak kaynak metali ergitmesi şeklinde de tanımlanabilir.

Kaynak işlemleri, havaya açık kaynak yöntemleri ile yapılabildiği gibi kaynak edilecek parçalardaki ağız örtecek katı maddelerin karışımı altında da yapılabilir. Petrol ve doğalgaz borularının üretiminde tozaltı ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı, örtülü elektrod ark kaynağı gibi kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en çok tercih edilen kaynak yöntemi tozaltı ark kaynağıdır.

3.4.1. Örtülü elektrod ark kaynağı

Örtülü elektrod ark kaynağı, kaynak için gerekli ısının, örtü kaplı tükenen bir elektrod ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı, elle yapılan bir ark kaynak yöntemidir. Elektrodun ucu, kaynak banyosu, ark ve iş parçasının kaynağa yakın bölgeleri, atmosferin zararlı etkilerinden örtü maddesinin yanması ve ayrışması ile oluşan gazlar tarafından korunur. Ergimiş örtü maddesinin oluşturduğu cüruf kaynak banyosundaki ergimiş kaynak metali için ek bir koruma sağlar. İlave metal (dolgu metali), tükenen elektrodun çekirdek telinden ve bazı elektrodlarda da elektrod örtüsündeki metal tozları tarafından sağlanır.

Örtülü elektrod ark kaynağı; Boru üretiminde genellikle, kaynak tamirinde kullanılmaktadır. Spiral kaynaklı veya boyuna kaynaklı boru makinesinden çıkmış olan boruya, gerekli test ve muayeneleri yapıldıktan sonra birleştirme kaynağında görülen hatalar nedeniyle tamir kaynağı yapılması gerekmektedir. Bu tamiratlar genellikle sertifikalı kaynakçılar tarafından ve el marifetiyle örtülü elektrod ark kaynağı kullanılarak yapılmaktadır.

Bu kaynağın iyi yönleri şunlardır;

- ❖ Örtülü elektrod ark kaynağı açık ve kapalı alanlarda uygulanabilir.
- ❖ Elektrod 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 elektrod türü mevcuttur. Bu nedenle kaynaklı birleştirmeler de ana malzemenin sahip olduğu özelliklere sahip olabilir.

Bu kaynağın kötü yönleri şunlardır;

- ❖ Örtülü elektrod ark kaynağının metal yığıma hızı ve verimliliği pek çok ark kaynak yönteminden düşüktür. Elektrodlar belli boylarda kesik çubuklar şeklindedir, bu nedenle her elektrod tükendiğinde kaynağı durdurmak gerekir.
- ❖ Her kaynak pasosu sonrasında kaynak metali üzerinde oluşan cürufu temizlemek gerekir.

3.4.2. Gazaltı Ark Kaynağı

Gazaltı ark kaynağı, kaynak için gerekli ısının, tükenen bir elektrod ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Kaynak bölgesine sürekli şekilde beslenen (sürülen), masif haldeki tel elektrod ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturur. Elektrod, kaynak banyosu, ark ve iş parçasının kaynağa yakın bölgeleri, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak torcundan gelen gaz veya karışım gazlar tarafından korunur. Gaz, kaynak bölgesini tam olarak koruyabilmelidir, aksi takdirde çok küçük bir hava girişi dahi kaynak metalinde hataya neden olur.

Gazaltı ark kaynağı; genellikle boyuna dikişli borularda ve kaynak tamirlerinde kullanılan bir yöntemdir.

Bu kaynağın iyi yönleri şunlardır;

- Gazaltı ark kaynağı örtülü elektrod ark kaynağına göre aşağıdaki sebeplerden dolayı daha hızlı bir kaynak yöntemidir.
- Tel şeklindeki kaynak elektrodu kaynak bölgesine sürekli beslendiği için kaynakçı örtülü elektrod ark kaynak yönteminde olduğu gibi tükenen elektrodu değiştirmek için kaynağı durdurmak zorunda değildir.
- Cüruf oluşmadığı için örtülü elektrodlardaki gibi her paso sonrası cüruf temizliği işlemi yoktur ve kaynak metalinde cüruf kalıntısı oluşma riski olmadığından, daha kaliteli kaynaklar elde edilir.
- Örtülü elektrod ark kaynağına göre daha düşük çaplı elektrodlar kullanıldığından, aynı akım aralığında yüksek akım yoğunluğuna ve yüksek metal yığıma hızına sahiptir.
- Gazaltı ark kaynağı ile elde edilen kaynak metali düşük hidrojen miktarına sahiptir, bu özellikle sertleşme özelliğine sahip çeliklerde önemlidir.
- Gazaltı ark kaynağında derin nüfuziyet sağlanabildiği için bazen küçük köşe kaynakları yapmaya izin verir ve örtülü elektrod ark kaynağına göre daha düzgün bir kök penetrasyonu sağlar.
- İnce malzemeler çoğunlukla TIG kaynak yöntemi ile ilave metal kullanarak veya kullanmadan birleştirilse de, gazaltı kaynağı ince malzemelerin kaynağına örtülü elektrod ark kaynağından daha iyi sonuç verir.
- Hem yarı otomatik hem de tam otomatik kaynak sistemlerinde kullanıma çok uygundur.

Bu kaynağın kötü yönleri şunlardır;

- Gazaltı kaynak ekipmanları, örtülü elektrod ark kaynağı ekipmanlarına göre daha karmaşık, daha pahalı ve taşınması daha zordur.
- Gazaltı kaynak torcu iş parçasına yakın olması gerektiği için örtülü elektrod ark kaynağı gibi ulaşılması zor alanlarda kaynak yapmak kolay değildir.
- Sertleşme özelliği olan çeliklerde gazaltı kaynağı ile yapılan kaynak birleştirmeleri çatlamaya daha eğilimlidir çünkü, örtülü elektrod ark kaynağında olduğu gibi kaynak metalinin soğuma hızını düşüren bir cüruf tabakası yoktur.

- Gazaltı kaynağı, gaz korumasını kaynak bölgesinden uzaklaştırabilecek hava akımlarına karşı ek bir koruma gerektirir. Bu nedenle, örtülü elektrod ark kaynağına göre açık alanlarda kaynak yapmaya uygun değildir.

3.4.3.Tozaltı ark kaynağı

Tozaltı kaynağı, kaynak için gerekli ısının, tükenen elektrod (veya elektrodlar) ile iş parçası arasında oluşan ark (veya arklar) sayesinde ortaya çıktığı bir kaynak yöntemidir. Ark bölgesi kaynak tozu tabakası ile kaynak metali ve kaynağa yakın ana metal de eriyen kaynak tozu (cüruf) ve kaynak dikişi tarafından korunur.

Tozaltı kaynağında elektrik arkta ve ergimiş metal ile ergimiş cüruftan oluşan kaynak banyosundan geçer. Ark ısı; elektrodu, kaynak tozunu ve ana metali eriterek kaynak ağzını dolduran kaynak banyosunu oluşturur. Koruyuculuk görevi yapan kaynak tozu ayrıca kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deokside eder. Alaşımli çelikleri kaynak yaparken kullanılan kaynak tozlarında, kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu dengeleyen alaşım elementleri bulunmaktadır.

Tozaltı kaynağı otomatik bir kaynak yöntemidir. Bazı tozaltı kaynak uygulamalarında iki veya daha fazla elektrod aynı anda kaynak ağzına sürülebilir. Elektrodlar yan yana kaynak banyosuna sürülebilir veya kaynak banyolarının birbirinden bağımsız katılaşmasını sağlayacak kadar uzaklıkta, arka arkaya sürülerek yüksek kaynak hızına ulaşılabilir.

Bu kaynağın iyi yönleri şunlardır;

- ✓ Her kalınlık ve boyuttaki boruların kaynaklarında ve sert dolgu kaynaklarında kullanılabilen yüksek kaynak hızına ve yüksek metal yığıma hızına sahip bir yöntemdir.
- ✓ Hatasız ve yüksek mekanik dayanımlı kaynak dikişleri verir.
- ✓ Kaynak esnasında sıçrama olmaz ve ark ısıları görünmez. Bu nedenle kaynak operatörü için gereken koruma daha azdır.
- ✓ Diğer yöntemlere göre farklı kaynak ağzı açılarını kaynak yapmak mümkündür.
- ✓ Tozaltı kaynağı kapalı ve açık alanlarda uygulanabilir.

Bu kaynağın kötü yönleri şunlardır;

- ✓ Tozaltı kaynak tozları, havadan nem almaya eğilimlidir, bu da kaynakta gözeneğe neden olmaktadır.
- ✓ Yüksek kalitede kaynaklar elde edebilmek için ana metal düzgün olmalı ve ana metal yüzeyinde yağ, pas ve diğer kirlilikler olmamalıdır.
- ✓ Cüruf kaynak dikişi üzerinden temizlenmelidir. Özellikle çok pasolu kaynaklarda, kaynak dikişinde cüruf kalıntısı olmaması için cüruf her paso sonrası temizlenmelidir. Bu işlem kaynak bölgesine ulaşımın zor olduğu büyük ölçülü uygulamalarda zor olabilir.
- ✓ Tozaltı kaynağı 5 mm'den daha ince malzemelerde yanma yapabileceği için genellikle tercih edilmemektedir.
- ✓ Yöntem özel bazı uygulamalar hariç, düz ve yatay pozisyonadaki alın kaynakları ve köşe kaynakları için uygundur.
- ✓ Her metal ve alaşım için uygulanabilen bir yöntem değildir.

3.5. Kaynak Parametreleri ve Mekanik Özellik İlişkisi

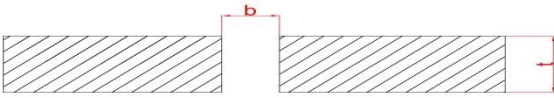
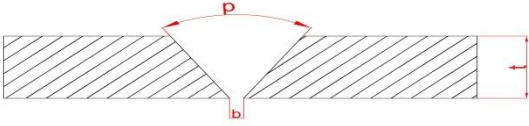
Kaliteli bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi için kaynak kalitesine etki eden parametrelerin en uygun değerde tutulması gerekir. Kaynak parametreleri, kaynak işleminin ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli etkendir. Bu parametreler, kaynak edilen metalin türü ve parça geometrisi göz önüne alınarak saptanırlar. Burada, kaynak akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, kaynak ağzı, kaynak düzlemi, elektrod açısı, kaynak metalürjisi ve kaynak hataları temel kaynak parametreleridir.

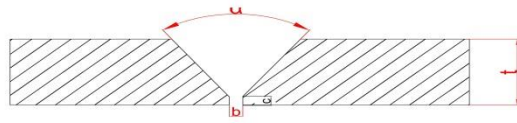
Bunun yanı sıra, kullanılan akım türü ve kutuplama, kullanılan tel çapları, toz yığılma yüksekliği, serbest tel uzunluğu, kaynak yapılan düzlemin eğimi, kaynak kafa sayısı, elektrod açısı ve elektrodlar arası uzaklık gibi bir dizi ikincil kaynak parametreleri vardır. Bu değişkenler birbirlerinden bağımsız olmayıp, birinin değiştirilmesi durumunda arzu edilen sonuca ulaşmak için diğerlerinden bir veya bir kaçının değiştirilmesi gerekebilir. Bu nedenle, söz konusu tüm bu kaynak değişkenlerinin etkilerinin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması, iyi bir kaynak dikiş kalitesinin elde edilmesi için son derece önemlidir.

3.5.1. Kaynak ağzı

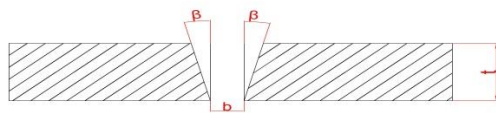
Ark kaynağında, iyi nüfuziyetli bir kaynak bağlantısının elde edilmesi için, kaynak birleşim yerinin hazırlanması son derece önemlidir. Kaynağa hazırlık çalışması; Kaynak yerinin temizlenmesi ve kaynak ağzının açılması olarak başlıca iki noktada düğümlenir. Kaynak ağzı esas olarak, nüfuziyet derinliğini artırmak için yapılır.

Kaynak ağzı biçimine, birinci derecede kaynak edilecek parçanın kalınlığı etki eder. Birleştirme kaynağında, belirli bir kalınlığa kadar, parçaya kaynak ağzı açmadan kaynak yapılabilir. Ancak, belirli bir kalınlıktan sonra birleştirilecek parçalara çeşitli türlerde ağız açılır. Şekil 3.8. Ağız açısı büyüdükçe nüfuziyet ve ek kaynak tüketimi artmakta dikişin yüksekliği ise azalmaktadır. Şekil 3.9. Ağız açısı küçüldükçe, daha dar ve daha derin bir kaynak dikişi elde edilir. Ancak, kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı küçüldükçe, çatlak oluşum tehlikesi artmaktadır. Toz kalıntı ve çatlak oluşum tehlikesinin azaltılması için, kaynak ağzı açısının 60° 'den büyük olması önerilmektedir(Şirin, 2004). Maksimum ağız açısını belirleyen kriter, dolgu metali ile esas metalin karışım oranıdır. Alın yüksekliği azaldıkça malzemenin delinme tehlikesi artar. Alın yüksekliğini belirleyen kriter ise elde edilmek istenen nüfuziyet derinliğidir.

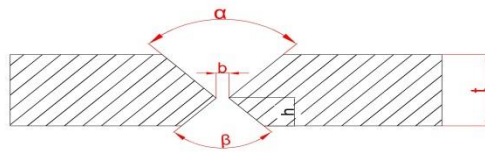
Kaynak Ağzı	İşaret
	I
	V



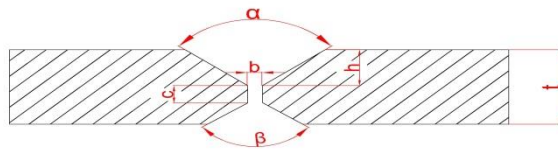
Y



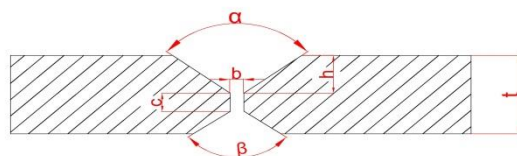
U



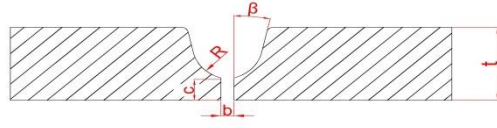
X



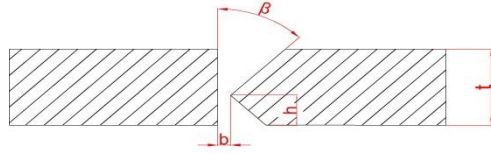
X



X

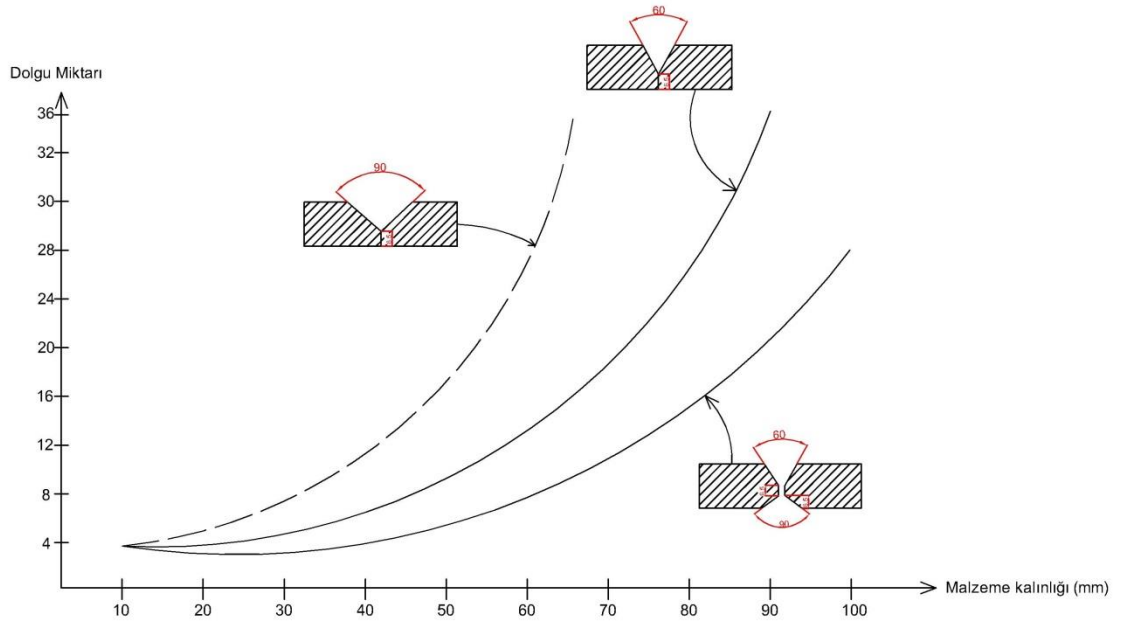


Y



K

Şekil 3.8. Borularda kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri



Şekil 3.9. Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak ağızı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki (Şirin, 2004).

Kaynak tel çapının artması; akımın sabit kalması durumunda, akım yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla nüfuziyetin azalmasına yol açar. Ayrıca, tel çapının artması ark

tutuşmasında zorluk yaratır ve düzensiz arka neden olur. Tel çapı arttıkça kaynak telinin akım yüklenebilme kabiliyeti artar, yani iş parçasına daha yüksek seviyede akım yüklenebilir (Şirin, 2004).

3.5.2. Kaynak akım şiddeti

Akım şiddeti, kaynak dikişinin biçimi üzerinde en büyük etkiyi gösteren parametrelerden birisidir. Akım şiddeti, kaynak telinin ergime hızı ve miktarını kontrol eder. Bunun yanı sıra, ergiyen esas metal miktarını ve nüfuziyet derinliğini etkiler. Seçilen kaynak hızı için akımın çok fazla olması durumunda ergiyen tel miktarı artar, buna bağlı olarak dikiş yüksekliği, genişliği ve nüfuziyet derinliği de artar. Dolayısı ile kaynak bölgesi büyür ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) genişler. Kaynak akımının çok fazla olması durumunda, düzensiz bir ark meydana gelir ve iş parçasının delinme tehlikesi artar. Akımın çok düşük olması durumu ise, hem nüfuziyet yetersizliğine hem de kaynak kepi yüksekliğinin arzu edilen seviyesinin altında kalmasına neden olur. (Ada., 2006)

3.5.3. Ark gerilimi

Ark gerilimi esas olarak, ergime bölgesinin ve kaynak kepinin biçimine etki eder. Ark geriliminin yükseltilmesi ile birlikte, kaynak kepi daha geniş ve düze yakın bir biçim alır. Ancak, ark içinde kalan toz miktarı artacağından toz kullanımı da artar. Gerilim yükseldikçe, dikişin nüfuziyeti azalır. Ark gerilimi, ark boyunun bir fonksiyonudur; Yani, ark boyu değıştikçe ark gerilimi de değışir. Yüksek bir ark gerilimi, uzun ark boyu ile çalışmayı gerektirir. Bu da, daha fazla miktarda tozun cüruf haline geçmesine neden olur. Bunun sonucunda da, kaynak dikişinin kimyasal bileşimi değışir. Örneğin; asit karakterli toz kullanımı durumunda, dikişteki Si miktarı yükselir. Kaynak dikişinde çatlama neden olan Mn ve Si içeriğini kontrol altına almak için gerilim sınırlaması önem taşımaktadır.

Ark geriliminin aşırı fazla olması durumunda, kaynak banyosunu örten toz örtüsü yırtılarak, kaynak metalinin hava ile temasına bunun sonucunda da kaynakta gözenek oluşumuna ve ark üflemesine karşı hassasiyet artar. Kaynak akımının sabit tutulduğu ve ark geriliminin de bu akıma göre düşük kaldığı durumda, esas metaldeki ergime iyi bir

kaynak dikişini oluşturmaya yetmez. Kaynak hızı arttırıldığında, ark gerilimi olabilen en düşük düzeyde tutulmalıdır. (Ada., 2006)

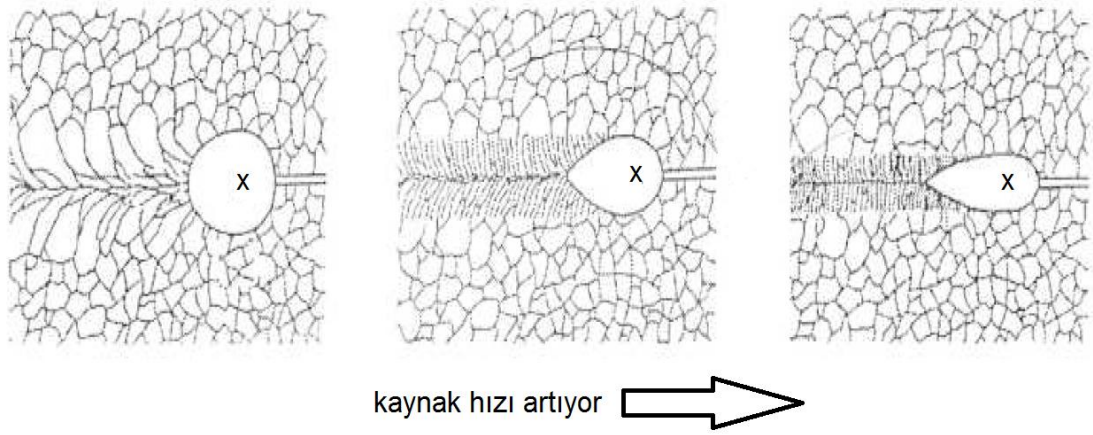
3.5.4.Kaynak hızı

Kaynak hızı; Üretim hızının ve kaynak dikişinin metalurjik açıdan kalitesini belirleyen en önemli parametrelerinden birisidir. Ayrıca, kaynak hızı kaynak bağlantısının mekanik ve tokluk özellikleri üzerinde son derece etkili olan ısı girdisini de etkilemektedir. Düşük bir hızla yapılan kaynakta ergiyen ek kaynak metali (tel) miktarı artar; dolayısıyla kaynak banyosu büyür. Diğer bir deyişle, ısı girdisi artar ve normal kaynak hızlarında delinmemesi gereken parçalarda, delinme tehlikesi ortaya çıkar.

Aşırı hız düşümü durumunda, çatlak oluşum tehlikesinin çok yüksek olduğu şapkalı kaynak kepi oluşur. Düşük kaynak hızlarında, elektrod fazla uzaklaşmadan banyo katılaşmaya başlayacağından, dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı büyür. Ayrıca, arkın dışına taşarak cüruf kalıntısına neden olabilecek düzeyde oldukça büyük bir kaynak banyosu oluşturur. Kaynak hızı yükseldikçe, nüfuziyet ile dikiş genişliğinin azaldığı görülür. Ayrıca, kaynak hızının artması ile birlikte dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı da küçülmeye başlar. Kaynak hızının aşırı yüksek olması durumunda nüfuziyet azalır, yanma oluşu, gözenek, ark üflemesi ve düzensiz bir dikiş oluşum tehlikesi artar (Şirin, 2004).

Kaynak dikişini genel olarak ergiyen tel ile ergiyen esas metalden oluşur. Tozaltı kaynağında, kaynak metali içinde ergiyen esas metal miktarı % 10 ile 60 arasında olup, bu oran kaynak hızının yükselmesi ile azalan yönde değişir. Yani; kaynak metali içindeki ergiyen esas metal miktarı azalır.

Kaynak hızı ile kaynak banyosunun biçimini de kontrol etme olanağı vardır. Düşük hızlı bir kaynak işleminde kaynak banyosu hemen hemen dairesel (eliptik) iken, kaynak hızının artması ile bu dairesellik kaybolur. Şekil 3.10.



Şekil 3.10. Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi (Şirin, 2004)

Yapılan araştırmalar, ark geriliminin ergimiş bölgenin kesit alanı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığını, buna karşın kaynak hızı ve kaynak akım şiddetinin ergimiş bölgenin kesit alanını belirleyen asıl etkenler olduğunu göstermiştir. Tozaltı kaynağı ile yapılan bu çalışmalardan birinde, ergimiş bölgenin kesit alanı ile kaynak hızı ve kaynak akımı arasındaki ilişki;

$$\log_{10} A = 0,903 \cdot \log_{10} \left(\frac{I^{1,716}}{S} \right) - 0,78 \quad 3.2.$$

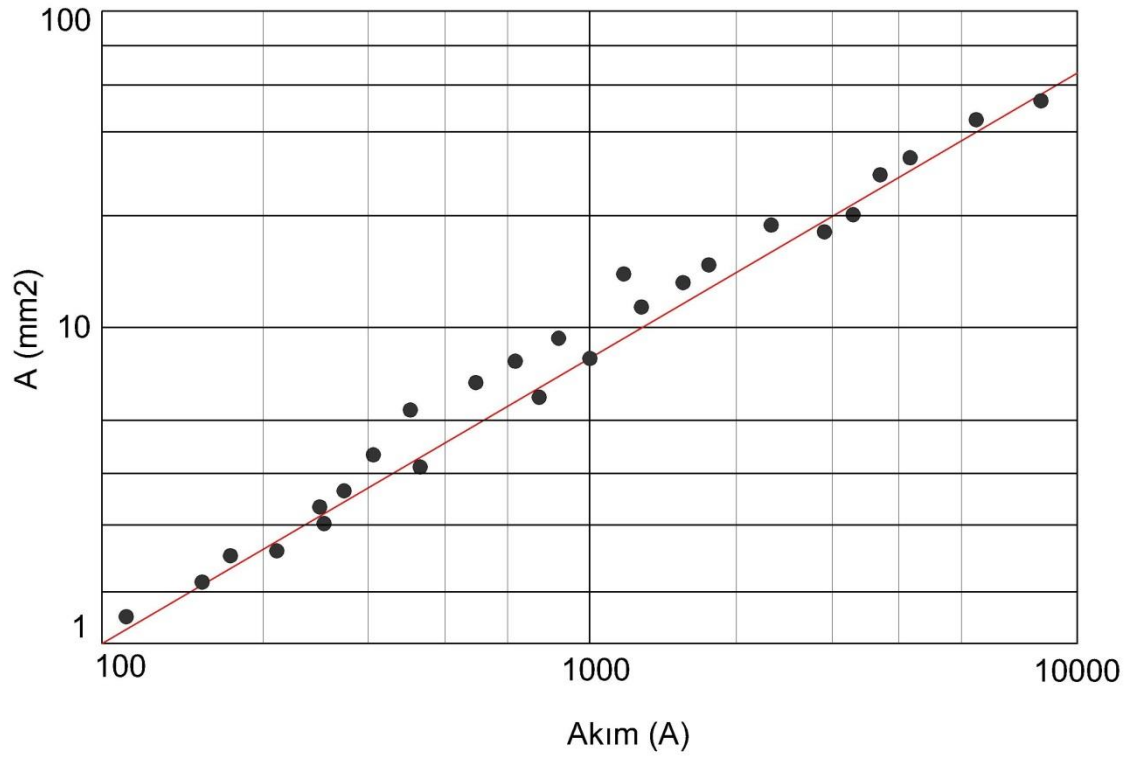
$$A = \left[\frac{I^{1,55}}{(10^{3,95} \cdot S^{0,903})} \right] \quad 3.3.$$

Logaritmik olarak hazırlanmış bu denklemde; A, ergimiş bölgenin kesit alanını (mm^2), I kaynak akım şiddetini (A) ve S kaynak hızını (cm/dk) ifade etmektedir. Şekil 3.11.'de, ergime kesit alanının $\frac{I^{1,716}}{S}$ 'in bir fonksiyonu olarak değişiminin grafiksel gösterimi, Şekil 3.12.'de ise nomogram olarak düzenlenmiş hali verilmektedir. Söz konusu bu denklemin yeniden düzenlenmesi ile kaynak ağzı açılmamış tek pasolu alın kaynağında, ergime kesit alanı Denklem 3.3'e göre kolaylıkla hesaplanabilir.

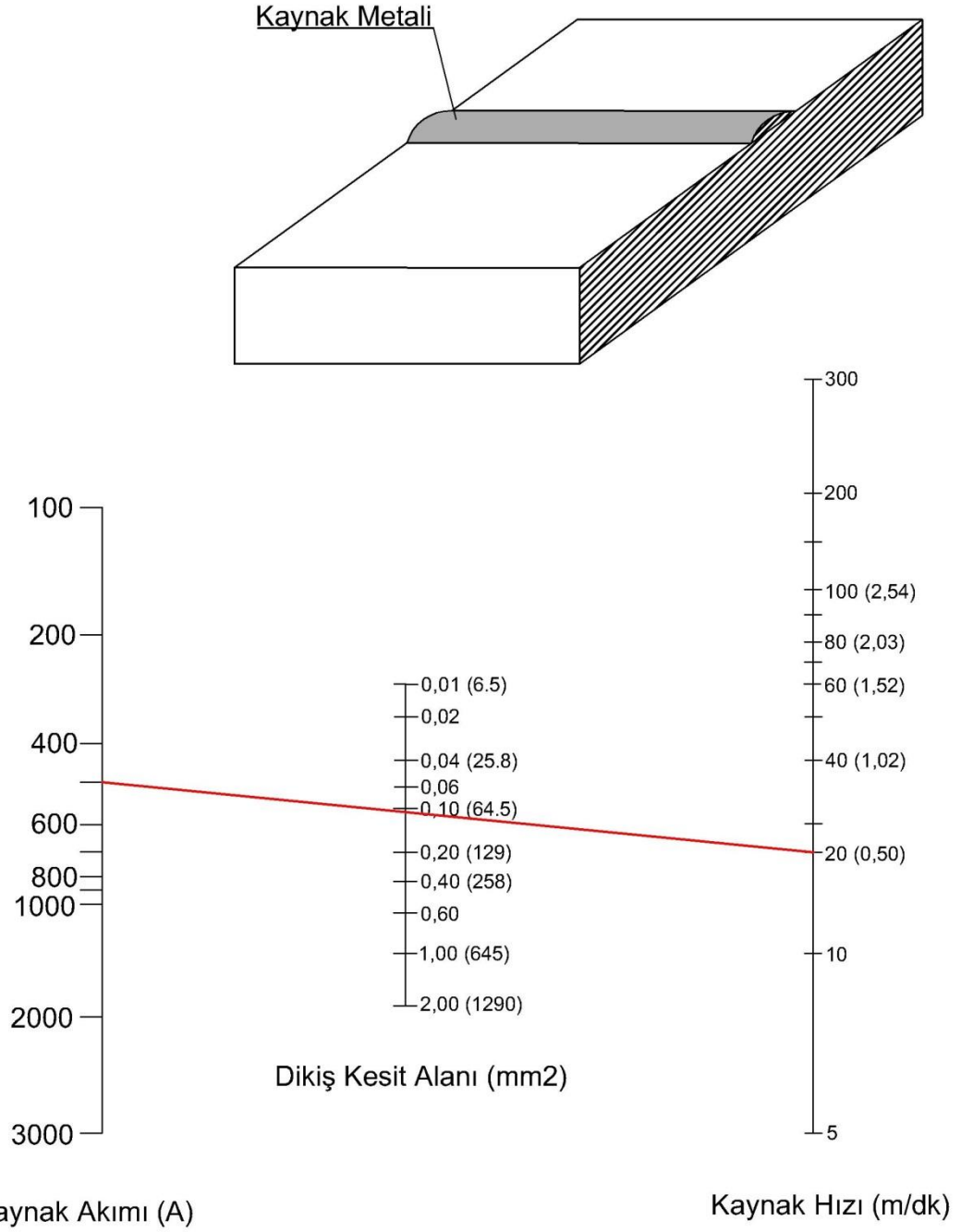
Tek pasolu alın kaynağında, kaynak akımı, kaynak hızı ve gerilime bağlı olarak nüfuziyet derinliği aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilir. Denklem 3.3. Burada I kaynak akım şiddetini (A), S kaynak hızını (inç/dk), E ark gerilimini (V), P ise nüfuziyet derinliğini (inç) ifade etmektedir. K ise sabit bir sayı olup, Tozaltı kaynağında

CS türü tozlar için 0,0012 olarak alınabilir. Söz konusu bu denklemin grafiksel gösterimi ise Şekil 3.13.'de verilmiştir. Kaynak hızı ile kaynak akımı arasındaki oran, yanma oluğu üzerinde oldukça etkilidir. Kaynak hızı ile kaynak akımının tek pasolu kaynak bağlantılarında yanma oluğu üzerindeki etkisi Şekil 3.14'de verilmiştir.

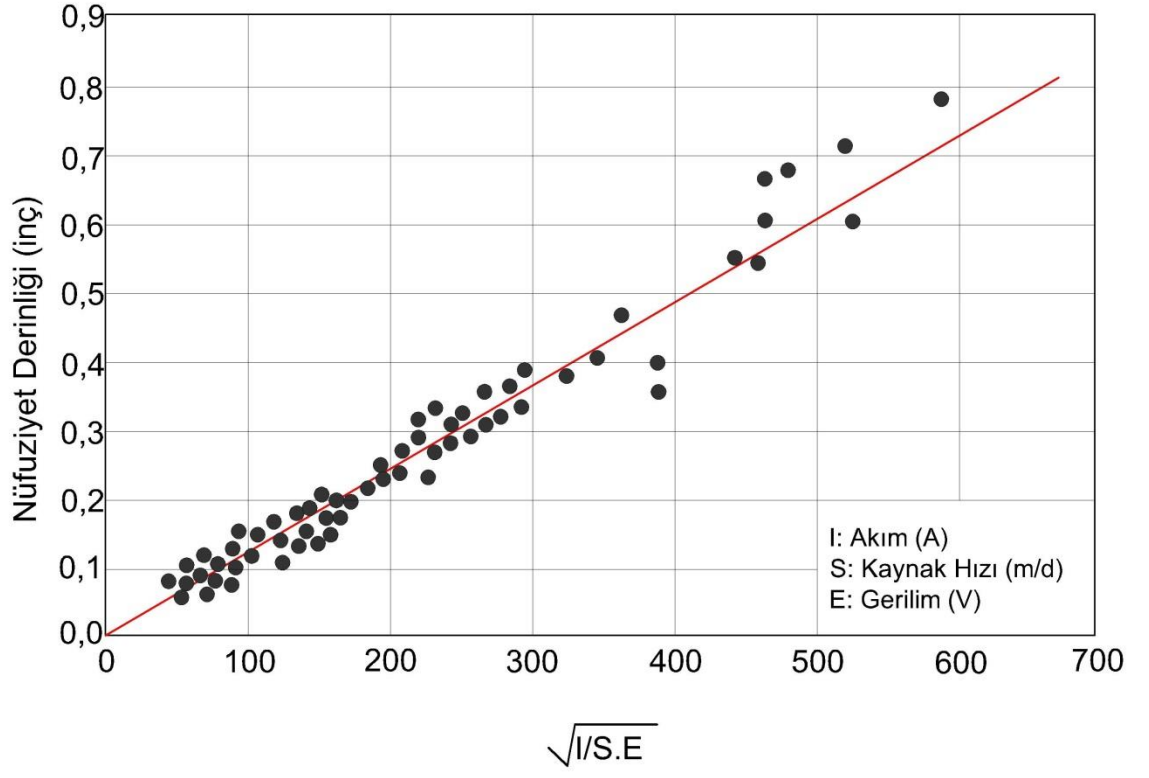
$$P = \frac{K \cdot \sqrt[3]{I^4}}{S \cdot E^2} \quad 3.4$$



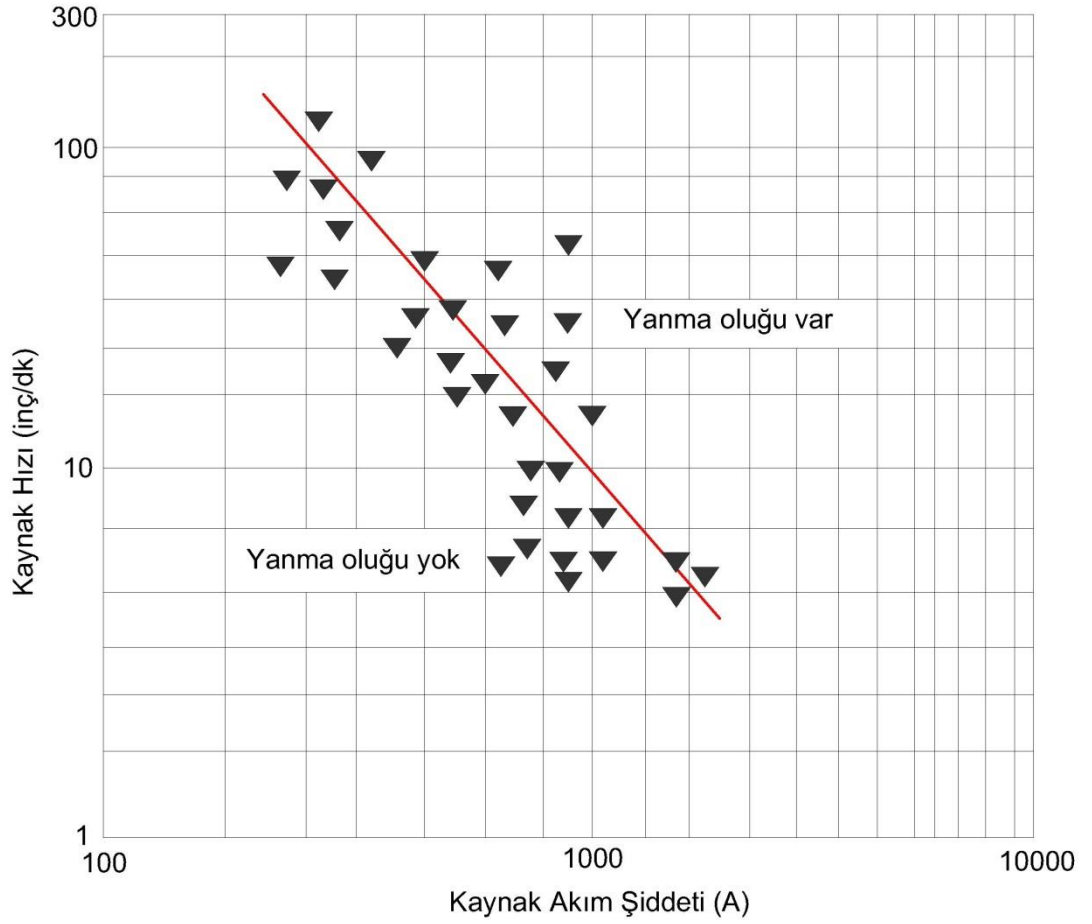
Şekil 3.11. Tozaltı kaynağında kaynak akımı ve kaynak hızının ergime kesit alanı üzerindeki etki. (ASM Handbook Committee, 1983)



Şekil 3.12. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee, 1983)



Şekil 3.13. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nüfuziyet derinliğine etkisi (ASM Handbook Committee, 1983)



Şekil 3.14. Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluşu arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee, 1983)

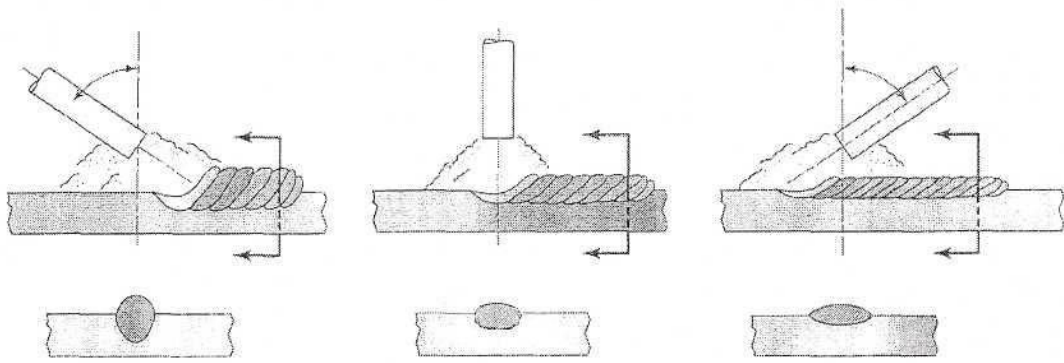
3.5.5. Kaynak düzlemi ve elektrod açısı

Kaynak sırasında; kaynak elektrodunun eğim açısı, kaynak dikiş biçimini ve nüfuziyeti etkiler. Elektrodun ucu kaynak yönünün aksi yönüne doğru yönelmiş ise, bu tekniğe “sağa kaynak tekniği”, elektrodun ucu kaynak doğrultusuna göre yönelmiş ise buna “sola kaynak tekniği” adı verilir (Şirin, 2001).

Tüm diğer koşullar aynı tutularak, hareket açısı sıfırdan itibaren sola kaynak tekniğine doğru artırılacak olursa nüfuziyet azalır ve kaynak dikişi geniş ve düz bir durum alır. En yüksek nüfuziyet sağa kaynak tekniği ile hareket açısı 25° iken oluşur. Sağa kaynak tekniği aynı zamanda, daha dış bükey ve daha dar bir dikiş oluşturur. Tüm pozisyonlarda, kaynak banyosunun daha iyi kontrol edilebilmesi için önerilen elektrod eğim açısı 5° ile 15° dir. (Şekil 3.15.)

Kaynak esas olarak yatay pozisyonda yapılır. Kaynak yapılan parçanın bulunduğu yatay düzleme göre sahip olduğu eğimin 6° 'yi aşması durumunda, kaynağın yönüne göre kaynak dikişinin biçimi de değişir. Eğimli yüzlerde yokuş aşağı yapılan kaynaklarda nüfuziyet oldukça az ve dikiş geniştir, yokuş yukarı yapılan kaynaklarda ise nüfuziyet ve dikiş yüksekliği çok fazla, kaynak dikiş genişliği ise azdır. Yokuş yukarı yapılan kaynakta dikişte çatlak oluşumu, yokuş aşağı kaynakta ise birleşme hataları ve cüruf kalıntıları meydana gelebilir (Tülbentçi, 1998).

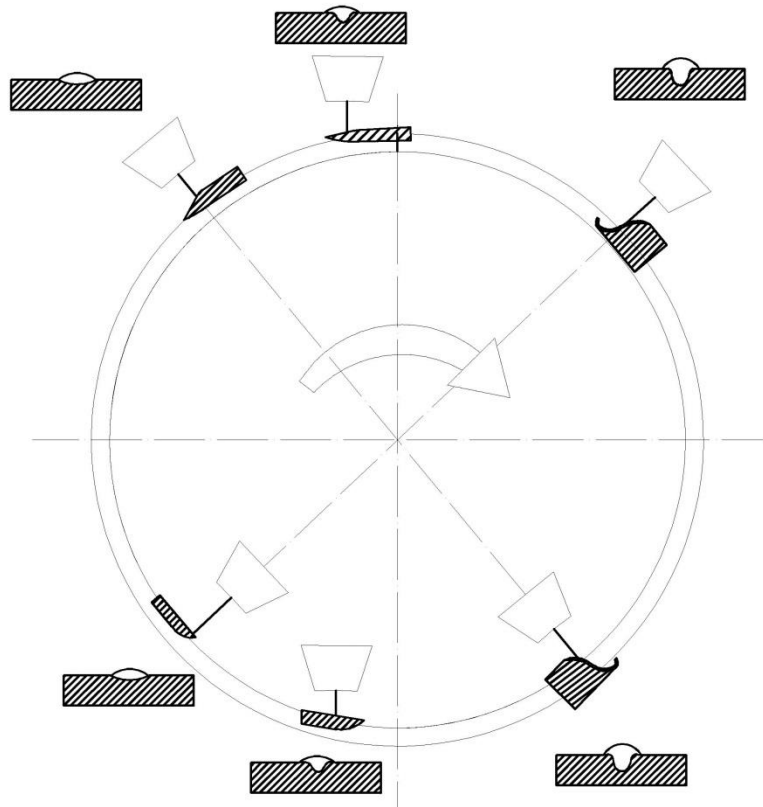
Aşağıya doğru kaynakta, kaynak banyosu elektroda doğru akma eğilimi gösterir, bu ise düzensiz bir ergime bölgesi oluşturur.



Şekil 3.15. Elektrod eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi (Tülbentçi, 1998)

Çevresel kaynak ya da silindirik parçaların kaynağı, düz bir sacın kaynağına göre bazı farklılıklar gösterir. En önemli farklılık, ergimiş toz cürufu ve ergimiş kaynak banyosunun akma eğilimi göstermesidir. Kaynak metalinin akmasını engellemenin tek yolu ise, kaynak banyosunun borunun düşey eksenine geldiğinde katılaşmasını tamamlamış olmasıdır. Bu nedenle, silindirik parçaların kaynağında telin bulunduğu yerin dikey eksenin sağında veya solunda bulunması ve telin ucu ile dikey eksen arasındaki mesafenin fazlalığı veya azlığı kaynak dikişinin biçiminin etki eden önemli faktörlerdir. Telin yeri ile eksen arasındaki uzaklık, yokuş yukarı yönde artarsa nüfuziyet azalır, dikiş genişler ve aynı zamanda cüruf kalıntılarına neden olur. Eğer bu uzaklık yokuş aşağı yönde artarsa, nüfuziyet ve dikiş yüksekliği artar. (Şekil 3.16.)

Kaynak eğim açıları tek kafa, çift kafa ya da üç kafa kullanım durumuna göre farklılık göstermektedir. Tek kafa kullanımında Lincoln Electric (1983) elektrod eğim açısını 3-5° sola kaynak tekniği olarak vermektedir. Çift kafa kullanımında ise ilk kafanın eğim açısı bütün kaynaklarda 0° olarak verilirken ikinci kafanın eğim açısı, Lincoln Electric (1991) ve Metals Handbook (1983)'da 12-15° sağa kaynak tekniği, Messer Griesheim (1970)'de 25° sağa kaynak tekniği olarak önerilmektedir. Europipe uygulaması ise 15-20° sağa kaynak tekniği şeklindedir (Brensing and Summer, 1998).



Şekil 3.16. Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi

3.5.6. Serbest tel uzunluğu ve elektrodlar arası uzaklık

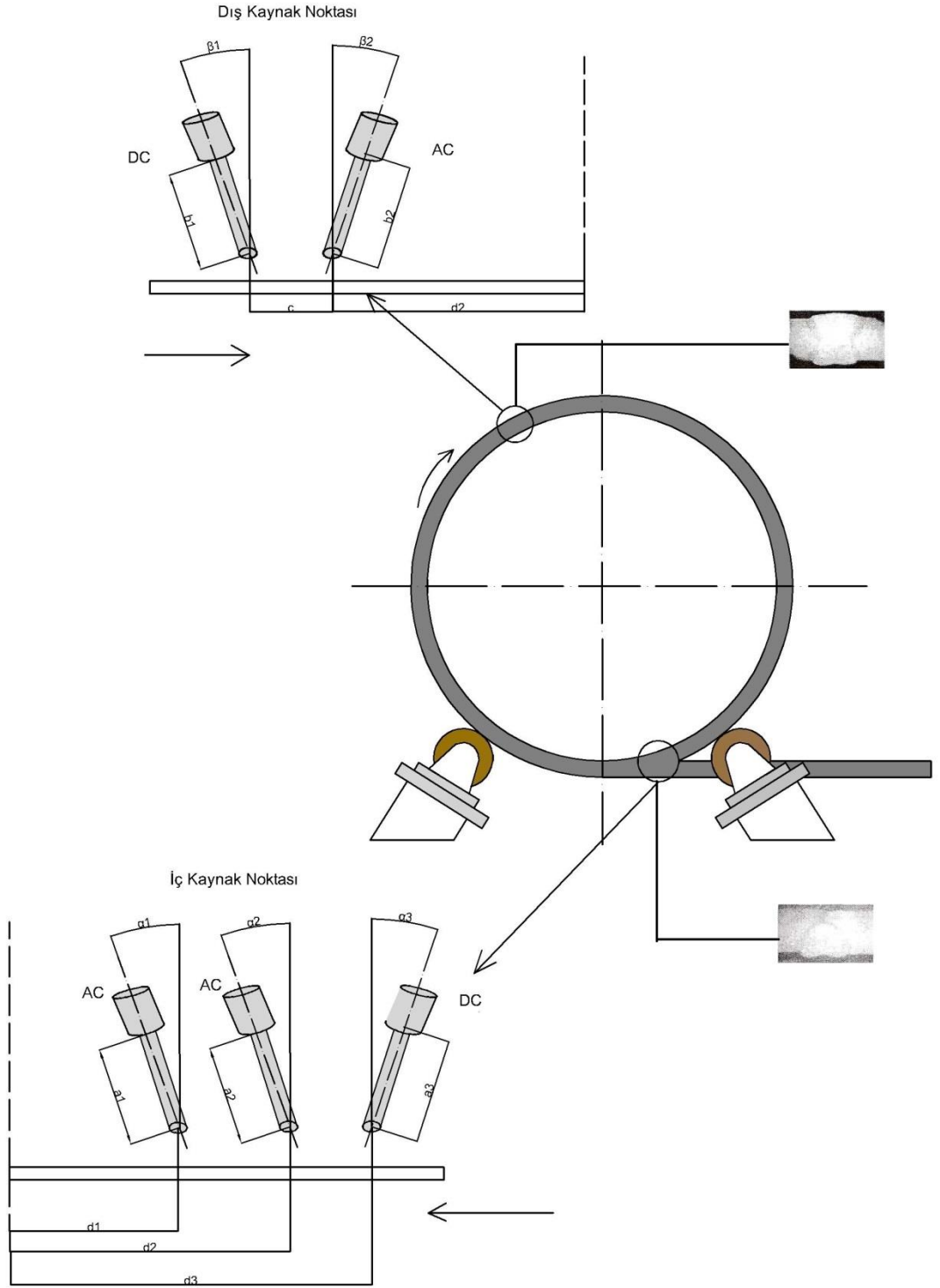
Kaynak telinin dışarıda kalan kısmı (serbest tel uzunluğu), kaynak memesinin parçaya olan uzaklığı ile ifade edilir. Akım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda ($>125 \text{ A/mm}^2$), telin serbest ucunun uzunluğu önemli bir faktör olarak kendini belli eder (Tülbentçi 1998). Serbest tel uzunluğunun artması, elektrik direncinin artmasına bu da kaynak telinin daha fazla ısınarak tel ergime miktarında küçük de olsa bir artışa neden olur.

Telin serbest ucunun uzunluğunun artması, elektriksel olarak devreye bir direncin daha eklenmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, serbest tel ucunun artırılması halinde ark gerilimini de arttırmak gerekir. Düşük ark gerilimi, yani tel serbest uzunluğunun artması, nüfuziyetin azalmasına, kaynak dikişinin daralmasına, dikiş yüksekliğinin artmasına ve cürufun temizlenmesinin zorlaşmasına yol açar. Deneyimler, temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığının azalmasıyla daha kararlı bir arkın oluştuğunu ve daha homojen görünümlü bir kaynak dikişinin elde edildiğini göstermektedir. Zira serbest tel ucunun aşırı fazla olması durumunda memeden çıkan tel ucunun salınımlar yapması, arkın pozisyonunun değişmesine ve bu da dikişin bozulmasına yol açar. Spiral dikişli boru üretimi için önerilen serbest tel uzunluğu 20.35 mm arasındadır.

Çevresel kaynak uygulamalarında, elektrodlar arası uzaklığın kaynak dikişinin biçimi ve kalitesi üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Elektrodlar arasındaki uzaklığın azalması daha dar ve daha derin bir nüfuziyete sahip dikiş elde edilmesine yol açar. Elektrodlar arasındaki uzaklık arttıkça, dikiş genişler ve nüfuziyet azalır. Elektrodlar arası uzaklık aynı zamandan ark kararlılığı üzerinde de etkin bir şekilde rol oynar. Elektrodların birbirine çok yakın olması durumunda, ergimiş metalin ya da cürufun geriye akarak ilk arkın altına girer ve arkta düzensizliklere yol açar. Elektrodların birbirine çok uzak olması halinde ise, ergimiş metalin katılaşması nedeni ile ikinci arkta düzensizlikler olabilir (Şirin, 2001).

Elektrodlar arasındaki uzaklık, Lincoln Electric (1993) tarafından 11-40 mm, Messer Griesheim tarafından 12-35 mm olarak önerilmektedir. Mannesmann Euro Pipe uygulaması ise 16-20 mm'dir.

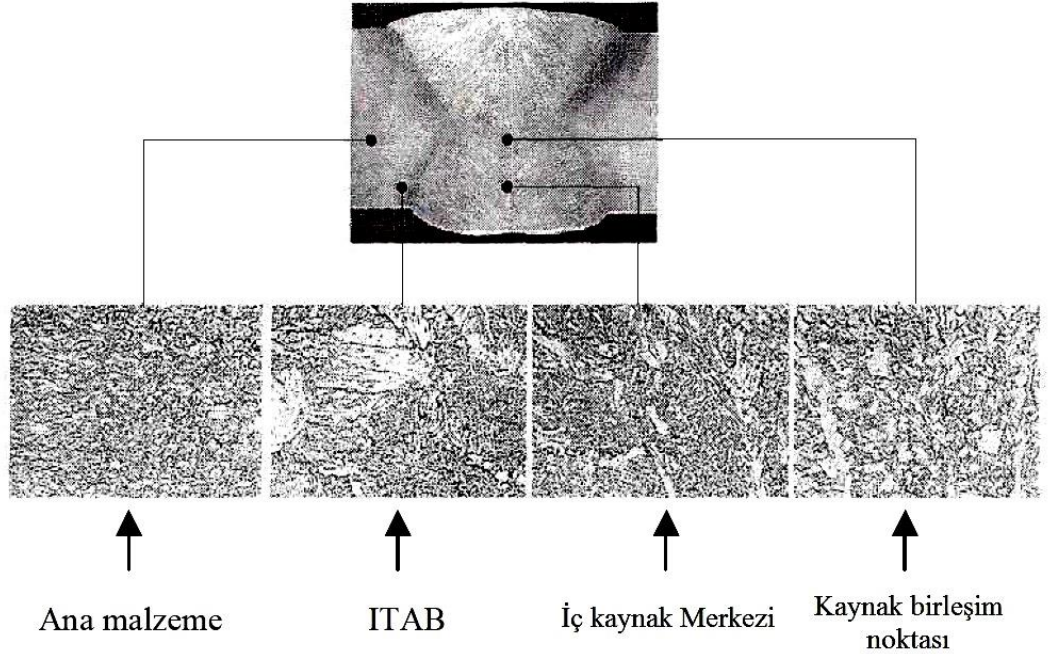
Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde de kaynak kafalarının pozisyonlaşması oldukça büyük bir öneme sahiptir. Şekil 3.17. Burada, kafa eğim açıları, kafalar arası uzaklık, kaynak noktasının borunun düşey eksenine göre konumu ve her bir kafadaki serbest tel uzunluğu, gerek elde edilecek olan kaynak dikişinin biçimi, gerekse hata oluşumu açısından oldukça önemli etkiye sahip parametrelerdir.



Şekil 3.17. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi (Şirin, 2001)

3.5.7. Kaynak Metalurjisi

Bir kaynak bağlantısının mekanik özelliğine etki eden faktörlerin en önemlisi, kaynak işlemi sırasında uygulanan sıcaklığın dağılım ve değişimi karşısında esas metalin davranışdır. Çok azı dışında tüm kaynak yöntemleri; kaynak edilen malzemenin kaynak bölgesinin bölgesel olarak ergime sıcaklığına kadar ısıtılmasını gerektirir. Bu şekilde bir sıcaklık derecesine kadar ısıtılmayı takip eden soğuma metalde bir dizi içyapı değişikliğine neden olur. Tüm ergitme kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemine benzer. Elektrik ark kaynağında; ek kaynak metali, ark yardımıyla ergir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağzı içine dökülür. Bu arada, kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar ergir ve dolayısıyla ergimiş kaynak metali ile esas metal karışarak kaynak ağzı içinde katılaşır. Bu işlem sırasında, kaynak edilen malzemenin kaynak dikişine bitişik kısımlarında metalin ergime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar değişik sıcaklık derecelerinde ısınmış olan bölgeler ortaya çıkar. Diğer bir deyişle, ısının yayılımı nedeni ile mekanik yapı ve içyapı özellikleri itibariyle gerek asıl metal gerekse kaynak metalinden farklı özellikler içeren bölgeler oluşur Şekil 3.18.



Şekil 3.18. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler (Ada, 2006)

Kaynak bağlantısının bulunduğu ve kaynak sırasında ortaya çıkan sıcaklıktan etkilenmiş bölgelerin tümüne kaynak bölgesi adı verilir. Bu bölge, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) olmak üzere iki kısımdan oluşur.

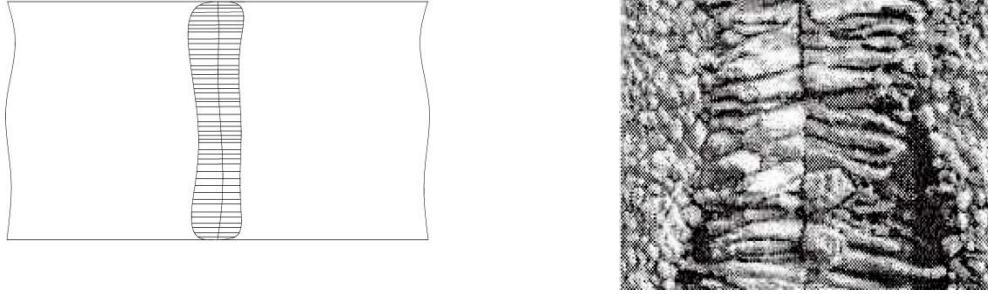
3.5.8. Kaynak bölgesinin içyapısı

Kaynak işlemi sırasında ergiyen ve sonrasında soğuyarak katılaştıran bölgeye ergime bölgesi (kaynak metali) adı verilir. Metalin katılma sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısınmış olan ergime bölgesi, kimyasal bileşim olarak esas metal ve ek kaynak metali karışımından oluşur (Tülbentçi, 1998). Tek pasolu kaynak dikişlerinde, bu bölgedeki şiddetli türbülans dolayısı ile esas metal ve ek kaynak metali iyice birbirine karışarak oldukça homojen bir bileşim gösterirler. Ergime bölgesindeki esas metal ve ek kaynak metali oranları tam olarak bilinse dahi, bu bölgenin kimyasal bileşiminin hesap yolu ile belirlenmesine imkân yoktur. Zira birçok alaşım elementi kaynak sırasında yanma nedeni ile kayba uğrarlar.

Karışım bölgesini çevreleyen ve esas metal ile dolgu metalinin karışımına katılmadan katılaştıran ve yalnız esas metalden oluşan bir bölge daha vardır. Bu bölgeye karışmamış bölge adı verilir. Tüm kaynak yöntemlerinde oluşan bu bölgenin kalınlığı, kaynak yöntemine ve soğuma hızına bağlı olarak 0,05 ile 2,5 mm arasında değişmektedir. Özellikle, dolgu metali ile esas metalin kimyasal bileşiminin farklı olduğu durumlarda, bu bölge parlak bir renge sahip olup görsel olarak daha da belirginleşir.

Ergiyen bölgenin katılması, kendini çevreleyen esas metale ısı iletimi ile olur. Isı ergiyen bölgeden esas metale doğru çok hızlı bir şekilde aktığından dolayı, esas metale yakın olan bölgelerde aşırı soğuma sonucunda çok sayıda çekirdek oluşur. Bunların birbirlerini, herhangi bir yöne doğru serbestçe büyüme bakımından, engellenmesi nedeniyle ince ve aynı zamanda yuvarlak taneler oluşur. Tek pasolu kaynak bağlantılarında dendiritik taneler sıvı/katı faz sınırına dik olarak kaynak banyosu ortasına doğru büyür ve malzeme içinde bulunan katışıkları dikiş ortasına doğru öterler Şekil 3.19.

Bu katışıklar, çoğunlukla metal olmayan fazlardır. Özellikle, kalın parçalardaki derin nüfuziyetli kaynaklarda bu iri tanelerin birleştiği yerde yani ortadaki kısımda, segregasyondan dolayı bir boşluk ve dolayısıyla bir zayıflama oluşur. Bu durumda, bu bölgedeki tokluk değeri azalır ve çoğunlukla sıcak çatlaklar bu bölgede oluşur.



Şekil 3.19. Ergime bölgesindeki tanelerin durumu (Ada, 2006)

Metalik malzemeler bir kaynak işlemi gördükleri zaman; kaynak dikişine (ergime bölgesi) bitişik olan bölge, kaynağa uygulanmış olan sıcaklık derecesinin etkisi altında kalır. Kaynağa uygulanan sıcaklık derecesinin daha doğrusu ısıl çevrimin etkisi altında kalarak, içyapı değişikliğine uğrayan ergime bölgesine bitişik olan bu bölgeye “ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB)” adı verilir. ITAB ergitme kaynağının bir sonucu olup kaçınılması olanaksızdır; boyutları ise kaynak sırasında uygulanan ısı girdisine, soğuma hızına, parça boyutlarına ve malzemenin ısı iletim katsayısına bağlı olarak değişir. Bu etkilerden değiştirilmesi imkân dâhilinde olanlar yardımı ile ITAB bir dereceye kadar kontrol altına alınabilir.

Kaynak sırasında malzemenin ITAB bölgesinde, önce hızlı bir ısınma ve sonrasında malzeme kalınlığına ve uygulanan ısı girdisine bağlı olarak hızlı bir soğuma oluşur. Çeliğin bileşimine göre, sertleşme eğilimi olan çekirdeklerde soğuma hızı kritik soğuma hızını aştığı anda genellikle ITAB bölgesinin 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan bölgelerinde martenzitik karakterde sert ve kırılabilir bir yapı ortaya çıkar. Bu bölge bağlantının en zayıf bölgesi olup birçok çatlama ve kırılma bu bölgede meydana gelir. Düşük karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde kaynak sırasında oluşan ısıl değişimlerin yarattığı en önemli etki, malzemenin ısıdan etkilenen bölgesinin sertleşme derecesine bağlı olarak, tokluk mukavemetinin ve hidrojen gevrekliğinin olumsuz yönde değişmesidir. Sertlik ve sertleşebilme kabiliyeti anlam olarak birbirinden çok farklı iki

kavramdır. Sertlik genel olarak çeliğin içerdiği C miktarının bir fonksiyonudur. Sertleşebilme kabiliyeti ise, çeliğin östenit bölgesinden itibaren ani olarak soğutulması sonucu ortaya çıkan martenzitik yapının oluşma kolaylığının bir ölçüsüdür. Sertleşebilme kabiliyeti düşük çelikler, ancak kaynak işlemini takiben çok şiddetli bir şekilde soğutulduklarında martenzitik yapı oluştururlar. Sertleşebilme kabiliyeti yüksek çelikler ise, çok yavaş soğutuldukları durumda bile martenzitik yapıya dönüşebilirler. Çeliklerin kaynağında, ısıdan etkilenmiş bölgenin içyapısı tane büyüklüğü açısından iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmeye uğramış bölge ve içyapı değişikliğine uğramış bölge olmak üzere dört farklı bölge yapısı içerir. İri taneli bölge, ergime bölgesine bitişik olan ve kaynak sırasında 1150-1450 °C sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bilindiği gibi, metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklık derecelerinde ısıtıldıklarında tane büyümesi oluşmaktadır. Bazı taneler büyüyerek kısmen ya da tamamen küçük tanelerin yerine geçer. Tane büyüme hızı sıcaklık arttıkça artar ve metalin katılaşma sıcaklığına yaklaştıkça büyüme oldukça hızlanır. İri taneli yapılar, ince taneli yapılara karşın daha gevrek ve kırılğan olduğu için istenmeyen bir durumdur. Çeliklerde kaynak sırasında, ergime sınırına bitişik olan esas metal katılaşma sıcaklığına yakın bir sıcaklığa erittiğinden östenit içindeki tane büyümesi oldukça fazladır. İnce taneli bölge, kaynak sırasında 900 ile 1150 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bu bölgede tane büyümesine rastlanmaz; ancak, östenit olduğundan soğuma anındaki soğuma hızı ve çeliğin bileşimine bağlı olarak aynı iri taneli bölgede görülen içyapıya benzer bir yapı görülür. (Şirin, 2004).

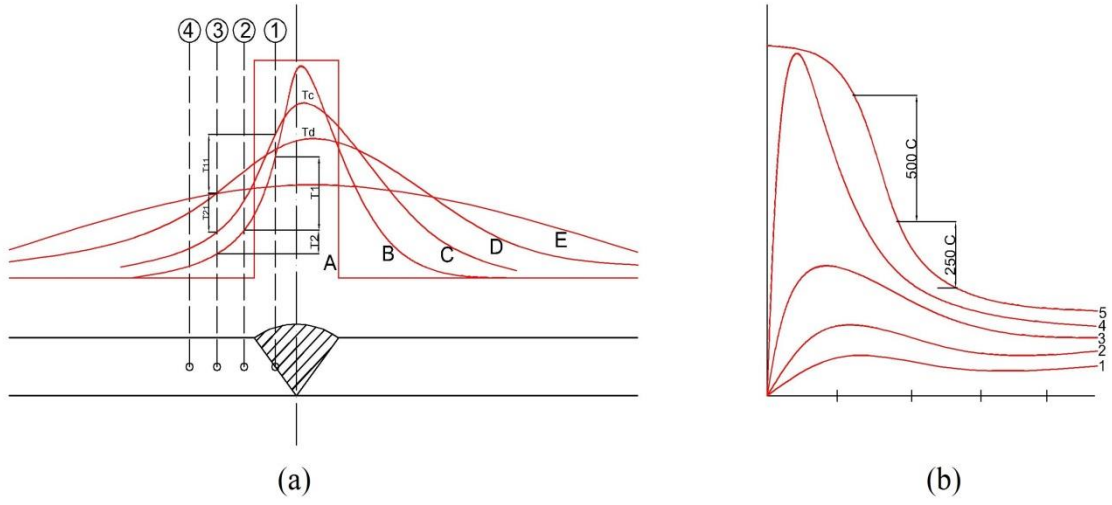
3.5.9. Kaynak sırasında oluşan ısıl çevrimler

Çeliklerin kaynağında, ITAB özelliklerinin önceden belirlenebilmesi için kaynak edilen malzeme bileşiminin, malzemenin kaynak öncesi uğradığı ısıl çevrimlerin, kaynak sırasındaki sıcaklık dağılım ve değişiminin bilinmesi gerekir. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen ısıl değişimler nedeni ile kaynağın malzeme üzerinde yarattığı etkileri daha iyi tahmin edebilmek için ısıl çevrim hakkındaki bazı faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu faktörler, ısıtma hızı, tepe sıcaklığı, sıcaklık dağılımı, tepe sıcaklığına maruz kalınan süre ve ısınan bölgelerin soğuma hızıdır. Söz konusu bu faktörlerden ısıtma hızı ve tepe sıcaklığının etkisinde kalınan süre özellikle elektrik ark kaynağında çok dar bir alan içerisinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kaynak

bölgesindeki sıcaklığın dağılımı ve değişimi incelenirken yalnız erişilen tepe sıcaklık derecesi ve soğuma hızı göz önünde bulundurulur. Kaynak işleminde, gerek malzemenin kaynak edilmesi sırasında gerekse soğuma sırasında malzeme içinde sürekli bir ısı yayılımı söz konusudur.

Şekil 3.20-a'da A eğrisi ısı yayılımının söz konusu olmadığı durumu temsil etmektedir. Burada, kaynak bölgesindeki sıcaklık malzemenin ergime sıcaklık derecesinin üstünde olup, esas metalde herhangi bir sıcaklık artışının olmadığı kabul edilmiştir. Ancak, bu çok gerçekçi bir yaklaşım değildir. Enerji girdisinin aniden kesilmesi durumunda B eğrisi, kaynak bölgesindeki ısının daha soğuk esas metale doğru aktığı ve kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının düştüğü görülecektir. Benzer durum C eğrisi içinde söz konusudur. 1 no'lu bölgedeki sıcaklık ergimiş metalden esas metale doğru oluşan ısı akışının etkisi ile hemen hemen ergimiş bölge sıcaklığına eşittir. Ergime bölgesinden uzaklaştıkça malzeme sıcaklığı düşmektedir. 2 no'lu bölgedeki sıcaklık 1 no'lu bölgedeki sıcaklığın yaklaşık 1/3'ü kadar olup benzer durum 3 ve 2 no'lu bölgeler içinde söz konusudur. 4 no'lu bölgede ise sıcaklık artışı yoktur. Tepe sıcaklığının derecesi ısı akışında oldukça etkin bir rol oynar. B eğrisinde 1 ve 2 noktaları arasındaki sıcaklık düşümü T_1 °C iken, C eğrisindeki sıcaklık düşümü bundan çok daha azdır (T_{11} °C).

Sıcaklık dağılımının soğuma üzerindeki etkisi, Şekil 3.20-b'deki diyagram yardımıyla daha kolay görülmektedir. Kaynak sırasındaki ısı girdisi nedeni ile, 1 no'lu bölgenin sıcaklığı ergime noktasının üzerine çıkarak bu bölge ergimiş hale geçmekte ve sonrasında da soğuma olayı gerçekleşmektedir. Burada, ergimiş bölge ile esas metal arasındaki sıcaklık farkı çok yüksek olduğu için ısı girdisinin sona erdirilmesi ile çok hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. 2 no'lu eğriye bakıldığında, bu bölgede ulaşılan tepe sıcaklığının 1 noktasındaki sıcaklığın hemen altında bir değerde olduğu görülmektedir. 3 ve 4 noktalarında ise ısınma olayı ısı yayılımı sonucu gerçekleştiğinden, 1 ve 2 no'lu bölgelerin soğuma sürecine geçmesi ile birlikte başlamaktadır. Sonuç olarak, en yüksek soğuma hızının, sıcaklığın en yüksek olduğu noktada olduğu görülmektedir. Ayrıca, kaynak noktasından uzaklaştıkça hem tepe sıcaklığı düşmekte (dolayısıyla ısıtma ve soğutma hızları da azalmaktadır) hem de tepe sıcaklığına ulaşmak için gereken süre gereksinimi artmaktadır (Şirin, 2004).



Şekil 3.20. a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi b) ITAB bölgesindeki ısı yayını (Şirin, 2004).

Isı girdisi; Ergitme kaynağında ısı kaynağının temel görevi metali ergitmektir. İyi bir kaynak bağlantısının elde edilebilmesi için, ısı kaynağının yeterli enerjiyi üretebilmesi gerekir. Ark enerjisi olarak da tanımlanabilecek olan bu enerji, hem esas metalde yeterli ergimeyi oluşturacak kadar yüksek hem de ITAB bölgesinde istenmeyen mikro yapı değişimlerine yol açmayacak kadar düşük olmalıdır.

Metalurjik nedenlerden dolayı, hem ergitilecek malzeme miktarı minimum düzeyde tutulmalı hem de malzeme minimum enerji girdisi ile ergitilmelidir. Isı girdisinin artması ile kaynak metali ile ITAB bölgesinin tokluk ya da mukavemet değerlerinde bozulmalar oluşur. Ark kaynağında, akım üretici tarafından üretilen ark enerjisi, Denklem 3.7 ile verilen denkleme göre belirlenir. Ancak, arktaki kayıplar nedeni ile üretilen bu enerjinin tamamı malzemeye aktarılamaz. Birim kaynak uzunluğu boyunca ark tarafından üretilen enerjinin bir kısmı ışıma yolu ile çevreye yayılır yani iş parçasına aktarılamaz. Tozaltı kaynağında, kaynak banyosu üzerindeki koruyucu toz örtüsü sayesinde ark enerjisinin % 90-99'u faydalı enerji olarak iş parçasına aktarılmaktadır. Uygulamada birim kaynak uzunluğundaki enerji kullanımı olarak ifade edilebilecek olan "ısı girdisi" kavramı daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Denklem 3.9. Burada, H_{net} net ısı girdisini (J/mm), I kaynak akımını (A), E ark gerilimini (V), S kaynak hızını (mm/sn) ifade etmekte olup, f_1 ise ark verimi olup boyutsuz bir katsayıdır.

Tozaltı kaynağı için ark verimi 0,99 olarak kabul edilebilir. İş parçasına aktarılan bu ısı girdisinin (H_{net}) ise yalnız bir bölümü malzemenin ergimesi için harcanmaktadır. Burada ise, karşımıza ergime etkinlik katsayısı (f_2) çıkmaktadır. f_2 malzemenin ergimesi için gerekli olan minimum enerji miktarının, malzemeye aktarılan toplan enerji miktarına (H_{net}) oranıdır.

Ergime etkinlik katsayısı Denklem 3.9'e göre hesaplanabilir. Burada, H_f ergime ısı, C spesifik ısı, T_m ana metalin ergime sıcaklığı, T_0 ana metalin kaynak öncesi sıcaklığı, A kaynak dikişinin kesit alanı (mm^2) ve γ ise kaynak metalin yoğunluğu olup, çelikler için $H_f = 274000$ J/kg, $C = 670$ J/kg ve $\gamma = 7,8 \times 10^{-6}$ kg/ mm^3 olarak alınabilir (Şirin, 2004).

$$H = \frac{I.E}{S} \quad 3.5$$

$$H_{net} = \frac{f_1.I.E}{S} \quad 3.6$$

$$f_2 = \frac{[H_f + C.(T_m.T_0)].A.\gamma}{H_{net}} \quad 3.7$$

Tepe sıcaklığı; Tepe sıcaklığı kaynak sırasında meydana gelen ısıl değişimleri etkileyen en önemli etkidir. Kaynak işlemi sırasında malzemede ulaşılabilecek olan tepe sıcaklığı, ısı girdisine ve ısı kayıplarına bağlı olarak değişir. Isı girdi hızı, ısı kayıpları hızından yüksek olduğu sürece malzeme sıcaklığı yükselir. Her ikisinin birbirine eşit olduğu anda malzeme tepe sıcaklığına erişmiş olur. Kaynak metalinde ulaşılan tepe sıcaklık derecesi aynı zamanda ITAB bölgesindeki tane boyutları üzerinde de etkin bir rol oynar. Isı girdisi hem kaynak metalinin ergimesini hem de ergimiş bölgeden esas metale doğru oluşan ısı yayılımını karşılayacak düzeyde olmalıdır. Kaynak hızı arttırıldığı zaman yeterli ergimeyi sağlayabilmek için ısı girdisini yani kaynak akım şiddetini arttırmak gerekir. Akım şiddetinin artması, kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının bir miktar yükselmesine neden olur. J. R. Adams tarafından geliştirilen; Alın kaynaklı sac ve plakalarda tam nüfuz etmiş tek bir pasoda, kaynağa bitişik ana metalin tepe sıcaklığının dağılım denklemi Denklem 3.10'da verilmiştir (Şirin, 2004).

Bu denklemde $Y=0$ olduğunda, yani tam ergime sınırında, denklem $T_p=T_m$ vermektedir. Bu sonuç doğru olarak kabul edilebilir. Zira kaynak ergime sınırında tepe sıcaklığı ergime sıcaklığına eşittir. Bu denklem yalnızca ITAB bölgesi için geçerli olup; ITAB bölgesindeki spesifik noktalarda ulaşılan tepe sıcaklığını belirlenebilmesi, ITAB genişliğinin önceden saptanabilmesi ve ITAB genişliği üzerinde ön ısıtmanın etkisinin hesaplanabilmesi amacı ile kullanılabilir. Burada, T_p tepe sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_0 iş parçasının başlangıç sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_m malzemenin ergime sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), H_{net} ısı girdisini (J/mm), t malzeme kalınlığını (mm) ve Y esas metal üzerindeki noktanın erime bölge sınırına olan uzaklığını (mm) ifade eder (Şirin, 2004).

$$\frac{1}{T_p \cdot T_0} = \frac{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_{\text{net}}} + \frac{1}{T_m \cdot T_0} \quad 3.8$$

Soğuma hızı; Kaynak işleminde, genellikle metal önce sıvı faz eğrisinin üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve sonra da soğutulmaktadır. Soğumanın hızlı gerçekleşmesi durumunda çeliğin kaynağını etkileyen çok önemli faz değişiklikleri oluşabilir. Alaşım-sız ötektoid altı çeliklerde kritik soğuma hızı (V_{sk}) çeliğin C miktarı arttıkça ya da östenit tane büyüklüğü arttıkça azalır. Soğutma sırasında çeliğin soğuma hızı (V) kritik soğuma hızından küçükse yani $V < V_{\text{sk}}$ ise ve dönüşüm sıcaklığı T_{min} sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda tamamlanıyorsa en son yapıda herhangi bir problem oluşmaz. Buna karşılık, $V > V_{\text{sk}}$ ise yapıda martenzit adı verilen sert ve gevrek bir faz oluşur. Saf demir oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar ısıtıldığında çok sayıda yapısal dönüşüme uğrar ve iki farklı allotropik dönüşüm gösterir. Burada önem taşıyan husus, demirin çeşitli koşullarda bir kafes sisteminden diğerine geçebilme özelliğidir.

Demir normal sıcaklıklarda hacim merkezli kübik kristal kafes yapısında olup, bu halini 911°C 'ye kadar korur. Demirin bu haline α - demiri (ferrit) denir. Bu sıcaklıktan sonra, yüzey merkezli kübik kristal yapısındaki γ - demirine (östenit) 1392°C 'den sonra ise tekrar hacim merkezli kübik kristal yapısında olan δ - demirine dönüşür. Östenitte bol miktarda çözünen karbon ve diğer alaşım elementleri, soğuma sırasında ferrite geçerken ayrışmak zorundadırlar. Çözünmüş olan bu alaşım elementlerinin ferrite geçerken ayrışmalarını engelleyecek kadar hızlı bir soğuma oluştuğunda, hem bu ayrışmalar engellenebilir hem de normal östenit-ferrit dönüşümü bozulup olay östenit-

martenzit dönüşümüne çevrilebilir. Martenzitik iç yapı demirin dengesini bozan bir yapıdır. İçinde çözünmeyen elementlerin sıkışıp kaldığı ve çıkamadığı bir ferrit kafesidir. Demir atomları zorla olmak istemedikleri yerlere itilmiş ve her atom etrafında gerilmeli bir durum yaratılmıştır ve demir böylece sertleşmiştir. Çeliğin bileşimindeki karbon miktarı ve/veya diğer alaşım elementlerinin miktarı artıkça çeliğin sertleşebilme kabiliyeti de o oranda artar. ITAB bölgesinde martenzit oluşumuna olanak vermeyen bir soğuma hızının seçilerek kaynak yapılması son derece önemlidir (Şirin, 2001).

Kaynak bölgesinin soğuması özellikle kendi soğuk bölgesine ısı iletimi ile yani ısının çelik tarafından çekilmesiyle yani “soğurmasıyla” olur. Kaynak edilen parça ne kadar kalın ise, soğurma miktarı artacak ve soğuma hızı yükselerek ITAB bölgesinde sertleşme ve dolayısıyla martenzitik yapı oluşabilecektir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, ITAB bölgesinde 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan kısımların dönüşüm açısından 800 ile 500 °C arasındaki soğuma hızı ile aşağı yukarı aynı hızda soğumaktadır. Bu nedenle, karbonlu ve düşük alaşımli çelikler için, soğuma sırasında ITAB bölgesindeki en kritik soğuma aralığı 800 ile 500 °C arasındaki kısım olup, soğuma hızı bu sıcaklık aralığındaki süre için tanımlanan bir değerdir. Bu değer küçük olduğu durumda, soğuma hızlı olmuş demektir. Soğuma süresinin azalması sertliğin ve mukavemetin artmasına, buna karşın çatlama eğiliminin yükselmesine neden olur. Soğuma süresinin büyük olduğu durumda, soğuma yavaş olmuş demektir. Diğer bir değişle, ısı girdisinin fazla olması söz konusudur. Bu durumda, tane büyümesi oluşarak malzemenin çekme mukavemeti, akma sınırı gibi mekanik özelliklerinde azalma oluşur. Soğuma süresinin hesaplanmasında, parça kalınlığına bağlı olarak iki ve üç boyutlu ısı iletimi göz önüne alınır. Kalın parçaların kaynağında, ısı hem parça düzleminde hem de parça kalınlığı doğrultusunda yayılırken (üç boyutlu ısı iletimi), ince parçalarda ısı iletimi sadece parça düzleminde (iki boyutlu ısı iletimi) oluşur. Bu nedenle, kalın parçalarda parça kalınlığı soğuma üzerinde etkili olmazken ince parçalarda bu etki görülmektedir. Şekil 3.21. İki ve üç boyutlu ısı iletimine göre soğuma süresine ait bağıntılar, gerekli kabuller ve düzenlemeler yapılarak Rosenthal ve Rykalin'in katı cisimlerde hareketli noktasal ısı kaynağının varlığı kabul edilerek, kaynak bölgesindeki sıcaklık akışı yer ve zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde ısı iletimi diferansiyel denklemlerinden geliştirilmiştir. Buna göre, üç boyutlu ve iki

boyutlu ısı iletimi için soğuma süresi sırasıyla Denklem 3.11 ve Denklem 3.12’de verildiği gibidir (Ada, 2006).

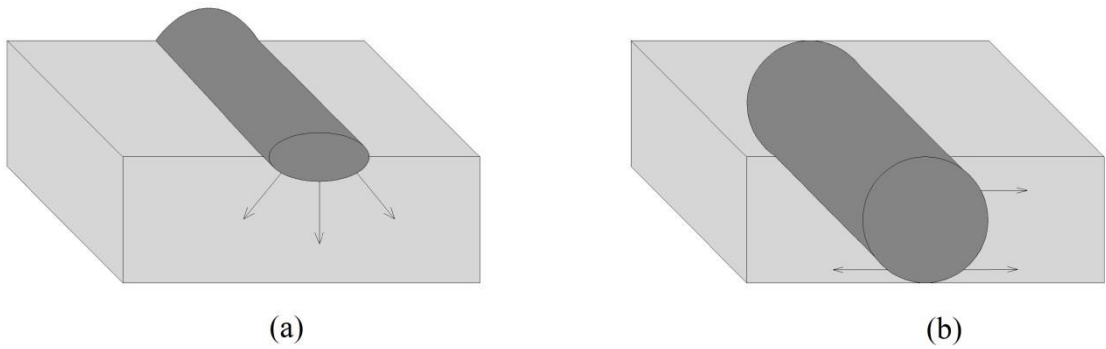
Burada, $t_{8/5}$ 800 ila 500 °C arasındaki soğuma süresinin (sn), η bağlı termik verimi, E net ısı girdisini (j/cm), F_2 ve F_3 sırasıyla iki ve üç boyutlu ısı iletiminde dikiş faktörünü, λ çeliğin özgül ısı iletkenliğini, ρ çeliğin yoğunluğunu, c çeliğin özgül ısısını, d malzeme kalınlığını (cm) ve T_0 ortam veya ön ısıtma sıcaklığını (°C) ifade etmektedir. Kaynak yöntemine bağlı olarak alınan bağlı termik verim, tozaltı kaynağı için $\eta =1$ ’dir. Kaynak dikiş faktörü (F_2 ve F_3) ise, kaynak ağzı yoksa 1, kaynak ağzı açılmış ise 0,9 olarak alınır. Alaşımız ve az alaşımlı çelikler için, $\rho=7,85 \text{ gr/cm}^3$, $\lambda= 0,24\text{J/s.cm}^\circ\text{C}$ ve $c=0,9 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ ‘dir.

Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) için soğuma süresi:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{\eta E F_3}{2\pi\lambda \left[\left(\frac{1}{500-T_0} \right) - \left(\frac{1}{800-T_0} \right) \right]} \quad 3.9$$

İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) için soğuma süresi:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{2\eta E^2 F_2}{4\pi c \lambda \rho d^2 \left(\frac{1}{500-T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800-T_0} \right)^2} \quad 3.10$$



Şekil 3.21. a) Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça), b) İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) (Ada, 2006).

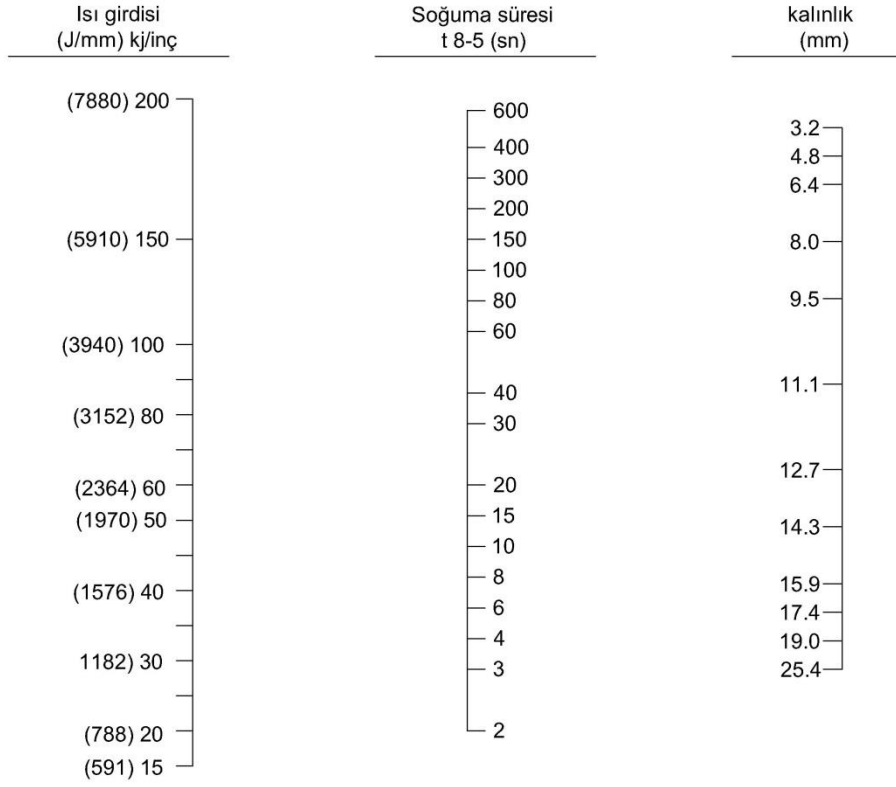
İki boyutlu ısı iletiminden üç boyutlu ısı iletiminde geçişi gösteren kalınlığa (dg) geçiş kalınlığı adı verilir ve Denklem 3.11 ile Denklem 3.12'in eşitlenip düzenlenmesi ile elde edilir . Denklem 3.13.

$$dg = \left[\frac{(\eta \frac{E}{2} \rho \cdot c)}{\left(\left(\frac{1}{500-T_0} \right) + \left(\frac{1}{800-T_0} \right) \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 3.11$$

Isı iletiminin türüne, parça kalınlığının geçiş kalınlığı ile karşılaştırılması sonucunda karar verilir. Buna göre, malzeme kalınlığı geçiş kalınlığından küçük ise iki boyutlu ısı iletimi, aksi durumda ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur. Bir diğer yol ise, her iki ısı iletimine göre soğuma süresinin hesaplanarak ısı iletim türünün ne olduğuna karar vermektedir. Her iki değerden büyük olanı fiziksel olarak daha anlamlıdır. Bu nedenle, Denklem 3.11'dan elde edilen değer daha büyükse ısı iletimi üç boyutlu aksi halde ise iki boyutlu demektir.

Malzeme kalınlığı ve ısı girdisine bağlı olarak soğuma süresini, Şekil 3.22.'de verilen nomogram yardımı ile hesaplama olanağı vardır. Soğuma hızı denklemlerinden görülmektedir ki, ana metalin başlangıç sıcaklığı, uygulanan enerji girdisi, kullanılan kaynak yöntemi, kaynak pozisyonu, malzeme kalınlığı ve kaynak ağzı soğuma biçimi soğuma hızına etki eden faktörlerdir. Ergime bölgesindeki soğuma hızının belirlenmesi, ergime ve ITAB bölgesindeki metalürjik dönüşümlerin kontrol altına alınması (özellikle martenzitik yapı dolayısıyla soğuk çatlak oluşumunun önüne geçilmesi) ve kaynak metalindeki tane büyümesinin engellenmesi açısından oldukça önemlidir.

Soğuma oranı hesapları ince ve kalın parçalar için ayrı ayrı yapılmıştır. İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) için soğuma hızı denklem 3.14'de, üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) için soğuma hızı ise denklem 3.15'de verilmiştir. Burada, Rc₂ ve Rc₃ sırasıyla iki ve üç boyutlu ısı iletiminde kaynak orta eksenindeki soğuma hızı (°C/sn), T_c soğuma hızının hesaplandığı sıcaklıktır (550 °C). Isı iletim türünün belirlenmesi sınır parça kalınlığına bağlı olarak yapılır. Denklem 3.16. Eğer, τ < 0,75 ise iki boyutlu ısı iletimi, τ > 0,75 ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur.



Şekil 3.22. Kalınlık, ısı girdisi ve soğuma süresi arasındaki ilişki (Linnert, 1994)

$$Rc_2 = \frac{(2\pi k((T_c - T_i))^2)}{H_n} \quad 3.12$$

$$Rc_3 = 2\pi k \rho c (T_c - T_i)^2 \left(\frac{h}{H_n}\right)^2 \quad 3.13$$

$$\tau = h(\rho c (T_c - T_i)^2) \left(\frac{h}{H_n}\right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.14$$

Karbon eşdeğeri; Kaynak işlemi sırasında, ergime bölgesine bitişik olan ana metalin ısıl çevrime uğraması sonucunda belirli bir sertlik artışına uğradığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Buradaki sertlik artışına etki eden en önemli faktör, ana metalin kimyasal bileşimidir. Alaşımsız çeliklerin sertleşme kabiliyetleri üzerinde oldukça etkin olan başlıca elementler C ve Mn'dır. Az alaşımlı çeliklerde ise, Cr, Mo, V ve B gibi alaşım elementleri düşük C oranlarında bile kaynak sonrası ITAB bölgesinde

sertlik artışına neden olurlar. Kaynak sırasında çeliğin sertleşme eğilimini belirten bir değer sayısının bulunması ve bununla çeliğin bileşimine dayanarak, kaynak kabiliyetini belirten bir denklemin elde edilmesi için birçok çalışma yapılmış ve alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eşdeğer sertliği sağlayacak C miktarı saptanmıştır. Bu şekilde saptanan ve çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliği veren C miktarına karbon eşdeğeri ($C_{eş}$) adı verilmiştir (Şirin, 2001).

Günümüze kadar bu konuda birçok çalışma yapılmış ve oldukça fazla sayıda karbon eşdeğeri formülü geliştirilmiştir; Ancak, bunlardan en yaygın olarak kullanılan Uluslararası Kaynak Enstitüsü Kaynak Kabiliyeti Komisyonuna (IIW) göre düzenlenmiş olan formüldür (Şirin, 2004). Denklem 3.18’de verilen bu karbon eşdeğeri denklemin geçerli olabilmesi için, çelikteki alaşım elementlerinin sınırı Çizelge 3.2.’deki gibi olmalıdır. CEPLS formülü ile Denklem 3.18, % 0,15’den daha az C içeren boru çelikleri için Ito and Bessyo tarafından geliştirilmiş olan PCM denklemleri Denklem 3.19. çelik boru sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Şirin, 2004).

Görüldüğü gibi, karbon eşdeğeri formülü tamamen çeliğin kimyasal bileşimi ile ilgili olup, malzemeye uygulanan ısı girdisi, malzeme kalınlığı, kaynak ağızı biçimi gibi faktörleri içermemektedir.

$$C_{eş} = \left(\frac{C+Mn}{6}\right) + \left(\frac{Cr+Mo+V}{5}\right) + \left(\frac{Ni+Cu}{15}\right) \quad 3.15$$

$$CE_{PLS} = \left(\frac{C+Si}{25}\right) + \left(\frac{Mn+Cu}{16}\right) + \left(\frac{Cr}{20}\right) + \left(\frac{Ni}{60}\right) + \left(\frac{Mo}{40}\right) + \left(\frac{V}{10}\right) \quad 3.16$$

$$PCM = \left(\frac{C+Si}{30}\right) + \left(\frac{Mn+Cu+Cr}{20}\right) + \left(\frac{Ni}{60}\right) + \left(\frac{Mn}{15}\right) + \left(\frac{V}{10}\right) + 5B \quad 3.17$$

Çizelge 3.2. $C_{eş}$ (IIW) için çeliklerdeki alaşım elementlerinin üst sınırı (Şirin, 2004)

C	Mn	Cr	Ni	Mo
%0,5	%1	%1	%3,5	%0,6

Çizelge 3.3. C_{es}'e göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi (Şirin, 2004)

Karbon Eşdeğeri (%)	Ön tav sıcaklığı (°C)
<0,45	-
0,45 – 0,60	100 - 200
>0,60	200 - 300

Çizelge 3.4. Ön tav uygulanmadan kaynak edilebilecek maksimum parça kalınlığı (Şirin, 2004)

Akma Sınırı (N/mm ²)	Maksimum Kalınlık (mm)
315 – 355	30
385 – 420	20
460 – 500	12
>590	2

Uluslararası Kaynak Enstitüsü çatlamaya karşı bir emniyet olarak kaynak sonrası ITAB bölgesindeki sertliğin 350 HV'yi aşmamasını önermektedir. ITAB bölgesinde sertlik artışını kontrol edebilmek için yaygın olarak yapılan uygulama, kaynak öncesi parçaya ön tav yapılması ve kaynak işleminin bu sıcaklık derecesinde gerçekleştirilmesidir. Bir yapı çeliğine uygulanacak olan tavlama karbon eşdeğerine bağlı olarak belirleyen bazı denklemler geliştirilmiş olsa da en doğru yol Çizelge 3.4'de verilmiş olan değerleri uygulamaktır. İnce taneli yapı çeliklerinin kaynağında +5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda parçaya 80 - 200 °C'lik bir ön tav uygulanır. Bu sıcaklığın üzerindeki çalışmalarda, parçaya ön tav uygulanıp uygulamama konusunda malzemenin akma sınırı ve parça kalınlığı bir kriter olarak kullanılır. Çizelge 3.5.

Kaynak kabiliyeti bakımından çelikleri üç ayrı grupta değerlendirme olanağı vardır; İyi bir kaynak kabiliyetine sahip olan çelikler, bilinen tüm kaynak yöntemleri ile hiçbir özel önlem gerektirmeksizin kaynak edilebilirler. ITAB bölgesinde tane büyümesi dışında bir yapı değişikliği ve sertleşme oluşmaz. Bu özellik, genellikle C_{es} <

% 0,45 olan çeliklerde vardır. Orta derecede kaynak kabiliyetine sahip olan çeliklerde güvenli bir kaynak bağlantısı elde edebilmek için, kaynak yöntemi ve malzeme seçimine dikkat edilmeli ve uygun bir ön tav sıcaklığı uygulanmalıdır. Bu gruba giren çeliklerin karbon eşdeğeri % 0,45 ile 0,60 arasındadır. Kötü derecede kaynak kabiliyetine sahip olan çelikler ($C_{eş} > \% 1$ olan yüksek alaşımlı ve karbonlu çelikler) ise, özel ek kaynak metali kullanılarak, oldukça yüksek bir ön tav sıcaklığı ve kontrollü bir soğutma ile kaynak edilirler. Genellikle ITAB bölgesindeki sertlik değeri garanti edilemez (Yıldız, 2000).

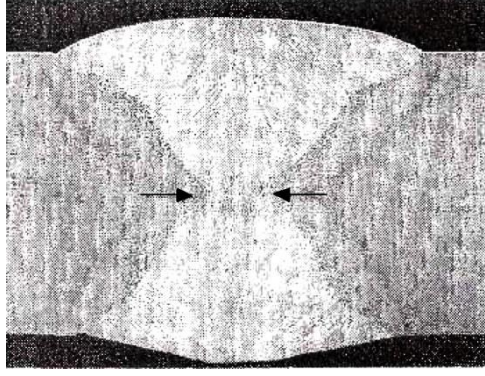
3.5.10.Kaynak Hataları

Kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, uygun olmayan ek kaynak metali veya kaynak tozu kullanımı ve kaynak tekniğinin kötü uygulanması sonucunda istenmeyen bir dizi kaynak hatası ile karşılaşılması olasıdır. Tüm kaynak hataları, kaynak dikişinde bir zayıflama ve süreksizlik oluşturarak bağlantının kullanımı sırasında geri dönüşü olanaksız çatlak, kırılma ya da performans eksikliğine neden olabilir. Dikişli boru üretiminde en çok karşılaşılan hata türleri; gözenek, yanma oluğu, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği, çatlak oluşumu ile geometrik (bindirme, dikiş kaçıklığı vb.) hatalardır.

3.5.10.1. Nüfuziyet yetersizliği

Nüfuziyet başarılı bir kaynağın temel şartıdır ve nüfuziyet esas olarak kaynak bağlantısındaki ergime derinliğidir. Yani, esas metalin ilk yüzeyi ile ergimenin bittiği noktalar arasındaki mesafedir. Kaynak sırasında, ergimenin bütün malzeme kalınlığına aynı olmaması sonucunda bağlantının alt kısımlarında kırılmaya neden olabilecek oyuk ve çentikler oluşur. Şekil 3.23.

Nüfuziyet yetersizliği öncelikle dikişin yorulma mukavemetini önemli bir ölçüde düşürür ve dikiş eğilmeye zorlandığında kökteki oyuk ve çentikler bağlantının kırılma eğilimini arttırarak, bağlantının bu kısımdan çatlamasına ve sonrasında kırılmasına yol açar.



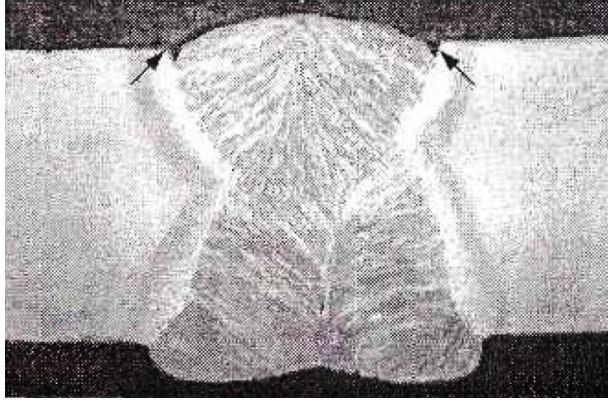
Şekil 3.23. Nüfuziyet yetersizliği (Yıldız, 2000).

Tek pasolu alın kaynağında nüfuziyet derinliği, malzeme kalınlığının % 80'ini geçerse kaynak sırasında malzemenin delinme tehlikesi artar. Gereğinden kalın bir tel kullanılması durumunda ya da düşük akım şiddeti ile çalışılması halinde nüfuziyet derinliği azalır ve nüfuziyet yetersizliği oluşabilir. Ayrıca, kaynak ağzının hatalı açılması da bu hataya yol açabilir.

3.5.10.2. Yanma oluğu (çentik)

Bu hata, kaynaktan sonra esas metalde veya kaynak metalinde oyuk ve çentik biçiminde kendisini gösterir. Söz konusu bu oluklar dikiş boyunca sürekli veya kesintili bir şekilde devam eder. Şekil 3.24. Yanma olukları, kaynak dikiş kesitini zayıflattıklarından ve çentik etkisi yaptıklarından dolayı, özellikler dinamik zorlamalarının etkisinde kalan bağlantılarda bulunmaları istenemez. Bütün ark kaynak yöntemlerinde karşılaşılan yanma oluğunun oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Akım şiddetinin ve/veya ark geriliminin çok yüksek olması
- ✓ Kaynak hızının çok yüksek olması nedeni ile ergimiş ilave metalin kaynak ağzını tam olarak dolduramaması,
- ✓ Tel eğiminin (kafa açısı) uygunsuz olması ya da tel besleme hızının düzensiz olması nedeni ile ek kaynak metali yığılmasında düzensizliklerin oluşması.



Şekil 3.24. Yanma oluğu (Yıldız, 2000).

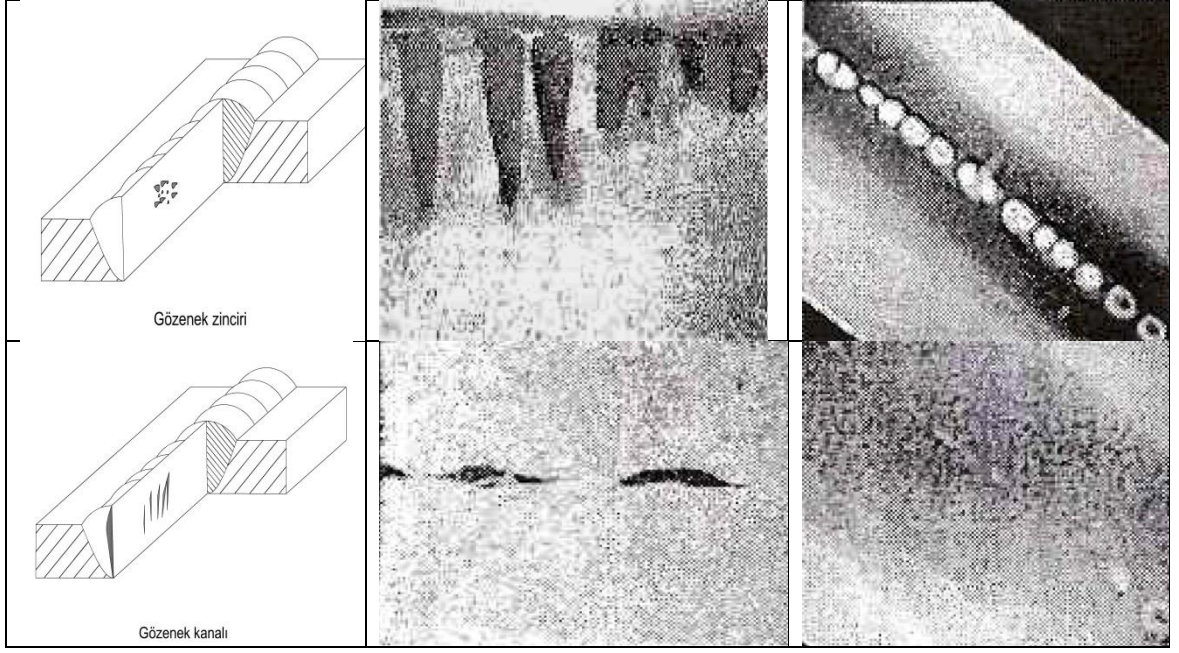
3.5.10.4. Gözenek oluşumu

Çok çeşitli nedenlerle oluşabilen gözenekler kaynak banyosunda sıkışıp kalan gazların oluşturduğu boşluklardır. Bunlar gaz kabarcığı denilen tek tek yuvarlak veya gaz kanalı olarak adlandırılan uzunlamasına boşluklar halinde dikiş içinde yer alırlar Şekil 3.25. Bir kaynak dikişinin içinde bulunan gözenekler, dikişin taşıyıcıyı kesitinin azalmasına yol açtığından dolayı mukavemet değerlerini düşürür ve aynı zamanda yerel gerilme birikimlerine neden olur. Bu durum bağlantının mekanik özelliklerinin kötüleşmesine yol açar. Gözenekler, özellikle yorulma mukavemetini azaltıcı yönde etki gösterirler. Kaynak metali içinde dağılmış olarak bulunan küçük gözenekler birleştirmenin statik mukavemetini çok fazla etkilemezler. Ancak, yüksek dinamik mukavemet istenen konstrüksiyonlarda gözenek oluşumuna izin verilmez (Şirin, 1997). Tozaltı kaynağında, gözenek oluşumuna neden olan elementleri kısaca aşağıdaki gibi açıklamak olasıdır;

- Yüksek kükürt içerikli kaynağa yatkın olmayan çelik kullanımı,
- Uyumsuz tel ve toz kombinasyonu ile çalışılması,
- Serbest tel ucunun fazla uzun olması. Deneyimler temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığın kısılması ile daha kararlı ve sabit bir arkın elde edildiğini göstermiştir. Tel eğiminin uygunsuz olması da gözenek oluşumuna yol açar.
- Kaynak tozunun nemli olması nedeni ile kaynak banyosuna nem taşınması,
- Çok yüksek veya çok düşük ark gerilimi ile çalışılması,

- Kaynak hızının aşırı yüksek olması ya da ısı girdisinin düşük olması nedeni ile gazların kaynak banyosunda dışarıya çıkacak zamanı bulamadan kaynak metalinin katılaşması ve gazların katılaştıran kaynak metali içinde hapis olması; diğer bir ifade ile hızlı soğuma durumunda, gazların (H_2 , CO , N_2 veya H_2O) yüzeye çıkmasının engellenmesi ile katılaştıran kaynak metalinde kalmaları ile gözenek türü kaynak hatası oluşur.
- Özellikle toz altı kaynak yönteminde, toz yüksekliğinin uygun olmaması; Kaynak yaparken yığılan tozun yüksekliği, arkı tam örtecek şekilde ayarlanmalıdır. Eğer, yığılan tozun yüksekliği az ise dikiş gözenekli olur. Tozun yüksekliğinin fazla olması halinde de, gazların dikişten dışarıya çıkması zorlaşır; bu da, gözenek oluşumuna neden olur.
- Tel, toz veya iş parçasının yüzeyinin kirli olması; Yağ, gres ve boya gibi organik kalıntılarla ile pas ve tufal gibi metalik kalıntılar da gözenek oluşumuna neden olurlar. Bu nedenle, kullanılan kaynak tozunun içinde toz, pislik, tufal ve demir tozu gibi kalıntılar bulunmamalıdır. Bu amaçla, kaynak tozu sürekli bir eleme ve temizlemeye tabi tutulur. Kaynak ağızlarında giderilemeyen bir kalıntı olması halinde, kaynak hızı düşürülerek gazların kaynak banyosu katılaştıncaya kadar dışarıya çıkabilmesi için yeterli zaman oluşturulur. Bu gibi durumlarda, yüksek miktarlarda dezoksidasyon elementi içeren kaynak telleri de kullanılabilir.
- Ark üflemesi de gözenek oluşumuna yol açar.

Hatanın Şematik Gösterimi	Makro görüntüsü	X-Ray görüntüsü
 <p>Gözenek</p>		

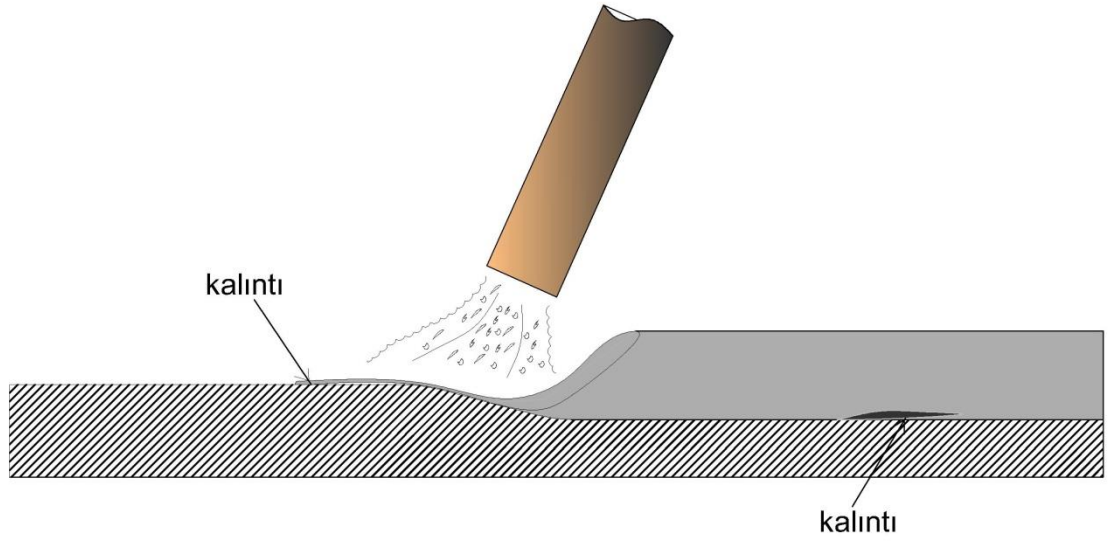


Şekil 3.25. Gözenek türü kaynak hataları (Şirin, 1997)

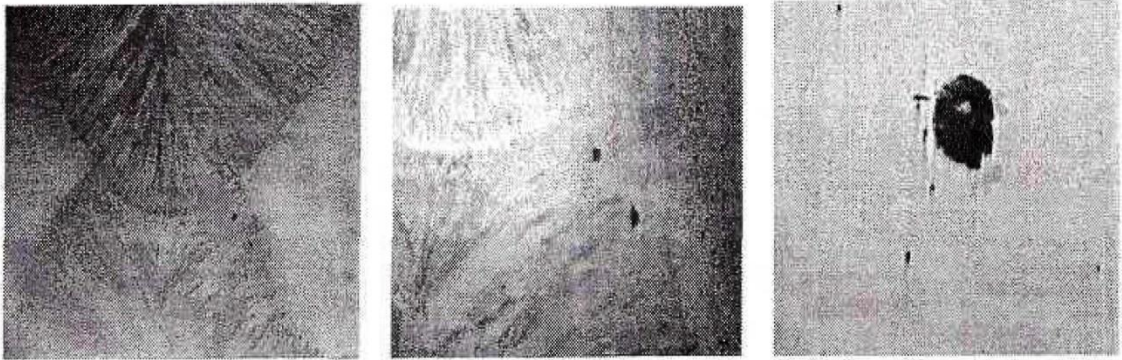
3.5.10.5. Kalıntılar

Kalıntılar gerek kaynak kesitini zayıflatmaları gerekse de çatlak başlangıcına neden olduklarından varlıkları arzu edilmez.

Ergimiş kaynak banyosunu dezokside etmek ve yabancı maddelerden arındırmak amacı ile kaynak tozu içinde bulunan elementler kaynak süresince oksitler, nitrürler ve yabancı maddelerle reaksiyonuna girerler. Normalde cüruf olarak adlandırılan bu bileşikler düşük yoğunlukları ve katılma sıcaklıkları nedeniyle kaynak işlemi süresince yüzeye doğru hareket ederler ve yüzeyde cüruf tabakası oluştururlar Şekil 3.26. Hızlı soğuma durumunda (yetersiz ısı girdisi), cüruf kalıntısı kaynak banyosunun erken katılması nedeniyle metal yüzeyine ulaşamaz ve dikişin içinde kalarak hata yaratır. Şekil 3.27 Kaynak telinin doğrultulmasında problem olması, telin kaynak noktasına kesintili bir biçimde gelmesi, uygun olmayan kaynak ağız tasarımı ile tufal, pas ve yağ gibi yabancı maddelerin varlığı kalıntı oluşumunu arttıran etkenler arasındadır. Cürufun elektroda doğru akması da cüruf kalıntısına neden olur. Ancak, bu durumda soğuma hızının artırılması yani daha hızlı bir soğumanın sağlanması gerekir. Ayrıca, daha az akıcı ve iri taneli toz kullanımı tercih edilir ve kaynak ağız açısı büyütülür.



Şekil 3.26. Kalıntı türü hatanın oluşumu (Ada, 2006)



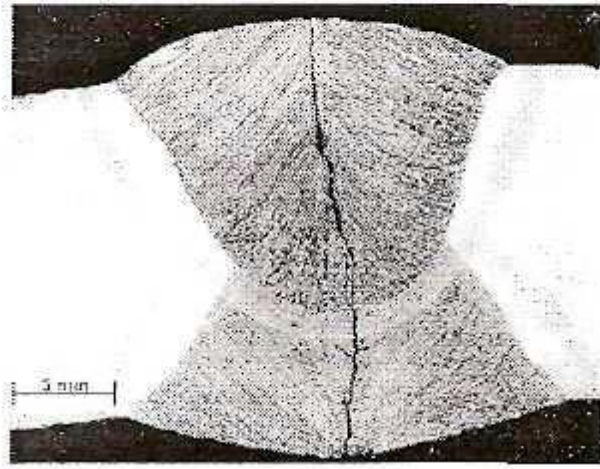
Şekil 3.27. Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü (Ada, 2006)

3.5.10.6. Çatlak oluşumu

Bu hata diğer hatalara karşı en tehlikeli olanıdır Şekil 2.28. Dış zorlamaların türü ne olursa olsun çatlaklar sürekli olarak bağlantının mukavemet değerini düşürür; Bu bakımdan, kaynak dikişinde çatlakla hiçbir şekilde izin verilmez. Çatlakın oluştuğu yer, çatlak oluşum nedeniyle ilgili olarak önemli ipuçları vermektedir. Eğitim kaynağında çatlakla kaynak metalinde (genellikle sıcak çatlak) ve ısıdan etkilenmiş bölgede (genellikle soğuk çatlak) rastlanır. Çatlaklar oluşum zamanlarına göre “sıcak çatlak” ve “soğuk çatlak” olmak üzere iki gruba ayrılır. Sıcak çatlaklar kaynak banyosu

katılaşmaya başladığı anda, soğuk çatlak ise kaynak banyosu katılaştıktan sonra (hatta haftalar sonra) ortaya çıkar.

Sıcak çatlak oluşumu; Katılaştıran kaynak metalinde oluşan tipik bir hasar biçimidir, bu tür çatlaklar likidüs ve solidüs sıcaklıkları arasındaki bölgede katılaşmadan hemen önce ortaya çıkar. Kaynak metalini soğuma sırasında büzülme ya da diğer bir deyişle kendini çekme eğilimi gösterir. Bu durumda, kaynak metalini yeteri kadar sünek değilse ve kaynak edilen parçaların birbirine göre hareket etme imkânları sınırlı ise sıcak çatlak oluşur. Malzemenin alaşım elementi (özellikle C miktarı) çatlak oluşumu açısından son derece önemlidir. Yüksek alaşım ya da yüksek karbonlu bir malzemenin ergitme kaynağında, malzemenin belirli bir kısmı eriyerek erimiş elektrod metalini ile karışmakta ve kaynak metalini oluşturmaktadır. Tel ve toz seçiminin uygun olmaması durumunda, yüksek oranda C ya da alaşım elementi içeren, mukavemeti yüksek ancak sünekliği düşük bir kaynak metalini elde edilir.



Şekil 3.28. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası (Ada, 2006)

Bu durumda, katılaşma sırasında kaynak metalini yeterli sünekliğe sahip olmadığı için kendini çekme sırasındaki şekil değişimini plastik alanda gerçekleştirerek çatlak oluşumuna yol açabilir. Burada, sünekliği yüksek bir dolgu metalini kullanımı ile çatlak oluşum tehlikesi azaltılabilir. Kaynak metalinin hızlı soğuması da bir diğer çatlak oluşum nedenidir. Eğer, esas metal soğuk ve kaynak banyosu küçükse soğuma da o

oranda hızlı olacaktır. Buna bağı olarak, kaynak metalinin katılma sırasındaki büzülmesi (kendini çekme) çok hızlı gerçekleşecek ve bu da çatlak oluşumuna yol açacaktır. Bu durumda, malzemeye ön tav yapılması ya da ısı girdisinin artırılması ile soğuma hızı yavaşlatılarak çatlak oluşumu engellenebilir.

Çeliğin bileşimindeki FeS, Ni, Cu, Zn, Pb, Sn gibi düşük sıcaklıklarda ergiyen bileşiklerin varlığın da sıcak çatlak oluşumunu artıran etkenlerdir. Bunlar katılma sırasında merkeze doğru ötelenir ve son anda katılaştığı için katılma sırasındaki büzülme (kendini çekme) dolayısıyla boşluk oluşumuna ve bunun sonucunda da çatlak oluşumuna neden olurlar. Bunun ilk çözümü, nüfuziyeti azaltarak ana metalden kaynak metaline gelen bu tür kalıntıların miktarını azaltmaktır. Bir diğere yol ise, yeterli oranda Mn eklenmesi ile MnS oluşturmaktır. Ergime sıcaklığı yaklaşık 1595 °C olan MnS kaynak metali katılmaya başlamadan önce oluşur ve segregasyona yol açmaz. Dikiş geometrisi de kaynak yerinde oluşan çatlaklar üzerinde oldukça etkilidir. Şapkalı bir kaynak bağlantısında şapkalımanın başladığı yerler çatlak açısından bağlantının en zayıf noktasıdır. Şapkalımaya gerilimin aşırı fazla olması ya da kaynak hızının çok düşük olması neden olur. Bunu dışında, dikişin genişlik/derinlik oranı da çatlak oluşumu açısından son derece önemlidir.

Kaynak yerinde oluşan çatlaklara, mekanik zorlanmalar da neden olmaktadır. Tozaltı kaynaklı spiral dikişli boru üretiminde iç kaynağın bantların birleşme noktasına göre konumu son derece önemlidir. İç kaynak noktası, bant kenarlarının birleşme noktasından belirli bir uzaklıkta olmalıdır. Bant kenarlarının birleşiminden sonra kıvrımın etkisi ile oluşan şekil değişimlerini sona erdiği nokta, iç kaynak için çatlak oluşum tehlikesi açısından güvenli bir bölge olarak kabul edilebilir.

Soğuk çatlak oluşumu; Kaynak dikiş tamamen katılaştıktan sonra ortaya çıkan soğuk çatlak oluşumu için üç koşulun bir araya gelmesi gerekir; Bunlar, yeterli derecede hidrojen varlığı, yeterli derecede gerilim ve çatlaka duyarlı malzemedir (sertleşme özelliği). Söz konusu bu etkenlerden birinin ya da birkaçının giderilmesi ITAB bölgesindeki soğuk çatlak oluşumunu ortadan kaldırır. Genellikle dikişin ortasında boylamasına olarak ortaya çıkan soğuk çatlak 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda oluşur.

Yüksek karbonlu ve alaşımlı çelikler ile yüksek mukavemetli az alaşımlı çeliklerde (HSLA) daha sık rastlanır.

Kaynak işlemi sırasında, ısının yerel olarak uygulanması ile malzemede ve özellikle kaynak dikişi civarında oluşan büyük sıcaklık farklılıklarından dolayı iç gerilmeler meydana gelir. Ergitme kaynağı işlemlerinde ortaya çıkan ve malzeme kalınlığına bağlı olarak artan iç gerilmeler çatlama eğilimini artırır, malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetini azaltarak kaynaklı konstrüksiyonların kullanım güvenliğini olumsuz yönde etkiler. Kaynaktan sonra ortaya çıkan iç gerilmelerin, çalışma koşullarındaki zorlanmalar ve kaynak banyosundan yayılan hidrojenin olumsuz etkileri ile birleşmesi ve sertleşen bölgenin plastik şekil değiştirme özelliğinin olmaması nedeni ile kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle gözle görülmeyen kılcal çatlaklar zamanla belirli bir büyüklüğe erişince gevrek kırılmaya yol açabilir. Çeliğin sertleşme eğilimi kimyasal özelliklerine göre değişir. Bu konu, özellikle az alaşımlı kalın etli yapı çelikleri için çok önemlidir. Kalın saclarda ısı çabuk yayıldığı için dikiş hızlı soğur ve dolayısıyla parça kalınlığına ve diğer soğuma koşullarına bağlı olarak çatlak tehlikesi ortaya çıkar. Geçiş bölgelerinde sert bir bölge oluşumunu engellemek için soğuma hızının olabildiğince azaltılması gerekir.

3.5.10.6. Gevrek kırılma

Kırılmaları bir kez aşırı zorlanma ile oluşan “zorunlu kırılma” ve zorlanmanın tekrarlanması ile oluşan “yorulma kırılması” olmak üzere iki ana gruba ayırma olanağı vardır. Zorunlu kırılmalar ise, şekil değişiminin olmadığı ya da çok az olduğu “gevrek kırılma” ve şekil değişimi sonucunda oluşan “sünek kırılma” olmak üzere ikiye ayrılır. Sünek malzemeler, uygulanan gerilmenin etkisiyle akma sınırının üzerinde plastik şekil değişimine uğrar. Malzemeye uygulanan dış kuvvetlerin etkisi ile elastik şekil değişiminden hemen sonra plastik şekil değişimine uğramaksızın ya da % 1 gibi az bir uzamadan sonra parçanın iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına “gevrek kırılma” denir. Gevrek kırılma, nereden ve ne zaman başlayacağı önceden kestirilemediği için son derece tehlikelidir. Geçmişte önemli kazalara ve büyük kayıplara yol açtığı için, üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar hala devam etmektedir. Kaynaklı

konstrüksiyonlarda gevrek kırılmanın önemi oldukça fazladır. Mühendislik yapılarında gevrek kırılmadan çekinilmesinin nedenleri şunlardır:

- ❖ Genellikle 10-50 N/mm² gibi çok düşük dış gerilmeler bile hasara yol açabilir.
- ❖ Çatlak parça içinde 5000 m/sn gibi çok büyük bir hızla ilerler ve bu sırada hasarı sınırlayıcı önlem almak olası değildir.
- ❖ Malzeme kalınlığının artışı bile kırılmayı engelleyemez. Kaynak sırasındaki ortam şartları gevrek kırılmanın başlamasına ve başladıktan sonra da devam etmesine elverişlidir. Kaynaklı konstrüksiyonlarda tüm parçalar arasında metalik bir bağ bulunduğundan, kırılma kaynak bağlantısı üzerinden bir taraftan diğer tarafa kolayca geçebilir. Birçok örnekte, kırılmanın ilk olarak konstrüksiyonun mukavemet olarak etkisi olmayan bir parçada başlayıp, kaynak dikişinden geçerek yayıldığı ve ana parçaları da kırmak suretiyle tüm konstrüksiyonun hasara uğramasına neden olduğu görülmüştür.

Kaynak hataları gevrek kırılma bakımından tehlikeli bir durum yaratır. Bu nedenle, malzemedeki kaynaklanan hatalarının giderilebilmesi için kaynağı yapılacak çeliklerde kalite ve bileşim bakımından bazı minimum şartların yerine getirilmesi gerekir. Şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan malzemelerde gevrek kırılma tehlikesi azdır. Dolayısıyla, kaynak edilecek bir malzeme ancak yeterli sünekliğe sahip ise “kaynağa elverişli” olarak nitelendirilebilir. Gevrek kırılmanın oluşması aşağıdaki koşulların bir araya gelmesine bağlıdır;

- Malzemenin gevrek kırılma eğilimi taşıması (heterojen içyapı).
- Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olması.
- Çentik veya benzeri kusurların bulunması.

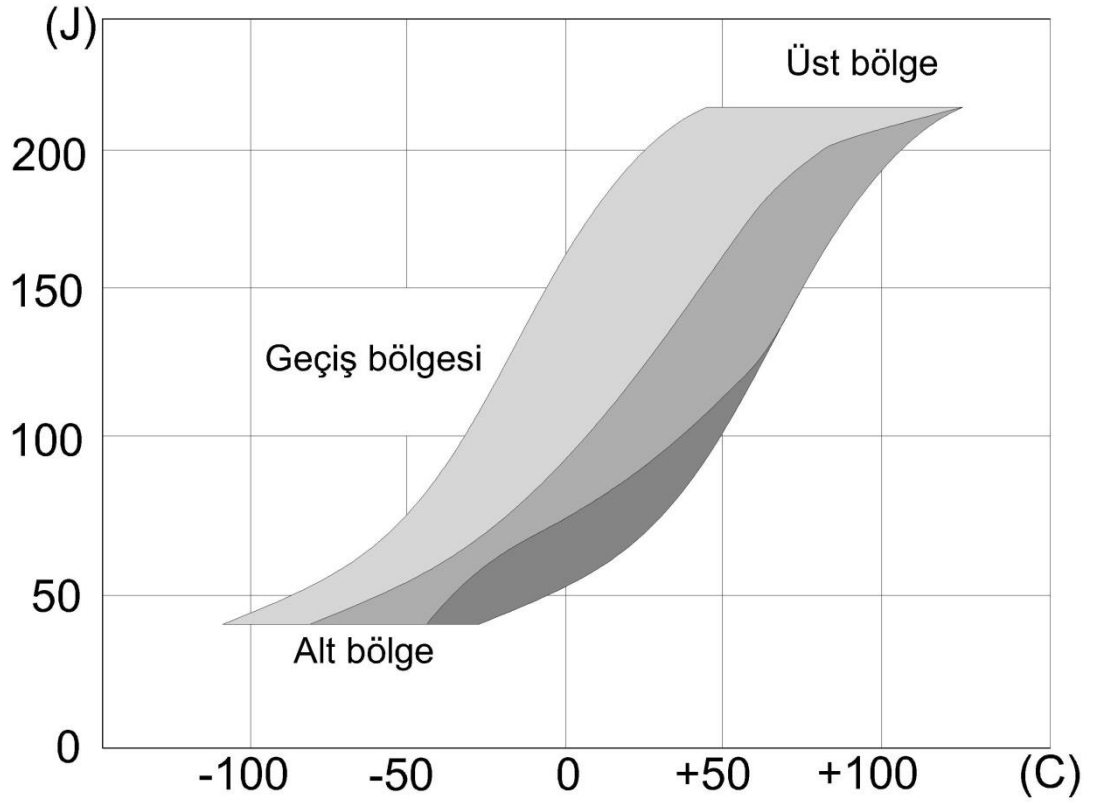
Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin gevrekleştirici bazı etkenlerden dolayı tükenmiş olması, düşük sıcaklık ve çok eksenli gerilme durumu gevrek kırılmayı kolaylaştıran faktörlerdir. Kırılma davranışının incelenmesi için geliştirilen deney yöntemleri arasında özellikle çentik – darbe deneyi “vurma” yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemin sakıncası elde edilen vurma değerinin (kıрма işi) sadece malzemeye özgü bir büyüklük olmayıp deney parçasının geometrisine çok fazla

bağımlı olmasıdır (Şirin, 1997). Bu nedenle, çentik - darbe deneylerinde elde edilen sonuçlar mukavemet hesaplarında kullanılmaz. Deney DIN 51222'ye uygun olarak imal edilmiş sarkaçlı vurma cihazında yapılır. Cihazın çekici önceden belirlenmiş olan bir H yüksekliğinden düşer ve en alt noktada arka yüzüne vurduğu çentikli deney parçasını kırmaya zorlar. Deney parçasının kırılması ya da destekler arasından şekil değiştirerek geçmesi için sarkaç enerjisinin bir kısmı kırma işi olarak harcanır ve bu değer cihaz göstergesinden doğrudan okunur. Çentik - darbe deney parçaları DIN 50115'de standartlaştırılmış olup, bunlardan en yaygın olanları DVM ve sivri çentikli ISO-V parçalarıdır. Numune parça genişliği artıkça vurma tokluk değeri azalır, geçiş sıcaklığı artar.

Vurma değerinin büyük olduğu üst bölgede sünek, alt bölgede gevrek geçiş bölgesinde ise çoğunlukla karışık kırılma görülür. Sünek kırılmayı sağlayan en yüksek enerjiye “tavan enerjisi” denir. Tavan enerjisi yüksek ve geçiş sıcaklığı düşük olunca tokluk özelliği iyileşir. Tavan enerjisi düşük ve geçiş sıcaklığı yüksek olunca da tokluk düşer ve çelik gevrekleşir. Sıcaklık, kırılma davranışını etkileyen önemli etkenlerden biridir. Bütün çelikler oda sıcaklığında iyi bir çentik - darbe mukavemetine sahip olmalarına karşın bazıları düşük sıcaklıklarda çok gevrek bir davranış gösterirler. Sünek halden gevrek hale geçiş belirli bir sıcaklık aralığında olur ve çelik bu sıcaklık aralığında gevrek hale gelir. Geçiş sıcaklığı, sünek kırılma ile (üst bölge), gevrek kırılma (alt bölge) ayrımı sağlar Şekil 3.29.

Bir çeliğin geçiş sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimi, uygulanan mekanik ve ısıl işlemler, tane büyüklüğü ve içyapı gibi birçok faktörün etkisi altında olup değişik şekillerde tanımlanabilir;

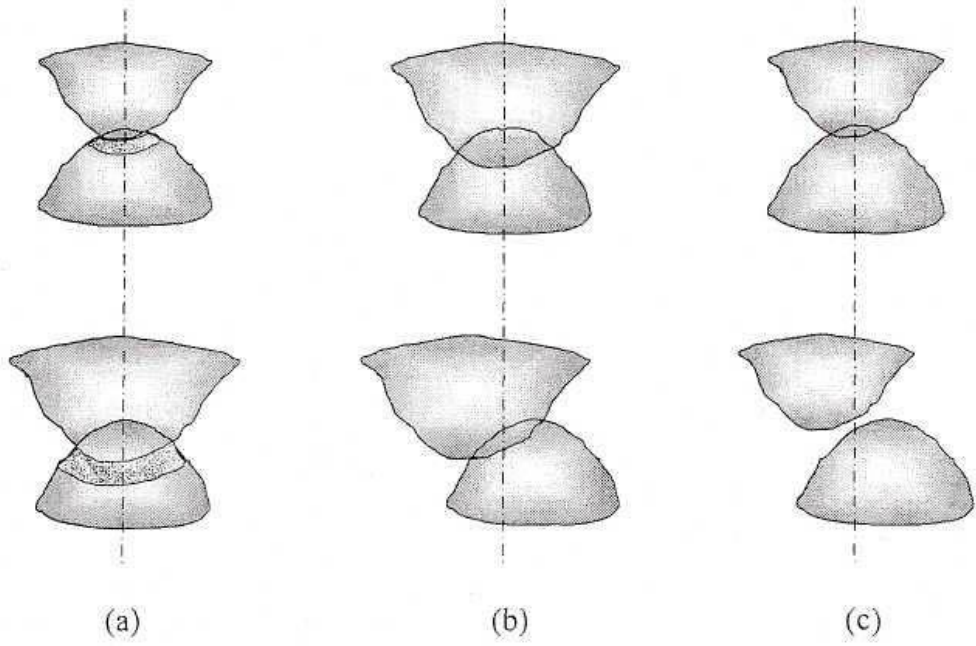
- ✚ Vurma değerinin belirli bir sınır değere (örneğin 27 J) ulaştığı sıcaklık.
- ✚ Kırılma yüzeyi incelendiğinde gevrek olarak kırılan kısmın tüm alanın belirli bir yüzdesi (örneğin % 80) olduğu sıcaklık.
- ✚ Üst sınırdaki vurma işinin belirli bir yüzdesine karşılık gelen sıcaklık.



Şekil 3.29. Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi (Şirin, 1997)

3.5.10.7. Geometrik kaynak hataları

Dikiş kaçıklığı, bindirme, işlerlik, genişlik/derinlik oranı, kep yüksekliği ve açısı gibi kaynak geometrisindeki düzensizlikler yük altında bağlantının tokluk davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. İşlerlik, iç ve dış dikişin birbirine geçme miktarı olarak tanımlanabilir. İşlerlik oranı iki açıdan önem taşımaktadır. Dış kaynak sonrası iç kaynağın belirli bir bölümü ısı yayılımı nedeni ile yapı değişikliğine uğrar. Bu bölge kaynak bölgesi olması nedeni ile zaten mikroyapısal değişime uğramış olup, dış kaynak sonrası etkisinde kaldığı ısı çevrim nedeni ile oldukça kaba taneli bir yapıya dönüşerek tokluk açısından kaynak dikişinin en zayıf bölgesini oluşturur



Şekil 3.30. a) İşlerlik ısıdan etkilenen bölge arasındaki ilişki
 b) İşlerlik ile dikiş kaçıklığı arasındaki ilişki
 c) St52 ile X70 malzemelerin kaynak mukayesesi (Şirin, 1997)

İşlerlik miktarının artması bir anlamda dış kaynak için uygulanan ısı girdisinin de artırılmasını zorunlu kılar. Bu ise, iç kaynakta dış kaynak sonrası ısıdan etkilenen bölgenin daha da büyümesine neden olur (Şekil 3.30-a). Bu nedenle, işlerlik miktarı bu bölgenin kaynak tokluğunda problem yaratmayacak düzeyde olacağı kadar yüksek olmalıdır. Öte yandan, işlerliğin belirli bir oranda aksel dikiş kaçıklığını tolere edebilecek düzeyde olması gerekir (Şekil 3.30-b). İşlerlik miktarı yeterinden az olursa, az bir orandaki dikiş kaçıklığı bile nüfuziyet problemlerine yol açabilir. (Şekil 3.30-c). Bersch ve Koch tarafından spiral dikişli boru üretiminde St52 ile X70 kalite malzemelerin mekanik performanslarının mukayesesi amacı ile yapılan bir çalışmada nüfuziyet derinliğinin malzeme kalınlığının % 60'ı kadar olmasının yeterli olacağı ifade edilmiştir. Her bir dikişin nüfuziyet derinliği işlerlik problemi yaratmayacak düzeyde olmalıdır.

Kaynak kepi ergiyen telin dikişte oluşturduğu çıkıntı kısmıdır. API 5L standardında, izin verilebilir kaynak kep yüksekliğini, 12,7 mm'den daha ince malzemelerde maksimum 3,17 mm ve 12,7 mm'den kalın malzemelerde ise maksimum 4,76 mm olarak verilmiştir. Ancak, şapka açısının da göz önüne alınması durumunda,

kep yüksekliğinin maksimum 2 mm ile sınırlandırılmasında yarar vardır. Şapka açısı da 30 ile 50° arasında olmalıdır (Ada, 2006).

Tozaltı kaynak yöntemi, kaynak banyosunun göreceli olarak yavaş soğuması ile karakterize edilebilir. Ancak, bazı durumlarda segregasyon, iri taneli yapı ve sıcak çatlak oluşumlarına rastlanabilmektedir. Bu durum, kaynak dikiş geometrisindeki uyumsuzluklardan kaynaklanan soğuma düzensizlikleri ile açıklanabilir. Söz konusu bu uygunsuzlukların başında ise kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı gelmektedir. Dikiş genişliği, gerek kaynak ağzı açılmış kısmı tam olarak kapatarak yanma oluşuna neden olmayacak, gerekse gazların kaynak banyosundan dışarıya rahatça çıkmasına olanak sağlayacak genişlikte olmalıdır. Derinlik ise, yeterli oranda işlerliğin sağlanabilmesi için malzeme kalınlığının en az % 60'ı kadar olmalıdır.

The Welding Institute, genişlik/derinlik oranının 1,8'den küçük olması halinde çatlak oluşum tehlikesinin artacağını belirtmektedir. Buna karşın, Lincoln Electric, söz konusu bu oranın 0,5'den küçük olması halinde ise çatlak tehlikesinin çok yüksek olacağını, 1,3'den büyük olması halinde ise çatlak tehlikesinin azalacağını bildirmektedir. Diğer bir yazar ise, iç dikiş için genişlik/derinlik oranının 0,5 ile 10 arasında, dış dikiş için ise bu oranının 1 ile 8 arasında değişebileceğini belirtmektedir (Şirin, 1997).

3.6. Boruların Test ve Muayene Yöntemleri

Dikişli borular, endüstrinin pek çok dalında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kullanım yerlerine göre belirli fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olmaları gerekir. Bu nedenle, gerek üretim sırasında makine ayarlarına yönelik gerekse üretim sonrasında nihai boru kalitesinin belirlenmesine yönelik bir takım test ve muayeneler yapılır.

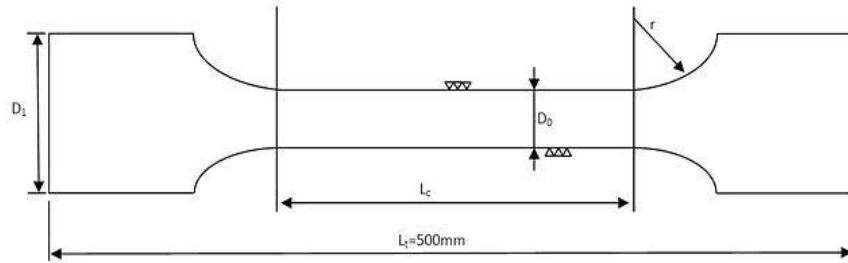
Test ve muayeneler tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Mekanik ve teknolojik testler tahribatlı grup içerisinde olup bu kapsamda yapılan sertlik ölçme testi, çekme testi ve çentik darbe deneyi ile malzemenin sertliği, akma sınırı, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve tokluk gibi mekaniksel özellikleri saptanır. Genişletme, yassılma, eğme gibi teknolojik testler sonucunda ise; boru ve profilin şekil

alabilirliği, işlenebilirliği ve kaynak dikişi hakkında bilgiler elde edilir. Bu testler için üründen uygun boyutta numune alınır. Tahribatsız muayeneler ise; ultrasonik, radyografik ve hidrostatik muayeneler olup kaynak dikişi ve malzemedeki hataları (atlak, boşluk, süreksizlik) saptamak için yapılırlar. Bu muayeneler için üründen numune alma söz konusu değildir. Bunların dışında, kimyasal analiz ve metalografik muayene boru üretiminde oldukça sık ve kolaylıkla yapılan testlerdir.

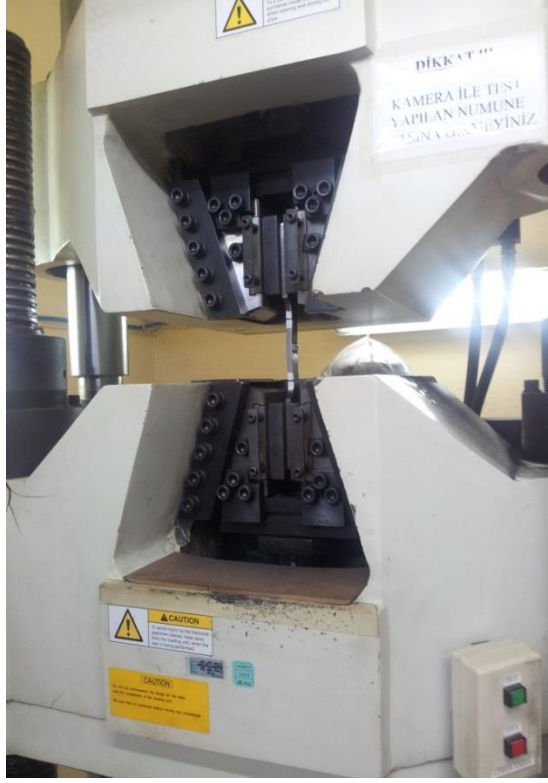
3.6.1. Tahribatlı Test ve Muayeneler

3.6.1.1. Çekme Testi

Çekme testi borunun hem kaynaklı hem de kaynaklız kısmından kesit alınması ve işlenmesini içerir. Standarda uygun hazırlanmış deney numunesi çekme test makinasına yerleştirilir (şekil 3.31), makine (şekil 3.32.) numuneye çekme gerilmesi uygular ve kopuncaya (şekil 3.33) kadar çekmeye devam eder.



şekil 3.31. Çekme testi numunesi



Şekil 3.32. Çekme testi uygulaması

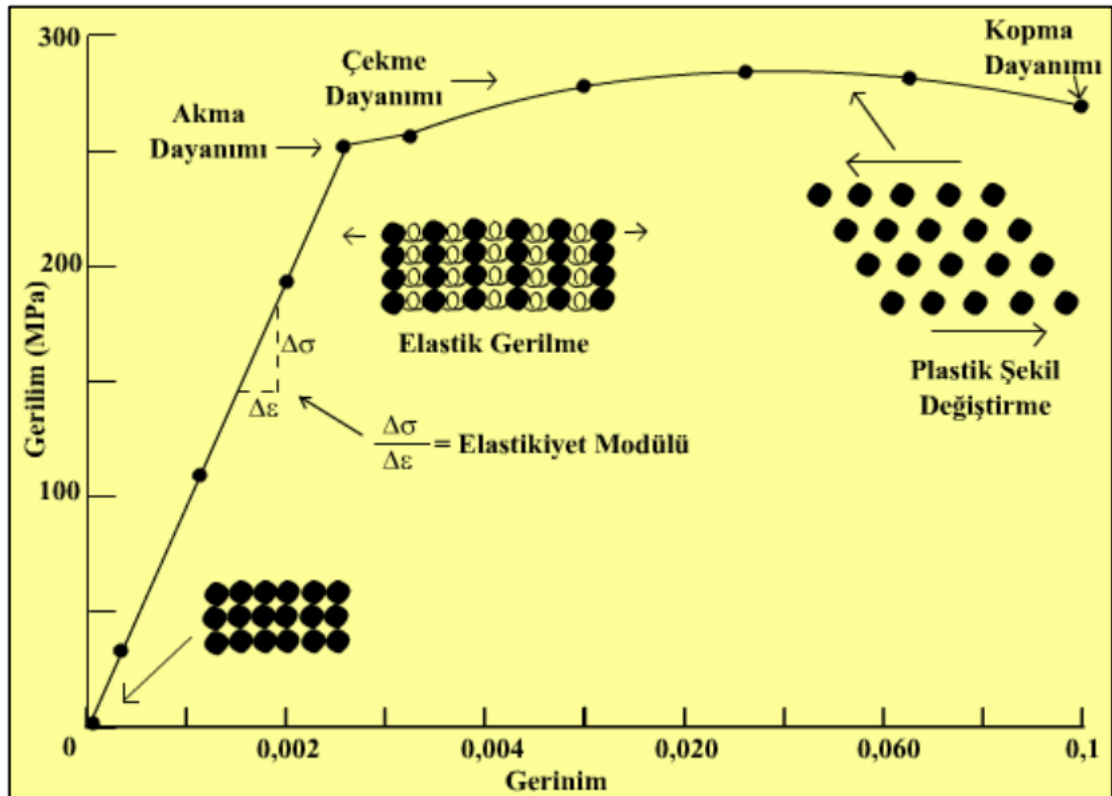


Şekil 3.33. Test sonrası

Bu deney sonucunda, kuvvet (F)-uzama (Δl) eğrisi elde edilir. Ancak bu eğri ile birlikte kullanılan numunenin boyutlarını da vermek gerekir. Bu nedenle, bu eğri yerine

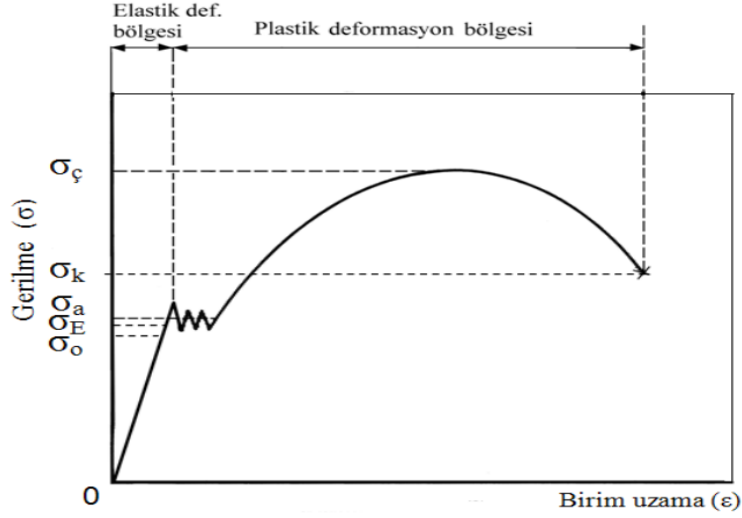
daha evrensel olan gerilme-şekil değiştirme (birim uzama) eğrisi kullanılır. Gerilme-birim uzama eğrisine çekme diyagramı adı verilir. Şekil 3.32.'de normalize edilmiş durumdaki az (düşük) karbonlu bir çeliğin gerilme-birim uzama eğrisi verilmiştir (σ - ϵ eğrisi)

Çekme deneyinde numuneye yük uygulanmaya başlandığında numunede uzama ikiye ayrılır; Elastik uzama: numuneye yük uygulandığında akma sınırına gelene kadar bir miktar uzama görülür. Yük kaldırıldığında bu uzaman kaybolur ve numune eski haline döner. Plastik uzama: yük akma sınırından sonra uygulanmaya devam edildiğinde numunede kalıcı şekil değişimi meydana gelir. Yani yük kaldırıldığında numune eski haline dönemez. 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 3.34. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri (Asarkaya, 2006)

Deney numuneleri kaynaklı ve kaynaklız olarak iki şekilde hazırlanır. Sadece dikişsiz borularda kaynaklız numuneler üzerinde testler yapılmaktadır.



Şekil 3.35. Çekme diyagramı

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 3.32’de E değerinin tespiti gösterilmiştir.

Elastiklik sınırı (σ_e), malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında plastik uzamanın görülmediği veya yalnız elastik değiştirmenin 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 düzgünlük gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir. Belirgin akma göstermeyen numunelerin akma sınırı % 0,2’lik plastik uzamaya denk gelir. Şekil 3.34.’de akma noktalarının tespiti görülmektedir.

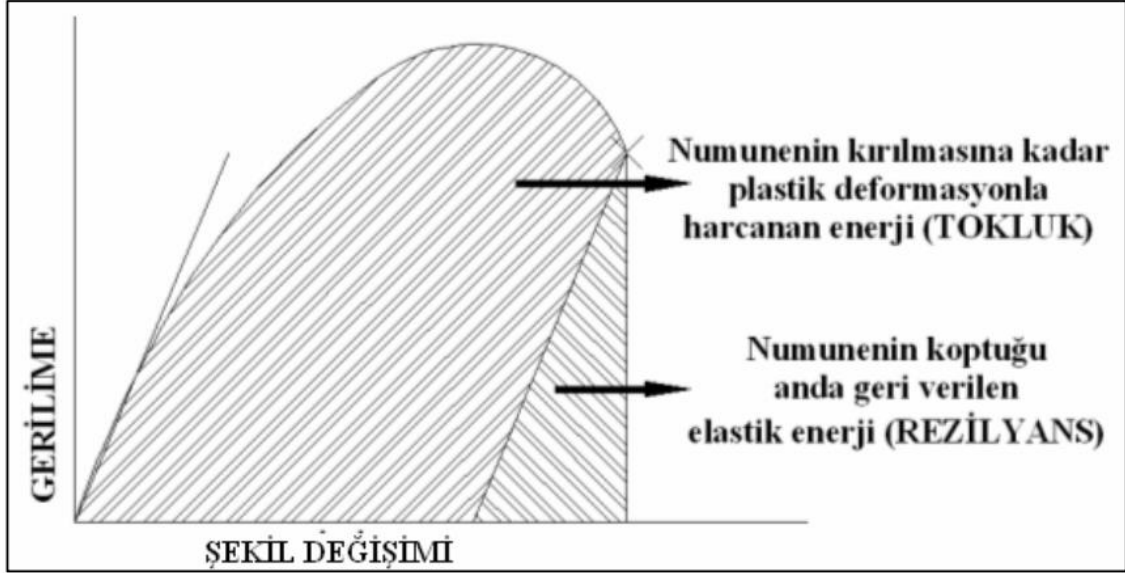
Çekme dayanımı (σ_c), bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilme değeri olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme

diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup, $\sigma_c = \frac{F_{maks}}{A_0}$ formülü ile bulunur. Burada F_{maks} malzemeye uygulanan en yüksek kuvveti, A_0 ise malzemenin ilk kesit alanını gösterir.

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.

Tokluk, numunenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjiye denir. Genellikle gerilme-birim uzama eğrisinin altında kalan alanın hesaplanır. Şekil 3.36.'de çekme deneyinde rezilyans ve tokluğun beraberce tespiti görülmektedir.

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.



Şekil 3.36. Gerilme-birim uzama eğrisi yardımıyla şekil değiştirme enerjilerinin (rezilyans ve tokluk) belirlenmesi

3.6.1.2. Eğme Testi

Eğme testi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Bu testle iki mesnet üzerine yerleştirilmiş test parçasının kaynak dikişine dik olarak öngörülen çapta bir mandrel yardımıyla kuvvet uygulayarak eğmesi suretiyle kaynak bağlantısının şekil değiştirme kabiliyeti bulunur.

Deney numunesine bir kuvvet etkilediğinde, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Çeşitli eğme deneyi yöntemleri vardır. Bunların içinde en çok uygulananı Şekil 3.38.'de gösterilen silindirik mesnetler üzerinde numuneyi (Şekil 3.37.) bir mandrel yardımıyla eğme yöntemidir. Bu yöntemlerde ana gaye, malzemeyi çatlatıncaya kadar tek yönde eğmektir Şekil 3.39. Kalitatif eğme deneylerinde (katlama deneyi), sünekliği iyi olan malzemeler 180° katlanmalarına rağmen çatlama göstermezler. Böyle malzemelerin deney sonucunda 180° katlamaya rağmen çatlamanın görülmediği belirtilir.

Eğme testleri kaynaklı ve kaynaklız olmak üzere iki şekilde hazırlanır. Sadece dikişsiz borularda kaynaklız numune üzerinde eğme testleri gerçekleştirilir.



Şekil 3.37. Eğme testi numunesi



Şekil 3.38. Eğme testi uygulaması



Şekil 3.39. Bükülmüş numuneler

3.6.1.3. Çentik Darbe Testi

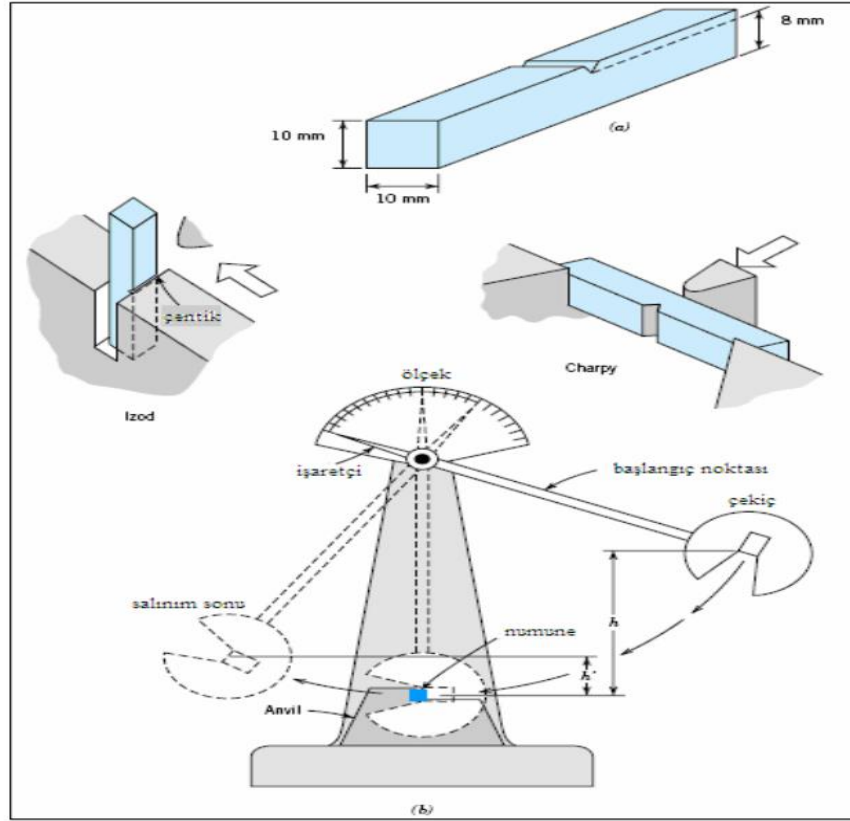
Çentik darbe testi gevrek kırılmaya neden olabilecek şartlar altında çalışan malzemelerin mekanik özelliklerinin saptanmasında kullanılır. Darbe deneyinin genel olarak amacı, metalik malzemelerin dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarını ve sünek-gevrek geçiş sıcaklığını tespit etmektir. Genelde malzemelerin mekanik özellikleri hakkında fikir edinebilmek için çekme deneyi sonuçları kullanılır. Çekme testinde uzama miktarı yüksek olan malzemelerin sünek davranacağı düşünülür. Bu kabul her zaman doğru sonuç vermez. Çekme deneyinde sünek davranış gösteren malzeme darbe deneyinde gevrek davranış gösterebilir. Özellikle oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bu olaya daha çok rastlanır. Darbe deneyinden elde edilen sonuçlar, çekme deneyi sonuçları gibi mühendislik hesaplarında kullanılmazlar.

API 5L Standardına göre üretilen boruların -20 °C'de ve 0°C'de çentik darbe testine tabi tutulması gerekmektedir. Darbe testine tabi tutulmadan önce numunelerde V şeklinde çentik açılmaktadır.

Deneyde numunenin dinamik zorlama altında kırılması için gereken enerji belirlenir. Bulunan değer malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır.

Darbe deneyi iki türde yapılır.

- Charpy darbe deneyi
- İzod darbe deneyi



Şekil 3.40. Çentik darbe testinin şematik gösterimi (Süzen, 2009)

Deney cihazı Şekil 3.40,41.'deki gibidir. G ağırlığına sahip sarkaç h yüksekliğine çıkarılır bu konumda $G.h$ enerjisine sahiptir. Serbest bırakılan sarkaç numuneye çarparak kırar ve h_1 yüksekliğine çıkar. Bu konumda enerjisi $G.h_1$ haline gelir. Başlangıçtaki ve sondaki iki potansiyel enerji değeri arasındaki fark numunenin kırılması için gerekli olan enerjidir. Darbe direnci olarak da adlandırılan bu değer şöyle hesaplanır:

$$E = G(h - h_1) = G.L(\cos\beta - \cos\alpha) \quad 3.18$$

Burada;

G : Sarkacın ağırlığı (kg)

L : Sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m)

h : Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m)

h_1 : Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m)

α : Düşme açısı (derece)

β : Yükseliş açısı (derece) Darbe direnci genellikle Joule (J) olarak verilir.

Ancak, bazı durumlarda J/m^2 , Nm yada Nm/m^2 cinsinden de verilebilir. Kırılma enerjileri yüksek olan malzemelerin kırılma toklukları da yüksek olur.

Darbe direnci genellikle Joule (J) olarak verilir. Ancak, bazı durumlarda J/m^2 , Nm yada Nm/m^2 cinsinden de verilebilir. Kırılma enerjileri yüksek olan malzemelerin kırılma toklukları da yüksek olur.

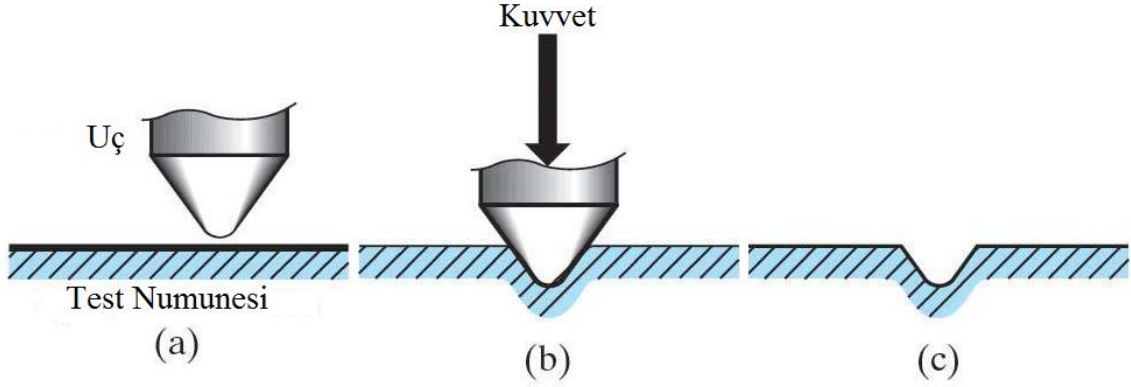


Şekil 3.41. Çentik darbe test numunesi ve cihazı

3.6.1.4. Sertlik Testi

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirençtir. Bilimsel olarak ise malzemenin dislokasyon hareketine veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç sertlik olarak ifade edilir. Sertlik değerleri direkt olarak malzemelerin dayanımları ile alakalı olduğu için büyük önem taşır. Bütün metallerde ve özellikle çelikte sertlik soğuk sertleştirme ve ısıl işlem sonucu geniş sınırlar içerisinde değişir. Ölçülen sertlik değerlerinden yararlanarak malzemenin iç yapısı hakkında bilgiler elde edilir. Sertlik muayeneleri bu sebeple çok uygulanır.

Sertlik deneyinde, bir malzemenin yüzeyine batırılan bir uca veya kesici takıma karşı gösterilen direnç ölçülür. Şekil 3.42.



Şekil 3.42. Sertlik Testi Şematik Gösterimi

Sertlik ölçme yöntemleri: Batıcı ucun geometrisine ve uygulanan kuvvet büyüklüğüne göre:

- Brinell sertlik ölçme metodu
- Vickers sertlik ölçme metodu
- Rockwell sertlik ölçme metodu olmak üzere üçe ayrılır.

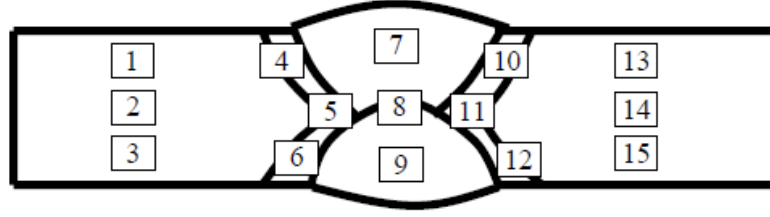
Çelik boruların sertlik testleri, Vickers ve Rockwell sertlik ölçme metotları kullanılarak yapılmaktadır. Vickers sertlik ölçme metodunda ISO 6507-1 veya ASTM E 92 standardı, Rockwell sertlik ölçme metodunda ise ISO 6508 veya ASTM E 18 standardı kullanılmaktadır.

Vickers sertlik ölçme metodunda; Batıcı uç tepe açısı 136° olan elmas pramit kullanılmaktadır. Sertlik değerinin tespitinde izin köşegen uzunluklarının ortalaması (d_{ort}) ile uygulanan kuvvet (F); Denklem 3.21’de yerine konulduğunda VSD(Vickers Sertlik Değeri) tespit edilebilmektedir. Rockwell sertlik ölçme metodunda ise; Batıcı ucun yüzeyden içeri doğru battığı derinlik dikkate alınır.

$$VSD = \frac{1,72.F}{d_{ort}^2}$$

3.19

Sertlik testi numunelerinde 6 adet HAZ bölgesinde, 3 adet kaynak bölgesinde ve 6 adet ana metalde olmak üzere toplam 15 adet ölçme bölgesi belirlenir. Şekil 3.43. Bu bölgeler içerisinde en sertlik sıralaması HAZ bölgesi>Kaynak Bölgesi>Ana metal olarak sıralanabilir. Dikişsiz borularda sertlik testi sadece ana metalde yapılmaktadır.



Şekil 3.43. Sertlik testi numunelerinde belirlenen sertlik ölçme bölgeleri

3.6.2. Tahribatsız Test ve Muayeneler

Tahribatsız muayene, bir malzeme ya da sistemin bütünlüğüne zarar vermeden malzemenin kullanılabilirliğini etkileyen herhangi bir süreksizliğin olup olmadığını tespit etmek ya da diğer malzeme özelliklerini değerlendirmek için inceleme yapan tüm test yöntemlerini kapsamaktadır.

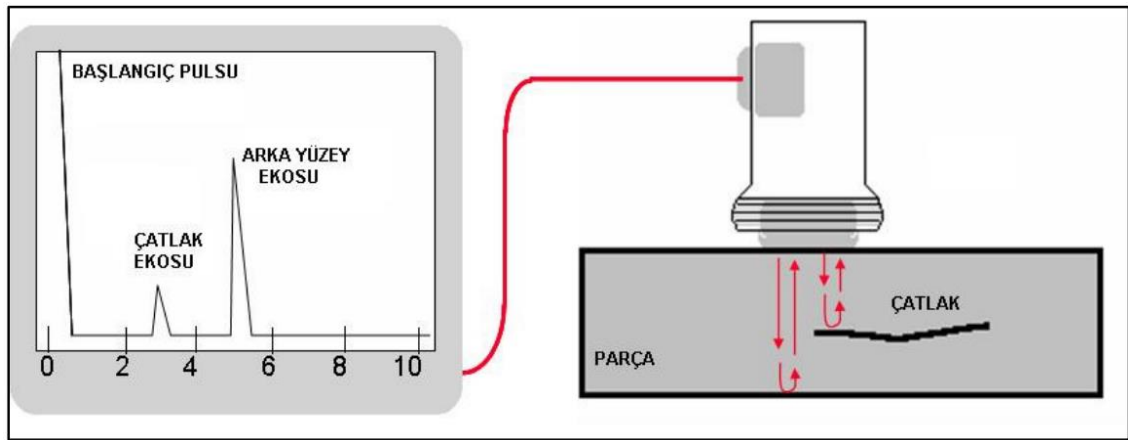
Kaynak işlemi sırasında, kaynak dikişinde ve ısıdan etkilenen bölgede hataların oluşmaması veya kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması istenmektedir. Aksi takdirde, malzemenin servis koşullarında dayanımı olumsuz olarak etkilenecek ve beklenmeyen hasarlara neden olabilecektir. Kaynaklı birleştirmelerde oluşan hataları tespit edebilmek için, istenilen kaynak kalitesine, malzemeye, kaynak dikişinin kalınlığına, kaynak yöntemine, kullanım yerine ve beklenen hatanın tipi ve konumuna bağlı olarak en uygun tahribatsız muayene yöntemi seçilmelidir.

3.6.2.1. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik dalgaların malzeme içi hataların deteksiyonunda kullanılması ilk defa 1931 yılında bir Alman patenti ile başlar. İlk ticari cihazlar 1940 senelerinde endüstriye yayılmaya başlamıştır. Elektroniğin gelişimi bu tekniğin pratik bir muayene metodu

olarak gelişmesine büyük katkısı olmuştur. Şimdi tahribatsız muayenenin temel metotlarından biri hâline gelmiştir. Hacimsel yöntemlerden biri olan ultrasonik kontrolünün test prensibi, prob tarafından üretilen yüksek frekanstaki ses dalgalarının test malzemesi ortamında yayılması ve bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansması esasına dayanır.

Ultrasonik dalgalar ($f = 0,14-10$ MHz) probta kısa darbeler şeklinde ters piezoelektrik etki ile üretilir ve malzemeye girişi sağlanır. Ses dalgaları malzemede bir arka duvar ile karşılaşınca yansır. Yankı o anda pasif durumdaki proba ulaştığında tekrar elektrik sinyaline dönüşür ve ultrasonik muayene cihazına iletilir (Şekil 3.44). Sinyalin şiddetine göre uçuş zamanı ekseninde bir belirti oluşturur. Aşağıdaki resimde arka duvar yankısı ekranın sağında görülmektedir. Bu yankının başlangıç darbesine ekranda ki sol sinyal mesafe et kalınlığına karşılık gelmektedir. Ekranda arka duvardan beklenen yankı konumundan önce, yani bu yankının solunda kalan bir yankı görülmesi durumunda malzeme içinde bir süreksizlik olduğu anlaşılır.

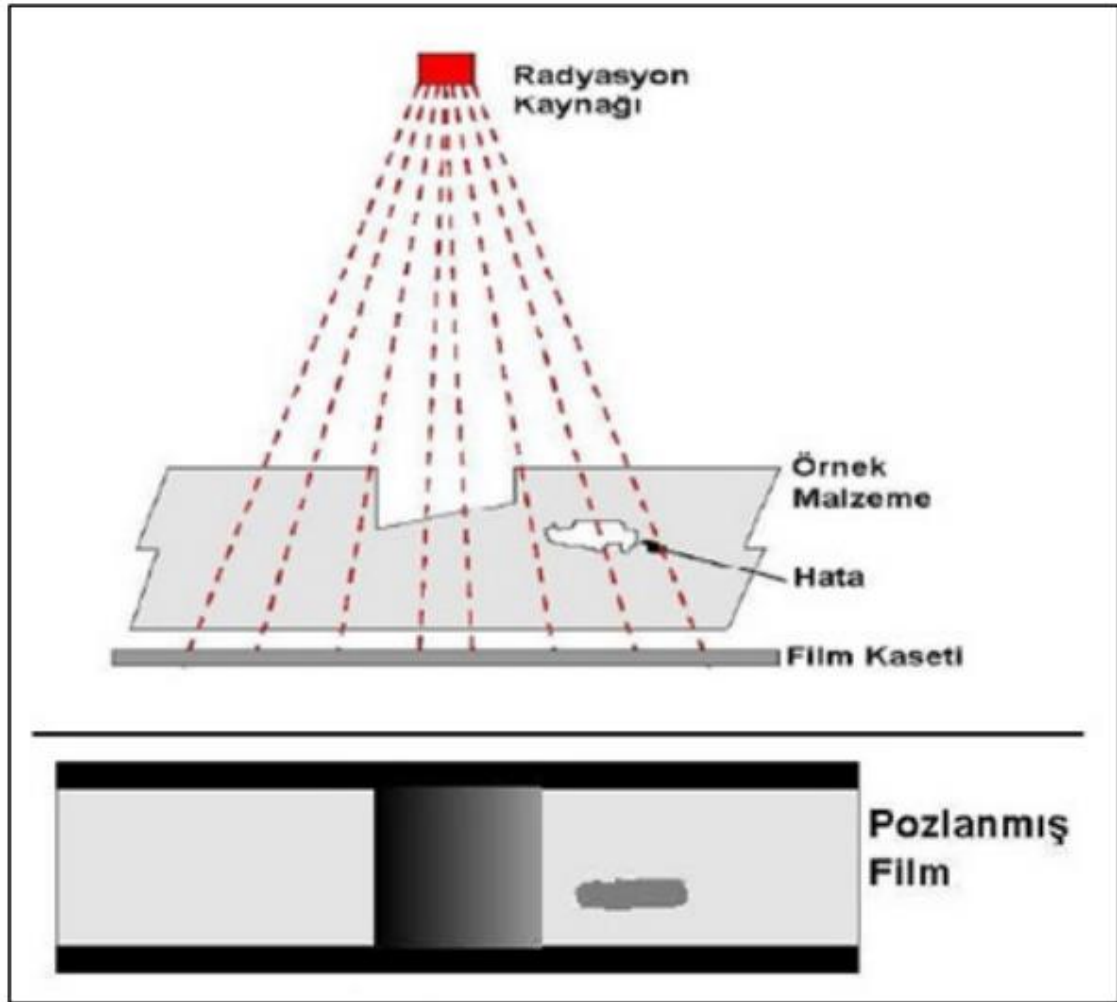


Şekil 3.44. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi (Seçim, 2011)

3.6.2.2. Radyografik Muayene

Radyografik muayene, X veya Gama ışınlarının kullanılarak incelenecek malzeme parçalarının görüntüsünün elde edilmesidir. X ve gama ışınları yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Bu dalgaların doğrusal ilerleme, zayıflama, iyonlaştırma ve nüfuz edebilme özelliklerinden yararlanılarak radyografik muayenelerde kullanılması sağlanmaktadır.

Bu yöntemde kullanılan X ışınları, elektronik bir cihaz tarafından; Gama ışınları ise, radyoaktif bir element tarafından üretilir. Bu ışınlar, malzemenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı olarak bir kısmı absorbe edilir. Malzeme tarafından absorbe edilmeyen enerji, film üzerine etkir, film üzerinde görülen koyu renkler o bölgeye çok fazla enerjinin gittiğini gösterir. Malzeme içinde gözenek, çatlak, boşluk gibi süreksizlikler o noktada malzeme kalınlığının azalmasına neden olduklarından film üzerinde koyu şekiller halinde görülür. Buna karşın malzeme içinde tungsten gibi ağır metal kalıntısının bulunması ise film üzerinde beyaz olarak görülür. Şekil 3.45.

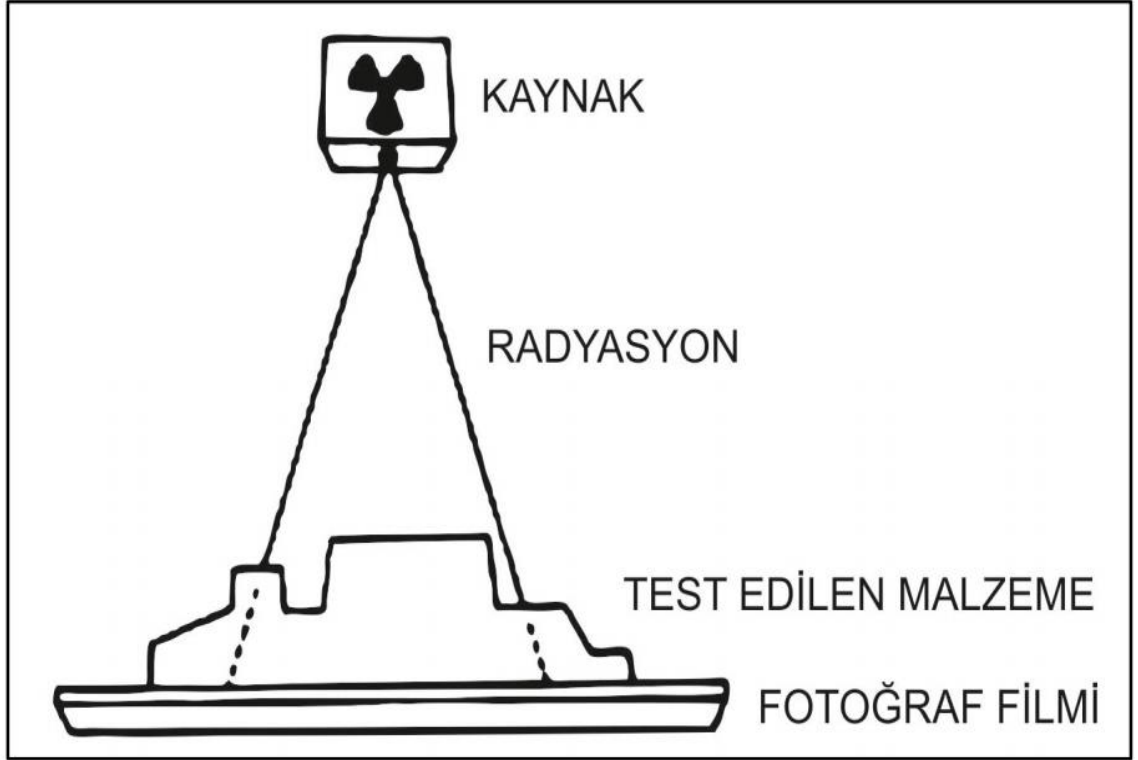


Şekil 3.45. X ışını ile radyografik muayene (Kaba, 2009)

X Işınları: X ışınlarının üretimi doğanın genel bir yasasına dayanır ve X ışını tüpleriyle elde edilir. Hareket eden elektrik yüklü parçacıklar, örneğin elektronlar,

yollarında bulunan bir engele çarptıklarında kinetik enerjilerini yitirirler ve bu enerjinin küçük bir kısmı X ışınlarına dönüşür ve oluşum alanından ışınarak uzaklaşır. Elektronların çarpma anında ivme kaybetmeleriyle, kinetik enerjinin diğer kısmı ısı enerjisine dönüşür. X ışınlarının üreteçlerinin verimi çok düşüktür; öyle ki toplam enerjilerinin % 1'ini X ışınına, % 99'u ise ısı enerjisine dönüşür.

Gama Işınları: Gama ışınımı yayınımları "radyoaktivite kavramı" ile açıklanabilir. Radyoaktif bir maddede, atomik kararsızlığa neden olan fazla enerjinin ışınım enerjisi olarak açığa çıktığı süre giden bir bozunma olayı meydana gelir. Bozunum türüne göre, Alfa (α), Beta (β) ya da Gama (γ) ışınları veya bunların karışımları gözlenir. Radyografik muayene için genellikle gama ışınları kullanılır. Alfa ya da beta parçacıkları ile görüntüleme ve nötron radyografisi ise endüstriyel radyografi açısından çok önemlidir. Gama ışınımı doğal olarak izotop halinde bulunan maddelerden de yayınır. Nötronlarla bombardıman edilen atom çekirdeğinde yapay olarak oluşturulmuş aşırı enerji, doğal haliyle ışınım yaymayan bir maddeyi ışınım yayarı hale getirebilir. Bu işlem, bir nükleer reaktörde (nötron aktivasyonu) olduğu gibi, kararlı haldeki bir atom çekirdeğinin nötron (elektriksel olarak nötr parçacıklar) bombardımanına tutularak kararsız (dengesiz) hale getirilmesiyle yapılabilir. Bu işlem sonunda atomun çekirdeğindeki nötron ve protonların toplamı olan Atom Kütle Numarası değişir. Bu tip aşırı yüklü ve kararsız çekirdek radyoizotop olarak adlandırılır. Ir 192, Co 60, Tm-170, Yb-169 ve Se-75 piyasada en çok kullanılan radyoizotoplardır. Şekil 3.46.'de Gama ışını ile radyografi çalışmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.46. Gama ışını ile radyografi çalışmasının şematik gösterimi (Kaba, 2009)

3.6.2.3. Sıvı Penetrant Testi

Sıvı penetrantla muayene yöntemi, malzemenin cinsine bağlı olmaksızın, yüzeyde veya yüzeye açık olan çatlak gözenek vb. malzeme süreksizliklerinin tespit edilmesi için kullanılmaktadır. Muayene bölgesi, mekanik ve/veya kimyasal olarak temizlendikten sonra kurutulur ve penetrant (kırmızı renkli veya florışıl) yüzeye uygulanır. Penetrantın yüzeye açık olan süreksizliklere nüfuz edebilmesi için belirli bir süre beklenir. Yüzeydeki penetrant, uygun bir sıvı ile temizlenerek kurutulur ve süreksizlikler içindeki penetrantı emerek yüzeye yayar ve beyaz rengi sayesinde kontrast sağlayarak hatayı gözle veya büyüteçle görülebilir hale getirir.

İşlem prosedürleri kullanılacak olan penetrant tipini ve penetrant bekleme zamanını belirler. Bu süre penetrantın olası süreksizliklere girmesi için gereken süredir. Bu sürenin ardından yüzeyde kalan penetrant temizlenir. Bu işlemde dikkat edilmesi gereken süreksizliğin içindeki penetrantın dışarı çıkarılmamasıdır. Bu ikinci temizlemenin ardından “developer” olarak bilinen kimyasal madde yüzeye uygulanır. Developer şayet süreksizlik varsa içine girmiş olan penetrantı çekerek görülebilir hale

gelmesini sağlar. Bu sayede süreksizlik renk kontrastından ötürü kolaylıkla tespit edilebilir. Bu işlemler neticesinde gerekli yorumlar yapılır. Kontrolün neticesi kayıt altına alındıktan sonra developer ve kalan penetrant temizlenerek işlem sonlandırılır. Şekil 3.47.



Şekil 3.47. Flüoresan penetrant (girici) sıvıyla ultraviyole ışınları altında yapılan test resimleri

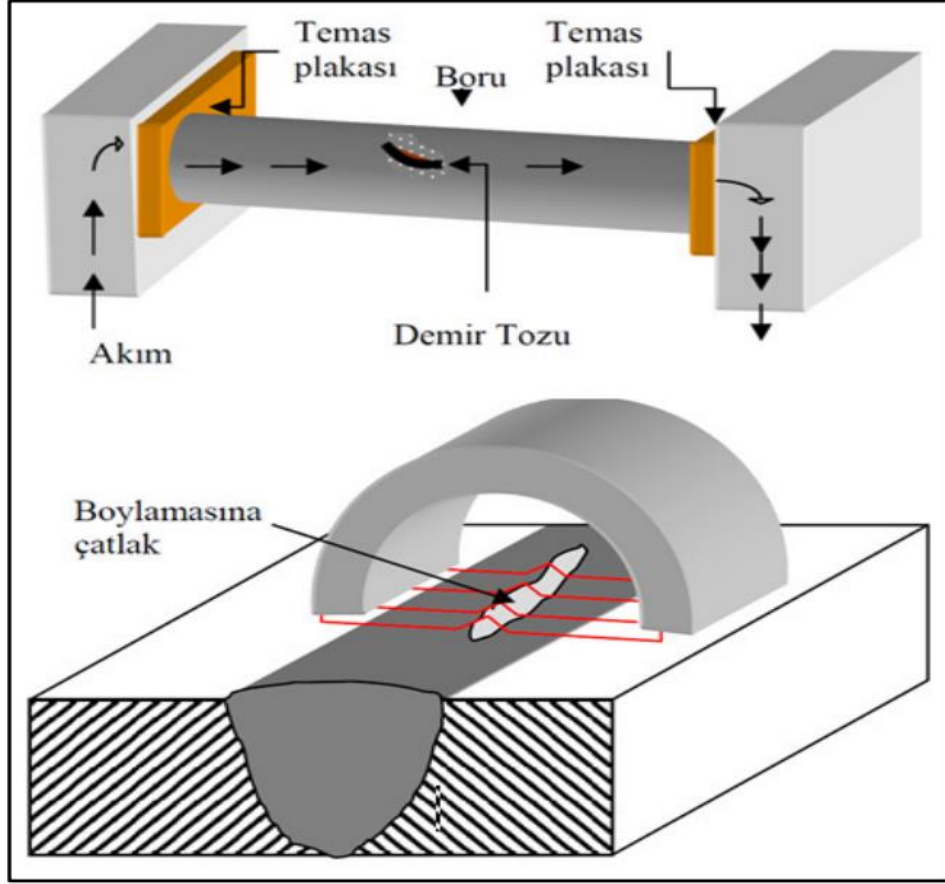
3.6.2.4. Manyetik Parçacık Testi

Bu yöntem ferromanyetik malzemeler (demir, nikel, kobalt gibi manyetikliği yüksek olan malzemeler) manyetize edildiğinde manyetik akımın yüzey süreksizliklerinde değişmesi veya kesilmesi esasına dayanır.

Manyetik parçacık testi, çelik konstrüksiyon, otomotiv, petrokimya, güç santralleri, havacılık gibi çok farklı endüstriyel sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Sualtı muayenesi (off-shore yapılar ve sualtı boru hatları), manyetik parçacık testinin kullanılabileceği diğer bir alandır.

Test parçası önce bir sürekli mıknatıs (permanent magnet) veya bir elektromagnet ile hatta test parçasının içinden veya etrafından elektrik akımı geçirilerek manyetize edilir. Böylece malzemede manyetik kuvvet çizgileri oluşur. Bu çizgileri kesen herhangi bir süreksizlik olması durumunda, kuvvet çizgileri süreksizliğin üzerinden atlayarak yoluna devam eder, dolayısıyla süreksizlik üzerinde yoğun bir kaçak manyetik alan oluşur. Süreksizliğin göz ile görünür hale gelmesi için test yüzeyine ince demir tozları serpilir. Yoğun kaçak alan demir tozlarını süreksizlik üzerinde toplayarak süreksizliğin görünür hale gelmesini sağlar. Böylece, süreksizliğin

yeri, şekli ve boyutu tespit edilmiş olur. Şekil 3.48’de manyetik parçacık deneyinin uygulama biçimleri verilmiştir.

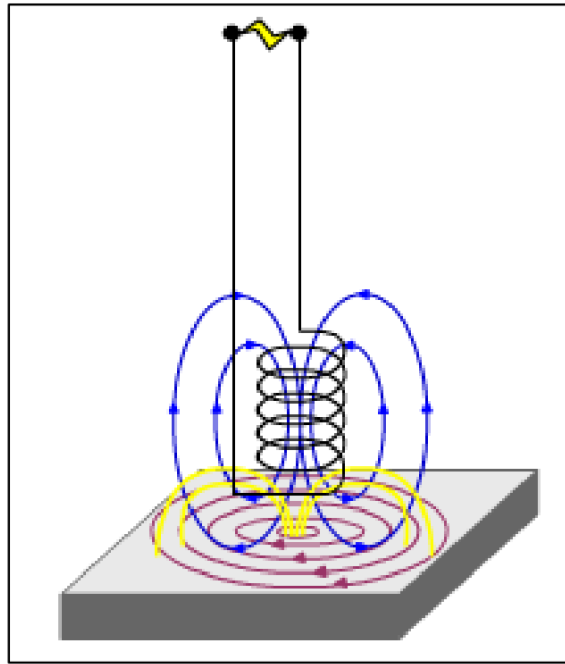


Şekil 3.48. Manyetik parçacık deneyinin uygulama biçimleri

3.6.2.5. Girdap Akımı Testi

Girdap akımı testi, küçük elektrik dalgalarının bir malzemeye indüklenmesi ve malzeme homojensizliğinin bu akımların akışında herhangi bir değişikliğin üzerindeki bir probun içindeki bobin (coil) tarafından cihazdaki elektronik işlem ve prezentasyonla tespit edildiği elektromanyetik bir tahribatsız muayene metodu olarak tanımlanabilir. Bu yöntemin kaynaklardaki süreksizliklerin yüzey ve bazı durumlarda yüzeye yakın iç bünyesindeki muayenesi birçok uygulamadan sadece birisidir. Girdap akımları teknikleri ayrıca malzemenin iletkenliği, tane boyutu, sertliği, kalınlığı ve farklı bileşimdeki malzemelerin mikro yapıları, manyetik geçirgenliği, ısıl işlem ve kaplamaların kalınlığını etkilemeden farklı malzemelerin muayenesinde başarılı bir

şekilde uygulanmaktadır. Kaynaktaki değişen manyetik alan malzemede elektrik alan veya “girdap akımları” oluşturur. Prob içindeki test bobini veya bazı durumlarda ayrı hızlandırıcı bir bobin elektronik şekilde alan etkileşmesi içindeki değişimleri belirlemek için kullanılır. Kaynaktaki süreksizlikler girdap akımlarının manyetik alanını ve yönünü değiştirmekte olup bu sayede test sinyali ile süreksizliğin tespiti mümkün olmaktadır. Girdap akımları testi esas olarak ince cidarlı alın kaynaklı bağlantılı borularda kullanılır. Şekil 3.49. Girdap akımları dairesel yönde ilerledikleri için, boyuna süreksizlikler girdap akımları akışındaki en belirgin değişime neden olurlar.



Şekil 3.49. Girdap akımları kontrolünde oluşan manyetik alan ve akımlar

3.6.3. Hidrostatik Basınç Testi

Basınç altında çalışan kazan, boru ve vana üretiminin yapıldığı sektörlerde tahribatsız olarak basınçla kontrol yöntemi kullanılır. Üretilen her parçaya işletme basıncının en az 1,5 katı sıvı veya gaz basıncı belirli sürede uygulanması işlemi basınçla kontrol olarak tanımlanır. Kalitelere, çaplara ve et kalınlıklarına göre borulara uygulanan hidrostatik (sıvı basıncı) test basınçları aşağıda verilen formüle göre hesaplanır.

$$P = \frac{S \cdot t \cdot 2000}{D}$$

3.20

Burada,

P :Hidrostatik test basıncı (KPa)

S :Minimum gerilme kuvveti (MPa)

t :Et kalınlığı (mm)

D :Dış çap (mm) dir.

Doğal olarak su en çok kullanılan maddedir. Hazır olarak bulunabilir ve düşük maliyete sahiptir. Nispeten çok küçük sızıntıların bulguları doldurma ve muayene öncesi suyun kabın dışını ıslatmasına bağlı olarak gözden geçirilir. Muayene ortamına küçük miktarlarda suda çözünebilir flüoresans boyaların eklenmesiyle ve ultraviyole ışıkla kabın dış yüzeylerinin muayenesi genellikle metodun hassaslığını arttırmak için kullanılır. Hava veya asal gazlar kullanıldığı zaman, sızıntılar kabarcık olarak kabın dışında sabun filmin üzerinde oluşurlar veya basınçlı kabın kaçan hava veya gazdaki kabarcıkları tespit etmek amacıyla bir sıvı havuza daldırılması sonucu bulunurlar. Bu sırada da tüm kaynak dikişleri ve bağlantı noktaları kontrol edilir. Şekil 3.50.



Şekil 3.50 Hidrostatik basınç test makinesi

3.6.4. Gözle Muayene

Bir ürünün yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesidir. Gözle muayene çok basit bir metot olarak görünse de en önemli muayene yöntemidir. Genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır. Zaten diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir. Bu yöntem, metalik veya metalik olmayan bütün malzemelere uygulanabilir. Muayene yüzeylerine ulaşabilirlik durumuna göre gerektiğinde endoskoplar gibi yardımcı gereçler de kullanılarak uygulanabilir. Çoğu durumda muayene yüzeyi hazırlığı olarak yüzey temizliği yapılması istenmez. Daha doğrusu yüzeyin, beklenen hataların en iyi görüneceği şekilde olması gerekir. Yeterli ışık şartları altında ve uygun bakma açılarında inceleme yapılmalıdır.

Gözle muayene sonucunda;

- Yanma olukları
- Uygun olmayan dikiş boyutları
- İç köse dikişlerinin asimetrliliği
- 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.

4. YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, boru hatlarında kullanılan ve farklı malzemelerden üretilen petrol ve doğalgaz borularının, mekanik performansının incelenerek mikroyapı ve mekanik özelliklerin mukayese edilmesi amaçlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda, API 5L standardına göre tozaltı kaynağı ile spiral dikişli olarak farklı ebatlarda üretilen X42, X52, X60, X65 ve X70 malzemeden yapılan borulara; kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek tane sınırları ve tanecik yapıları incelenmiştir.

Deneylerde, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılgenliğine karşı yüksek dirençli API 5L standartlarında çelikler kullanılmıştır. Bu malzemeler ülkemizdeki ve dünyadaki petrol ve doğalgaz iletim hatları için dünyanın önde gelen çelik üreticileri tarafından üretilmiştir. Ele alınan X42, X52, X60, X65 ve X70 malzemeden yapılan boruların imalatında boru çapı, kaynak tel çapı, kaynak hızı, akım tipi, uygulanacak amper ve volt değerleri oldukça önemlidir. Çalışmada kullanılan bu parametreler Çizelge 4.1 de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Deney Parametreleri

<i>Malzeme</i>	<i>Kaynak Bölgesi</i>	<i>Tel çapı (mm)</i>	<i>Hız (cm/dk)</i>	<i>Akım tipi</i>	<i>Amper (A)</i>	<i>Ark Gerilimi (V)</i>
<i>API 5L X 42 kalite (20") 508x4,76 mm ebatlı hat borusu</i>	İç kaynak	3,2	170	DC +	650	29
	Dış kaynak	3,2	170	DC +	675	29
<i>API 5L X 52 kalite (18") 457,2x12,34 mm ebatlı hat borusu</i>	İç kaynak	3,2	220	DC +	900	29
		3,2	220	AC 1	775	29
	Dış kaynak	3,2	220	AC 2	525	30
		3,2	220	DC +	900	29
		3,2	220	AC	750	29
		4,0	200	DC +	850	27
<i>API 5L X 60 kalite (34") 863,6x11,91 mm ebatlı hat borusu</i>	İç kaynak	3,2	200	AC 1	725	28
		3,2	200	AC 2	475	29
	Dış kaynak	3,2	200	DC +	850	27
		3,2	200	AC	525	29
<i>API 5L X 65 kalite (20") 508x11,91 mm ebatlı hat borusu</i>	İç kaynak	4,0	200	DC +	900	27
		3,2	200	AC 1	750	28
	Dış kaynak	3,2	200	AC 2	500	28
		3,2	200	DC +	800	28
<i>API 5L X 70 kalite (56") 1422,4x19,65 mm ebatlı hat borusu</i>	İç kaynak	3,2	200	AC	450	29
		4,0	280	DC +	950	26
	Dış kaynak	4,0	280	AC 1	800	27
		3,2	280	AC 2	600	28
		4,0	280	DC +	950	26
		3,2	280	AC 1	825	27
		3,2	280	AC 2	575	28

Ele alınan X42, X52, X60, X65 ve X70 malzemelerin kimyasal analizleri de yapılmış olup Çizelge 4.2 de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Deneyleerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri

<i>Malzeme</i>	<i>(20") 508x4,76 mm ebatlı hat borusu üretiminde kullanılan, API 5L X 42 malzeme</i>	<i>(18") 457,2x12,34 mm ebatlı hat borusu üretiminde kullanılan, API 5L X 52 malzeme</i>	<i>(34") 863,6x11,91 mm ebatlı hat borusu üretiminde kullanılan, API 5L X 60 malzeme</i>	<i>(20") 508x11,91 mm ebatlı hat borusu üretiminde kullanılan, API 5L X 65 malzeme</i>	<i>(56") 1422,4x19,65 mm ebatlı hat borusu üretiminde kullanılan, API 5L X 70 malzeme</i>
<i>C</i>	0,085	0,072	0,059	0,058	0,0522
<i>Si</i>	0,2025	0,2556	0,1596	0,174	0,3456
<i>Mn</i>	0,4155	1,275	1,35	1,566	1,656
<i>P</i>	0,0103	0,0095	0,017	0,032	0,0045
<i>S</i>	0,0062	0,0004	0,0019	0,025	0,0023
<i>V</i>	0,002	0,002	0,0035	0,033	0,0035
<i>Ni</i>	0,0340	0,002	0,043	0,045	0,1335
<i>Cr</i>	0,0215	0,075	0,0372	0,075	0,1886
<i>Mo</i>	0,0023	0,0002	0,006	0,012	0,2350
<i>Cu</i>	0,0374	0,032	0,0672	0,0108	0,0118
<i>N</i>	0,0072	0,0035	0,0078	0,0001	0,0051
<i>Al</i>	0,0458	0,075	0,0012	0,058	0,0689
<i>Nb</i>	0,0008	0,052	0,0566	0,065	0,0307
<i>Ti</i>	0,0017	0,0011	0,0103	0,030	0,0105
<i>B</i>	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004

Boru imalatında kullanılan toz altı kaynak yönteminde kaynak kalitesine etki eden en önemli girdilerden olan kaynak telinin kimyasal analizi de çizelge 4.3. de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Deneyleerde kullanılan S3Mo kaynak telinin kimyasal analizi

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,09	1,65	0,16	0,008	0,006	0,02
Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
0,02	0,51	0,03	0,002	0,002	0,01

4.1. Deney Sonuçları

4.1.1. API 5L X42 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları

Çizelge 4.1’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 508 mm çapında, 4,76 mm kesit kalınlığında ve X42 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen imalatın mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Borunun kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik – darbe, eğme, hidrostatik test ve gözle muayene sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 4.4’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu telinin ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 4.4. Kaynak metalinin kimyasal analizi (X42, 4.76 mm)

	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cr
Element (%)	0,1573	0,2125	0,5433	0,0086	0,0057	0,001	0,0369	0,0277
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	B	
	0,0037	0,0436	0,0086	0,0548	0,0006	0,0019	0,0003	

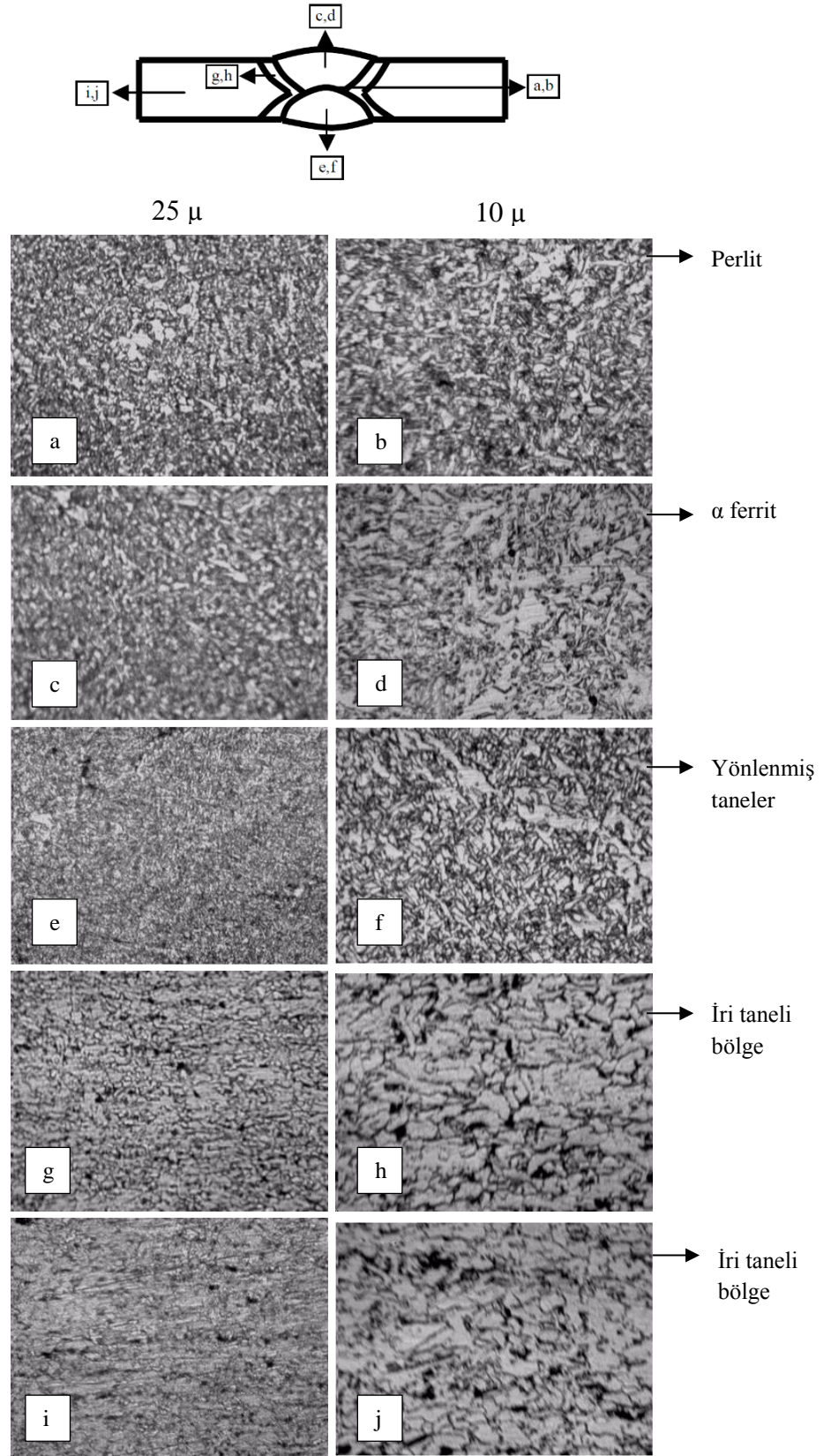
Şekil 4.1’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, vs.) olmadığı görülmektedir. Ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri belirgin bir şekilde görülmektedir. Yine

makroyapı fotoğrafından, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği, nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş bölgenin olmadığı görülmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.



Şekil 4.1. Kaynağın makro görüntüsü (X42, 4.76 mm)

Şekil 4.2’de x400 ve x1000 büyütülmüş olarak ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. ITAB’da ana malzemeye oranla daha iri tanelerin oluştuğu, kaynak metalinde ise kaynak esnasında oluşan yüksek türbülans dolaylı tanelerin diğer bölgelere oranla daha homojen ve daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, dış kaynağın iç kaynaktan daha sonra yapılması dış kaynak bölgesinin iç kaynak yapılırken ön tavlama işlemi görmesine neden olmuştur. Bu nedenle birleşme bölgelerinde kaynak metali taneleri daha iri bir şekilde oluşmuş ve ısı akış yönünün tersine yönlenmiştir.



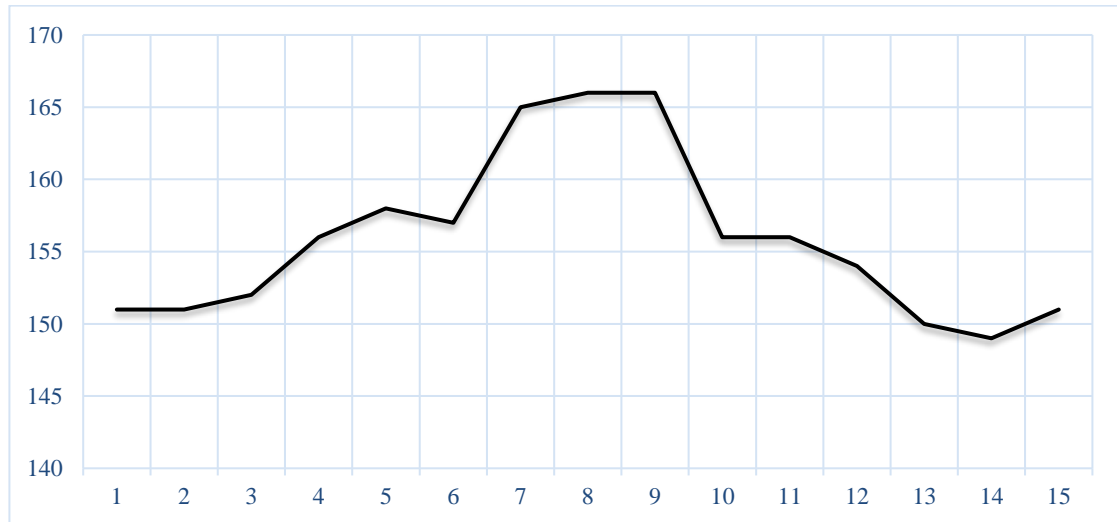
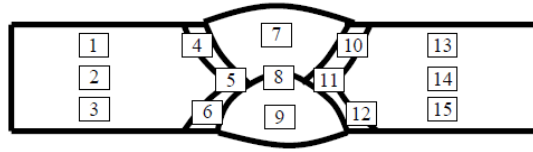
Şekil 4.2. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X42, 4.76 mm)

Çizelge 4.5 incelendiğinde ana malzemenin akma dayanımının 349 N/mm^2 , kopma dayanımının 499 N/mm^2 , % uzama değerinin ise 38.8 olduğu tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş parçanın akma dayanımının 373 N/mm^2 , kopma dayanımının 527 N/mm^2 , % uzama değerlerinin ise 20.8 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Çekme deneyi sonuçları (X42, 4.76 mm)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Kopma Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
Ana Malzeme	349	499	38,8
Kaynaklı Malzeme	373	527	20,8

Şekil 4.3'de 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek ana malzeme sertliği 152 HV, en yüksek ITAB bölgesi sertliği 158 HV, en yüksek kaynak metal sertliği ise 166 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X42, 4.76 mm)

Çizelge 4.6'da -20°C'de ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak bölgesinden alınan 3 numunede yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 142,33 Joule, ITAB bölgesinin ortalama çentik - darbe değerinin 104 Joule, kaynak metalinin ortalama çentik - darbe değerinin ise 110,33 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Çentik - darbe deney sonuçları (X42, 4.76 mm)

Malzeme	Enerji (Joule)			
	Test Sıcaklığı: -20 °C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana Malzeme	141	144	142	142,33
ITAB	106	96	110	104
Kaynak Bölgesi	112	117	102	110,33

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen deney numunelerine dış kaynak dışarda ve içerde tutularak iki ayrı deney yapılmıştır. (Çizelge 4.7) Deney sonucunda API 5L'de kabul kriteri olarak belirtilen 3.2 mm uzunluğunda veya et kalınlığının %12.5'i uzunluğunda herhangi bir çatlak veya kırılma görülmemiştir.

Çizelge 4.7. Eğme deneyi sonuçları (X42, 4.76 mm)

Mandrel Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda (yüz)		Dış kaynak içeride (kök)	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
123,5	158,5	180	Hata Yok	180	Hata Yok

Borular, API 5L'de belirtilen test basıncı hesaplama yöntemine göre belirlenen 32,7 bar test basıncına 20 sn. maruz bırakılmış ve herhangi bir basınç kaybı veya sızıntı tespit edilmemiştir.

P: Test basıncı (MPa)

S: Minimum akma dayanımı (Mpa)

t: Et kalınlığı (mm)

D: Boru dış çapı (mm)

$$P = \frac{S.t}{D} = \frac{349.4,76}{508} = 3,27 \text{ MPa} = 32,7 \text{ bar}$$

Ayrıca gözle yapılan kontrollerde; Çap, uzunluk, et kalınlığı vs. ölçümleri yapılarak, bu değerlerin API 5L’de verilen toleranslar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

4.1.2. API 5L X52 doğal gaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları

Çizelge 4.1’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 457,2 mm çapında, 12,34 mm kesit kalınlığında ve X52 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen imalatın mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Borunun kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik – darbe, eğme, hidrostatik test ve gözle muayene sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

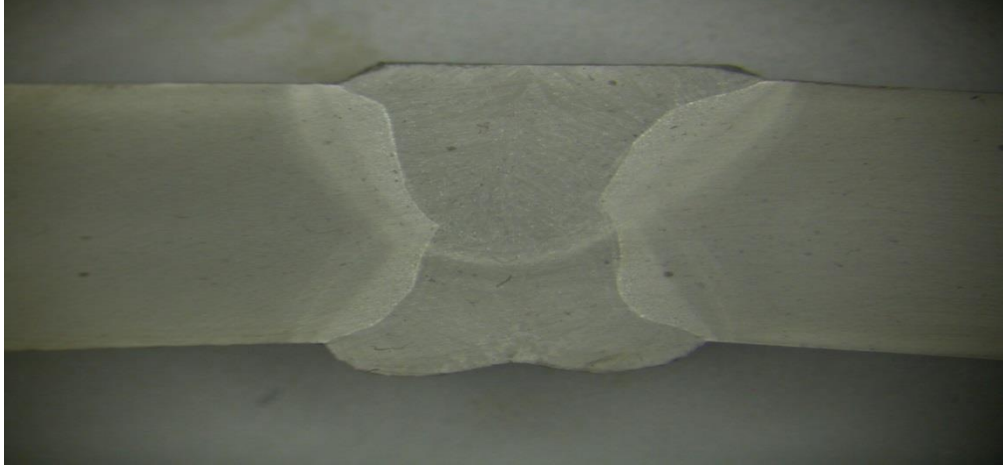
Çizelge 4.8’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu telinin ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 4.8. Kaynak metali kimyasal analizi (X52, 12.34 mm)

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cr
	0,055	0,286	1,389	0,008	0,0001	0,003	0,001	0,081
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	B	
0,0005	0,028	0,0001	0,035	0,026	0,001	0,0003		

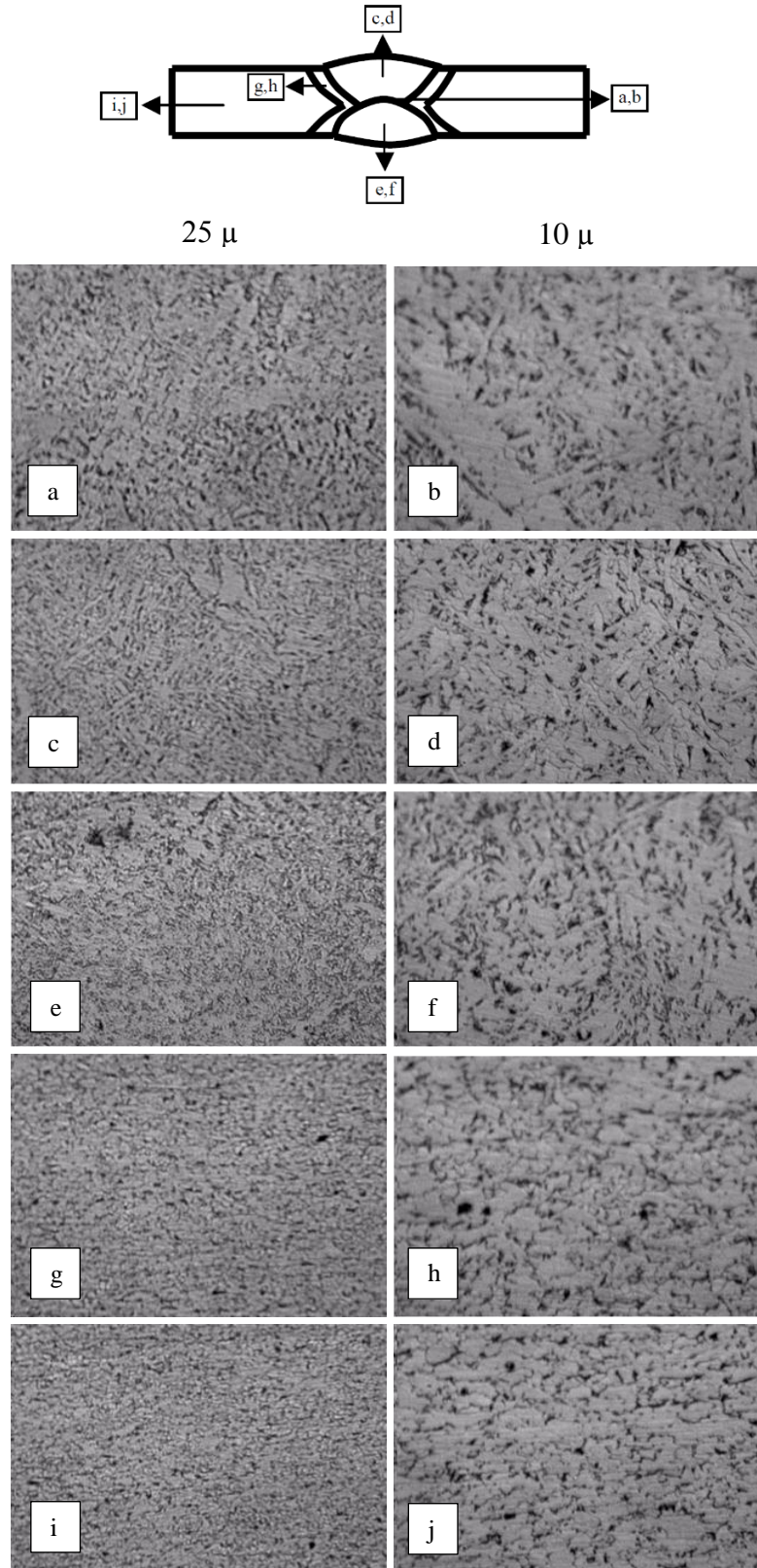
Şekil 4.4’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinin belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği, nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş bölgenin olmadığı

görülebilmektedir. Bu malzemenin birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ise ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.



Şekil 4.4. Kaynağın makro görüntüsü (X52, 12.34 mm)

Şekil 4.5’de x400 ve x1000 büyütülmüş ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında kaynak metalinde oluşan yapının çok ince tanelerden meydana geldiği ve iğnemsî bir yapının oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde oluşan taneler yine ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde yönlenmiş ve kısmen dendritik yapının oluştuğu da görülebilmektedir.



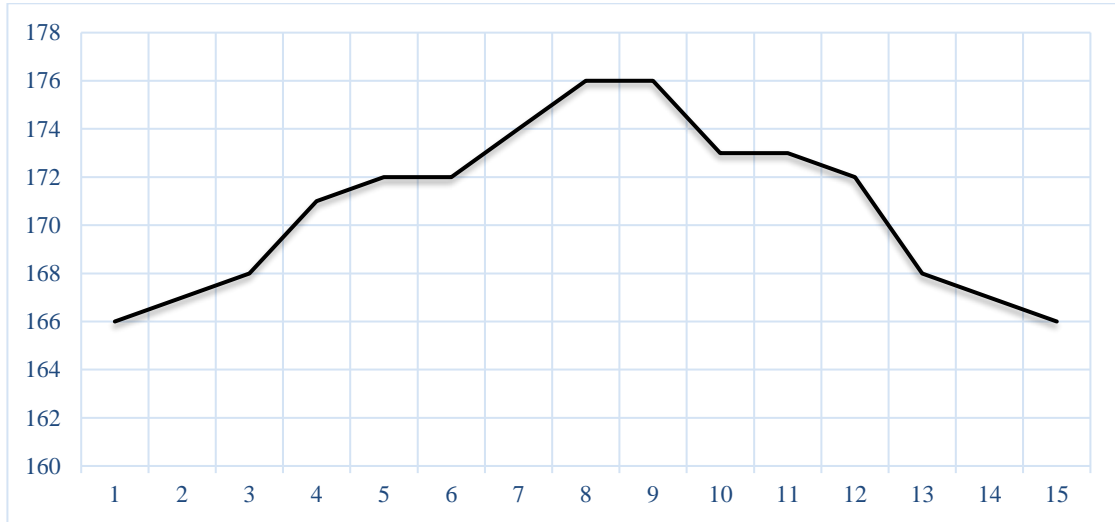
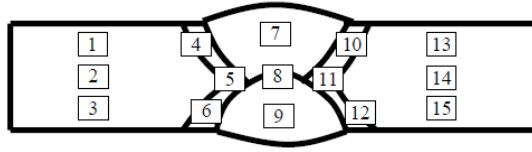
Şekil 4.5. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X52, 12.34 mm)

Çizelge 4.9 incelendiğinde ana malzemenin akma dayanımının 432 N/mm^2 , kopma dayanımının 512 N/mm^2 , % uzama değerinin ise 42 olduğu tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş parçanın akma dayanımının 460 N/mm^2 , kopma dayanımının 547 N/mm^2 , % uzama değerlerinin ise 19,1 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9. Çekme deneyi sonuçları (X52, 12.34 mm)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Kopma Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
Ana Malzeme	432	512	42
Kaynaklı Malzeme	460	547	19,1

Şekil 4.6'da 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek ana malzeme sertliği 166 HV, En yüksek ITAB bölgesi sertliği 173 HV, En yüksek kaynak metal sertliği ise 176 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X52, 12.34 mm)

Çizelge 4.10'da -20°C'de ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak bölgesinden alınan 3 numunede yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 325 Joule, ITAB bölgesinin ortalama çentik - darbe değerinin 277 Joule, kaynak metalinin ortalama çentik - darbe değerinin ise 160 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10. Çentik - darbe deney sonuçları (X52, 12.34 mm)

Malzeme	Enerji (Joule)			
	Test Sıcaklığı: -20 °C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana Malzeme	308	339	333	325
ITAB	265	195	273	277
Kaynak Bölgesi	128	163	187	160

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen deney numunelerine dış kaynak dışarda ve içerde tutularak iki ayrı deney yapılmıştır. (Çizelge 4.11) Deney sonucunda API 5L'de kabul kriteri olarak belirtilen 3.2 mm uzunluğunda veya et kalınlığının %12.5'i uzunluğunda herhangi bir çatlak veya kırılma görülmemiştir.

Çizelge 4.11. Eğme deneyi sonuçları (X52, 12.34 mm)

Mandrel Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda (yüz)		Dış kaynak içeride (kök)	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
135	163	180	Hata Yok	180	Hata Yok

Borular, API 5L'de belirtilen test basıncı hesaplama yöntemine göre belirlenen 116,7 bar test basıncına 20 sn. maruz bırakılmış ve herhangi bir basınç kaybı veya sızıntı tespit edilmemiştir.

P: Test basıncı (MPa)

S: Minimum akma dayanımı (Mpa)

t: Et kalınlığı (mm)

D: Boru dış çapı (mm)

$$P = \frac{S \cdot t}{D} = \frac{432.12,34}{457,2} = 11,67 \text{ MPa} = 116,7 \text{ bar}$$

Ayrıca gözle yapılan kontrollerde; Çap, uzunluk, et kalınlığı vs. ölçümleri yapılarak, bu değerlerin API 5L’de verilen toleranslar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

4.1.3. API 5L X60 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları

Çizelge 4.1’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 863,6 mm çapında, 11,91 mm kesit kalınlığında ve X60 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen imalatın mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Borunun kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik – darbe, eğme, hidrostatik test ve gözle muayene sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

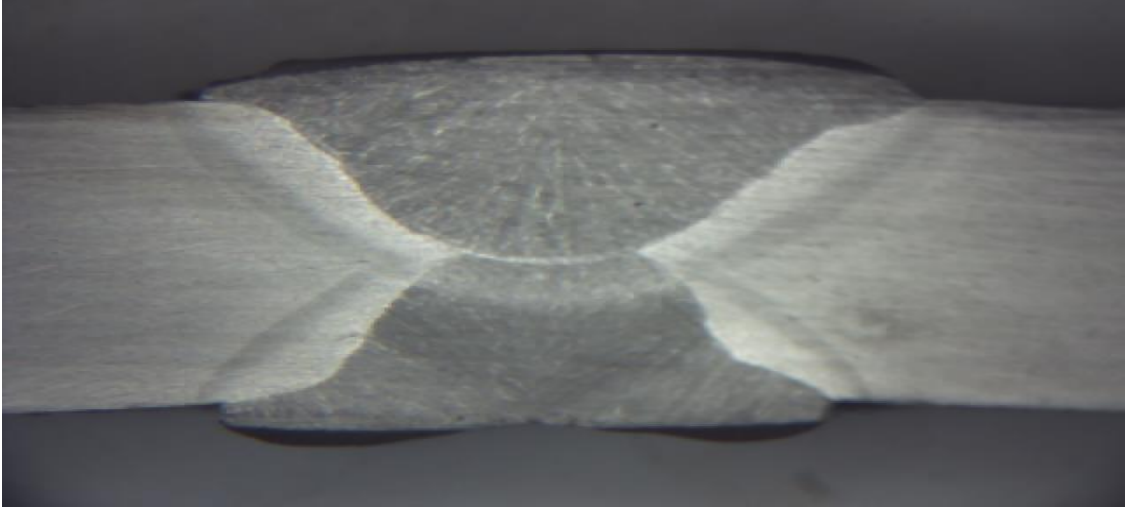
Çizelge 4.12’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu telinin ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 4.12. Kaynak metali kimyasal analizi (X60, 11.91 mm)

	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cr
Element (%)	0,0839	0,1796	1,3716	0,0114	0,0011	0,0039	0,0551	0,0386
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	B	
	0,005	0,0536	0,0086	0,0015	0,0365	0,0215	0,0003	

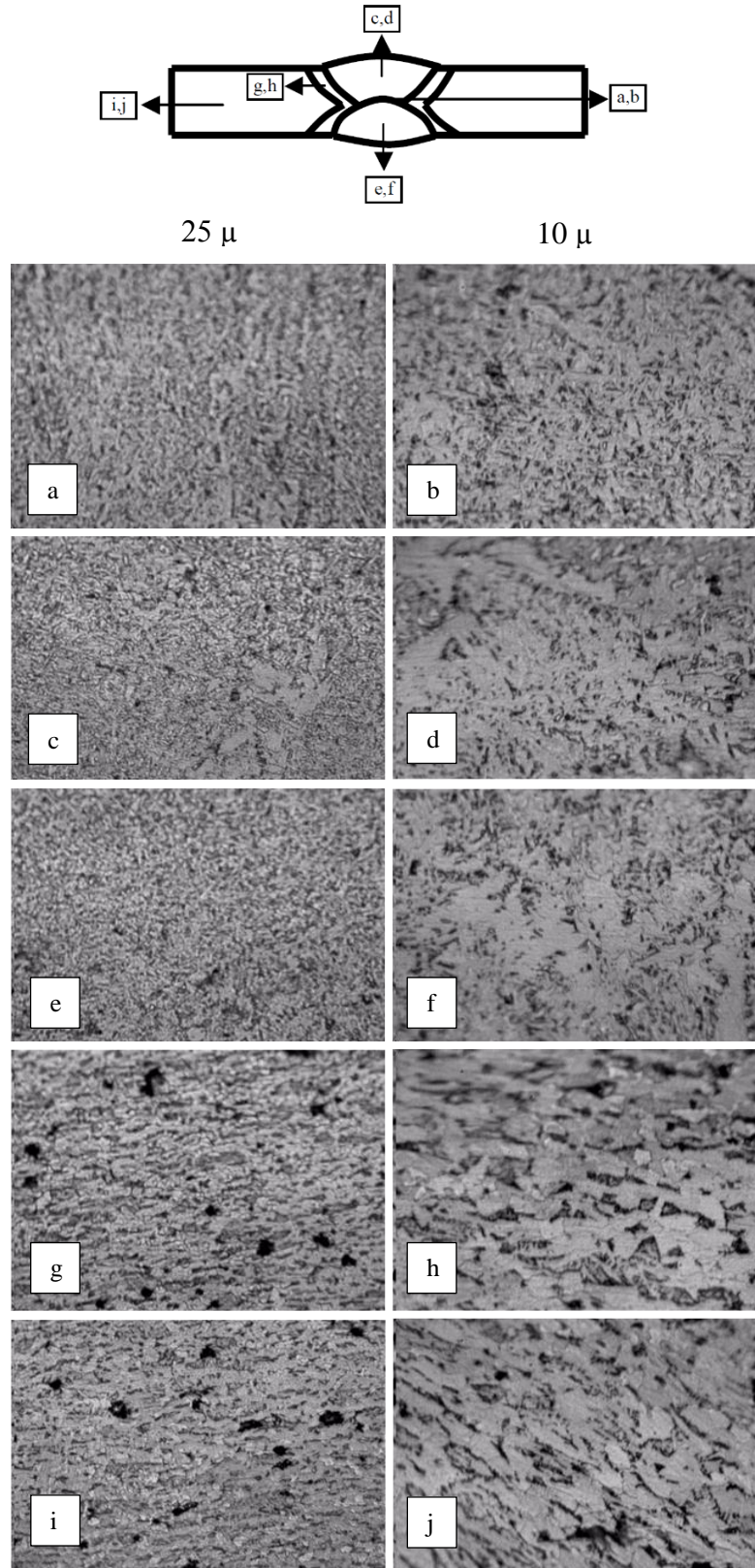
Şekil 4.7’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) ve birleşmemiş bölgenin olmadığı, nüfuziyetin tam olduğu görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri belirgin bir şekilde ayırt edilebilirken

kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters olacak şekilde yönlendiği görülebilmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönelmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönelmelerin ise ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.7. Kaynağın makro görüntüsü (X60, 11.91 mm)

Şekil 4.8’de x400 ve x1000 büyütülmüş ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. ITAB da ana malzemeye oranla daha iri tanelerin olduğu, kaynak metalinde ise kaynak esnasında oluşan yüksek türbülansın dolayı tanelerin diğer bölgelere oranla çok daha homojen bir şekilde ve daha ince tanelerden olduğu görülmektedir. Kaynak metali tane yapısının yer yer dendritik yapıdan olduğu da belirgin bir şekilde görüldüğü gibi, dış kaynaktaki oluşan kaynak metali tanelerinin iç kaynağa göre daha iri bir şekilde olduğu ve ısı akış yönüne ters bir şekilde yönlendiği görülebilmektedir.



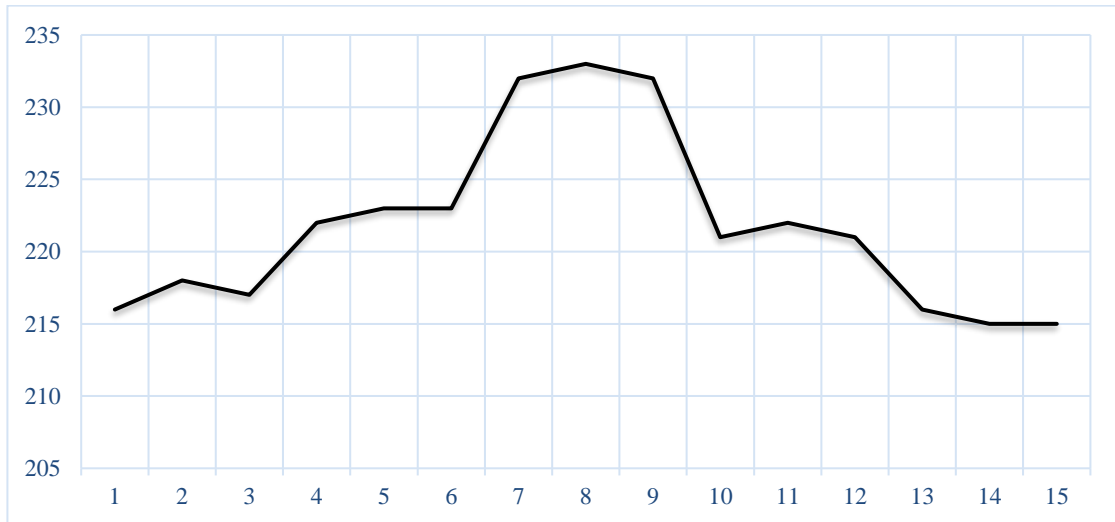
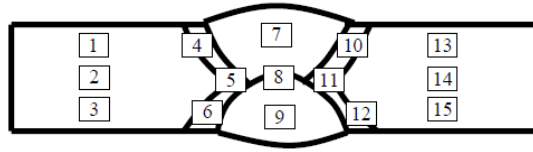
Şekil 4.8. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X60, 11.91 mm)

Çizelge 4.13 incelendiğinde ana malzemenin akma dayanımının 471 N/mm², kopma dayanımının 574 N/mm², % uzama değerinin ise 37,7 olduğu tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş parçanın akma dayanımının 521 N/mm², kopma dayanımının 622 N/mm², % uzama değerlerinin ise 17,4 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. Çekme deneyi sonuçları (X60, 11,91 mm)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Kopma Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama
Ana Malzeme	471	574	37,7
Kaynaklı Malzeme	521	622	17,4

Şekil 4.9’da 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek ana malzeme sertliği 218 HV, En yüksek ITAB bölgesi sertliği 223 HV, En yüksek kaynak metal sertliği ise 233 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X60, 11.91 mm)

Çizelge 4.14'da -20°C'de ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak bölgesinden alınan 3 numunede yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 280,41 Joule, ITAB bölgesinin ortalama çentik - darbe değerinin 199,44 Joule, kaynak metalinin ortalama çentik - darbe değerinin ise 177,27 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.14. Çentik - darbe deney sonuçları (X60, 11.91 mm)

Malzeme	Enerji (Joule)			
	Test Sıcaklığı: -20 °C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana Malzeme	279,02	260,40	301,81	280,41
ITAB	174,49	207,44	216,39	199,44
Kaynak Bölgesi	153,32	239,80	138,67	177,27

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen deney numunelerine dış kaynak dışarda ve içerde tutularak iki ayrı deney yapılmıştır. (Çizelge 4.15) Deney sonucunda API 5L'de kabul kriteri olarak belirtilen 3.2 mm uzunluğunda veya et kalınlığının %12.5'i uzunluğunda herhangi bir çatlak veya kırılma görülmemiştir.

Çizelge 4.15. Eğme deneyi sonuçları (X60, 11.91 mm)

Mandrel Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda (yüz)		Dış kaynak içeride (kök)	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
127	154	180	Hata Yok	180	Hata Yok

Borular, API 5L'de belirtilen test basıncı hesaplama yöntemine göre belirlenen 65 bar test basıncına 20 sn. maruz bırakılmış ve herhangi bir basınç kaybı veya sızıntı tespit edilmemiştir.

P: Test basıncı (MPa)

S: Minimum akma dayanımı (Mpa)

t: Et kalınlığı (mm)

D: Boru dış çapı (mm)

$$P = \frac{S.t}{D} = \frac{471.11,91}{863,6} = 6,5 \text{ MPa} = 65 \text{ bar}$$

Ayrıca gözle yapılan kontrollerde; Çap, uzunluk, et kalınlığı vs. ölçümleri yapılarak, bu değerlerin API 5L’de verilen toleranslar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

4.1.4. API 5L X65 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları

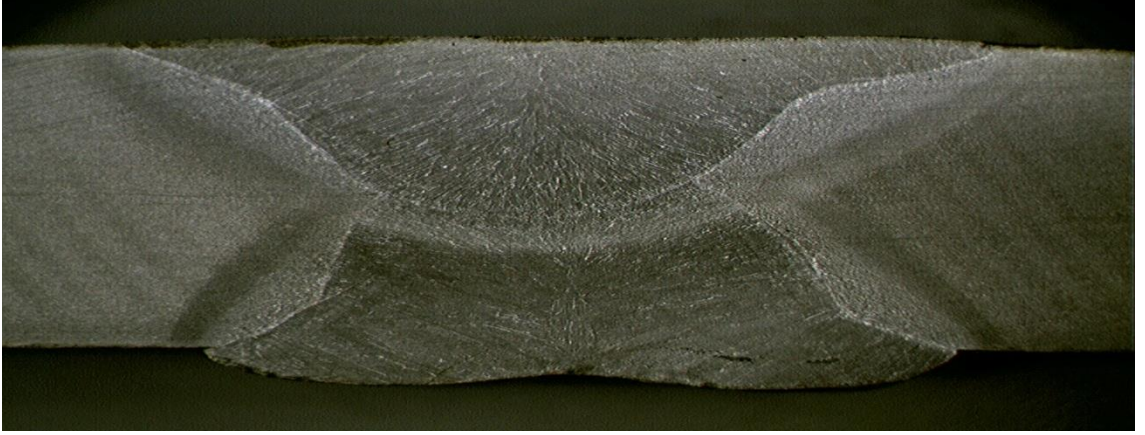
Çizelge 4.1’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 508 mm çapında, 11,91 mm kesit kalınlığında ve X65 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen imalatın mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Borunun kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik – darbe, eğme, hidrostatik test ve gözle muayene sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 4.16’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu telinin ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 4.16. Kaynak metali kimyasal analizi (X65, 11.91 mm)

	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cr
Element (%)	0,092	0,234	1,561	0,02	0,011	0,035	0,036	0,067
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	B	
	0,015	0,088	0,0002	0,046	0,051	0,028	0,0003	

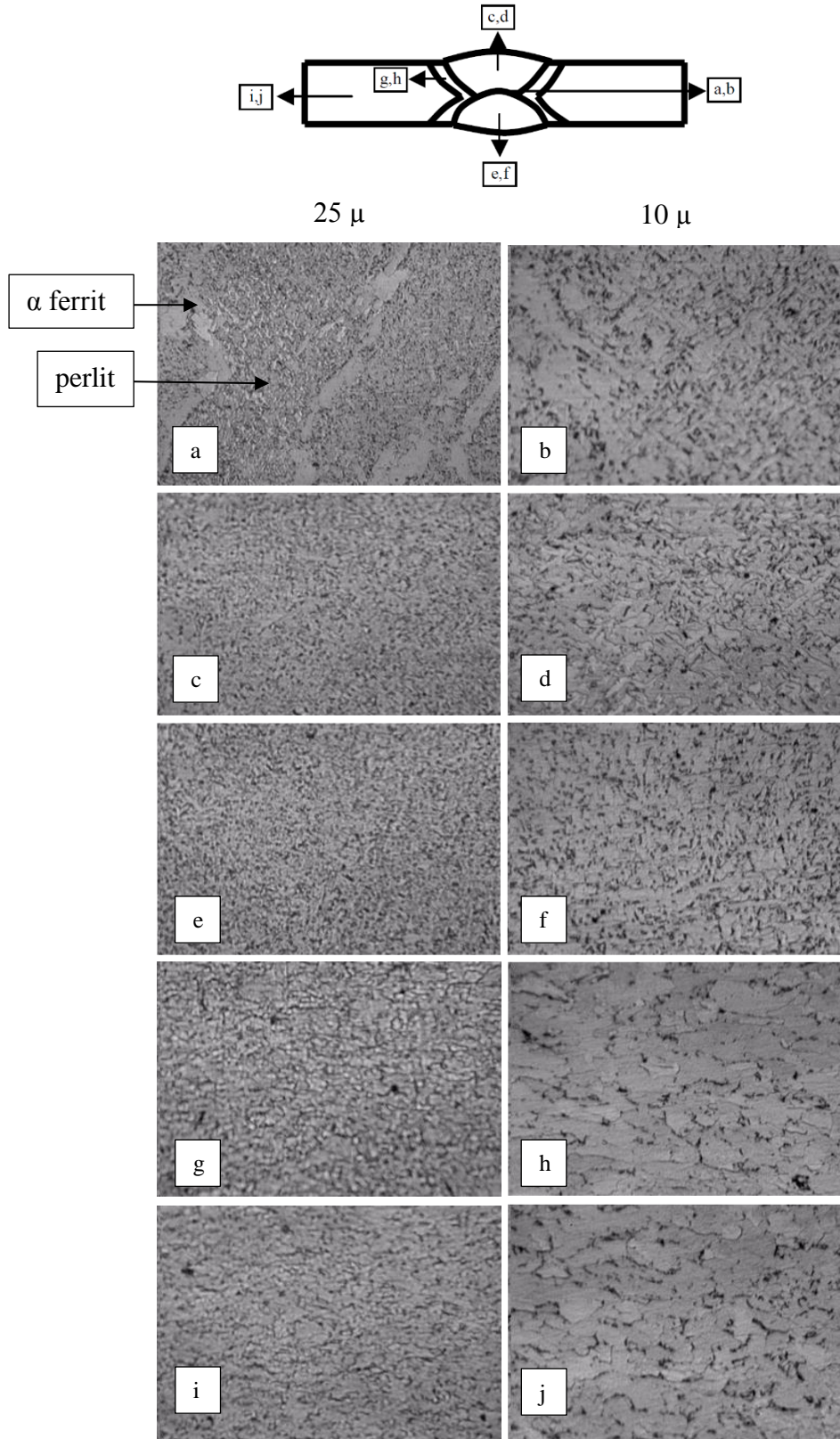
X65 malzemenin makroyapı fotoğrafı Şekil 4.10'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11.91 mm)

Verilen makroyapı fotoğrafında nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş herhangi bir bölgenin olmadığı tespit edilmiş olup herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı görülmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur. Ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri de belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

Şekil 4.11'de x400 ve x1000 büyütmüş olarak verilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında diğer malzemelerin mikroyapıları ile benzerlik arz ettiği görülmektedir. Burada da ITAB'da iri taneli bölgenin, kaynak metalinde ise ince taneli yapının oluştuğu tespit edilmiştir. İç ve dış kaynak metalllerinde eş aksenal bir yapının hakim olduğu, iç ve dış kaynağın birleşim bölgesinde ise tane yapısında belirgin bir şekilde plakalar halinde ferrit tanelerinin oluştuğu görülebilmektedir.



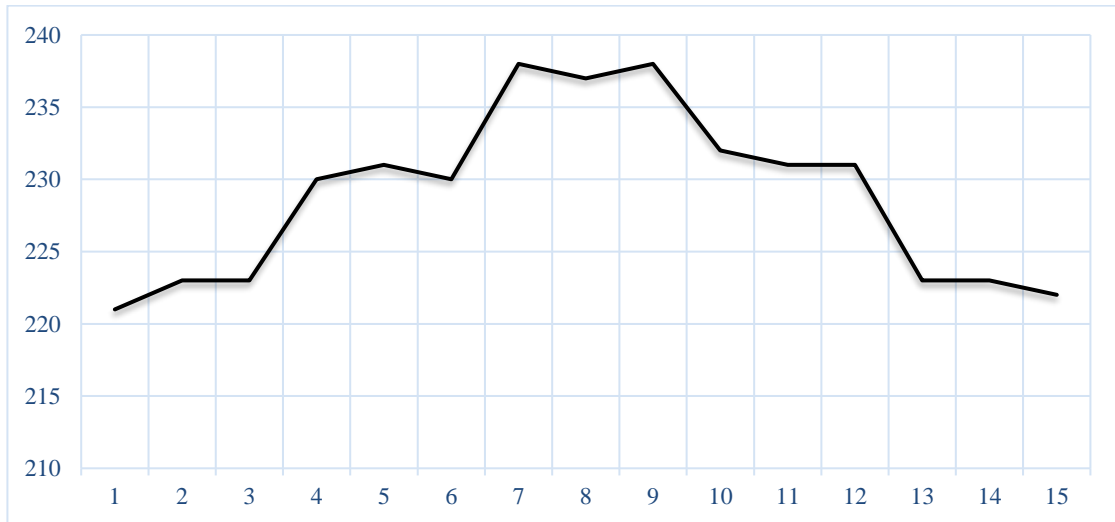
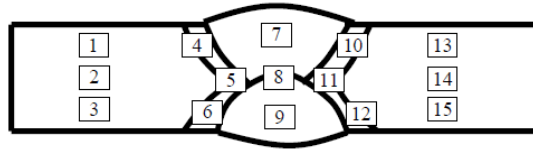
Şekil 4.11. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X65, 11.91 mm)

Çizelge 4.17 incelendiğinde ana malzemenin akma dayanımının 530 N/mm^2 , kopma dayanımının 598 N/mm^2 , % uzama değerinin ise 35 olduğu tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş parçanın akma dayanımının 555 N/mm^2 , kopma dayanımının 650 N/mm^2 , % uzama değerlerinin ise 15,1 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. Çekme deneyi sonuçları (X65, 11,91 mm)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Kopma Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
Ana Malzeme	530	598	35
Kaynaklı Malzeme	555	650	15,1

Şekil 4.12'da 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek ana malzeme sertliği 223 HV, En yüksek ITAB bölgesi sertliği 232 HV, En yüksek kaynak metal sertliği ise 238 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11,91 mm)

Çizelge 4.18'de -20°C'de ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak bölgesinden alınan 3 numunede yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 282 Joule, ITAB bölgesinin ortalama çentik - darbe değerinin 199,44 Joule, kaynak metalinin ortalama çentik - darbe değerinin ise 177,27 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.18. Çentik - darbe deney sonuçları (X65, 11.91 mm)

Malzeme	Enerji (Joule)			
	Test Sıcaklığı: -20 °C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana Malzeme	167	172	206	282
ITAB	123	77	119	199,44
Kaynak Bölgesi	105	87	75	177,27

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen deney numunelerine dış kaynak dışarda ve içerde tutularak iki ayrı deney yapılmıştır. (Çizelge 4.19) Deney sonucunda API 5L'de kabul kriteri olarak belirtilen 3.2 mm uzunluğunda veya et kalınlığının %12.5'i uzunluğunda herhangi bir çatlak veya kırılma görülmemiştir.

Çizelge 4.19. Eğme deneyi sonuçları (X65, 11.91 mm)

Mandrel Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda (yüz)		Dış kaynak içeride (kök)	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
148	175	180	Hata Yok	180	Hata Yok

Borular, API 5L'de belirtilen test basıncı hesaplama yöntemine göre belirlenen 124,3 bar test basıncına 20 sn. maruz bırakılmış ve herhangi bir basınç kaybı veya sızıntı tespit edilmemiştir.

P: Test basıncı (MPa)

S: Minimum akma dayanımı (Mpa)

t: Et kalınlığı (mm)

D: Boru dış çapı (mm)

$$P = \frac{S.t}{D} = \frac{530.11,91}{508} = 12,23 \text{ MPa} = 124,3 \text{ bar}$$

Ayrıca gözle yapılan kontrollerde; Çap, uzunluk, et kalınlığı vs. ölçümleri yapılarak, bu değerlerin API 5L’de verilen toleranslar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

4.1.5. API 5L X70 doğalgaz boru numunelerine ait deneyler ve sonuçları

Çizelge 4.1’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 1422,4 mm çapında, 19,65 mm kesit kalınlığında ve X42 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen imalatın mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Borunun kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik – darbe, eğme, hidrostatik test ve gözle muayene sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

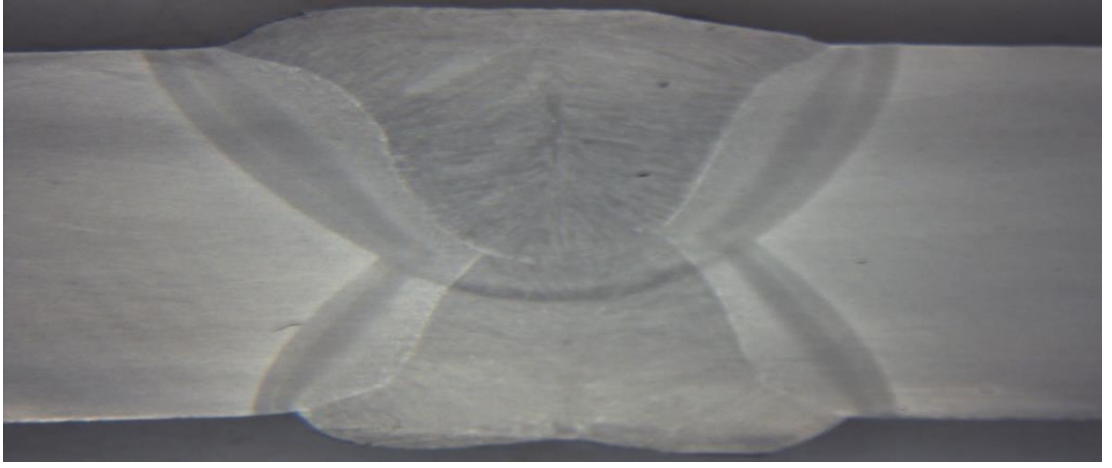
Çizelge 4.20’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu telinin ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 4.20. Kaynak metali kimyasal analizi (X70, 19.65 mm)

	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cr
Element (%)	0,0722	0,2453	1,6426	0,0059	0,0019	0,0021	0,1301	0,1716
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	B	
	0,1151	0,0187	0,0041	0,0451	0,0557	0,0208	0,0003	

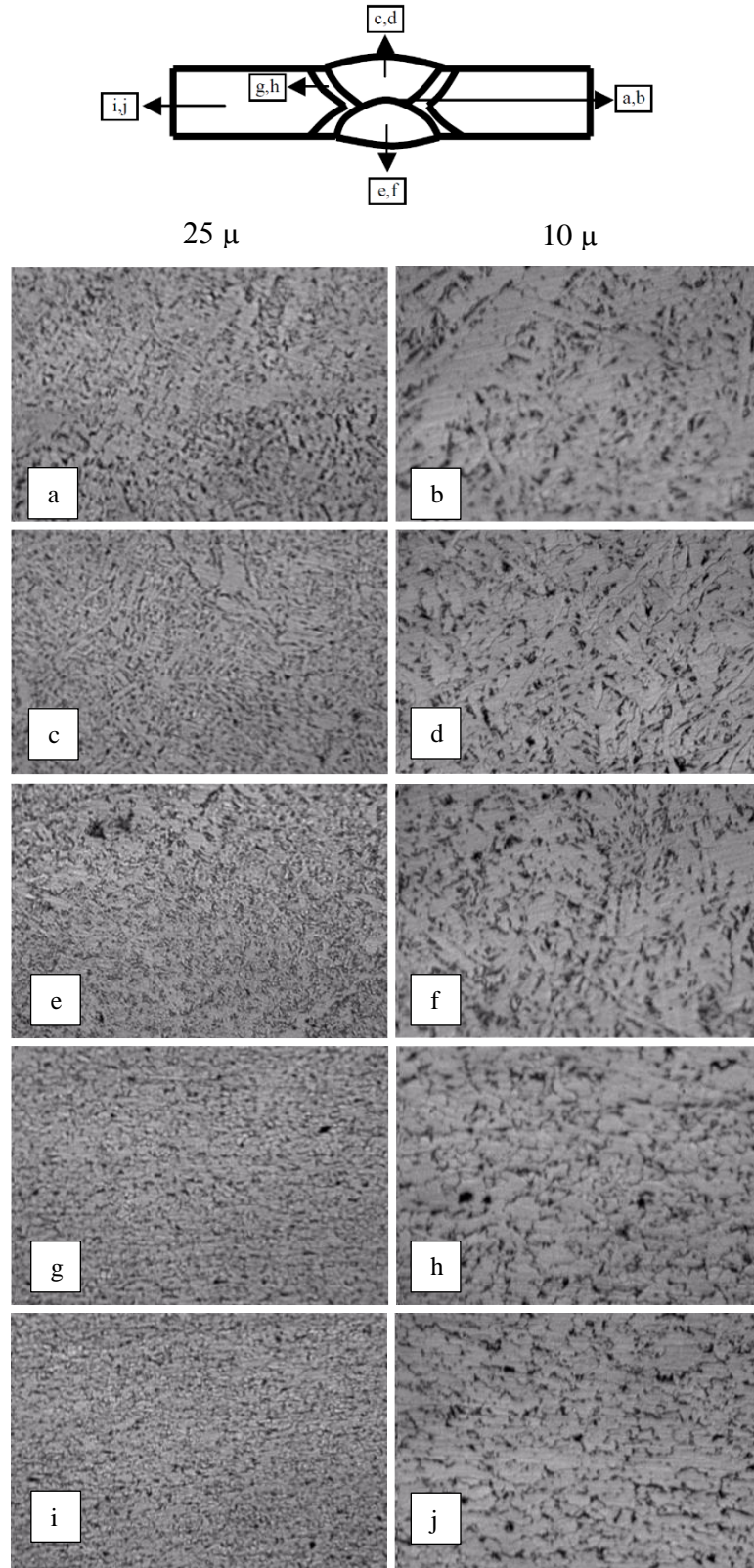
Şekil 4.13’de verilen X70 malzemesinin makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinin belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği, nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş bölgenin

olmadığı görülebilmektedir. Yine bu malzemenin birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ise ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.



Şekil 4.13. Kaynağın makro görüntüsü (X70, 19.65 mm)

Şekil 4.14'de x400 ve x1000 büyütmüş olarak; ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında kaynak metalinde oluşan yapının çok ince tanelerden meydana geldiği ve iğnemi bir yapının oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde oluşan taneler yine ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde yönlenmiş ve kısmen dendritik yapının oluştuğu da görülebilmektedir.



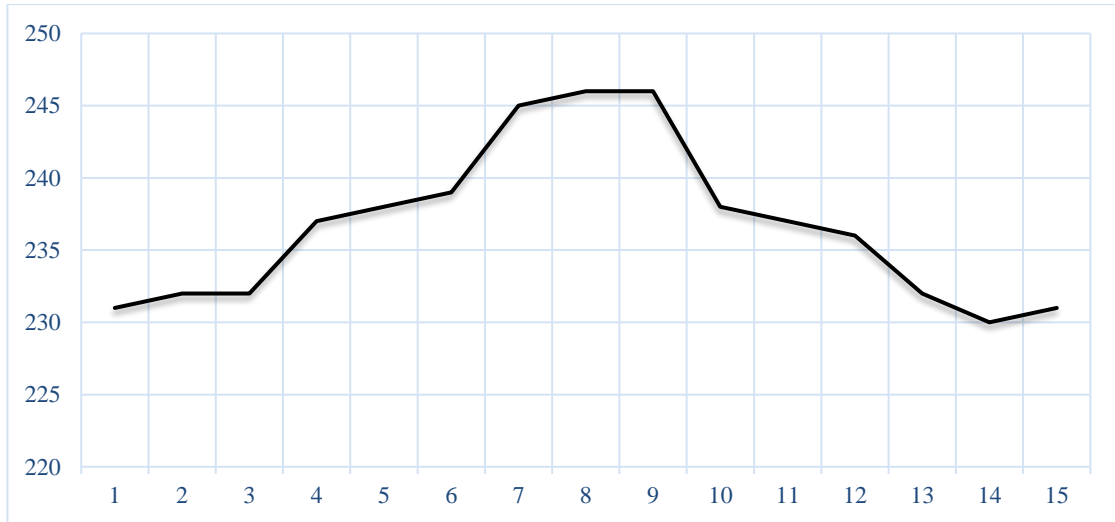
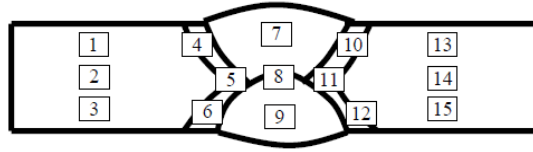
Şekil 4.14. Numuneden alınan mikroyapı fotoğrafları (X70, 19.65 mm)

Çizelge 4.21 incelendiğinde ana malzemenin akma dayanımının 546 N/mm^2 , kopma dayanımının 658 N/mm^2 , % uzama değerinin ise 25,3 olduğu tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş parçanın akma dayanımının 596 N/mm^2 , kopma dayanımının 723 N/mm^2 , % uzama değerlerinin ise 14,7 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.21. Çekme deneyi sonuçları (X70, 19,65 mm)

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm^2)	Kopma Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
Ana Malzeme	546	658	25,3
Kaynaklı Malzeme	596	723	14,7

Şekil 4.15'de 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. En yüksek ana malzeme sertliği 232 HV, En yüksek ITAB bölgesi sertliği 239 HV, En yüksek kaynak metal sertliği ise 246 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X70, 19.65 mm)

Çizelge 4.22’de -20°C’de ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak bölgesinden alınan 3 numunede yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 355,29 Joule, ITAB bölgesinin ortalama çentik - darbe değerinin 141,62 Joule, kaynak metalinin ortalama çentik - darbe değerinin ise 139,07 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.22. Çentik - darbe deney sonuçları (X70, 19.65 mm)

Malzeme	Enerji (Joule)			
	Test Sıcaklığı: -20 °C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana Malzeme	339,91	408,75	317,21	355,29
HAZ Bölgesi	143,18	112,73	168,94	141,62
Kaynak Bölgesi	134,47	144,65	138,09	139,07

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen deney numunelerine dış kaynak dışarda ve içerde tutularak iki ayrı deney yapılmıştır. (Çizelge 4.23) Deney sonucunda API 5L’de kabul kriteri olarak belirtilen 3.2 mm uzunluğunda veya et kalınlığının %12.5’i uzunluğunda herhangi bir çatlak veya kırılma görülmemiştir.

Çizelge 4.23. Eğme deneyi sonuçları (X70, 19,65 mm)

Mandrel Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda (yüz)		Dış kaynak içeride (kök)	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
233	275	180	Hata Yok	180	Hata Yok

Borular, API 5L’de belirtilen test basıncı hesaplama yöntemine göre belirlenen 75,4 bar test basıncına 20 sn. maruz bırakılmış ve herhangi bir basınç kaybı veya sızıntı tespit edilmemiştir.

P: Test basıncı (MPa)

S: Minimum akma dayanımı (Mpa)

t: Et kalınlığı (mm)

D: Boru dış çapı (mm)

$$P = \frac{S.t}{D} = \frac{546.19,65}{1422,4} = 7,54 \text{ MPa} = 75,4 \text{ bar}$$

Ayrıca gözle yapılan kontrollerde; Çap, uzunluk, et kalınlığı vs. ölçümleri yapılarak, bu değerlerin API 5L’de verilen toleranslar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan X42, X52, X60, X65 ve X70 boruların deney sonuçlarına ait bulgular bu bölümde değerlendirilmiştir.

5.1 Makroyapı bulguları

Deney sonuçları başlığı altında verilen API 5L standardındaki X42, X52, X60, X65, X70 malzemelerin makroyapı fotoğrafları incelendiğinde yapısal olarak genel bir benzerlik görülmektedir. Şekil 4.13’e bakıldığında X70 malzemenin ITAB bölgesinin diğer malzemelere göre daha geniş olduğu, X42 malzemenin ITAB bölgesinin ise diğer malzemelere göre daha dar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi kalın kesitli malzemelerde kaynak sırasında ısı girdisinin ince kesitli malzemelere göre daha fazla olmasıdır. Ayrıca kalın kesitli malzemelerde yüksek ısı girdisi, malzemenin yönlenme çizgilerinin daha belirgin oluşmasına sebep olmuştur. Burada, birleştirilen malzemelerin kesit kalınlıklarının fazla olması ITAB’ın daha geniş bir alanda oluşmasına neden olmuş ve hızlı katılaşmadan dolayı ince taneli bir kaynak metalinin oluşmasına sebep olmuştur. Buradaki yapısal farklılığı etkileyen en önemli faktörün malzeme kesit kalınlığı sebebiyle oluşan bölgesel ısı girdisi olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı incelemeleri ve mekanik değerlerin sonuçları bu durumu daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

İncelenen makro fotoğrafların tümünde dış kaynak iç kaynaktan daha sonra gerçekleştiği için iç kaynak dış kaynağa ön tav işlemi uygulamaktadır. Bu ön tav etkisiyle dış kaynaklardaki kaynak metal alanı iç kaynaklara nazaran daha geniş olmaktadır. Bu da bütün makroyapı fotoğraflarında açıkça görülmektedir. Makroyapı fotoğraflarının tamamına genel olarak bakıldığında nüfuziyetin tam olduğu, aynı

zamanda makro düzeyde hata diyebileceğimiz herhangi bir yapıya (yanma oluğu, gözenek, kalıntı, çatlak, v.b.) rastlanmadığı görülmüştür.

5.2. Mikroyapı bulguları

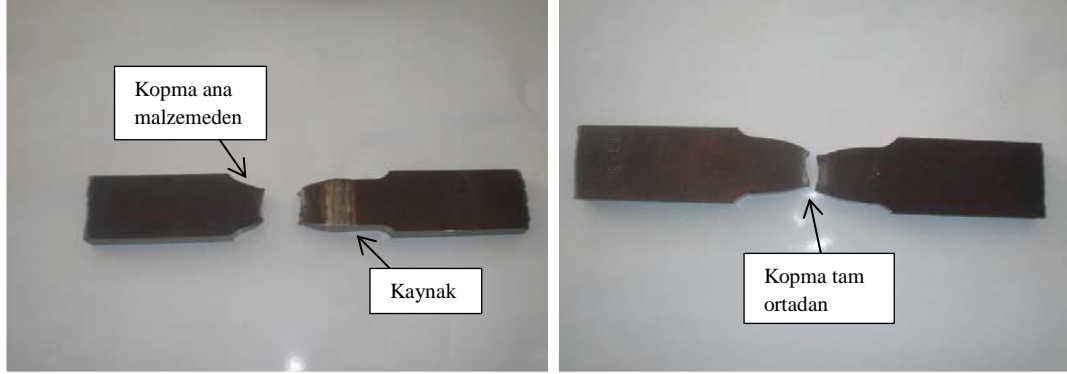
Mikroyapı fotoğrafları genel olarak incelendiğinde, ana malzemeye göre kaynaklı malzemelerde oluşması beklenen tipik ITAB tane yapısı oluşmuş, kaynak metalinde ise ince taneli yapıların oluştuğu görülebilmektedir. İnce kesitli malzemelerin kaynak metali mikroyapı fotoğraflarında uzun sütunsal ferrit plakaları görülürken, kalın kesitli borulara ait kaynak metalinde daha küçük ve sık ferrit plakaları görülmektedir. Bunun sebebinin, kalın kesitli borularda kaynak esnasında aynı anda iç kaynakta 3, dış kaynakta ise 2 tel kullanılarak kaynaklandığından daha fazla ısı girdisine maruz kaldığı dolayısıyla daha geç soğuduğu için olduğu düşünülmektedir.

Mikroyapı fotoğraflarında en iri ana malzeme tane yapısı X42 malzemesinde görülürken, en küçük tane yapısının da X70 malzemesinde görüldüğü tespit edilmiştir. Bilindiği gibi ince taneli yapıların dayanımı kaba tanelere göre daha yüksektir. Çekme deneyi sonuçlarında da iri taneli yapıya sahip olan X42 malzemesinin çekme dayanımı en düşük değer çıkarken, ince taneli yapıya sahip X70 malzemesine uygulanan çekme deneyi sonucu en yüksek değerdedir. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri ve üretim esnasında kullanılan yöntemler (termomekanik haddeleme, hızlı soğutma vs.) ile tane inceltmesi yapılarak malzemelerin dayanımı arttırılmaktadır. Diğer mekanik testlerde bu durumu doğrulamaktadır. Mikroyapı fotoğraflarında özellikle aynı anda birden fazla tel kullanılarak yapılan malzemelerin kaynak metalinde sütunsal uzun ferrit plakalarının varlığı görülmektedir. Malzemeleri kaynaklama esnasında tel sayısı artıkça ısı girdisi miktarı artmakta dolayısıyla soğuma süresi uzamaktadır. Bu da ferrit plakalarının oluşumuna imkân vermektedir.

5.3. Çekme deneyi bulguları

Çekme deney sonuçları incelendiğinde kopmanın bütün malzemelerde ana malzemedan olduğu, kaynaklı bölgeden kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 5.1'den de görüleceği üzere kaynaklı malzemedede kopma ana malzemedede, ana

malzemeden alınan çekme numunesinde ise kopma malzemenin tam ortasından gerçekleşmiştir.



Şekil 5.1. Ana malzemeden ve kaynaklı bölgeden alınmış çekme deneyi sonuçları

Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülebilir. 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 görülebilmektedir.

Çalışmamızda çekme numuneleri standarda (ASTM E8) uygun hazırlandığından, kaynaklı numunelerdeki kaynak bölgesinin sert olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi ise dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasına bağlanmıştır. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olmaktadır.

Çekme test sonuçlarında hem ana malzemenin hem de kaynak metalinin en yüksek çekme değerinin X70 malzemesinde olduğu görülmektedir. X70 malzemesinden ölçülen çekme değerleri kaynak metalinde 723 N/mm^2 , ana malzemede ise 658 N/mm^2 'dir. En düşük çekme mukavemeti değerleri ise X42 malzemesinde

görülmektedir. Bu malzemenin çekme mukavemeti değerleri ana malzemede 499 N/mm², kaynak metalinde 527 N/mm²'dir. Mekanik testlerde elde edilen sonuç farklılıklarında malzemelerin tane boyutlarının önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. Tane boyutu, mukavemeti belirleyen bir mekanizma olup, tane boyutu ile mukavemet arasında ters orantı vardır. Tane boyutu arttığında mukavemet azalır, tane boyutu azaldığında ise mukavemetin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Çeliklerde tane küçülmesinin mukavemet arttırıcı mekanizmalardan bir tanesi olduğu bilinmektedir. Malzemelerin tamamının mikroyapı sonuçlarına bakıldığında da en ince tane yapısına sahip malzemenin X70 malzemesi olması çekme dayanımının bu malzemede yüksek çıkmasına neden olmuştur. En düşük çekme dayanımı gösteren X42 malzemesinin mikroyapı fotoğraflarında ise bu malzemenin en kaba taneli yapıya sahip olduğu görülmektedir.

5.4. Sertlik deneyi bulguları

Sertlik sonuçları grafiklerine genel olarak bakıldığında, en yüksek sertliğin kaynak metalinde, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. Çelik malzemelerde karbonun sertleşebilirliği arttırdığı bilinen bir durumdur. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de kullanılan malzeme ve telin kimyasal analizine bakıldığında; kullanılan telin karbon oranının ana malzemelerden yüksek olduğu görülmektedir. Bu da sertlik deney numunelerinin tümünde kaynak metalinin sertliğinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

Malzemelerin 15 farklı noktasından alınan sertlik değerleri içerisinde ana malzemenin en yüksek sertlik değeri yaklaşık 232 HV ile X70 malzemesi iken, en yüksek kaynak metali sertliği yaklaşık 246 HV sertlik değeri ile yine X70 malzemesinde olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metali sertliği en yüksek diğer malzeme ise X70 malzemesinden sonra X65 malzemesindedir. Bilindiği üzere kaynak metalinin bileşimi ana malzeme ve ilave metalin bileşiminden mevcuttur.

İncelenen 5 farklı malzeme için verilen sertlik sonuçlarında ana malzemeler içerisinde en düşük sertlik değeri yaklaşık 152 HV ile X42 malzemesindedir. Bu sertlik değerini X52 malzemesi takip etmektedir. Kaynak metali sertlik değerlerine bakıldığında ise en düşük değer yaklaşık 166 HV ile X42 malzemesinde olduğu

görülmektedir. Kaynak metali sertlik ölçümlerinde mikroyapı incelemelerinde görülen en iri tane yapısına sahip X42 malzemesinin sertliği en düşük çıkmıştır. X42 malzemesinin karbon yüzdesinin diğer malzemelere göre daha yüksek olması sertlik değerinin düşmesine neden olmuştur. Ayrıca Ti oranları da sertlik değerlerini etkileyen başka bir etken olarak düşünülebilir. Titanyumun, sertliği ve kırılabilirliği artırıcı yönde etkili elementler grubundaki oksijen ile TiO ve azot ile TiN bileşimini oluşturması kaynak metalindeki sertlik değerlerinin düşmesine neden olur. Ti oranı

Çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında da kopmaların ana malzemedan oldukları görülmüştür. Kaynak metali sertliğinin yüksek çıkması, dolayısıyla çekme anında deformasyona uğramaması nedeniyle kopmalar, düşük sertlik değerine sahip olan ana malzemelerden gerçekleşmiştir.

5.5. Çentik - darbe deneyi bulguları

-20 °C.de yapılan çentik . darbe deneylerinde, kaynaklı bölgelerdeki çentik – darbe değerlerinin daha düşük olduğu, ana malzeme değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik deney sonuçlarında da en sert bölgenin kaynak metali olduğu tartışılmıştı.

Elde edilen çentik - darbe deney sonuçları sertlik sonuçları ile kıyaslandığında sertliğin yüksek olduğu kaynaklı bölgelerin kırılabilirliğinin daha yüksek olduğu buna karşın ana malzemelerin kaynak bölgelerine oranla daha tok olduğu ve kırılma enerjisini absorbe ettiği düşünülmektedir. Sertlik deneylerinden elde edilen verilerden de görüleceği üzere kaynak bölgesi malzemenin en sert bölgesidir. Kaynak metalleri için ölçülen sertlik grafiklerinde verilen değerler ile tokluk değerleri kıyaslanacak olursak; sertlik arttığında tokluğun azaldığı görülmektedir.

Çentik - darbe deney sonuçları incelendiğinde, numuneler içerisinde Çizelge 4.22’de verilen 19,65 mm kesit kalınlığındaki X70 malzemesinin ana malzeme ortalama çentik - darbe değeri 355,29 Joule ile en yüksek değerdir.

Karbon miktarı artışı malzeme sertliğini artırıcı mekanizmaların en önemlilerinden biridir. Karbon miktarı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken

malzemenin tokluğu düşer. Bu nedenledir ki; deneylerin tümünde malzeme tokluğunun en yüksek tokluk değerini gösterdiği malzemeler, %C miktarının en düşük olduğu boru imalatında kullanılan X70 malzemelerdir. Sertlik deney bulgularında malzemelerdeki Mn oranının artmasıyla malzemenin mukavemet ve sertlik özelliklerinin arttığından bahsedilmişti. Ancak mangan tokluğu azaltmaktadır. Bu nedenle kimyasal özelliklerinde mangan oranı arttıkça tokluk değerinin azaldı görülecektir.

5.6. Eğme deneyi bulguları

Eğme deneyi kaynaklı malzemelerde makro olarak bir hatanın oluşup oluşmadığını görmek için yapılan bir deneydir. Bütün malzemelere 180° olarak uygulanan eğme deneylerinde malzemelerde çatlama, yırtılma gibi herhangi bir hatanın oluşmadığı görülmüştür. Bu da malzemelerin birleştirmesinin uygun bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Şekil 5.2’de eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü verilmiştir.



Şekil 5.2. Eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışma sonunda elde edilen genel sonuçlar;

- İnce taneli yapıların malzemelerin mekanik özelliklerini arttırdığı, ayrıca parçanın kesit kalınlığının ITAB bölgesini doğrudan etkilediği dolayısıyla kalın parçalarda ısı yayılımının daha geniş bir alana yayıldığı,
- Kaynak metalinin sertliğinin yüksek olmasının çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyona uğramasını engellediği, bu nedenle kopmanın ana malzemede gerçekleştiği,
- Tozaltı kaynağında, ilave tel bileşiminin kaynak metali sertliğini doğrudan etkilediği,
- Kaynak metaline ilave edilen Mn'ın kaynak metali sertliğini önemli oranda arttırdığı, buna karşılık Ti ilavesinin kaynak metali sertliğini düşürdüğü, tokluğunu ise arttırdığı,
- API 5L standardındaki X42, X52, X60, X65 ve X70 malzemelerin petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanımı için -20 °C'deki çalışma şartlarına uygun tokluk değerlerine sahip olduğu,
- X70 malzemenin daha ince taneli yapıya sahip olduğu bu yüzden dayanım özelliklerinin, diğer malzemelere oranla, aynı et kalınlığı ve çapta daha yüksek basınçta çalışabildiği tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

- Boru hatlarında kullanılan API saclarının üretiminde kullanılan mekanik özellikleri artırıcı yöntemler üzerinde deneysel çalışmalar yapılabilir.

- Farklı ilave metaller ve tozlar kullanılarak üretilen boruların kaynak metali üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Farklı kaynak ağız geometrilerine sahip numunelerin mekanik özellikleri incelenebilir.
- Boru hatlarında kullanılan boruların korozyon dirençleri üzerine çalışmalar yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Sevim C., 2012, “Küresel Enerji Jeopolitiği ve Enerji Güvenliği”, *Journal of Yasar University*, İzmir, 4378-4391.
2. Alsancak, H., 2010, “The Role of Turkey in Global Energy: Bolstering Energy Infrastructure Security”, *Journal of Energy Security*.
3. Leifer, I., 2012, “State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill”, “*Remote Sensing of Environment*”, 185-209
4. ASM Handbook Committee, 1983, “Welding, brazing and soldering”, *Metals Handbook*, U.S.A., 115-152.
5. Linert G. E., 1994, “Welding Metallurgy”, “*American Welding Society*”, Miami, USA
6. Taş Z., 2006, “Çeliklerde Termomekanik İşlem Uygulamaları”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Kayseri, 172-173.
7. Mahmutoğlu M., Z., Çimenoğlu H., “% 0.03 Nb ve % 0.05 V’lu bir boru hattı çeliğinde mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi”, *İTÜ dergisi*, İstanbul, Türkiye, 1
8. Uzun, H., “Kaynaklı API 5L X65 Boru Hattı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu”, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi*, Sakarya, Türkiye
9. Asarkaya, M., 2006, “Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 54-86
10. Süzen, A., 2009, “Gemi saclarının kaynak bağlantılarında kaynak parametrelerinin dikis geometrisine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 28-39
11. Taban E., Kaluç E., “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler Ve Kaynak Edilebilirliği”, *Mühendis ve Makine dergisi*, İstanbul, Türkiye
12. Yavuz S., “Türkiye’de Boru Üretiminde Kullanılan DKP Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, Türkiye.

13. Tekin E., 2011, “API Standardı Petrol Ve Doğalgaz Boruları Çeliklerine Genel Bir Bakış” *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Metalurji Mühendisleri Odası*, Ankara, Türkiye, 29-30.
14. Akay A., A., Kaya Y., Kahraman N., 2013 “Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, Zonguldak, Türkiye.
15. Kılınçer S., 1998, “Düşük Karbonlu Çeliklerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
16. Taş Z., 2004, “Termomekanik işlem görmüş mikroalaşımli çeliklerin kırılma mekaniği ve kırılma tokluğu açısından incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Türkiye.
17. Kaba S., 2009, “Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Türkiye
18. Uysal K., 2010, “Petrol ve Doğalgaz Boru Hattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-6.
19. API 5L, 2013, “Specification for Line Pipe”, 44th Edition, *American Petroleum Institute*, ABD.
20. Seçim, C., 2011, “Tahribatsız muayene yöntemleri ve uygulama alanları”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 20-28
21. Ateş, E., 2006, “Spiral Kaynaklı Mikroalaşımli Petrol ve Doğalgaz Boru hatlarının Üretim Prosesinin, Malzeme Özelliklerinin ve Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Özet.
22. Aydın E., 2011, “Isıl İşlem Parametrelerinin Bor Katkılı Östenitik Çelik Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18-19.
23. Taş Z., 2006, “NB-V-Alaşımli Boru Çeliklerinde Mikroyapı - Mekanik Özellikler İlişkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Gebze, Kocaeli, 153-155.

24. Ada H., 2006, “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Tozaltı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Türkiye, 7-108.
25. Şirin, K., 2004, “Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral boru üretiminde kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, Türkiye, 9-97.
26. ASM Handbook Committee, (1983) “*Welding, brazing and soldering*”, Metals Handbook, U.S.A., 115-15.
27. Şirin, M.Ş., 2001, “Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile boru imalinde kaynak parametreleri dikiş formu ve ITAB arasındaki ilişkinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Türkiye, 2-67.
28. Tülbentçi K., 1998, “Gazaltı Kaynak Yöntemi Mig-Mag”, *Archtech*, İstanbul, 35-63
29. Brensing K. H., Summer B., 1998, “Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes”, *Europipe*, Germany, 53-67.
30. Yıldız M., 2000, “Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, Türkiye, 4-12.
31. Şirin, K., 1997, “Yüksek frekans indüksiyon kaynaklı boru üretiminde proses parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-15.
32. Avcı İ., 2010, “Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynaklı Borularda Kaynak Parametrelerindeki Değişimin Mekanik Özelliklere ve Kaynak Dikişi Geometrisine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 37-42
33. DAVIS, J.R., 2004 Introduction to tensile testing, Tensile Testing, 2nd Edition
34. Akay A. A., 2012, “Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 29-44

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Tokat iline bağlı Zile ilçesinde doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Mithat Paşa İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimimi İskenderun Lisesi'nde tamamladım. 2005 yılında girdiğim Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldum. 2011 yılında Hatboru Çelik Boru Fabrikası'nda Bakım Mühendisi olarak çalıştım. Aynı yıl Mayıs ayında başladığım BOTAŞ Petrol İşletmeleri Bölge Müdürlüğü'nde halen çalışmaktayım.