
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

API BORULARININ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN TAGUCHI METODU İLE OPTİMİZASYONU

Hakan ADA

DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2017

Hakan ADA tarafından hazırlanan "API BORULARININ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN TAGUCHI METODU İLE OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……..

Başkan: Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

İmalat Mühendisliği, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye: Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……...

Üye: Doç. Dr. Nurullah KIRATLI

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Dumlupınar Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye: Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 26/01/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hakan ADA

26/01/2017

API BORULARININ KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN TAGUCHI METODU İLE OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Hakan ADA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2017

ÖZET

Yüksek işletme basınçları altında, petrol ve doğalgaz hat borularının performansına yönelik kalite ihtiyaçları ise her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, uygulanacak kaynak yöntemi, bu kaynak yöntemine uygun ekipmanlar, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, ilave kaynak metali miktarı, kaynak hızı, kaynak yönü ve diğer kaynak parametreleri petrol ve doğalgaz hat borularının performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Belirtilen bu faktörlerin tümü kaynak tasarımı çalışmalarının önemini vurgulamaktadır. Farklı yöntemler ve parametreler dâhilinde gerçekleşen kaynak işlemleri farklı performanslar ortaya koymaktadır. Yüksek basınç uygulamalarına güvenle cevap verilebilecek boruların üretilmesi ve boru hatlarının inşa edilmesinde gerekli kalite seviyesinin yakalanabilmesi için kaynak tekniğinin ve buna bağlı olarak kaynak parametreleri seçiminin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ülkemizde boruların birleştirildiği yapım işlerinde, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik-kimyasal özellikleri ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (sertlik ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulamadığı, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile belirlendiği görülmektedir. Kaynak tekniğinin doğru seçilememesi, ya gereksiz yönde fire verilmesine ya da belirli hataların farkına varılamamasına yol açmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı, kaynak güvenirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimlilik ve hızın düşmesine, hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik sistematik bir yöntemin oluşturulamamasıdır. Bu çalışmada; yukarıda belirtilen eksikliklerin giderilmesine yönelik olarak petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X65 kalitesindeki çelik boruların elektrik ark kaynağıyla kaynak işlemlerinin Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak, kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik test sonuçları elde edilmesi planlanmıştır. Performans göstergesi olarak her bir kontrol yöntemine uygun girdi parametreleri (akım, kaynak yönü, elektrod türü) belirlenmiş ve çıktı olarak mekanik test sonuçları (akma-çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, sertlik) analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre de boruların kaynaklı birleştirmeleri için gerekli optimizasyon sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 91511

Anahtar Kelimeler : API 5L X65, boru hattı, elektrik ark kaynağı, Taguchi, optimizasyon

Sayfa Adedi : 250

Danışman : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

OPTIMISATION OF THE WELDING PARAMETERS OF JOINTS OF API PIPES WITH TAGUCHI METHOD

(Ph. D. Thesis)

Hakan ADA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2017

ABSTRACT

The quality requirements for the performance of oil and natural gas line pipes increase under high operating pressures day by day. The type of used steel material, the thickness of material, the applied welding method, the suitable equipment for welding method, chemical composition and mechanical properties of welding metal, the amount of additional welding metal, the speed of welding, the direction of welding and other welding parameters are important factors that affect the performance of oil and natural gas line pipes. All of these factors emphasize the importance of welding design work. Welding processes, which are performed using different methods and parameters, exhibit different performances. The selections of welding technique and welding parameters are very important for both the production of suitable pipes for high pressure applications and the suitable quality level in the construction of pipelines. In our country, it is seen that there is no relationship between the welding parameters and the mechanical-chemical properties of the material and the performance characteristics of the weld seam (such as hardness and toughness) in construction where pipes are combined. So the welding parameters are often determined by trial and error method. The wrong selection of welding technique leads to faults. Due to similar reasons, reliability of welding is ensured by low welding speed. Accordingly, both the efficiency and speed reduce and cost increases. The basic deficiency is that there is no systematic method for the selection of welding parameters. In this study, the investigation of optimum mechanical test results of API 5L X65 steel pipes, which are produced using electric arc welding by Taguchi method for oil and natural gas pipelines, is aimed. Input parameters (flow, the direction of welding, electrode type), which is suitable for each control method, are determined and the mechanical test results (yield-tensile strength, notch impact strength, hardness) are analyzed as output parameters. According to the obtained results, the optimization, that is required for welded joints of pipes, is provided.

Science Code : 91511
Key Words : API 5L X65, pipeline, elektric arc welding, Taguchi, optimisation
Page Number : 250
Supervisor : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve görüşleriyle beni yönlendiren ve her zaman desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Sayın Cemil ÇETİNKAYA, Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Sayın Ramazan KAÇAR, Doç. Dr. Sayın Ahmet DURGUTLU ve Doç. Dr. Sayın Nurullah KIRATLI'ya, tezime katkı sunan jüri üyeleri Prof. Dr. Sayın Nizamettin KAHRAMAN ve Doç. Dr. Sayın Behçet GÜLENÇ, ayrıca Prof. Dr. Sayın Mustafa BOZ ve Yrd. Doç. Dr. Sayın Tayfun FINDIK hocalarıma şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Sayın Yakup KAYA ve mesai arkadaşlarım Öğr. Gör. Dr. Sinan AKSÖZ, Uzm. Bekir KESKİN , Öğr. Gör. Dr. Güven MERAL, Öğr. Gör. Ramazan ÇAKIROĞLU, Öğr. Gör. Dr. Cemil OCAK ile öğrencilerime teşekkür ederim.

Labaratuvar çalışmalarımın büyük bir kısmını gerçekleştirdiğim Emek Boru A.Ş. çalışanları Ahmet TEZEL, İlhan CANDAN ve Tamer KÜSEN'e, TURKMAK yöneticileri, kadim dostlarım Nihat KAYA ve Ümit SARI'ya, Noksel Çelik Boru A.Ş. çalışanları Nejat Kolukısa ve Özgür YAVAŞ'a, BOTAŞ Genel Müdürlüğü Sözleşme Takip ve Kontrol Müdürü Sayın Adnan GÜRSU'ya, bu tez kapsamında her türlü imkanı tarafıma sağlayan Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı ve Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü'ne, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü'ne, burada SEM çalışmalarını gerçekleştirme fırsatı veren Kastamonu Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Sayın Seyit AYDIN ve Araştırma Merkezi Müdürü Doç. Dr. Sayın Özgür ÖZTÜRK'e, çalışmalarıma yardımcı olan öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Sayın Elif AŞIKUZUN, Uzm. Şeydanur KAYA ve Fatih BULUT'a, ayrıca 07/2016-05 numara ile kayıtlı proje kapsamında sağlanan destekler için, Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki en önemli varlıklarım olan başta rahmetli annem olmak üzere muhterem babam, kardeşlerim ve saygıdeğer eşlerine, varlığıyla çalışmalarıma her zaman güç ve enerji katan sevgili eşim ve çok kıymetli ailesine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

HARİTALARIN LİSTESİ xix

SİMGELER VE KISALTMALAR xx

1. GİRİŞ 1

2. BORU HATLARI, TARİHİ GELİŞİMİ VE DÜNYA - TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ 5

2.1. Boru Hatlarının Tarihi Gelişimi 6

2.2. Türkiye'nin Coğrafi Konumunun Boru Hatları Siyasetine Etkileri 7

2.3. Türkiye'nin Boru Hatları Seçiminde Avantajlı Durumları 13

2.3.1. Enerji güzergâhlarına göre konumu 13

2.3.2. Önemli bir ithalatçı ülke olması 15

2.3.3. Uluslararası sisteme entegre siyasi yapısı 16

2.3.4. İşletme şartlarının uygunluğu 18

2.3.5. Boğazlar 19

3. API BORULARI (DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI) 21

3.1. Hat Borularının İmal Usulleri 22

3.2. Hat Borularının Kimyasal ve Mekanik Özellikleri 24

3.3. Doğalgaz ve Petrol Borularında Kullanılan Çeliklerin Genel Özellikleri 25

Sayfa

3.3.1. X serisi çelikler 25
3.4. Çelik Boru Üretimi 29
3.4.1. Spiral dikişli boru üretim yöntemi 29
3.4.2. Boyuna dikişli boru üretim yöntemi 35
4. HAT BORULARININ SAHADAKİ KAYNAKLI BİRLEŞTİRME İŞLEMLERİ 39
4.1. Boru Hatlarının Kaynağı 39
4.2. Örtülü Elektrod ile Ark Kaynağı 41
4.2.1. Çelik boruların kaynağında kullanılan örtülü elektrodlar 42
4.2.2. Boru hatlarının örtülü elektrod ile kaynağında uygulanan teknikler 42
4.3. Otomatik MIG / MAG Kaynağı 46
4.3.1. Boru hatlarının otomatik kaynağında kullanılan koruyucu gazlar 49
4.3.2. Boru hatlarının otomatik kaynağında kullanılan tel elektrodlar 49
4.4. Tozaltı Conta Kaynağı 50
4.5. Boru Hatlarının Kaynağı 51
4.5.1. Kaynak işlemine hazırlık 51
4.5.2. Boru kaynağında kullanılan kaynak sırası 57
5. DENEYSEL TASARIM TEKNİKLERİ 61
5.1. Taguchi Metodu 61
5.1.1. Taguchi yönteminin gelişimi 63
5.1.2. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu 63
5.1.3. Çevrim içi kalite kontrol 65
5.1.4. Çevrim dışı kalite kontrol 66
5.1.5. Taguchi'nin sinyal/gürültü oranları 69
5.1.6. Taguchi deney tasarımı aşamaları 71
6. LİTERATÜR TARAMASI 79
7. MATERYAL VE METOT 85

Sayfa

7.1. Materyal 86
7.2. Metot 87
7.3. Radyografi Testi 90
7.4. Numune Hazırlama 91
7.5. Mekanik Testler 92
7.5.1. Çekme testleri 92
7.5.2. Kaynaklı kırılma (nick break) testleri 94
7.5.3. Çentik – darbe testleri 95
7.5.4. Eğme testleri 96
7.5.5. Makroyapı – mikroyapı, SEM ve makrosertlik incelemeleri 98
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 99
8.1. Radyografi Testi 99
8.2. Makroyapı Çalışmaları 103
8.3. Mikroyapı Çalışmaları 110
8.3.1. Optik mikroskop çalışmaları 110
8.3.2. SEM çalışmaları 128
8.4. Çekme Testi 135
8.5. Sertlik Testi 148
8.6. Kaynaklı Kırılma (Nick Break) Testi 168
8.7. Çentik – Darbe Testi 179
8.8. Eğme Testi 189
9.OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI 193
9.1. Deney Düzeneği 193
9.2. Ölçüm Sonuçları 194
10.DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU 197
10.1. Sonuçların Taguchi Metodu ile Analiz Edilmesi ve Değerlendirilmesi 197

Sayfa

10.2. Doğrulama Deneyleri ve Sonuçları 200

11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 203

11.1. Sonuçlar 203

11.2. Öneriler 214

KAYNAKLAR 215

EKLER 227

EK-1. Çekme – basma test makinası kalibrasyon belgeleri 228

EK-2. Çentik – darbe test makinası kalibrasyon belgeleri 232

EK-3. Sertlik ölçme test makinası kalibrasyon belgeleri 235

EK-4. Radyografi testlerini gerçekleştiren personelin sertifikası 238

EK-5. Radyografik test raporu 239

EK-6. Taguchi programından alınan ekran görüntüleri 240

ÖZGEÇMİŞ 248

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Türkiye'nin yıllara göre enerji talebi 15

Çizelge 2.2. Türkiye'nin hinterlandında yer alan petrol boru hattı projelerinin özellikleri 16

Çizelge 2.3. Türkiye'nin hinterlandında yer alan doğalgaz boru hattı projelerinin özellikleri 17

Çizelge 3.1. Çelik sınıflarına göre boru imalat metotları 23

Çizelge 3.2. Dikişli ve dikişsiz boruların kimyasal bileşimi 24

Çizelge 3.3. API 5L Standardına göre boruların mekanik özellikleri 25

Çizelge 3.4. X serisi çeliklerin 15.3 MPa basınç ve emniyet katsayısı Fd = 0.72 için tasarlanan et kalınlıkları 29

Çizelge 4.1. Boru çapları ve et kalınlıklarına uygun elektrod çapları 57

Çizelge 7.1. Taguchi deney düzeneği 85

Çizelge 7.2. Deneylerde kullanılan X65 malzeme kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri 86

Çizelge 7.3. AWS/ASME FA.5.1. E6010 kodlu selülozik elektrot kimyasal analiz ve mekanik özellikleri 86

Çizelge 7.4. AWS/ASME FA.5.1. E8010 kodlu selülozik elektrot kimyasal analiz ve mekanik özellikleri 87

Çizelge 7.5. E55 5 MnMo B H5 kodlu tempo B70Mo elektrot kimyasal analiz ve mekanik özellikler 87

Çizelge 7.6. Magmaweld TD355 kaynak makinesi teknik özellikleri 87

Çizelge 7.7. Deneylerde kullanılan parametreler 89

Çizelge 8.1. Ana malzemeden alınan numunelerin çekme testi sonuçları 135

Çizelge 8.2. Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonuçları 136

Çizelge 8.3. Kaynaklı kırılma (nick break) testi sonuçları 168

Çizelge 8.4. Ana malzeme çentik – darbe test sonuçları 179

Çizelge 8.5. Kaynaklı birleştirmelerin çentik – darbe test sonuçları 180

Çizelge 8.6. Eğme testi sonuçları 190

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 9.1. Deney faktörleri ve seviyeleri 194

Çizelge 9.2. Taguchi L_{16} deney düzeneği 194

Çizelge 9.3. Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları 195

Çizelge 9.4. Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak kaynak metali sertliği ve darbe dayanımı için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları 195

Çizelge 10.1. Akma mukavemeti için doğrulama test sonuçları 201

Çizelge 10.2. Maksimum çekme mukavemeti için doğrulama test sonuçları 201

Çizelge 10.3. Kaynak metali sertliği için doğrulama deneyleri 201

Çizelge 10.4. Darbe dayanımı için doğrulama test sonuçları 201

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. 2015 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları 1

Şekil 1.2. 1990-2035 kaynak bazında dünya enerji talebi 2

Şekil 3.1. Yüksek mukavemetli çeliklerin tarihsel gelişimi 26

Şekil 3.2. Spiral dikişli kaynak makinesi açı ayarı 30

Şekil 3.3. Spiral dikişli boru makinesinde sac banda silindirik biçim verme 31

Şekil 3.4. Biçim (form) verme ünitesi (deve boynu) 32

Şekil 3.5. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu 33

Şekil 3.6. Spiral dikişli boru üretim makinesinin şematik gösterimi 35

Şekil 3.7. Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu 36

Şekil 3.8. Tozaltı kaynak yöntemi ile boyuna dikişli gaz borusu üretim aşamaları 38

Şekil 4.1. Kök paso yukarıdan aşağıya (PG) kaynak yöntemi 43

Şekil 4.2. Kök paso aşağıdan yukarıya (PF) kaynak yöntemi 44

Şekil 4.3. Selülozik elektrodla yukarıdan aşağıya kaynak ağız hazırlığı ve paso sıralaması 45

Şekil 4.4. Paso türleri ve pasolarda kullanılacak elektrod türü, çapı ve akım şiddeti aralığı 45

Şekil 4.5. Boru çeliklerinin kaynağında el ile yapılan kaynak ile otomatik kaynakta kaynak ağızlarının karşılaştırılması 47

Şekil 4.6. İç ve dış ağız kaçıklığı 52

Şekil 4.7. Ön tavlamaya tabi tutulacak kaynak bölgesinin şematik gösterimi 53

Şekil 4.8. Kaynak ağzı şekli ve kaynak ağzı açma aparatı 54

Şekil 4.9. 30 º'lik standart kaynak ağızları (sağ) ile otomatik MAG kaynağı, kaynak ağzı mukayesesi 55

Şekil 4.10. Kök pasoda sarkma 58

Şekil 4.11. Sıcak paso 58

Şekil 4.12. Tamamlanmış kaynak kesiti 59

Şekil 5.1. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu 63

Şekil 5.2. Etkileşim grafik gösterimi 72

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.1. a) Kaynak ağzı geometrisi, b) Paso sıralaması 88

Şekil 7.2. Mekanik test ve mikroyapı numunesi alınacak bölgelerin şematik gösterimi 92

Şekil 7.3. Çekme testi numunesinin şematik gösterimi 93

Şekil 7.4. Kaynaklı kırılma (nick break) test numunesinin şematik gösterimi 94

Şekil 7.5. Çentik - darbe test numunesinin şematik gösterimi 96

Şekil 7.6. Eğme test numunesinin şematik gösterimi 97

Şekil 8.1. ITAB'da maruz kalınan sıcaklık aralığına bağlı olarak oluşan bölgeler 112

Şekil 8.2. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuç grafikleri 141

Şekil 8.3. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuç grafikleri 142

Şekil 8.4. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuçları 144

Şekil 8.5. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuçları 145

Şekil 8.6. Çekme testi sonuçlarının genel grafik görüntüsü 146

Şekil 8.7. Sertlik ölçüm bölgelerinin şematik gösterimi 148

Şekil 8.8. 1 numaralı deney sertlik testi sonuçları 150

Şekil 8.9. 3 numaralı deney sertlik testi sonuçları 150

Şekil 8.10. 5 numaralı deney sertlik testi sonuçları 151

Şekil 8.11. 7 numaralı deney sertlik testi sonuçları 151

Şekil 8.12. 10 numaralı deney sertlik testi sonuçları 153

Şekil 8.13. 12 numaralı deney sertlik testi sonuçları 153

Şekil 8.14. 14 numaralı deney sertlik testi sonuçları 154

Şekil 8.15. 16 numaralı deney sertlik testi sonuçları 154

Şekil 8.16. 9 numaralı deney sertlik testi sonuçları 156

Şekil 8.17. 11 numaralı deney sertlik testi sonuçları 156

Şekil 8.18. 13 numaralı deney sertlik testi sonuçları 157

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.19. 15 numaralı deney sertlik testi sonuçları 157

Şekil 8.20. 2 numaralı deney sertlik testi sonuçları 159

Şekil 8.21. 4 numaralı deney sertlik testi sonuçları 159

Şekil 8.22. 6 numaralı deney sertlik testi sonuçları 160

Şekil 8.23. 8 numaralı deney sertlik testi sonuçları 160

Şekil 8.24. Farklı pasolar için sertlik ölçüm bölgeleri ve noktaları 164

Şekil 8.25. 1 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları 165

Şekil 8.26. 2 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları 165

Şekil 8.27. 9 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları 166

Şekil 8.28. 10 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları 166

Şekil 8.29. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü 182

Şekil 8.30. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü 184

Şekil 8.31. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü 185

Şekil 8.32. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü 187

Şekil 8.33. Tüm deneylere ait çentik – darbe test sonuçlarının grafik gösterimi 188

Şekil 10.1. Akma mukavemeti için S/N oranları ana etki grafiği 198

Şekil 10.2. Maksimum çekme mukavemeti için S/N oranları ana etki grafiği 199

Şekil 10.3. Kaynak metali sertlik değerleri için S/N oranları ana etki grafiği 199

Şekil 10.4. Kaynak metali darbe dayanım değerleri için S/N oranları ana etki grafiği .. 199

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları 34

Resim 3.2. Dış kaynak istasyonu görünümü 37

Resim 4.1. Doğalgaz boru hattının görünüşü 39

Resim 4.2. İç kaynak işlemi ile kök pasonun yapılışında arkın dıştan görünümü 48

Resim 4.3. Tek torçlu otomatik boru kaynak makinesi ve kullanımı 49

Resim 4.4. Boruların plazma kesme aparatları 56

Resim 4.5. Conta kaynaklarının merkezleme tertibatı 56

Resim 7.1. Kaynak işlemi için hazırlanan borular 88

Resim 7.2. Kaynak işlemleri 90

Resim 7.3. Dış kaynak işlemi 90

Resim 7.4. İç kaynak işlemi 90

Resim 7.5. Tamamlanmış kaynak işlemleri 90

Resim 7.6. Çekme test numuneleri 93

Resim 7.7. Kaynaklı kırılma (nick break) test numuneleri 95

Resim 7.8. Çentik darbe test numuneleri 96

Resim 7.9. Eğme test numuneleri 97

Resim 7.10. 16 deney ve 64 bölgeden alınan metalografik inceleme numuneleri 98

Resim 8.1. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayene görüntüleri 100

Resim 8.2. 1 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 104

Resim 8.3. 2 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 104

Resim 8.4. 3 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 104

Resim 8.5. 4 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 104

Resim 8.6. 5 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 105

Resim 8.7. 6 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 105

Resim 8.8. 7 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 105

Resim 8.9. 8 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 105

Resim 8.10. 9 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 106

Resim **Sayfa**

Resim 8.11. 10 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 106

Resim 8.12. 11 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 106

Resim 8.13. 12 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 106

Resim 8.14. 13 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 107

Resim 8.15. 14 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 107

Resim 8.16. 15 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 107

Resim 8.17. 16 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri 107

Resim 8.18. Ana malzemeden alınan mikroyapı görüntüleri 111

Resim 8.19. 1 numaralı deneyden alınan mikroyapı görüntüleri..... 116

Resim 8.20. 2 numaralı deneyden alınan mikroyapı görüntüleri..... 118

Resim 8.21. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri..... 120

Resim 8.22. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri..... 122

Resim 8.23. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri 123

Resim 8.24. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri 124

Resim 8. 25. Ana malzemeden alınan SEM görüntüsü 129

Resim 8.26. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri 130

Resim 8.27. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri 131

Resim 8.28. Aşağıdan yukarıya doğru yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri..... 132

Resim 8.29. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri..... 134

Resim 8.30. Çekme testi sonrası numunelerin görüntüsü..... 139

Resim 8.31. 1 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 170

Resim 8.32. 2 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 171

Resim 8.33. 3 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 171

Resim **Sayfa**

Resim 8.34. 4 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 172
Resim 8.35. 5 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 172
Resim 8.36. 6 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 173
Resim 8.37. 7 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 173
Resim 8.38. 8 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 174
Resim 8.39. 9 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 174
Resim 8.40. 10 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 175
Resim 8.41. 11 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 175
Resim 8.42. 12 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 176
Resim 8.43. 13 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 176
Resim 8.44. 14 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 177
Resim 8.45. 15 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü 177
Resim 8.46. 16 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü. 178
Resim 8.47. Eğme testi sonrası numunelerin görüntüleri. 190

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 2.1. Türkiye'nin yakın çevresindeki ülkelerin petrol ve doğal gaz rezerv dağılımı 8

Harita 2.2. Hazar petrolleri için muhtemel taşıma güzergâhları 9

Harita 2.3. Türkiye'nin hinterlandında yer alan boru hattı projeleri..... 12

Harita 2.4. Türkiye'nin hinterlandında yer alan petrol boru hattı projeleri 13

Harita 2.5. Türkiye'nin hinterlandında yer alan doğal gaz boru hattı projeleri 14

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Nb	Niyobyum
V	Vanadyum
Mo	Molibden
Cu	Bakır
Ni	Nikel
C	Karbon
N	Azot
Ti	Titanyum
Mn	Mangan
$C_{eş}$	Karbon Eşdeğerliği
PG	Yukarıdan Aşağı Kaynak Pozisyonu
PF	Aşağıdan Yukarı Kaynak Pozisyonu
CO_2	Karbondioksit
d	Toplam deney sayısı,
a	Faktörlerin düzey sayısı
k	Faktör sayısı
L	Ortogonal dizi
S/N	Sinyal/Gürültü oranları
SS_T	Genel kareler toplamı
SS_A	A faktörüne ait kareler toplamı
SS_B	B faktörüne ait kareler toplamı
SS_C	C faktörüne ait kareler toplamı
SS_{AXB}	A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı
SS_E	Hatanın kareler toplamı
N	Gözlemlerin toplam sayısı
y_i	i. Gözlem değeri

Simgeler	Açıklamalar
T	Tüm gözlemlerin toplamı
k_A	A faktörünün seviye sayısı
A_i	Ai seviyesindeki gözlemlerin toplamı
n_{Ai}	Ai seviyesi altındaki gözlem sayısı
c	Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı
$(AxB)_i$	A ve B faktörlerinin i. Koşulu altındaki verileri toplamı
V_T	Toplam serbestlik derecesi
V_A	A faktörünün serbestlik derecesi
V_{AxB}	AxB faktörünün serbestlik derecesi
V_e	Hata serbestlik derecesi
α	Anlamlılık düzeyi
υ1	Faktörün serbestlik derecesi
υ2	Hata serbestlik derecesi
n	Belirlenen faktör-seviye kombinasyondaki faktör sayısı
T	Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalaması
c	μ bulunurken kullanılan tüm faktörlerin toplam serbestlik derecesi
r	Yapılan doğrulama deneyi sayısı
ν_T	Ortalamaya ait serbestlik derecesi olup daima 1 dir.
ν_e	Hata serbestlik derecesi
V_e	Hata varyansı
HNO_3	Nitrik Asit
MPa	Mega Pascal
HV	Vickers Sertliği
”	İnç

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	Analysis of Variances (Varyans Analizi)

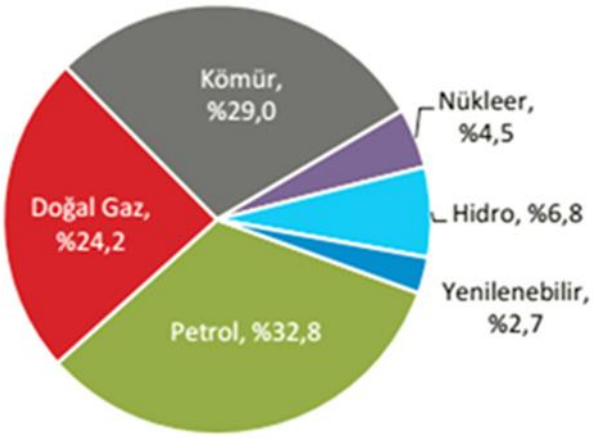
Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	American Society For Testing and Materials
API	American Petroleum Institue
AWS	American Welding Society
BP	British Petrol
BTC	Bakü Tiflis Ceyhan
BTE	Bakü Tiflis Erzurum
DWTT	Drop Weight Tear Test
GMAW	Gaz Metal Ark Kaynak
GTAW	Gaz Tungsten Ark Kaynak
HSLA	High Strength Low Alloy / Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelik
IEA	International Energy Agency
IEO	The International Energy Outlook
ITAB	Isının Tesiri Altındaki Bölge
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal Inert Gaz
RT	Radyografik Test
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMAW	Örtülü Elektrotla Ark Kaynak
SSCB	Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği
TM	Taguchi Metodu
TPAO	Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Petrol ve doğalgaz en önemli enerji kaynakları olarak insan hayatında ve uluslararası ilişkilerde önemli bir yere sahiptir. Yakın tarih petrol ve doğalgazın sadece enerji kaynakları olmadığını, aynı zamanda siyasi, ekonomik, kültürel ve askeri boyutlara da sahip olduğunu ve bu nedenle stratejik önemini ortaya koymaktadır [1].

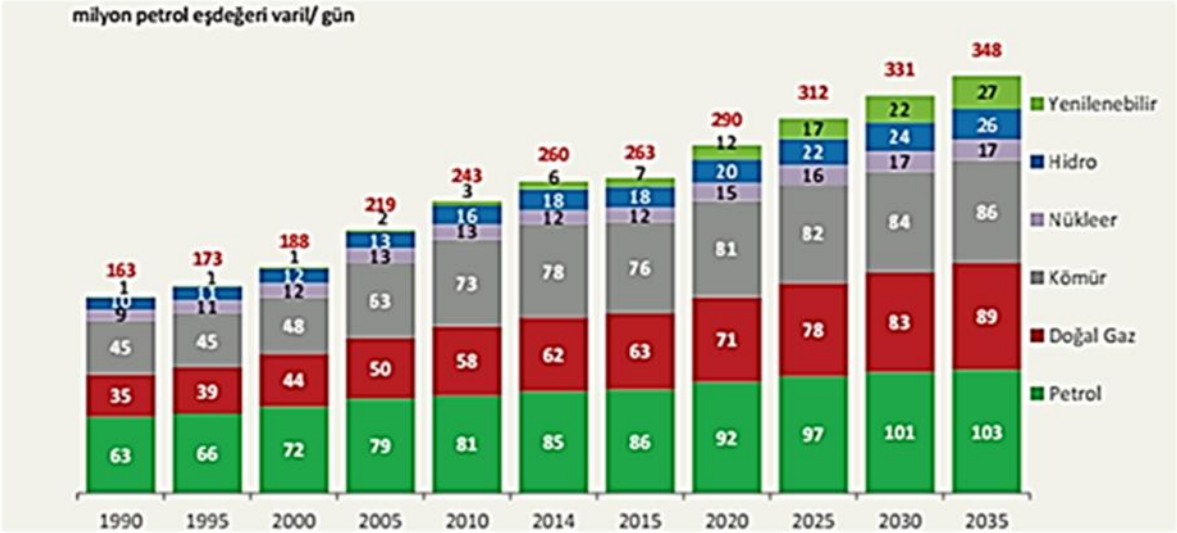
International Energy Agency'nin (IEA), 1998 yılında yaptığı bir araştırmada, dünya genelinde 2020 yılında, 1970'de tüketilen enerjinin yaklaşık üç katının tüketileceği bildirilmektedir [2]. 2015 yılında yapılan başka bir araştırmada ise dünya enerji talebinin 2013 ve 2040 yılları arasında, dünya nüfusunun artması ve gelişmekte olan ülkelerin katkısıyla 1/3 oranında artacağı ifade edilmektedir [3]. British Petrol'ün (BP) 2015 yılında hazırladığı raporda 7,1 milyar olan dünya nüfusunun 2035 yılı itibariyle 8,7 milyar olacağı öngörülürken, bu durumda enerjiye ihtiyaç duyan insan sayısının yaklaşık 1,6 milyar artacağını ifade etmektedir [4].

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'nın (TPAO) Mayıs 2016'da yayımladığı "Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu"nda 2015 yılında küresel enerji tüketiminde doğalgaz ve petrolün, dünyadaki tüm enerji kaynaklarının yarısından fazlasına tekabül ettiği bildirilmektedir [5].



Şekil 1.1. 2015 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları [3]

Petrol, özellikle ulaştırma sektörünün temel enerji kaynağı olarak, dünya birincil enerji tüketimi içinde en büyük paya sahiptir. Petrolü takip eden doğal gaz ve kömür ise büyük ölçüde elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 2015 yılı ilk verileri itibariyle petrol, dünya enerji talebinin %32,8'ini, doğal gaz ise %24,2'sini karşılamıştır. Bugüne kadar, çeşitli uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından (Uluslararası Enerji Ajansı, ABD Enerji İdaresi, BP, Exxon, Mobil vb.) yapılan çeşitli projeksiyonlara göre, petrol ve doğal gazın birincil enerji tüketimi içindeki payları uzun dönemde de koruyacakları öngörülmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. 1990-2035 kaynak bazında dünya enerji talebi [3]

Böylesine hem ekonomik hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın bulundukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerinse kullanım yerlerine taşınmaları gereklidir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır [6]. Uzak mesafelere petrol ve gaz ürünlerini taşımak için faydalanabilecek en kolay ve en ucuz yolun boru hatlarını kullanmak olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Gelişmiş boru hattı sistemleri dünyanın her yerinde üretim alanlarından tüketicilere, petrol, petrol ürünleri ve doğalgaz taşımaktadır. Dünyada enerjiye olan ihtiyacın artması da yüksek taşıma kapasitesine sahip yüksek basınçlı boru hatlarının inşasını gerektirmektedir [7].

Doğalgaz ve petrol taşımak için üretilen çelik borular, dağıtım ve iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek işletme basınçları altında, petrol ve doğalgaz hat

borularının performansına yönelik kalite ihtiyaçları her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, uygulanacak kaynak yöntemi, bu kaynak yöntemine uygun ekipmanlar, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, ilave kaynak metali miktarı, kaynak hızı ve diğer kaynak parametreleri petrol ve doğalgaz hat borularının performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Belirtilen bu faktörlerin tümü kaynak tasarımı çalışmalarının önemini vurgulamaktadır. Farklı yöntemler ve parametreler dâhilinde gerçekleşen kaynak işlemleri farklı performanslar ortaya koymaktadır.

Yüksek basınç uygulamalarına güvenle cevap verilebilecek boruların üretilmesi ve boru hatlarının inşa edilmesinde gerekli kalite seviyesinin yakalanabilmesi için kaynak tekniğinin ve buna bağlı olarak kaynak parametreleri seçiminin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ülkemizde boru fabrikalarında ve boruların birleştirildiği yapım işlerinde, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik-kimyasal özellikleri ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (sertlik ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulamadığı, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile belirlendiği görülmektedir. Kaynak tekniğinin doğru seçilememesi kalite kontrol işlemlerinde alışılmışın dışına çıkılmasını engelleyerek, ya gereksiz yönde fire verilmesine ya da belirli hataların farkına varılamamasına yol açmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı, kaynak güvenirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimliliğin düşmesine hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik sistematik bir yöntemin oluşturulamamasıdır.

Bu tez çalışmasında; bahsedilen eksikliklerin giderilmesine yönelik olarak petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API (American Petroleum Institue) 5L standardında ve X65 kalitesindeki çelik boruların kaynakla birleştirilmesinin Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak, kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik test sonuçlarının (sertlik, tokluk, akma ve çekme dayanımı) elde edilmesi planlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda, API 5L X65 kalitesindeki çelik boruların kaynak performansı araştırılmıştır. Boruların birleştirilme işlemlerinde, boruların saha birleştirmelerinde yaygın olarak tercih edilen yöntem olan örtülü elektrodla ark kaynağı tercih edilmiştir.

Örtülü elektrodla ark kaynağı yöntemi için gerekli parametrelerin Taguchi metodu ile optimizasyonu yapılmıştır. Performans göstergesi olarak her bir kontrol yöntemine uygun girdi parametreleri (akım, kaynak yönü ve elektrod türü) belirlenmiş, belirlenen parametreler ile gerçekleşen birleştirme işlemlerinin mekanik test sonuçları (akma, maksimum çekme, darbe dayanımı ve kaynak metali sertliği) analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre de boruların kaynaklı birleştirilmeleri için gerekli optimizasyon sağlanmıştır.

Kaynaklı birleştirmelerin kendisinden beklenilen lokal özelliklerini yerine getirebilmesi için en uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Doğru parametrelerin seçilmesi için yüzlerce deney yapmak gerekebilir. Bu çalışmada öncelikle, Taguchi metodu yardımıyla daha az deney yaparak, en uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Yine Taguchi metoduyla analizler yapılarak kaynaklı birleştirmelerin nüfuziyet profili ve mekanik test sonuçları optimize edilmiştir. Taguchi metoduyla elde edilen tahminsel sonuçlar, doğrulanan gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılıp, en uygun parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar nedenleriyle beraber tartışılmış, olumlu ve olumsuz yanları daha önceki çalışmalarla ilişkilendirilmiştir.

2. BORU HATLARI, TARİHİ GELİŞİMİ VE DÜNYA - TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ

Enerji dünya politikasına yön veren, hatta sınırların çizilmesinde rol oynayan çok önemli ve stratejik bir güçtür. Dünya üzerinde varlığını sürdürmek isteyen ülkeler sürekli, güvenli, temiz ve ucuz enerji kaynakları temin etmek zorundadır [8]. Toplumların yaşam kalitesinin ve uygarlık seviyesinin, kullandıkları enerji miktarı ile orantılı olduğu kabul edilmektir. Bu kapsamda "enerji=ilerleme=medeniyet" eşitliği kabul görmektedir [9].

Enerji kaynaklarının yeryüzünde eşit olmayan şekilde dağılması, belirli coğrafi bölgelerde daha fazla bulunması bu kaynakların boru hatları ve diğer yöntemlerle taşınmasını zorunlu kılmaktadır. Petrol ve doğalgaz bu bakımdan en önemli taşınabilir kaynaklardır [10]. Boru hatları ise ekonomiye can veren enerjiyi taşıyan damarlar gibidir. Bu nedenle boru hatları, geçtiği ve ulaştığı bölgelerin ekonomik ve politik olarak güçlenmesi ve ilerleyebilmesi için stratejik bir öneme sahiptir. Bu stratejik önem ve değeri sebebiyle; enerji üreten ve tüketen ülkeler, boru hatları politikasında aktif olmaya çalışmakta ve kendileri için kuvvetli bir pozisyon oluşturmaya çalışmaktadır [11]. Bunun yanı sıra enerji güvenliği de günümüzde ulusal ve uluslararası alanlarda üzerinde konuşulan önemli kanunlardan biri olmuştur. Enerji güvenliği; enerjinin sürekli ve güvenilir olarak, temiz ve çeşitli kaynaklardan uygun miktar ve fiyatlarla sağlanması olarak tanımlanmaktadır [9].

Soğuk Savaş'ın bitmesi ile beraber ortaya çıkan politik boşluklar, dünya enerji siyaseti açısından Hazar ve Orta Asya gibi iki önemli petrol ve doğal gaz zengini bölgenin dünya üzerinde paylaşım mücadelesini gündeme getirmiştir. Yeni dönemdeki bu güç rekabeti, iki ana aktör konumundaki Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Rusya çevresinde oluşmakta ve bu iki gücün müttefiklerinin de katılımı ile çok boyutlu bir nitelik kazanmaktadır. Günümüz enerji politikalarında son derece önemli bir yere sahip olan Hazar ve Orta Asya'dan çıkan boru hatlarının olası geçiş güzergâhı, coğrafi konumu ve tarihi birikiminin sağladığı imkânlarla Türkiye'yi, bu yeni dönem mücadelesinin en önemli taraflarından birisi haline getirmektedir. Sahip olduğu enerji kaynaklarını ekonomisinin gelişebilmesi için temel dinamik olarak gören doğu kıyısındaki komşu ülkelerle, gelişmiş ekonomisine dinamiklik sağlamak için çaba gösteren, fakat doğalgaz ve petrol gibi enerji kaynakları yönünden fakir Avrupa ülkeleri arasında kalan Türkiye, birbirine enerji bakımından ihtiyaç duyan bu iki bölge arasındaki konumu ile kendisine siyasal üstünlük

sağlamak için çalışmalar yürütmektedir. Uluslararası konjonktür dikkate alındığında ise; şu anda Avrupa Birliği (AB) için en uygun bölgesel seçeneğin Merkez Asya ve Kafkaslar enerji kaynakları olduğu görülmektedir [8,11]

2.1. Boru Hatlarının Tarihi Gelişimi

İlk boru hatları vidalı borular kullanılarak inşa ediliyordu. İşçiler büyük maşalar yardımıyla bu boruları birbirine vidalıyordu. Yaklaşık olarak 1920'li yıllara kadar iki ayrı borunun birbirine kaynaklanması kabul edilir bir birleştirme yöntemi değildi. Oksi - asetilen kaynağı 1920'li yıllarda ilk kez ortaya çıktı fakat 1920'li yılların sonunda bunun yerini elektrik kaynağı aldı. O zamandan günümüze kadar neredeyse tüm petrol ve doğalgaz boru hatları kaynak işlemi ile birleştirilmektedir. Kaynak teknolojisi yeni boru çeliklerine olan talebe ayak uydurmaktadır. Boru hatlarının uzunluğunun ve boru çaplarının artması kaynak teknolojisine olan ihtiyacı da arttırmaktadır[7].

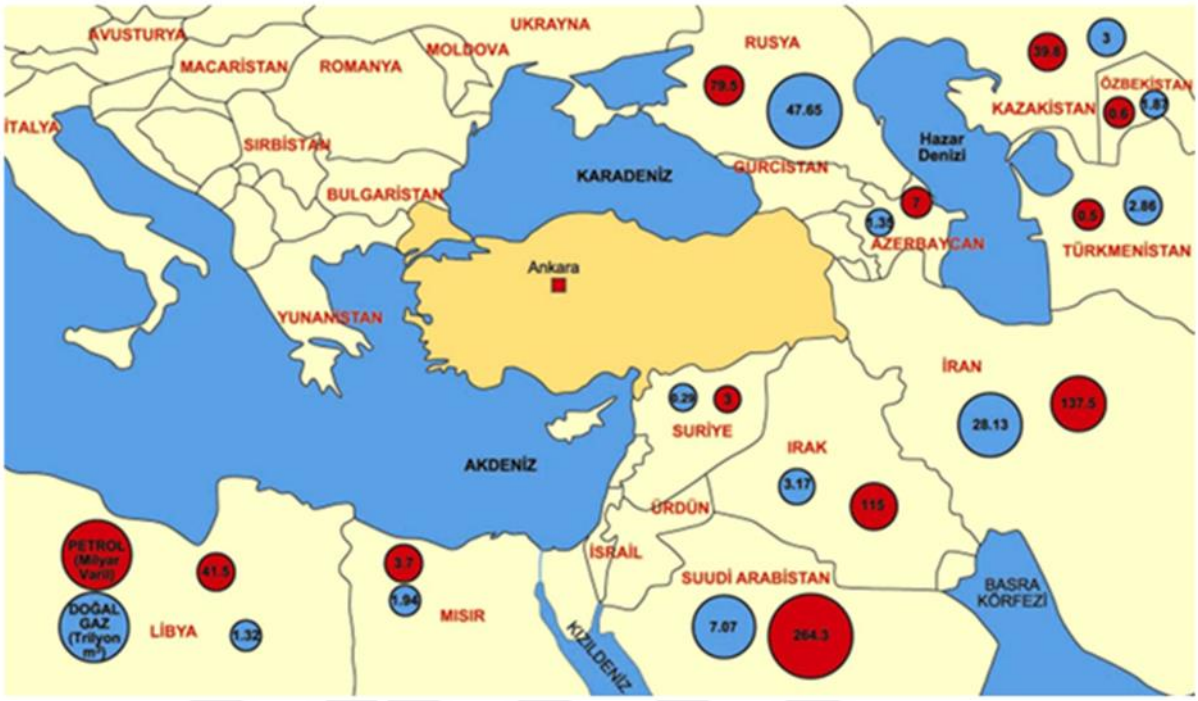
Boru hatları asırlar öncesinde yerleşim yerlerine, şehirlere ve köylere su taşıyordu. Bugün kullanılan doğalgaz ve petrol boru hatlarının tarihi, ekonomik değeri olan ilk petrol kuyusunun 1859 yılında Pensilvanya'da açılmasından sonra başlamıştır. Bundan dolayı, 1859 yılından bu yana, gaz ve petrolün keşfedilmesine ve pazarın büyüdüğü yere bağlı olarak binlerce kilometrelik boru hattı döşenmektedir. 109 mil uzunluk ve 6 inç çapa sahip ilk şehirlerarası petrol boru hattı 1879 yılında Pensilvanya'da Bradford ile Allentown arasına döşenmiştir. 1886 yılında 87 mil uzunluk ve 8 inç çapa sahip doğalgaz boru hattı Pensilvanya - Kane ile Newyork - Buffalo arasında inşa edilmiştir. 1890'lı yılların başlarında boru hattı inşası gittikçe büyümeye başlamıştı. 1906 yılında Oklahama ile Teksas arasına döşenmiş 472 mil uzunluğuna 8 inç çapa sahip boru hattı zamanın teknolojisine meydan okumaktaydı [7].

İkinci Dünya Savaşı esnasında tankerlerle petrol taşıma işleminin kesintiye uğramasından dolayı ABD'de petrolün uzak mesafelere boru hatlarıyla taşınmasında ciddi bir patlama meydana gelmişti. ABD'nin güneybatısındaki kıyılardan doğu kıyılarına petrolün taşınması gerekiyordu, bunun için iki boru hattı inşa edildi. Bunlardan birincisi 1250 mil uzunluğunda 24 inç çapındaki ham petrol taşıma hattı, ikincisi ise 1470 mil uzunluğunda 20 inç çapındaki petrol ürünlerini taşıma hattı idi. Aynı zamanlarda, hükümetin sahip olduğu boru hatları inşa edildi. Tennessee Gaz Şirketi güneybatı ile doğu kıyıları

arasındaki 1265 mil uzunluğuna sahip 24 inç çapındaki doğalgaz boru hattını hükümet için döşedi. 1947 yılında Teksas Eastern hükümetin boru hattını satın aldı ve elektrik motorlarını santrifüj kompresörlere bağlayarak petrol boru hattını doğalgaz boru hattına dönüştürdü. 1950'li yıllarda dünyanın diğer bölgelerinde de boru hattı ağları gelişiyordu. Yirminci yüzyılın başlarında Rusya'da petrolün bulunması dünya pazarında çok önemli rol oynadı. Yirminci yüzyılın ortalarında Sibirya'da çok büyük oranda petrol bulundu ve Sovyetler Birliğinde çok uzak mesafeler boyunca çok çetin arazilerden petrol boru hatları döşendi. 1960'lı yıllarda Sovyetler Birliği doğalgaz boru hattı sistemi kurmaya başladı. Bu sistem 1990'lı yılların başlarında 126.000 mil uzunluğunda 40–55 inç arasında değişen çapa sahip ana hattan oluşmaktaydı. 1950'li yılların başlarında büyük boru hatları Kanada'da döşenmeye başladı. Aynı zamanlarda, Trans Arabian boru hattı inşa edildi. Petrolün, doğalgazın ve diğer ürünlerin müşteriye ulaştırılmasında en verimli ve en ekonomik yolun boru hatları ile taşımacılık olduğunun anlaşılmasıyla birlikte dünya boru hattı ağlarında ciddi bir yükselme meydana gelmeye başladı. Bugün dünyada her yıl kilometrelerce boru hattı inşa edilmektedir. İnşa edilen boru hattının miktarı petrol ve doğalgazın bulunmasına, bunların yerlerine ve pazarın büyüdüğü yere bağlıdır [7].

2.2. Türkiye'nin Coğrafi Konumunun Boru Hatları Siyasetine Etkileri

Türkiye, topraklarının bulunduğu coğrafya nedeniyle, dünya güç dengelerini etkileyecek düzeyde sürekli ve çok yönlü menfaat çatışmalarına sahne olan hassas bir konumdadır. Petrol ve doğal gaz kaynakları açısından fakir ve dışa bağımlı bir ülke olan Türkiye'nin üç tarafı, bu enerji kaynakları açısından zengin ve ihracatçı ülkelerle çevrilidir. Bu hassas konum ile Türkiye; Avrupa, Asya ve Afrika kıtalarının düğüm noktasındadır. Bu nedenle de doğu-batı ve kuzey-güney eksenleri üzerinde bir köprü özelliği taşımaktadır [11-13]. Bu köprü konumu, tüm karasal ulaşım faaliyetleri için geçerli olduğu gibi enerji kaynaklarının transferi için de geçerli olabilme potansiyeline sahiptir. Çünkü Türkiye, enerji zengini Hazar ve Ortadoğu ülkeleri ile enerji fakiri; fakat enerji tüketimi çok yüksek olan Avrupa ülkeleri arasındaki en kısa mesafeli karasal bağlantıya sahip olan ülkedir [11,13].



Harita 2.1. Türkiye'nin yakın çevresindeki ülkelerin petrol ve doğal gaz rezerv dağılımı [14]

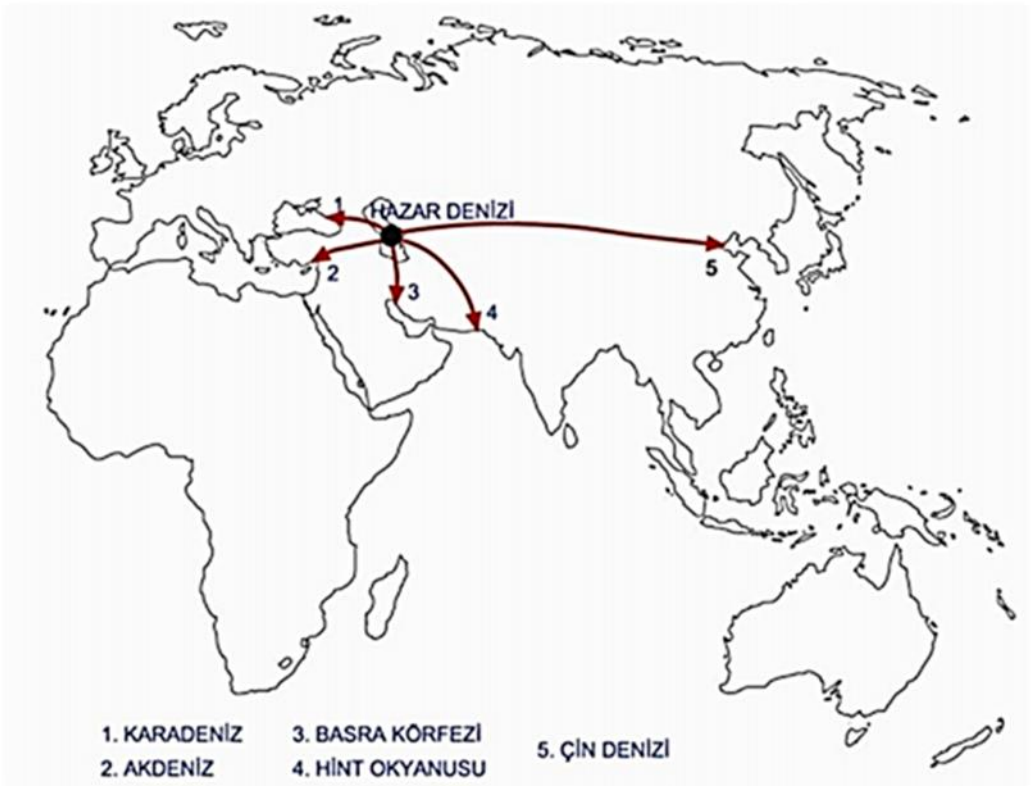
Stratejik bir geçiş ülkesi olan Türkiye aynı zamanda enerji pazarı olmaya da aday bir ülkedir. Bu nedenle petrol ve doğal gaz ithalatlarında kaynak çeşitliliği, arz güvenliği ve arz sürekliliğinin sağlanabilmesi açısından geniş kapsamlı enerji taşıma projelerinin geliştirilmesi, Türkiye için çok büyük önem taşımaktadır. Ortadoğu ve Hazar Bölgesi'ni, Akdeniz'e, Balkanlar'a ve Avrupa'ya bağlayan neredeyse tüm kara ve deniz güzergâhları Türkiye'den geçmektedir. Coğrafi konum, siyasi istikrar, yüksek tüketim düzeyi ve güvenlik, işletme garantisi vb. faktörler özellikle Orta Doğu, Orta Asya ve Güney Afrika'da üretilen doğal gazın depolanması, kullanımı ve Avrupa'ya ihracı açısından da Türkiye'yi en güvenli ve uygun çekim merkezlerinden biri haline getirmektedir. Türkiye, Hazar Denizi petrollerinin ve doğal gaz rezervlerinin uluslararası pazarlara açılmış olması sonucunda, üretim ve özellikle dağıtımından pay alma fırsatını da yakalamıştır [13,15].

Dünyadaki petrol ve gazın % 70'ine sahip olan ülkeler, Türkiye'nin doğusunda, kuzeyinde ve güneyinde yer almaktadır [16]. Bu durum, Türkiye'ye doğu - batı ve kuzey - güney yönlü boru hatlarının geçiş güzergâhı olabilme konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra deniz olan bölgelerden geçen boru hatlarının, karasal alanlardan geçen boru hatlarına göre daha maliyetli olması da Türkiye'yi daha tercih edilebilir kılmaktadır. Coğrafi konumunun verdiği imkânlarla Türkiye, Kuzey Afrika, Ortadoğu, Orta Asya ve

Hazar Havzası ülkeleri ile ilgili boru hattı projelerinin içinde yer almaktadır. Bu nedenle enerji kaynaklarının boru hatları ile taşınması mücadelesinin ağırlıklı olarak Orta Asya ve Hazar Havzası merkezli sürdüğü söylenebilir [11,13].

Hazar bölgesi, Türkiye'nin artan enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik önemli bir petrol ve doğalgaz kaynağı durumundadır. Türkiye özellikle Hazar petrollerini Bakü'den Akdeniz kıyısındaki Ceyhan'a taşıma konusunda kararlıdır. Bu boru hattı sadece Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp aynı zamanda bölgedeki jeopolitik nüfusunun da artmasına katkıda bulunacaktır [13,17].

Orta Asya ve Hazar ülkelerinin açık denizlere çıkışının olmamasının yanında dünyanın önemli enerji pazarlarına da uzak olması, bölgedeki petrolün boru hatları ile taşınmasını zorunlu hale getirmektedir. Bölge için en kritik soru da tam bu noktada ortaya çıkmaktadır: Bölgenin petrol kaynakları hangi güzergâhtan taşınmalıdır? [11].



Harita 2.2. Hazar petrolleri için muhtemel taşıma güzergâhları [18]

Petrol sahalarından denize ulaşacak uluslararası boru hatlarının hangi yollardan geçeceğini belirlemek karmaşık bir süreçtir. En tercih edilen durum, boru hattının geçeceği güzergâhın

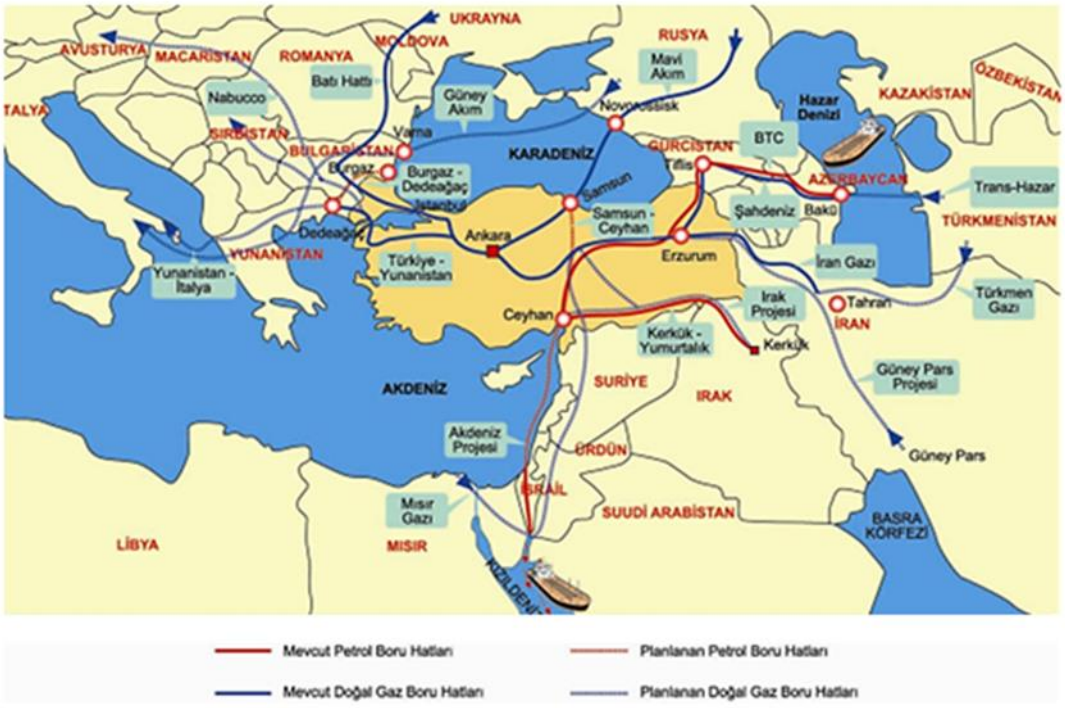
ekonomik, güvenli ve istikrarlı alanları takip etmesidir. Bu açıdan bakıldığında Hazar Havzası'nın petrolünü taşıyacak muhtemel boru hattı güzergâhlarının neredeyse tamamının önemli sorunlar taşıdığı gözlenmektedir. Bugün ülkeler beş önemli coğrafi bölge olan, Karadeniz, Akdeniz, Basra körfezi, Hint Okyanusu ve Çin denizine petrolü çekebilmek için birbirleri ile yarışmaktadırlar. Akdeniz'i Hazar Denizi'nin Azeri petrolleri, Karadeniz'i ise Hazar Denizi'nin doğusundaki Kazak petrolleri diğer coğrafyalara göre daha çok ön plana çıkarmaktadır. Ancak Karadeniz, dünyaya açılan bir çıkış noktası değil, bir ara bölge ve bir çıkış yoludur. Ulaşılması istenen deniz, dünya petrolünün 1/6'sını taşıyan Akdeniz'dir. Hazar petrollerinin taşınmasında gündeme getirilen en gerçekçi güzergâh Akdeniz yönüdür. Bölge petrollerinin Türkiye üzerinden Akdeniz'e indirilmesini öngören bu güzergâhın alternatiflerine oranla daha istikrarlı ve güvenli bölgelerden geçmesi, boğazları baypas etmesi ve en önemlisi petrolü, dünyada en fazla petrol taşınan deniz olan Akdeniz'e doğrudan indirmesi en büyük avantajlarıdır. Akdeniz güzergâhı, Çin Denizi güzergâhından daha kısa ve ekonomik, Hint Okyanusu güzergâhından daha güvenli, Basra Körfezi güzergâhına göre politik anlamda daha gerçekçi ve Karadeniz güzergâhına göre ise petrolün taşınma süresi açısından daha elverişli konumdadır [11,13,19,20].

Akdeniz güzergâhı, Basra Körfezi ve Karadeniz güzergâhlarına göre daha uzun mesafeli boru hattı yapımını gerektirse bile boru hattının ulaştığı limanlar göz önüne alındığında diğer güzergâhlara göre daha avantajlıdır. Dünyada petrol taşımacılığının en yoğun olduğu Akdeniz'in Atlas Okyanusu çıkışı olan Cebel-i Tarık Boğazı dikkate alındığında, Ceyhan Limanı'ndan çıkış yapan bir petrol tankeri, Basra Körfezi güzergâhının varış noktası olan Abadan Limanı'ndan ve Karadeniz güzergâhının varış noktası olan Novorossisk Limanı'ndan çıkış yapan petrol tankerlerine göre çok daha kısa mesafe kat etmektedir. Bu durum, Güney ve Batı Avrupa ile Okyanus ötesi ülkelere yapılacak petrol transferinin süresini kısaltmaktadır. Ayrıca Abadan Limanı'ndan petrol yüklenen bir tankerin Akdeniz'e çıkmak için Süveyş Kanalı'nı geçme zorunluluğu, Basra Körfezi güzergâhı için bir başka olumsuzluktur. Çünkü son yıllarda Aden Körfezi açıklarında Somalili korsanların petrol tankerlerine yönelik saldırıları, güvenlik sorunlarına neden olmakta ve Akdeniz'e yönelik petrol taşımacılığını olumsuz etkilemektedir. Buna karşılık, BTC ve Kerkük-Yumurtalık petrol boru hatlarının varış noktası olan Ceyhan Limanı, ilerleyen dönemde BTC boru hattına eklenebilecek Kazak petrolleri ve Karadeniz'e çıkarılacak petrolü boğazları baypas ederek taşıması planlanan Samsun - Ceyhan petrol boru hattının da devreye girmesi ile önemli bir enerji merkezi haline gelmektedir [21].

Türkiye'nin; özellikle Orta Doğu, Hazar Havzası ve Orta Asya'nın zengin enerji kaynaklarının ulaştırılmasında önemli bir ülke konumunda olabileceği düşünülmektedir. Bölge petrollerinin dünya piyasalarına ulaştırılması amacıyla inşa edilecek farklı ihraç boru hatlarının, bölgedeki tek bağımsız devlet olan Türkiye üzerinden geçirilmesi, ortaya çıkma ihtimali olan olumsuz bir durumun henüz başlangıçta saf dışı bırakılmasını mümkün kılacaktır. Bu açıdan Türkiye güvenlik koridorunun en önemli parçasını oluşturarak; "enerji arz güvenliği" konusunda da önemli bir yer konumunda olabilecektir. Bugün, yeni enerji haritalarını incelediğimizde ülkeleri bir ağ gibi kaplayan, sınırları çoktan aşmış olan, üstelik mevcut boru hattı sistemlerinden daha yaygın şekilde kendini belli eden "planlanan" boru hattı sistemleriyle karşılaşmaktayız. Burada en fazla göze çarpan bölgeler, dünya ispatlanmış doğalgaz rezervlerinin yaklaşık %40'ına, petrol rezervlerinin ise %67'sine sahip olan Orta Doğu ve Orta Asya ile yoğun talep eden Batı ülkeleri arasında doğal bir köprü konumunda bulunan Türkiye'dir [13,19].

Türkiye, içinde bulunduğu coğrafi konumdan dolayı petrol üreten ülkelerle, tüketici ülkeler arasında geçiş ülkesidir. Bu nedenle Türkiye'nin başta Avrupa olmak üzere dünya küresel pazarlarına petrol ihraç etmek gibi stratejik bir hedefi bulunmaktadır. Türkiye enerji tüketiminde dünya ortalamasının altında ve enerji alanında %80 dışa bağımlı olmasına rağmen Hazar petrolleri için önemli bir pazardır. 21.yy da enerji açığının daha da artacağı düşünülürse, Türkiye, Bakü Tiflis Ceyhan (BTC) boru hattı ile petrolün taşıma maliyetini en aza indirerek ucuz petrol temin edecek ve bu yolla iç tüketimindeki petrol açığını kapatacaktır. BTC projesi, petrol ve gaz açısından tüm tüketici ülkelere olduğu gibi Türkiye'ye de yeni seçenekler sunarak enerji kaynaklarını çeşitlendirmesini sağlayacaktır [13,21].

Türkiye, tarih boyunca kıtalar arası transit taşımacılık açısından büyük öneme sahip olmuş ve bu özelliğini günümüzde de devam ettirmiştir. Ayrıca Türkiye, Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nin (SSCB) dağılması ile Hazar ve Orta Asya enerji kaynaklarının Rusya dışında bir güzergâhtan taşınabileceği tek yol haline gelmiştir. Bu yönüyle de Türkiye, stratejik bir değere ulaşmıştır. Rusya'ya alternatif taşıma hatları sağlamak isteyen AB, son yıllarda özellikle doğal gaz boru hatlarının gerçekleştirilmesi için enerji transferinde en az masraflı, en güvenli ve en kestirme yolu sağlayan Türkiye ile işbirliği çabalarını artırmıştır [11,13,21,22,23].



Harita 2.3. Türkiye'nin hinterlandında yer alan boru hattı projeleri [11]

Rusya'ya, doğal gaz tedariki konusunda bağımlı olan AB, Türkiye üzerinden Hazar ve Ortadoğu doğal gazına ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla Türkiye ile AB, ilk olarak Azeri doğal gazını Türkiye üzerinden Yunanistan'a ulaştıran ve ilerleyen dönemde İtalya'ya kadar uzatılması planlanan Türkiye-Yunanistan doğal gaz boru hattı projesini hayata geçirmiştir. AB'nin doğal gaz temininde stratejik bir hedef olarak gördüğü ve Temmuz 2009'da "Hükümetlerarası Anlaşma" imzalanan 31 milyar metreküplük Nabucco doğal gaz boru hattı projesi ile ilgili çalışmalar da hala devam etmektedir. Bu proje, Türkiye'nin coğrafi konumunun sağladığı avantajlarla öncelikle Hazar olmak üzere, Ortadoğu ve Kuzey Afrika gazının Anadolu üzerinden Avrupa'ya taşınmasını amaçlamaktadır [11,13,23].

Kerkük - Yumurtalık hattı ile Irak petrollerine, BTC hattı ile Azeri petrollerine ulaşan Türkiye, Batı hattı ve Mavi Akım hatları ile Rus doğal gazını, Bakü Tiflis Erzurum (BTE) hattı ile Azeri doğal gazını ve İran-Türkiye hattı ile de İran doğal gazını tedarik etme imkânına kavuşmuştur. Gerçekleşen bu projelerin yanı sıra Türkiye, Samsun-Ceyhan petrol boru hattı ile Kazak ve Rus petrollerinin, Nabucco doğal gaz boru hattı ile Türkmenistan, Irak, İran ve Mısır doğal gazının transit geçiş ülkesi olma imkânına da sahiptir [19].

Sahip olduğu bu potansiyel ışığında Türkiye, Soğuk Savaş sonrası dönemde coğrafi konumunun zorladığı çok taraflı geliştireceği politikalarla enerji köprüsü olmak yerine enerji merkezi olma yönünde stratejiler geliştirebilme imkânını taşımaktadır. Bunun için Türkiye'nin elindeki en önemli argüman ise enerji üreticisi Kuzey Afrika, Ortadoğu, Orta Asya ve Hazar Havzası ile dev bir enerji tüketicisi olan Avrupa'ya hakim coğrafi konumudur [19,21,22,23].

2.3. Türkiye'nin Boru Hatları Seçiminde Avantajlı Durumları

2.3.1. Enerji güzergâhlarına göre konumu

Türkiye, doğudaki çok zengin petrol ve doğal gaz kaynaklarıyla batıdaki çok büyük tüketici bölgelerinin geçiş noktasında yer almaktadır. Aynı şekilde Türkiye, Karadeniz çıkışlı enerji kaynaklarının güneye taşınma güzergâhının da merkezinde bulunmaktadır. Bu özelliğiyle doğu-batı ve kuzey-güney yönlü boru hatlarının geçiş güzergâhında bulunan Türkiye, enerji transferini kolaylaştırıcı bir konuma sahiptir. Denize çıkışı olmayan Hazar ve Orta Asya petrollerinin batıya taşınmasında en uygun güzergâh üzerinde bulunan Türkiye, bu özelliği ile doğalgaz ve petrol boru hatları için stratejik bir değer ifade etmektedir [11,13,17].



Harita 2.4. Türkiye'nin hinterlandında yer alan petrol boru hattı projeleri [11]

Boru hatlarının geçişi için elverişli bir konuma sahip olan Türkiye, tarihinde gerçekleştirdiği ilk boru hattı olan Kerkük-Yumurtalık ile Hazar petrolünü ilk defa Rusya'nın kontrolü dışındaki bir güzergâhtan taşımaya olanak sağlayan BTC boru hatlarına transit geçiş imkânı sağlamaktadır. Gerçekleştirilen bu hatların yanı sıra Türkiye, Kazak petrollerinin BTC'ye eklenmesi, Karadeniz'e çıkış yapan petrollerin boğazları baypas ederek geçişini sağlayacak Samsun-Ceyhan hattı ve Ceyhan'a ulaştırılacak petrollerin İsrail üzerinden Hint Okyanusu'na ulaştırılmasını sağlayacak Akdeniz boru hattı projesi için de elverişli şartlar sunmaktadır [11,13,17].

Türkiye'nin doğusundaki büyük doğal gaz üreticileri ile batısındaki büyük doğal gaz tüketicileri arasında geliştirilmeye çalışılan enerji güzergâhları üzerinde yer alması da enerji alanındaki bir diğer üstün tarafıdır [11,13].



Harita 2.5. Türkiye'nin hinterlandında yer alan doğal gaz boru hattı projeleri [11]

Türkiye, kendi doğal gaz ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak Rus gazını taşıyan Batı hattı ile Mavi Akım hattını, Azeri gazını taşıyan BTE (Şahdeniz) hattını, Azeri gazını Yunanistan'a ulaştıran Türkiye-Yunanistan hattını ve İran gazını taşıyan İran-Türkiye hattını işletmeye almıştır. Ayrıca Hazar, Ortadoğu ve Kuzey Afrika doğal gazlarının taşınmasında kavşak özelliğindeki Türkiye, bu yönü ile Mısır, Irak ve İran gazını taşıyacak hatlar ile bu hatların ilerleyen dönemde bağlanması düşünülen ve AB'nin Rusya'ya doğal gaz bağımlılığını düşürecek olan Nabucco hattı için de stratejik bir değer ifade etmektedir.

Çünkü Türkiye, Avrupa'ya ulaştırılacak doğal gaz için en uygun ve en ucuz güzergâh üzerinde yer almaktadır [11,13].

2.3.2. Önemli bir ithalatçı ülke olması

Boru hatları ekonominin ihtiyaç duyduğu enerjiyi taşıyan stratejik değerdeki transfer yollarıdır. Bu nedenle boru hatlarının geçiş güzergâhları belirlenirken dikkat edilen en önemli hususlardan biri de boru hatlarının enerji tüketiminin yüksek olduğu ülkelere ulaşması ya da geçmesidir. Böylelikle enerji şirketleri yapım maliyeti yüksek olan boru hatlarının işletme şartlarını uygun hale getirmeye çalışmaktadır. Bu anlamda Türkiye, dinamik nüfusu ve gelişen ekonomisine bağlı olarak sürekli artan enerji tüketimi ve Avrupa'nın en hızlı büyüyen doğal gaz pazarı olma özelliği ile boru hatlarının geçişi için elverişli şartlar sunmaktadır [11].

Çizelge 2.1 Türkiye'nin yıllara göre enerji talebi [24]

Yıl	Enerji Talebi (GWh)	Artış (%)
2007	188.343	8,1
2008	203.787	8,2
2009	220.701	8,3
2010	239.019	8,3
2011	258.858	8,3
2012	280.084	8,2
2013	302.491	8,0
2014	326.388	7,9
2015	351.846	7,8
2016	378.234	7,5

Türkiye'nin enerji tüketiminin önümüzde yıllarda sürekli olarak artacağı beklentisi ve ülkemizde elektriğin yaklaşık yarısının doğal gaz çevrim santrallerinden sağlandığı dikkate alındığında, Türkiye özellikle doğal gaz boru hatlarının geçişi için cazip bir ülke özelliği göstermektedir [13].

2.3.3. Uluslararası sisteme entegre siyasi yapısı

Dünyada enerji piyasasına yön veren, gelişmiş teknolojik imkânlara sahip olan şirketler ve işletmeler ağırlıklı olarak Batı dünyasının parçalarıdır. Bu şirketler bizim hinterlandımızda yer alan Hazar ve Ortadoğu bölgelerindeki üretim alanlarında gerçekleştirdikleri faaliyetler ile boru hatlarının güzergâhının belirlenmesinde önemli oranda etken durumdadır. Aynı zamanda büyük tüketici konumundaki Batı dünyası ile Türkiye'nin uzun süreli müttefikliği, ülkemizdeki demokrasinin ve hukuk sisteminin alternatif ülkelere göre daha gelişmiş olması, Türkiye'ye boru hatlarının geçişi konusunda olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu yönleri ile Türkiye, bulunduğumuz coğrafya içinde Batı için İran ve Rusya'ya göre daha güvenilir bir partner özelliği taşımaktadır. Ayrıca Türkiye'nin Hazar ve Orta Asya petrol ve doğal gazını kontrol etmek gibi bir hedefinin olmaması da ülkemizi hem enerji arz eden hem de talep eden ülkeler açısından tercih edilir kılmaktadır. Avrupa ve ABD açısından "güvenilir bir ortak" olarak görülen Türkiye, Batılı enerji şirketleri ile çeşitli petrol boru hattı projeleri geliştirmiştir [11].

Çizelge 2.2. Türkiye'nin hinterlandında yer alan petrol boru hattı projelerinin özellikleri [11]

Boru Hattı Projesi	Güzergah	Kapasite (milyon ton/yıl)	Uzunluk (km)	Tahmini Maliyet ($)	Durum
BTC	Bakü' den başlayıp Gürcistan üzerinden Ceyhan'a	50	1760	3-3,5 milyar	Mayıs 2006' dan itibaren devrede
Kerkük-Yumurtalık	Kerkük'ten Yumurtalık'a (Ceyhan)	70,9 (iki hat toplamı)	1876 (iki hat toplamı)	…..	1976 yılından itibaren devrede
Samsun-Ceyhan (Trans Anadolu)	Samsun'dan Ceyhan'a	70	550	2 milyar	2010' da işletmeye alınması hedefleniyor.
Burgaz-Dedeağaç	Novorossisk limanından tankerlerle Burgaz'dan geçerek Dedeağaç' a	50	288	1,1 milyar	2010' da işletmeye alınması hedefleniyor.
Akdeniz (Med Stream)	Ceyhan üzerinden İsrail'e	40	610	1-1,5 milyar	2011' de işletmeye alınması hedefleniyor.

Türkiye, işletmeye alınan BTC boru hattında İngiliz enerji şirketi BP, yapım çalışmaları devam eden Samsun-Ceyhan boru hattında İtalyan enerji şirketi ENI ve Akdeniz (Med Stream) boru hattında ise İsrailli enerji şirketleri ile işbirliği yapmaktadır. Türkiye, farklı

ülkelerle geliştirebildiği ortaklıkları sayesinde doğal gaz boru hattı projelerinde de önemli mesafeler almıştır. Öncelikle kendi arz güvenliğini sağlamaya yönelik ortaklıklar kuran Türkiye, son dönemlerde tedarikçi çeşitlendirme çalışmalarının yanı sıra transit geçiş ülkesi olma yönünde de girişimlerde bulunmaktadır [11].

Çizelge 2.3. Türkiye'nin hinterlandında yer alan doğal gaz boru hattı projelerinin özellikleri [11]

Boru Hattı Projesi	Güzergah	Kapasite (milyar m^3/yıl)	Uzunluk (km)	Tahmini Maliyet ($)	Durum
Batı Hattı	Rusya, Ukrayna, Moldova, Romanya ve Bulgaristan' dan geçerek Türkiye' ye	14	842	…..	1987 yılından itibaren devrede
Mavi Akım	Rusya' dan Karadeniz'i geçerek Samsun' dan Ankara' ya	16	1265	3,5 milyar	2005 yılından itibaren devrede
Şah Deniz (BTE)	Bakü' den başlayıp Gürcistan üzerinden Erzurum' a	6.6	225	1 milyar	Temmuz 2007' den itibaren devrede
Türkiye-Yunanistan	Bakü' den başlayıp Gürcistan, Erzurum üzerinden Yunanistan' a	3 (İtalya' ya ulaştığında 8)	300	144 milyon	Kasım 2007' den itibaren devrede
İran-Türkiye	İran' dan başlayıp Doğubayazıt'tan Ankara' ya	10	850	…..	2003 yılından itibaren devrede
Nabucco	Türkiye' nin doğusundan başlayıp Bulgaristan, Romanya, Macaristan üzerinden Avusturya' ya	31	3300	11,6 milyar	2014' te işletmeye alınması hedefleniyor.
Irak-Türkiye	Bağdat' ın kuzeyinden Anada- Yumurtalık' a	10	1000 (tahmini)	Belirsiz	Belirsiz
Güney Akım	Karadeniz' den geçerek Bulgaristan' dan Avrupa' nın kuzeyi ve güneyine	30	9000	10 milyar	2010' da işletmeye alınması hedefleniyor.
Trans-Hazar	Türkmeniztan' dan Hazar geçişi ile Azerbaycan, Gürcistan üzerinden Türkiye ve Avrupaya	30	1641	3-4 milyar	Belirsiz

Türkiye, 2005 yılına kadar olan dönemde en büyük doğal gaz tedarikçisi olan Rusya ile Batı hattı ve Mavi Akım projelerini ve ikinci büyük doğal gaz tedarikçisi olan İran'la da İran-Türkiye projelerini gerçekleştirmiştir. 2005 sonrası dönemde ise Türkiye, arz kaynaklarını çeşitlendirmek ve Hazar gazının Avrupa'ya taşınması konusunda Batılı ülkeler ve enerji şirketleri ile işbirliği çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu çalışmaların ilk ürünü olan Türkiye-Yunanistan doğal gaz boru hattının ilerleyen dönemde İtalya'ya kadar uzatılması planlanmaktadır. Gerçekleşen bu projelerin yanı sıra Türkiye'nin çalışmaların sürdürüldüğü diğer doğal gaz boru hattı projelerinde de ortaklıkları bulunmaktadır. Bu

projeler içinde şüphesiz en dikkat çekici olan ve gerçekleşmesi yönünde önemli mesafe alınan, 31 milyar metreküp kapasiteli, Hazar gazını Avrupa'ya taşımayı amaçlayan Nabucco doğal gaz boru hattı, projesidir. Ayrıca Türkiye, Irak gazını ve Türkmen gazını taşıması planlanan boru hattı projelerinin de bir ayağını oluşturmaktadır. Ancak Irak'taki istikrarsız yapı ve Hazar'ın statü sorunu bu iki projenin ilerlemesi yönünde ciddi engeller oluşturmaktadır [11].

Türkiye'nin petrol boru hattı projelerinde olduğu gibi doğal gaz boru hattı projelerinde de ortaklık kurduğu enerji şirketleri ağırlıklı olarak Batılı ülkelere aittir. Türkiye BTE (Şahdeniz) boru hattının işletmesinde İngiliz BP şirketi ile Nabucco boru hattının devam eden çalışmalarında ise Bulgargaz (Bulgaristan), Transgaz (Romanya), OMW Erdgas (Avusturya), MOL (Macaristan) ve RWE (Almanya) şirketleri ile ortaklık yapmaktadır.

Sonuç olarak Türkiye, şu an tartışması süren yukarıdaki petrol ve doğalgaz boru hatları inşa edilirse, küresel petrol ihracatının % 10'nun ve dünyada boru hatlarıyla gerçekleşen doğal gaz ihracatının % 15'inin kendi topraklarından geçtiğine şahit olacaktır [11].

2.3.4. İşletme şartlarının uygunluğu

Türkiye'nin müteahhitlik ve mühendislik hizmetleri alanındaki tecrübe birikimi boru hatlarının yapımı ve işletilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca işbirliği yapılan yabancı enerji şirketlerinden modern yöntemler ve teknoloji sağlanması da Türkiye'nin işletme imkânlarını geliştirmiştir. Bu ilerlemelerle limanlardaki enerji terminallerine yapılan ve yapılması planlanan yatırımların, işletme imkânlarını daha da geliştireceği söylenebilir. Türkiye'nin işletme şartlarının uygunluğu konusundaki en önemli argümanlardan birisi de Ceyhan Terminali'nin varlığıdır. Bu liman, Novorossisk Limanı gibi alternatiflerine göre, çok büyük tankerlerin yanaşabileceği derinliğe sahip olması, iklim şartlarının uygunluğu nedeniyle neredeyse yıl boyunca işletilebilmesi ve kendisine ulaştırılan petrolü Akdeniz'e doğrudan indirebilmesi gibi özellikleri ile büyük üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca Türkiye'nin Ukrayna ve Rusya'da görülen işletme sorunlarını yaşamaması da bu anlamda çekiciliğini artıran bir başka faktördür. Türkiye, sahip olduğu bu işletme şartları ile transit ülke olma, enerji merkezi olma ve boru hatlarının güvenliğini büyük ölçüde sağlayabilme imkânlarını içinde barındırmaktadır [11].

2.3.5. Boğazlar

Türkiye'nin İstanbul ve Çanakkale boğazlarına sahip olması jeopolitik önemine katkı sağladığı gibi yapımı planlanan boru hatlarının ülkemiz üzerinden geçmesi mücadelesinde de elini güçlendirmektedir. Boğazlar, sahip oldukları jeomorfolojik ve hidrografik özellikleri ile gemi geçişleri açısından hem ekonomik açıdan hem de zaman açısından büyük zorluklar barındırmaktadır. Bu coğrafi zorluklara Türkiye'nin 1 Temmuz 1994'te uygulamaya koyduğu yeni Boğazlar Tüzüğü ile getirdiği tehlikeli yük taşıyan gemilerin geçişini zorlaştırıcı düzenlemeler de eklendiğinde Boğazlar, petrol taşımacılığı için ekonomik ve pratik olmayan bir suyolu özelliğine bürünmüştür. Bu nedenle Boğazları baypas etmeye yönelik gündeme getirilen doğalgaz ve petrol boru hatları için Türkiye, alternatiflerine göre avantajlı konuma gelmektedir [11].

3. API BORULARI (DOĞALGAZ VE PETROL BORULARI)

International Energy Agency'nin (IEA), 1998 yılında yaptığı bir araştırmada, dünya genelinde 2020 yılında, 1970'de tüketilen enerjinin yaklaşık üç katının tüketileceği bildirilmektedir [2]. 2015 yılında yapılan başka bir araştırmada ise dünya enerji talebinin 2013 ve 2040 yılları arasında, dünya nüfusunun artması ve gelişmekte olan ülkelerin katkısıyla 1/3 oranında artacağı ifade edilmektedir [3]. Böylesine hem ekonomik, hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın bulundukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerinse kullanım yerlerine taşınmaları gereklidir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise ancak büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır [6,7].

Boru hattı sistemleri; gaz, petrol ya da buhar gibi akışkan ürünlerin güvenli bir şekilde taşınması işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Doğalgaz ve petrol taşımacılığında kullanılan boru hatları; toprak kayması, göçük gibi dış kuvvetlerin sebep olduğu plastik deformasyona maruz kalabilir. Bu nedenle boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemlerinin, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [6,25-33].

Doğalgaz boru hatları toplama hattı, iletim hattı ve dağıtım hattı olmak üzere üç grupta toplanır. Gaz toplama boru hattı, kuyudan çıkarılan gazı gaz işleme tesislerine veya daha büyük toplama tesislerine taşır. Gaz iletim boru hattı, kuyulardan çıkarılmış ve işlenmiş temiz, kuru doğalgaz bu hat vasıtasıyla dağıtım bölgelerine, fabrika ve bireysel kullanıcılara taşır. Gaz boru hatlarında gazın hareket ettirilmesi kompresörlerle yapılır ve yüksek basınçlarda çalıştırılırlar [7,34-36].

Boru hattı yapımında kullanılan çelik boruları kazık ve muhafaza olarak kullanılan veya petrol ve gaz kuyularının açılmasında kullanılan çelik borulardan ayırt etmek için hat borusu olarak adlandırılırlar. Hat boruları diğer borulardan farklıdır. Korozyonun azaltılması için hat borularına genellikle iç ve dış yüzeyden kaplama uygulanır [34, 36]. Hat boruları çok farklı çaplarda ve boyutlarda imal edilebilir. Ayrıca farklı bileşime ve mekanik özelliklere sahip çeliklerden birçok farklı yöntem kullanılarak imal edilebilirler [7,34-36].

3.1. Hat Borularının İmal Usulleri

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institue) standardına göre üretilmektedir [37]. Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından yayınlanmakta olan API 5L standardında öngörülen boru ve çelik malzemeler, tüm dünyada petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılmaktadır. API 5L standardı ürün spesifikasyon seviyesi & hizmet koşulları için malzemelerin teslim koşulunu (kara, deniz aşırı, asidik ortam, vb. gibi) ve çelik kalitelerini (normalleştirilmiş, su verilmiş, termomekanik olarak haddelenmiş vb. gibi) tanımlamaktadır. Bu standart, dikişsiz ve dikişli boruları kapsamaktadır. Dikişli borular genellikle ark kaynak yöntemleri ile boyuna ve spiral dikişli olarak üretilirler. API Spec. 5L; A, B ve X kalite gruplarını ihtiva etmektedir [36,38].

Tüm API hat boruları Psi olarak verilen minimum akma mukavemetleri ile gösterilir. Akma mukavemeti çelik muayene numunesinde belirli bir miktar kalıcı deformasyon oluşturan çekme gerilmeleri olarak tanımlanır. A kalite sınıfı 30.000 Psi'lik basınca dayanım gösteren minimum akma mukavemetine, B kalite sınıfı 35.000 Psi'lik basınca dayanım gösteren minimum akma mukavemetine sahiptir. API standardına göre X42, X46, X52, X60, X65 gibi semboller Psi olarak mukavemet sergileyeceği basınca karşılık gelen minimum akma dayanımlarını gösterir. Örneğin: X46 gösteriminden; 46.000 Psi'lik basınca dayanım gösteren, X65 gösteriminden ise 65.000 Psi'lik basınca dayanım gösteren minimum akma mukavemeti değerine sahip malzeme olduğu anlaşılır [35].

Hat boruları, imalatında uygulanan yönteme göre dikişli ve dikişsiz olmak üzere iki şekilde üretilebilir. Dikişsiz borular tek tiptir. Dikişsiz boru şekillendirilebilen çeliklerden kaynak yapılmadan imal edilen borudur. Dikişsiz boru çeliğin sıcak işlenmesi ile imal edilir. Gerekirse, istenilen şekil, boyut ve özellikleri elde etmek için sıcak işlenmiş boruya, daha sonra soğuk veya sıcak haddeleme uygulanabilir. Dikişli borular ise; kaynak dikişinin şekline göre; boyuna dikişli, spiral dikişli boru olmak üzere iki tipe ayrılır. Boyuna dikişli borular, uygulanan kaynak dikişi metoduna göre ise; elektrik ark kaynak dikişli boru, toz altı ark kaynak dikişli boru, gaz metal ark kaynak dikişli boru, gaz metal ark kaynağı - toz altı ark kaynağının birlikte uygulanması ile üretilen dikişli boru, alın kaynaklı dikişli boru, çift kaynak dikişli boru olmak üzere altı guruba ayrılır. Spiral dikişli borular uygulanan kaynak dikişi metoduna göre, toz altı kaynak dikişli boru olmak üzere yalnızca tek bir türdür. Bunlara ilave olarak, borular imalatında soğuk genişletme işlemi uygulanıp

uygulanmadığına göre, genişletilmiş genişletilmemiş olmak üzere iki gruba ayrılır. [7,34-36].

Elektrik kaynak dikişli boru, elektrik direnç veya elektrik indüksiyon kaynağı ile dışarıdan herhangi bir metal ilave edilmeksizin imal edilen boyuna dikişli borudur. Sınıfı X 52'den daha yüksek kaliteli çelikten imal edilen, elektrik direnç ve indüksiyon kaynaklı boruların kaynak dikişleri, kaynak işleminden sonra en az 538 C° sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmalıdır. Sınıfı X 52 ve daha düşük kaliteli çelikten imal edilmiş boruların kaynak dikişi benzer şekilde ısıl işleme tabi tutulmalı veya kaynak bölgesinde martenzit fazı kalmayacak şekilde ısıl işlem uygulanmalıdır [7,34,35,39].

Toz altı kaynaklı borular, otomatik toz altı ark kaynağı tezgâhı ile imal edilen boyuna dikişli borudur. Spiral kaynaklı boru üreten makinelerde ana prensip, rulo sac halinde gelen haddelenmiş yassı çeliğe form verilerek spiral hareket yapması sağlanarak boru üretimidir. Kaynak, içte ve dışta en az bir paso olmalıdır. Gaz metal ark kaynak dikişli boru, sürekli gaz metal ark kaynağı ile imal edilen boyuna dikişli borudur. Kaynak, içte ve dışta en az birer sıradan ibaret olmalıdır. Gaz metal ark kaynağı ve toz altı ark kaynağının beraber kullanılmasıyla üretilen boru, bu iki yöntemin artarda kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Bu metot da önce gaz metal ark kaynağı sonra toz altı ark kaynağı uygulanır. Çift kaynak dikişli boru, toz altı ark kaynak işlemi veya gaz metal ark yöntemi yahut da bu iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla imal edilen borudur. Spiral kaynak dikişli boru toz altı ark kaynağı yöntemiyle imal edilen helis (spiral) dikişli borudur. Alın kaynaklı boru dikiş kenarlarının kaynak sıcaklığına kadar ocakta ısıtılmasından sonra, kaynağı yapmak için mekanik basınç uygulanmasıyla imal edilen boyuna dikişli borudur. Çizelge 3.1'de çelik sınıflarına göre imalat metotları verilmiştir [7,34,35,39,40].

Çizelge 3.1. Çelik sınıflarına göre boru imalat metotları [7,34,35,39]

Boru imalat metodu	Çelik Sınıfı		
	A 25	A ve B	X42 - X80
Dikişsiz	X	X	X
Dikişli			
Boyuna dikişli			
Alın kaynaklı	X		
Örtülü elektrodla ark kaynaklı	X	X	X
Tozaltı ark kaynaklı		X	X
Gaz metal ark kaynaklı		X	X

Çizelge 3.1. (devam) Çelik sınıflarına göre boru imalat metotları [7,34,35,39]

Gaz metal ark ve tozaltı ark kaynaklı			X
Çift kaynak dikişli *		X	
Spiral dikişli **			
Spiral tozaltı ark kaynaklı		X	X
(*) Çift dikişli borular 914,4 mm ve daha büyük dış çaplar ile sınırlandırılmıştır. (**) Spiral dikişli borular 114,3 mm ve daha büyük dış çaplar ile sınırlandırılmışlardır.			

3.2. Hat Borularının Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Boru hatlarında kullanılan boruların kimyasal ve mekanik özellikleri API 5L standardında belirlenmiştir. API 5L'ye göre boru tesislerinde en çok kullanılan boruların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmiştir [7,34,35,39].

Çizelge 3.2. Dikişli ve dikişsiz boruların kimyasal bileşimi [7,34,35,39,40]

Boru tipi	Çelik Sınıfı	% C mak	% Mn		% P		% S mak.
			min	mak	min	mak	
Dikişsiz boru							
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A 25 - I	0,21	0,30	0,60		0,03	0,06
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A 25 - II	0,21	0,30	0,60	0,45	0,08	0,06
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A	0,22		0,90		0,03	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	B	0,27		1,15		0,03	0,05
Genişletilmemiş	X 42	0,29		1,25		0,03	0,05
Genişletilmemiş	X 46, X 52	0,30		1,35		0,04	0,05
Soğuk genişletilmiş	X 42, X 46, X 52	0,28		1,25		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 56, X 60	0,26		1,35		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X65, X70, X80	İmalatçı ile müşteri arasındaki anlaşmaya göre					
Kaynaklı boru							
Yalnız elektrik veya alın kaynaklı	A 25 - I	0,21	0,30	0,60		0,045	0,06
Yalnız elektrik veya alın kaynaklı	A 25 - II	0,21	0,30	0,60	0,45	0,08	0,06
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A	0,21		0,90		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	B	0,26		1,15		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 42	0,28		1,25		0,04	0,05
Genişletilmemiş	X 46, X 52	0,30		1,35		0,04	0,05
Soğuk genişletilmiş	X 46, X 52	0,28		1,25		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 56, X 60	0,26		1,35		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X65	0,26		1,40		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 70	0,23		1,60		0,04	0,05
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 80	0,18		1,80		0,03	0,018

Çizelge 3.3. API 5L Standardına göre boruların mekanik özellikleri [7,34,35,39]

Çelik sınıfı	Minimum akma mukavemeti		Minimum çekme mukavemeti	
	Psi	MPa	Psi	MPa
A 25	25000	172	45000	310
A	30000	207	48000	331
B	35000	241	60000	413
X 42	42000	289	60000	413
X 46	46000	317	63000	434
X 52	52000	358	66000	455
X 56	56000	386	71000	489
X 60	60000	413	75000	517
X 65	65000	448	77000	530
X 70	70000	482	82000	565
X 80	80000	551	90000	620

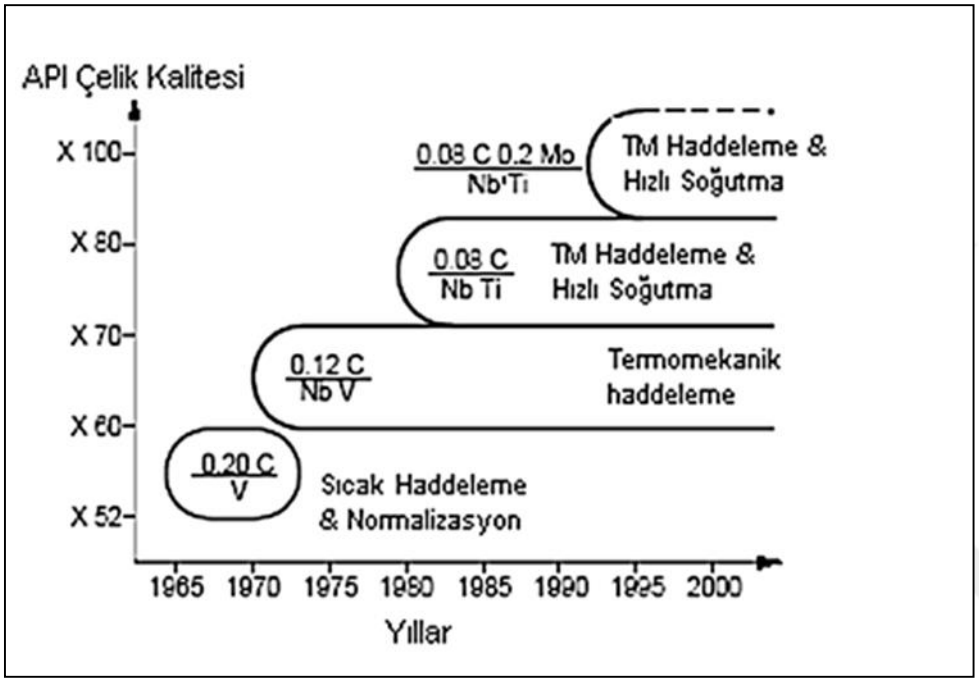
Doğalgaz ve petrol boruları gerek on-line gerekse off-line kontrollerin yanı sıra, DWTT (Drop Weight Tear Test) işlemleri de dâhil olmak üzere birçok tahribatlı ve tahribatsız testlerden geçirilmektedirler. Proje gereksinimleri ve kullanım alanlarına bağlı olarak; alaşımsız, mikroalaşımlı veya özel imalat çelikleri kullanılmaktadır. Üretim için seçilecek malzemeye temel oluşturmak amacıyla projeye özgü bir şartname hazırlanır. Amaç, sağlam ve sünek olmanın yanı sıra, şekillendirme, kaynak ve bükme için uygun homojen ince taneli mikroyapıyı elde etmektir [6].

3.3. Doğalgaz ve Petrol Borularında Kullanılan Çeliklerin Genel Özellikleri

3.3.1. X serisi çelikler

Hat borusunun işlenmesi ve geliştirilmesi ile ilgili çeşitli talepler yıllardan beri süregelmektedir. Boru hattı ekonomisi açısından, hat boruları sahadaki dizgilemeye iyi yanıt ve yüksek işletme basınçlarına izin vermelidir. Bu gereksinimler boru hattı çeliğinin yüksek mukavemete, tokluğa ve en uygun geometriye sahip olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle doğalgaz ve petrol borularının imalatında yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı HSLA çelikleri (yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler) kullanılmaktadır. HSLA kısaltması İngilizce yüksek mukavemet ve düşük alaşım kelimelerinin (High Strength Low Alloy) baş harflerinden türemektedir. 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) mikro alaşımlandırarak ve karbon bileşimi azaltılarak üretilecek malzemelerin X70'e kadar yükselmesine olanak tanımıştır. 80'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. Çeliğin termomekanik haddelemeye ilaveten geliştirilen hızlandırılmış soğutma ile plaka haline işlenmekte olduğu durumda; molibden (Mo), bakır (Cu) ve nikel (Ni) ilavesi ise mukavemet seviyesinin X100'e kadar yükseltilmesini olanaklı kılmaktadır [41].



Şekil 3.1. Yüksek mukavemetli çeliklerin tarihsel gelişimi [42]

HSLA 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 arttırabilir veya bazı kalitelerin mukavemet sınırlarını genişletebilir. Bu yüzden termomekanik haddeleme (kontrollü haddeleme) gibi özel haddeleme uygulamaları geliştirilmiştir [41].

HSLA çeliklerinin mukavemeti ferrit tane incelmesi, çökelme sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi mekanizmalarının birlikte uygulanması ile arttırılmaktadır. Bu alternatif mukavemet arttırma mekanizmalarından dolayı, HSLA çeliklerinin mukavemetinin arttırılması perlit, martenzit veya beynitte olduğu gibi yüksek karbon (C) bileşimine bağlı değildir. Bu durum birçok HSLA çeliğinin mükemmel kaynak kabiliyetine sahip olmasına da imkân sağlamaktadır [41].

HSLA çeliklerinde mukavemet arttırıcı alaşım elementlerinin başında tek tek veya birlikte (en fazla % 0.1 civarında) ilave edilen niobyum (Nb) ve vanadyum (V) gelmektedir. Bazı uygulamalarda, daha kalın malzemelerde veya daha fazla dayanımın istendiği durumlarda, nikel (Ni) veya molibden (Mo) de alaşım elementi olarak kullanılabilir. Modern HSLA çelikleri kalıntı azotu (N) bağlamak amacıyla yaklaşık %0.025 civarında titanyum (Ti) içermektedir. Bu sayede ısı tesiri altındaki bölgede tane incelmesi ve her tarafta iyi bir tokluk elde edilebilir. Önceleri üretilen HSLA çelikleri ingot döküm olarak üretilirken döküm işlemi tamamen sakin ya da yarı sakin olarak yapılmaktaydı. Ancak bu gün üretilen çelikler sürekli döküm yöntemiyle tamamen sakin dökülmüş olarak üretilmektedir [41,43,44].

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı veya mikro-alaşımlı çelik olarak bilinen malzemeler, metalurjik olarak düşük alaşımlı çelik grubuna girmektedir. HSLA çelikleri daha yüksek mukavemet, daha iyi tokluk değeri, daha iyi kaynak kabiliyeti ve özel ortamlarda sıradan karbon çeliklerinden daha iyi korozyon direnci elde etmek amacıyla az miktarda alaşım elementi içerecek şekilde üretilmektedir [45]

Hat boruları kaynak dikişli olmalarına karşın, zorunluluk gereği birbirlerine kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, hat borusu çeliklerinin diğer bir istenen karakteristiği de iyi kaynaklanabilir olmasıdır. HSLA çeliklerinin üretiminde, azalan C bileşimi mikroalaşımlama elementleri (Mo, Ti, V, Nb) ile birleştiğinde, mukavemeti ve kırılma tokluğunu artırmaktadır. Ayrıca, C ve mangan (Mn) bileşimlerinin azaltılması kaynaklanabilirliğin geliştirilmesine de ilave katkı sağlamaktadır [46].

Son yıllarda özellikle doğalgaz kullanımının artmasıyla birlikte doğalgaz taşımacılığı çok önemli hale gelmiştir. Bu durum, çok uzun mesafelerde ve yüksek basınçlı şartlar altında kullanılan geniş çaplı boruların üretimini, montajını ve işletilmesini, ekonomiklik ve emniyet yönünden önemli hale getirmiştir. Bunun neticesinde HSLA çeliklerinden yapılan dikişli boru üretimi gerek ülkemizde gerekse tüm dünyada artmaktadır. Boru hattı çelikleri dünyada en yaygın olan API standartları kullanılarak üretilmektedir [41,47-51].

Doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılan ve API standardına göre üretilen borularının üretildiği malzemeler ince taneli yapı çelikleridir. Bu malzemeler genellikle X sınıfında değerlendirilmekte ve tane yapısına göre sınıflandırılmaktadır. X42, X46, X52, X65, X70

ve X80 gibi malzemeler doğalgaz ve petrol boru hatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. API standardında X sınıfında değerlendirilen bu malzemelerin ana özelliği, ince taneli ferrit ve perlit yapılarının termomekanik işlemler sonucunda elde edilmesidir. Bu sınıflandırma işleminde X'in yanında bulunan malzeme numarası; yapı içerisindeki alaşım elementleri oranına göre değişmekte, X'in yanındaki numara arttıkça mikroyapıların daha ince yapılardan oluştuğu ve malzemenin dayanım gösterebileceği minimum akma dayanımı basıncının arttığı görülmektedir. İnce taneli yapı çeliklerinde ana mikroalaşım elementi, titanyum ve vanadyum ile kombinasyonu (Nb/V, Nb/Ti, and Nb/V/Ti) olan niyobyumdur. Bu yapılar çeliklerin akma gerilimini ve tokluğunu olumlu yönde etkilemektedir [6,52-54].

X çeliklerinden üretilen boruların kimyasal ve mekanik şartnameleri API 5L standardına göre belirlenmiştir (Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3.). X çelikleri, büyük çaplı boru hatlarının yapım işlerinde kullanılan HSLA çelik serilerinden birisidir [37,55–57]. Bu çelikler, kontrollü termomekanik haddeleme yöntemi ile üretilir ve mikroyapısında ince taneli asiküler ferrit hâkimdir [58-62]. HSLA çelikleri doğalgaz ve petrol ürünlerinin taşındığı boru hattı sistemlerinde düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [7,28,6,62,63]. API çeliklerinin üretiminde kullanılan termomekanik haddeleme; dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşme adı altındaki iki farklı yumuşatma mekanizması ile gerçekleşmekte olup, çeliklerin mikro yapı dönüşümleri ve mekanik özelliklerini kontrol etmek için haddeleme esnasında ve sonrasında sıcak deformasyon uygulanmaktadır [41,61,62].

Yüksek basınçlarda çalışan doğal gaz ve petrol boru hatlarının inşasında basınç değerine bağlı olarak API standartlarında X52, X65, X70 ve X80 çelikleri kullanılmaktadır. X serisi çelikleri akma dayanımına göre isimlendirilirler. Çizelge 3.3'te de görüldüğü gibi X serisi çeliklerin sınıfı yükseldikçe akma ve çekme dayanımları da artmaktadır. Bunun sonucunda yüksek mukavemette daha ince et kalınlığına sahip borular üretilebilmektedir. Bu sayede daha az çelik ve kaynak sarf malzemesi kullanılmaktadır. Böylece hem daha hızlı kaynak yapılarak zamandan, hem de az malzeme kullanıldığı için ekonomik yönden tasarruf yapmak mümkündür. Ayrıca daha yüksek basınçta gaz taşınması sağlanır, gaz taşıma ücreti azalır ve daha güvenli boru ve boru hattı yapılabilir [41,64,65].

Çizelge 3.4'te X serisi çeliklerin 15,3 MPa basınç ve 0,72 emniyet katsayısında tasarlanan et kalınlıkları verilmektedir. Kilometrelerce uzunluğa sahip bir boru hattının inşasında, yüksek mukavemetli ve düşük kesit kalınlıkta bir malzeme seçilerek, hem daha ekonomik ve ergonomik bir boru hattına, hem de arzu edilen servis şartlarına ulaşmak mümkündür. Bu durum boru hattı tasarımcıları ve yapım işi imalatçılarına sadece ekonomi açısından değil, aynı zamanda enerji ve zaman açısından da büyük faydalar sağlamaktadır [41].

Çizelge 3.4. X serisi çeliklerin 15,3 MPa basınç ve emniyet katsayısı Fd = 0,72 için tasarlanan et kalınlıkları [66]

Çap (mm)	X42	X46	X52	X56	X60	X65	X70	X80	X100
200	8,1	7,4	6,6	6,1	5,7	5,3	4,9	4,3	3,4
250	10,1	9,2	8,2	7,6	7,1	6,6	6,1	5,3	4,3
300	12,0	10,9	9,7	9,0	8,4	7,8	7,2	6,3	5,0
350	13,1	12,0	10,6	9,8	9,2	8,6	7,9	6,9	5,5

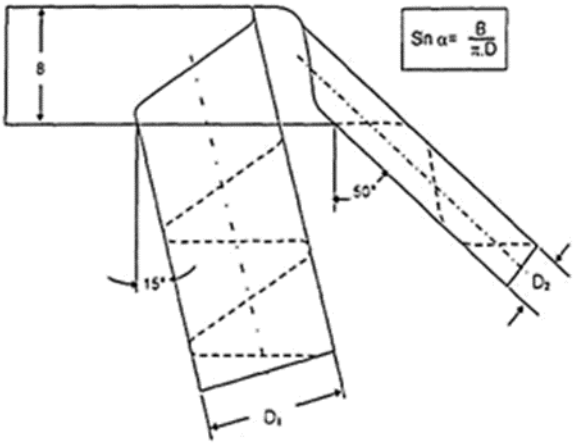
3.4. Çelik Boru Üretimi

Doğalgaz ve petrol boru hatları için üretilen API boruları seri üretim esasına dayalı olarak tozaltı ark kaynak yöntemi (SAW) ile üretilmektedir. Gaz ve petrol iletim hatlarında çoğunlukla spiral dikişli veya boyuna dikişli çelik borular kullanılmaktadır. Her iki borunun üretim akışları birbirine göre bazı farklılıklar göstermektedir.

3.4.1. Spiral dikişli boru üretim yöntemi

Spiral kaynaklı boru üreten makineler de ana prensip, tahrik silindirleri tarafından itilen sac malzemeye, şekillendirme makaraları yardımı ile spiral bir hareket yaptırılmasıdır. Malzemenin saç olarak makine üzerinde ilerlediği bölümün, malzemenin kaynak sonrası boru olarak ilerlediği bölüm ile yaptığı açı boru çapını belirleyen en önemli etkendir. Bu açı makineye yerleştirilen bant genişliği ve elde edilmek istenen boru çapı göz önüne alınarak belirlenir (Şekil 3.2). İlgili açı formülünden de görüldüğü gibi, bant genişliğinin sabit tutulması durumunda, makine ayar açısının değiştirilmesi ile elde edilen boru çapı da değişmektedir. Yine benzer şekilde, makine ayar açısı ile oynayarak, aynı çaplı boruyu farklı bant genişliklerinden elde etmek mümkündür [7,67].

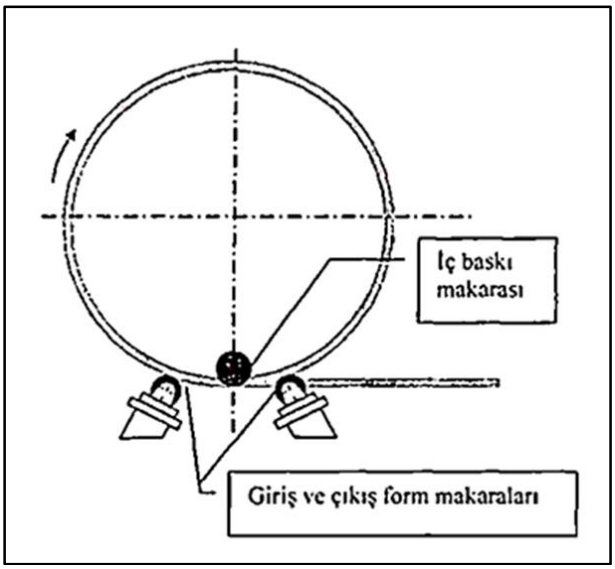
Sac rulonun makineye yüklenmesinden sonra, üretim sürekliliğinin sağlanması için biten rulo ile yeni rulo uçları birbirine kaynak edilir (uç kaynak). Uç kaynak işlemi tozaltı kaynak yöntemi ile tek ya da tandem kaynak yöntemi ile yapılır. Bantların özellikle son kısmındaki 1/3'lük kısmı diğer bölgelere kıyasla daha küçük bir sarım radyüsüne sahiptir. Hatasız bir kaynak elde etmek için, bandın 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 [7].



Şekil 3.2. Spiral dikişli kaynak makinesi açı ayarı [7]

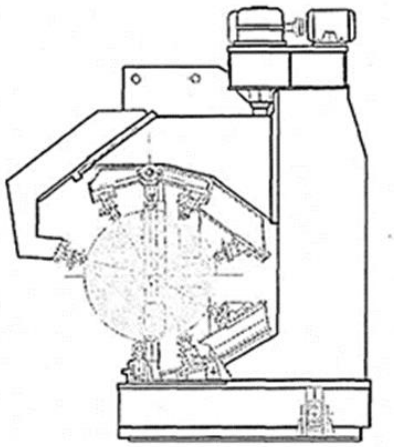
Bant genişliğinin öngörülenden daha dar olması halinde kaynak noktasında açma, aksi durumunda ise bindirme oluşur. Ayrıca, bant kenar yüzeyinin kalitesi iyi bir kaynak dikişi elde etmek için çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kenar kesme sonrası freze ile malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak ağzı açma işlemine geçilir. Bazı durumlarda, kaynak ağzı açılmadan önce bant kenarlarının belirli bir bölümü kesilerek çıkartılır [68]. Söz konusu bu kesme işlemi mekanik ya da ısıl kesme yöntemi ile olabilir. Bant et kalınlığının değiştiği bölgelerde, kılavuz roleleler yardımı ile kesme ekseninin hassas bir şekilde ayarlanması gerekir. Aksi taktirde; 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 [7].

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 roleleri olabildiğince biçim verme grubuna yakın olarak yerleştirilir. Bant sürekli olarak tahrik rolelerini merkezleyecek şekilde makineye yerleştirilir ve tüm makine ekipman ayarları bunu sağlayacak şekilde yapılır. Biçim verme öncesi yapılan son işlem bant kenarlarının kıvrılmasıdır. Çatılanma ve bindirme tipi hataların önlenmesi açısından, kenar kıvırma son derece önemli bir işlemdir. Burada iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem; bandın her iki tarafında bulunan ve iki farklı radyüse sahip role kullanımıdır. Daha etkin olan ikinci yöntem ise, iki ayrı rolenin bandın alt tarafında bir diğer rolenin ise bandın üst tarafında olduğu üçlü role grubu kullanımıdır. Üçlü role kullanımının üstünlükleri, malzeme, boru çapı ve makine açısı bağlı olarak bant kenarlarını istenilen bir radyüste kıvırma olanağı sağlamasıdır. Tüm bu işlemlerden sonra, biçim verme rolelerinin yardımı ile banda spiral bir şekil verilir (Şekil 3.3). Bandın spiral olarak şekillendirme işlemi üçlü- kıvırma 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 [7].



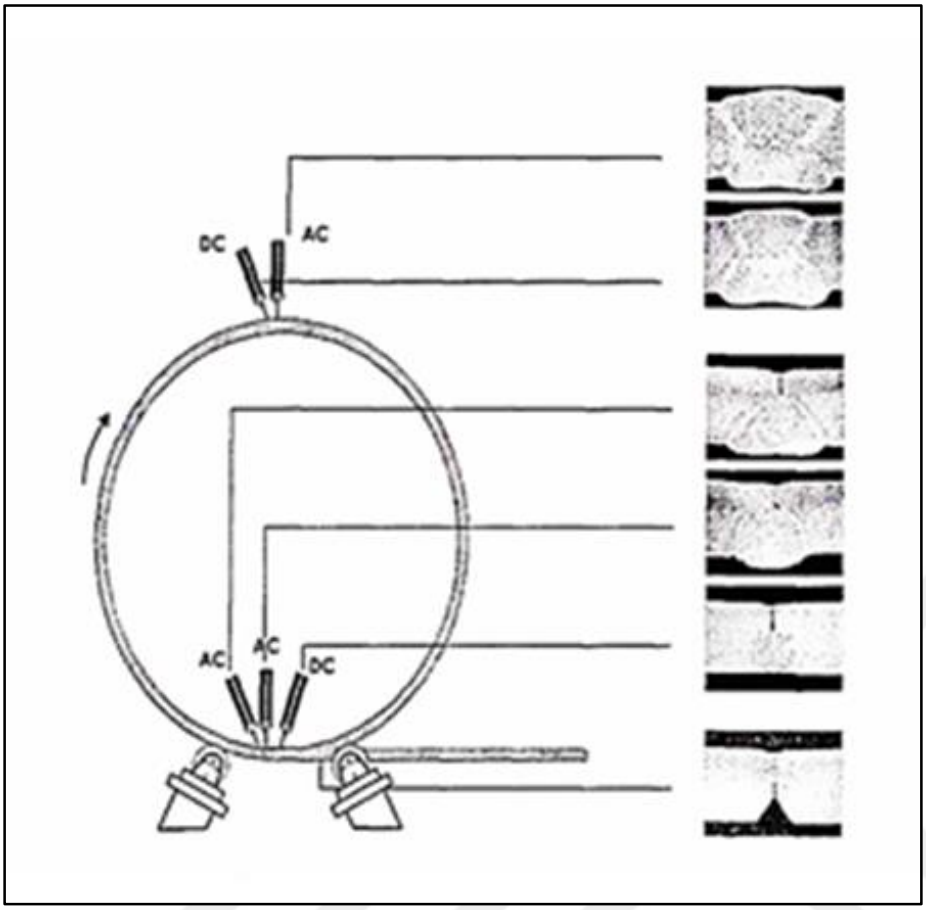
Şekil 3.3. Spiral dikişli boru makinesinde sac banda silindirik biçim verme [7]

Elde edilen borunun çap, ovallik ve doğrusallık gibi boyutsal hassasiyetini sağlayabilmek için üçlü 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. Boruya dıştan temas eden dış kafes makara grubu (endüstriyel uygulamada deve boynu olarak da adlandırılmaktadır) ya da borunun içine yerleştirilen malafa grubu ile sağlanmaktadır (Şekil 3.4). Spiral dikişli boru kaynağının ilk aşaması boruya spiral biçim verilen bölgede yapılan iç kaynaktır. Dış kaynak ise iç kaynaktan ayrı olarak daha ileri bir aşamada yapılır [7].



Şekil 3.4. Biçim (form) verme ünitesi (deve boynu) [7]

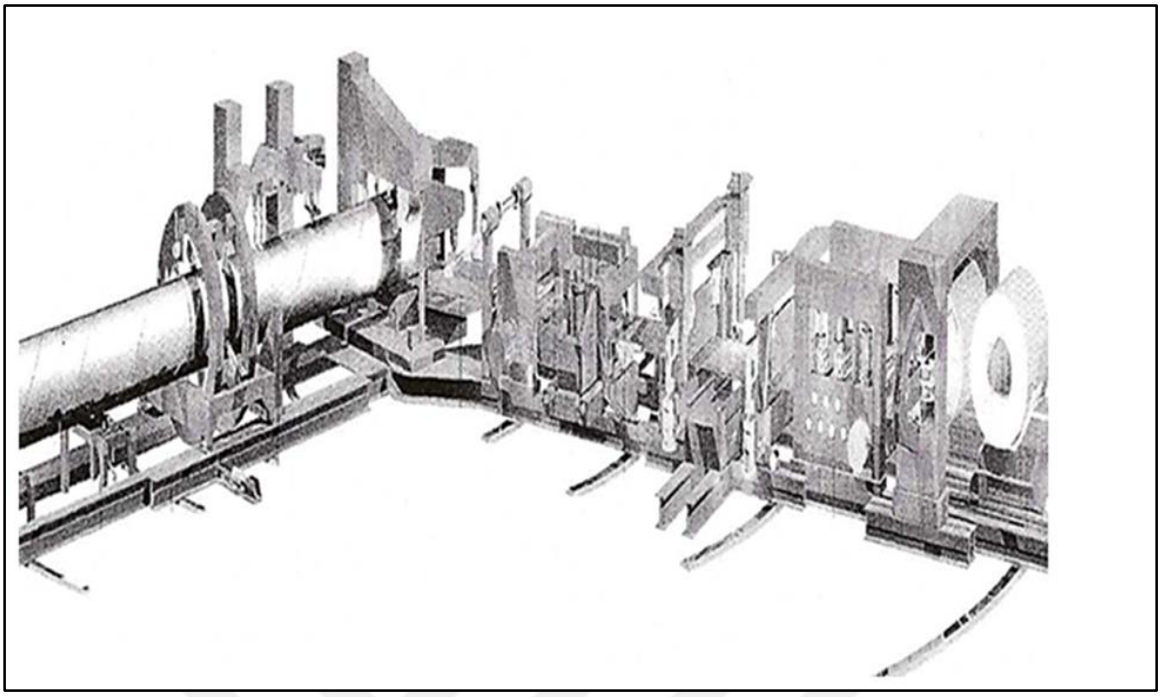
Kaynak işlemi tek ya da çoklu kafa kullanılarak yapılabilir (Şekil 3.5). Son aşama ise, borunun uygun boylarda kesilmesidir. Resim 3.1'de tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kullanılan bir kaynak makinesinin değişik aşamaları Şekil 3.6'da ise şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.5. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu [7]



Resim 3.1. Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları [7]



Şekil 3.6. Spiral dikişli boru üretim makinesinin şematik gösterimi [7]

3.4.2. Boyuna dikişli boru üretim yöntemi

Gaz ve petrol iletim hatlarında, spiral dikişli borunun yanı sıra tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen boyuna dikişli borular da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, boru çapına uygun ölçülerde üretilmiş olan saç plakalar kullanılmaktadır. Söz konusu bu saç plakalar, özel yöntemlerle kıvrıldıktan sonra (U ve O kıvırma), öncelikle oldukça yüksek bir hızda punto kaynağında tabi tutulmakta ve daha sonra, bağımsız istasyonlarda önce iç sonra dış kaynak yapılmaktadır. Gaz altı kaynak yöntemi ile yapılan punto kaynaklarında yaklaşık 6–7 m/dk gibi yüksek hızlara çıkıldığı için daha sonra yapılmakta olan iç ve dış kaynak istasyonlarının sayısı bu yüksek hızı karşılayacak sayıdadır [69]. Şekil 3.7'de boyuna dikişli bir gaz borusunda iç kaynağın oluşumu, Resim 3.2'de dış kaynak istasyon görünümü, Şekil 3.8'de ise boyuna dikişli boru üretim aşamaları görülmektedir [70]. Bu yöntemin, spiral dikişli boru üretimine kıyasla bir dizi üstünlüğü vardır. Bunlar; kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

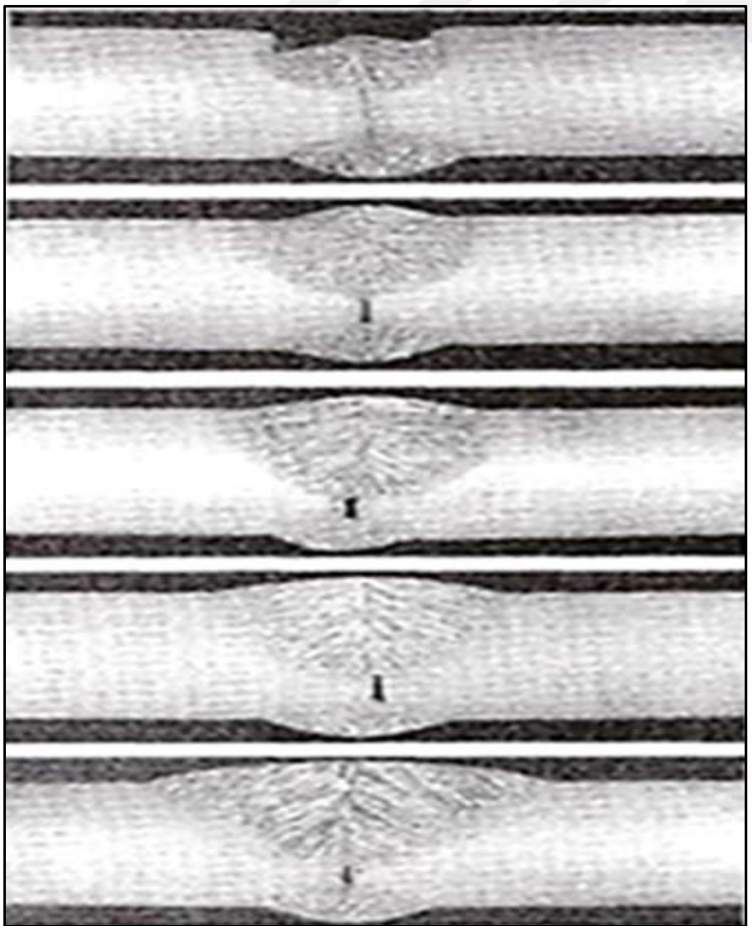
1. Hem iç hem de dış kaynağın düz bir hat boyunca yapılması ile bir takım kaynak hatası oluşumları engellenebilmektedir. Özellikle, kaynak banyosunun akması nedeni ile oluşan biçim bozuklukları bu yöntemde tamamen ortadan kaldırılmıştır.

2. 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.

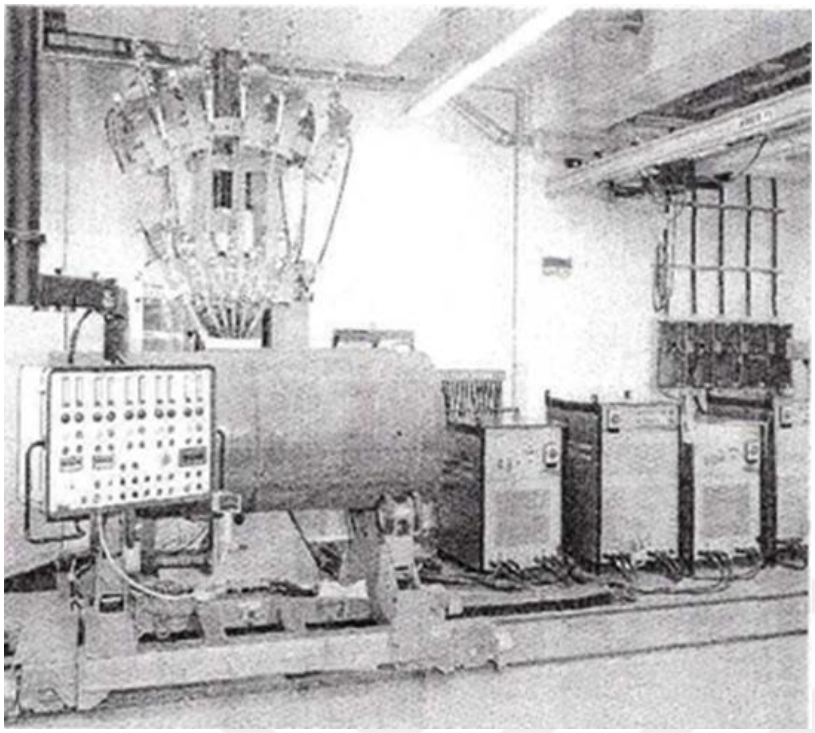
3. Çok sayıda kafa kullanımı nedeni ile spiral dikişli boru üretimine kıyasla oldukça yüksek üretim hızlarına çıkılabilmektedir.

4. Spiral dikişli borulara kıyasla, 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.

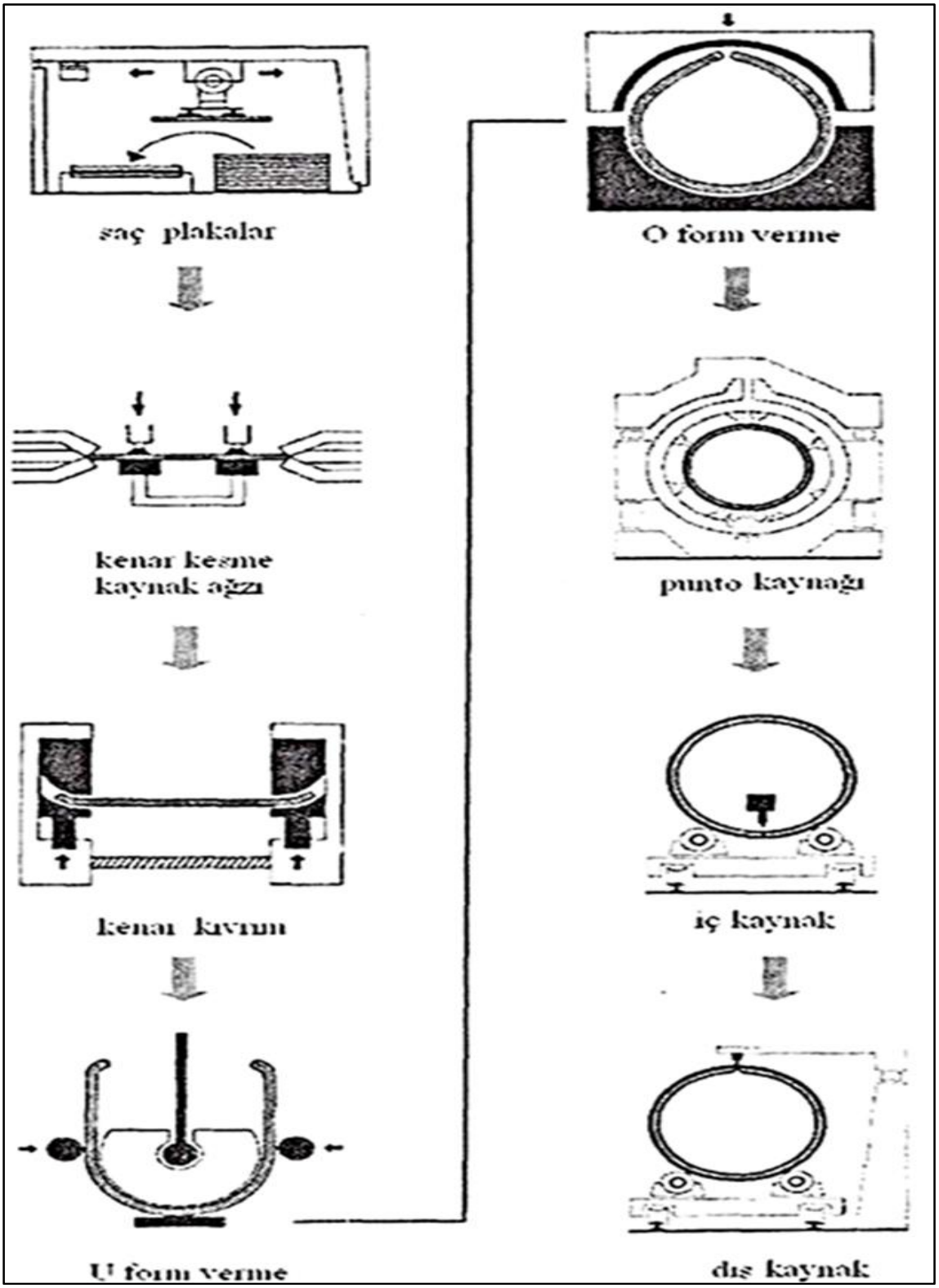
Ancak bu yöntemin yukarıda açıklanan tüm bu üstünlüklerinin yanı sıra, çok yüksek ve pahalı bir teknolojiye gereksinim göstermesi ve istenen ölçü ve kalınlıklarda sac plaka (yani hammadde) temininde zorlukların olması gibi bazı kısıtlamaları da vardır.



Şekil 3.7. Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu [7]



Resim 3.2. Dış kaynak istasyonu görünümü [7]



Şekil 3.8. Tozaltı kaynak yöntemi ile boyuna dikişli gaz borusu üretim aşamaları [7]

4. HAT BORULARININ SAHADAKİ KAYNAKLI BİRLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Uzun mesafeli boru hatlarının oluşturulmasında çelik boruların kaynağı, günümüzde güncel ve önemli bir uygulamadır. Su, doğalgaz ve ham petrol nakil hatlarının artan önemi, bu hatlarda kullanılan çelik boruların kaynağı için yeni teknikler ve ilave malzemeler geliştirilmesine aynı zamanda işlemlerin daha hızlı ve daha güvenilir olması için çalışılmasına neden olmaktadır [34,35,71].



Resim 4.1. Doğalgaz boru hattının görünüşü [34,35]

Çelik boruların kaynağı, pek çok disiplinin bir arada düşünülmesi ve uygulanması gereken bir konudur. Öncelikle boruların üretiminde başlar ve boruların uç uca çevresel kaynağındaki tekniklerle devam eder. Boruların kaynağında çalışacak kaynakçıların ve yapılan kaynak işlemlerinin kalifikasyonu, kaynakların yapılması ve dikişlerin tahribatsız muayenesi ile son bulur [34,35,72,73].

4.1. Boru Hatlarının Kaynağı

Boru hatları kaynaklarında en çok kullanılan iki yöntem gaz metal ark kaynak (MIG - MAG) ve örtülü elektrodla ark kaynak (SMAW) yöntemidir. Toz altı ark kaynak (SAW) ve gaz tungsten ark kaynak (GTAW) teknikleri arazi uygulamalarında çeşitli başarısızlıklar gösterir. Oksi-asetilen kaynak tekniği ise büyük çaplı borularda yetersiz ergitme sebebiyle

kullanılamaz. Ayrıca toz altı ark kaynak ve gaz tungsten ark kaynak teknikleri, servis dışı kalmış olan boruların atölyede yapılan ön onarım işlemlerinde kullanılabilir [34,35].

Kullanılan bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [34,35].

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemi

Avantajları;
1) Ekipman maliyeti düşük ve temini kolaydır.
2) Kaynak ağzı hataları kolaylıkla düzeltilir.
3) Kaynakçı temini kolaydır.
4) Otomatik olmadığından ayar deneme çalışması problemleri yoktur.
5) Bakım ve onarım sorunları en az seviyededir.

Dezavantajları;
1) Yavaş bir yöntemdir.
2) Hata ihtimali fazladır.
3) Kaynakçıya çok bağlıdır (hız-kalite).

Otomatik MAG (Metal Aktif Gaz) kaynak yöntemi

Avantajları;
1) Hızlı bir yöntemdir.
2) Hata ihtimali azdır.
3) Operatöre çok bağlı değildir.
4) Cüruf temizlemesi yoktur.

Dezavantajları;
1) Kaynakçı eğitimi gerektirir.
2) Yatırım maliyeti fazladır.
3) Özel bakım ve onarım personeli ve yedek parça gerektirir.
4) Deneme çalışmaları ve ayar gerektirir.
5) Kaynak ağzı hatalarını tolere edemez.
6) T - birleştirmelerde ve özel yerlerde (dik tepe vb) kullanılamaz.

Tozaltı kaynak yöntemi

Avantajları;
1) Hızlıdır.
2) Hata ihtimali azdır.
3) Operatöre çok bağlı değildir.

Dezavantajları;
1) Sadece düz pozisyonda kaynak yapabilir.
2) Operatör eğitimi gereklidir.
3) Yatırım maliyeti yüksektir.
4) Özel yetiştirilmiş bakım ve onarım personeli gerektirir.
5) Deneme çalışmaları ve ayar gerektirir.
6) Kaynak ağzı hatalarını tolere edemez.

Tozaltı kaynak yöntemi spiral veya düz kaynak dikişli büyük çaplı ve kalın cidarlı boruların imalatında kullanılan bir yöntemdir. Kaynak pozisyon sınırlaması nedeniyle boru hattı inşaatlarındaki simetrik kaynak ağızlarında uygulanamaz. Bu yöntem ile ana hat kaynağı denemeleri de vardır, ancak yukarıda belirtilen nedenlerle tercih edilmemektedir [34,35,40].

4.2. Örtülü Elektrod İle Ark Kaynağı

Örtülü elektrod ile ark kaynağı uygulaması bir ergitme kaynak yöntemidir ve bu yöntemde ark örtülü elektrod ile iş parçası arasında yanar. Bu şekilde örtülü elektrodun teli, örtüsü ve iş parçası ergiyerek kaynak metalini oluşturur. Bu esnada açığa çıkan gaz ark bölgesini korur ve oluşan cürufta kaynak dikişini örterek kaynak bölgesinin korunmasını sağlar.
Bu yöntem 1,2 mm'den kalın demir veya demir dışı malzemelerin tüm kaynak pozisyonlarında uygulanabilmektedir. Ayrıca, elektrod örtüsüne katılan alaşım elementleri yardımı ile kaynak metalini alaşımlandırarak istenen özelliklerde kaynak bağlantısı elde edilebilmektedir [34,35,74].

4.2.1. Çelik boruların kaynağında kullanılan örtülü elektrodlar

Örtülü elektrodlar arkın oluşturulmasında, sürekliliğini sağlamada ve gerekse kaynak metalinin sağlanmasında kullanılan bir kaynak sarf malzemesidir. Ark kararlılığı, nüfuziyet derinliği, dolgu oranı ve pozisyonda kullanılabilme yeteneği elektrod örtüsünün kimyasal bileşiminden büyük ölçüde etkilenir.

Günümüz teknolojisinde birleştirme kaynağında kullanılan örtülü elektrodlar, genel olarak örtülerinin karakteristiğine göre beş ayrı türe ayrılırlar [74];

• Rutil örtülü elektrodlar
• Asit karakterli örtülü elektrodlar
• Bazik karakterli örtülü elektrodlar
• Oksit karakterli örtülü elektrodlar
• Selülozik karakterli örtülü elektrodlar

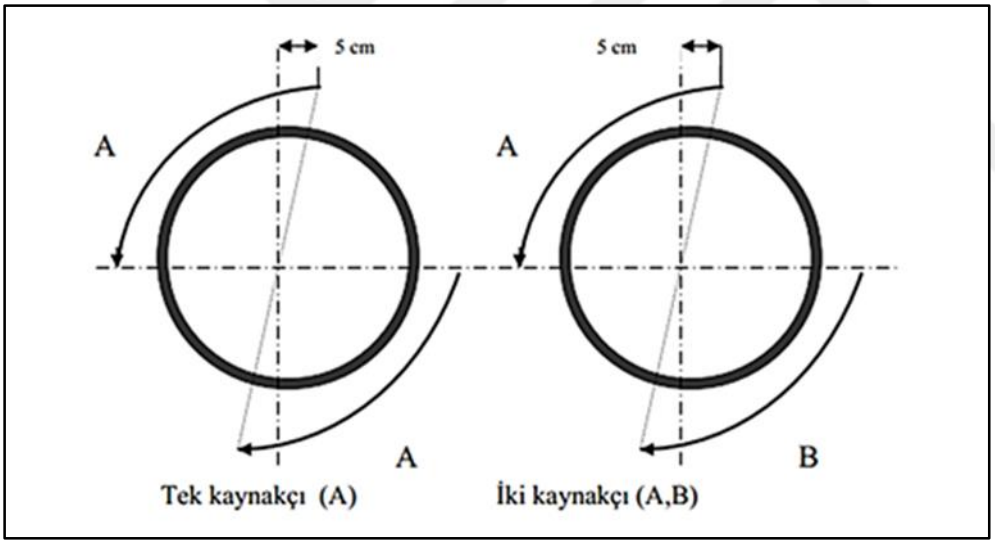
Röntgen kalitesinde kaynak istenildiğinde bazik ve selülozik elektrod olmak üzere iki alternatif vardır. Selülozik elektrodlar genellikle daha hızlı ve daha derin nüfuziyet sağladığı için tercih edilir. İnce cüruf yukarıdan aşağı düşen pozisyonda kaynak sağlar. Ancak yüksek kaliteli malzemelerde hidrojen difüzyonunun yol açacağı çatlakları önlemek üzere düşük hidrojenli bazik elektrod kullanılır [34,35].

4.2.2. Boru hatlarının örtülü elektrod ile kaynağında uygulanan teknikler

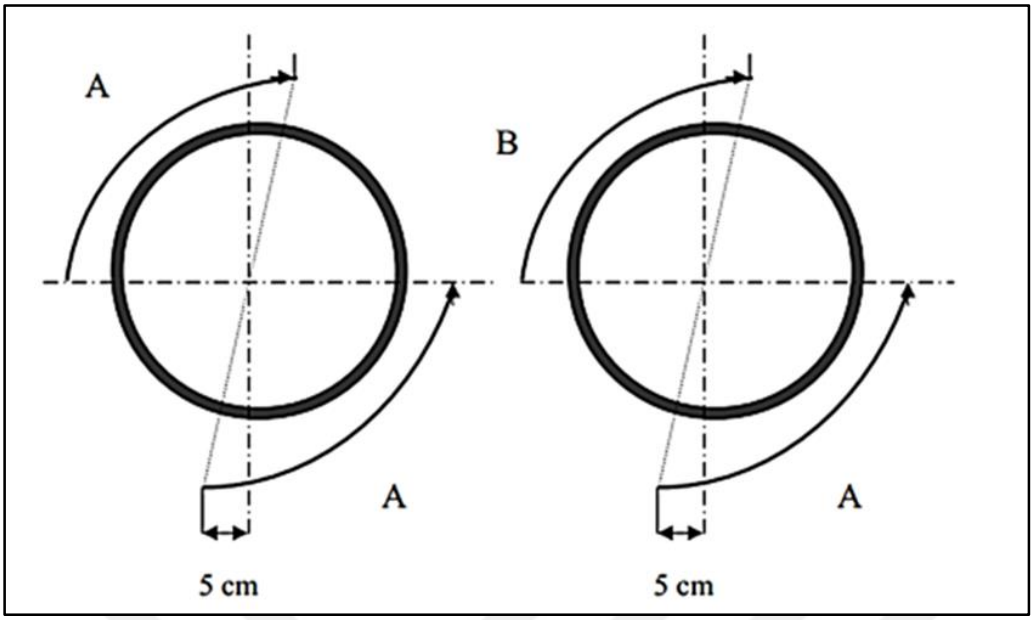
Boru hatlarında borular yere paralel olarak döşenir. Bu uygulamada boru daima sabittir. Kaynakçı borunun çevresini dolanarak kaynak yapar. Doğal olarak yere paralel deyimi ile borunun tamamen yatay pozisyonda döşendiği şeklinde bir yanlış anlama olmamalıdır. Boru hatlarının örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı kullanarak döşenmelerinde genel olarak aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı olmak üzere iki farklı teknik uygulanır. Yukarıdan aşağı teknik genel olarak alaşımsız çeliklerden yapılmış ve et kalınlığı 12,5 mm'den (1/2 inç) daha ince borulara ancak selülozik elektrodlar kullanılarak uygulanabilir. Alaşımlı çeliklerden yapılmış kalın cidarlı borularda ise bazik elektrodlar kullanarak uygulanan aşağıdan yukarı kaynak tekniği tercih edilir. Bazı hallerde ise iki yöntemin karışımı da uygulanmaktadır [34,35,75].

Kaynaklar sertifikalı kaynakçılar tarafından yapılmalıdır. Kaynaklar küçük çaplı (4″–12″ dâhil) borularda tek kaynakçı tarafından yapılır. Büyük çaplı (16″–30″) boruların kaynaklanması sırasında oluşabilecek gerilme ve genleşmeler homojen olarak kaynak ağzına dağıtılmalıdır. Bu sebeple iki kaynakçı aynı anda karşılıklı pozisyonlarda çalışmalıdır. Kaynakçı ekibinde, iki kaynakçı, bir borucu, iki kaynakçı yardımcısı, bir veya iki amper ayarı yapan kişi bulunmalıdır. 8″ ve daha büyük çaplı orijinal kaynak ağızlı boruların montajında tüm çevrede 1,6 mm ağız açıklığı ve 1,6 mm kaynak ağzı yüksekliği olduğundan kök paso yukarıdan aşağı (PG) pozisyonunda yapılabilir (Şekil 4.1).

Lokal tamirlerin kaynaklarında çevrede farklı boşluklar olması nedeniyle kök paso aşağıdan yukarı (PF) pozisyonunda yapılmalıdır (Şekil 4.2). Diğer pasolar yukarıdan aşağı yöntemiyle yapılmalıdır. Burada dikkat edilecek husus her pasonun başlangıç yeri bir önceki pasonun bitiş yerinden 5 cm geride olmalıdır [76,80,81].



Şekil 4.1. Kök paso yukarıdan aşağı (PG) kaynak yöntemi [34,77]



Şekil 4.2. Kök paso aşağıdan yukarı (PF) kaynak yöntemi [34,77]

Elektrik ark kaynağı ile yukarıdan aşağı kaynak tekniği

Yukarıdan aşağı kaynak uygulaması aşağıdan yukarı doğru yapılan alışılmış uygulamadan büyük farklılık gösterir. Sıvı haldeki kaynak banyosu kaynak sırasında yukarıdan aşağı doğru kaynak arkının hareketi yönünde akma eğilimindedir. Doğal olarak banyo üzerindeki cürufta aynı doğrultuda akma eğiliminde olmasına karşın bu kolaylıkla kaynakçı tarafından önlenebilmektedir. Buna dikkat edilmez ise, kaynak dikişinde, bağlantının mukavemetini azaltan cüruf kalıntılarına rastlanır. Sağlıklı bir kaynak dikişi elde edebilmek için bu tür bir uygulamada, kaynak arkı daima aşağıya doğru akan sıvı kaynak metalinin önünde tutulmalıdır. Bu ise yüksek akım şiddeti ve yüksek bir kaynak hızı ile elde edilebilir.

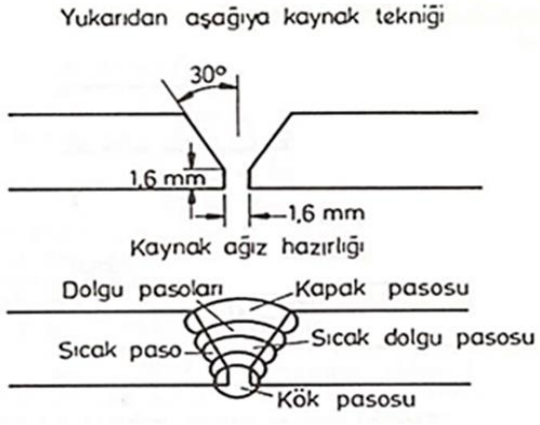
Kaynak akım şiddeti düşük seçildiğinde yüksek olan kaynak hızı nedeniyle esas metal ergimez ve nüfuziyet azalır. Bu pozisyonda uygun bir çalışma tekniği sonucunda aşağıdan yukarı kaynak pozisyonu ile karşılaştırıldığında oldukça ince görülen fakat sağlıklı kaynak dikişleri elde edilir. İşlem süresi daha kısadır ve elektrod tasarrufu sağlar [34,75].

Yukarıdan aşağı kaynakta selülozik elektrodlar öncelikle kullanılır. Ancak bazı özel bazik elektrodlar da kullanılmaktadır. Minimum akma dayanımı 415 N/mm2 veya daha büyük

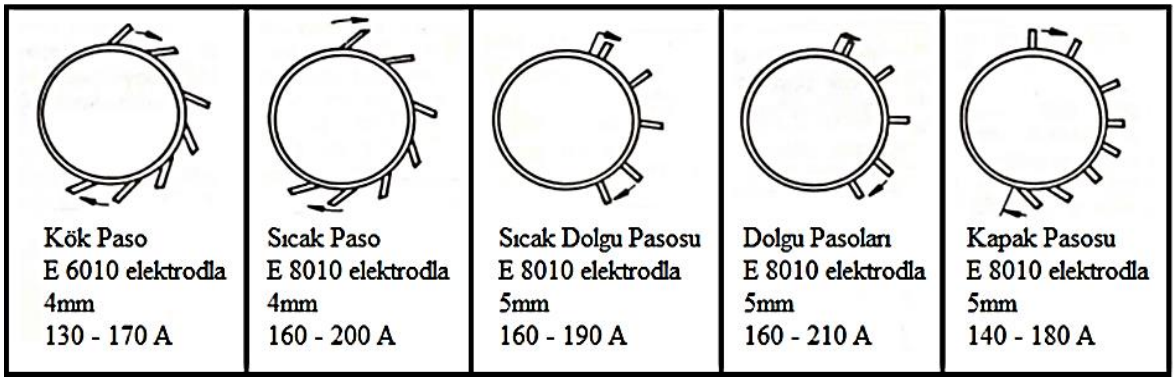
olan borulara yumuşak kaynak metali oluşturan bir elektrod kullanmak en uygun çözüm olarak tespit edilmiştir.

Verilen bir akım için selülozik elektrodla elde edilen nüfuziyet derinliği diğer elektrodlara nazaran % 70 fazladır. Cürufu ince ve çabuk kalkar. Bunlardan dolayı selülozik elektrodlar boru hattı kaynağının en önemli özelliği olan yukarıdan aşağı kaynak yapma pozisyonuna uygundur [34,75].

Şekil 4.3'te kesit kalınlığı 5 mm'den büyük malzemeler ve selülozik elektrodla yukarıdan aşağı kaynak pozisyonu için kaynak ağız hazırlığı ve paso sıralaması, Şekil 4.4'te paso türleri ve pasolarda kullanılacak elektrod türü, çapı ve akım şiddeti aralığı verilmektedir.



Şekil 4.3. Selülozik elektrodla yukarıdan aşağı kaynak ağız hazırlığı ve paso sıralaması [34]



Şekil 4.4. Paso türleri ve pasolarda kullanılacak elektrodların türü, çapı ve akım şiddeti çalışma aralığı [34]

Elektrik ark kaynağı ile aşağıdan yukarı kaynak tekniği

Et kalınlığı fazla olan alaşımlı çeliklerden yapılmış borulara uygulanan ve de bazik örtülü elektrodlar kullanılarak yapılan bir kaynak uygulamasıdır. Bu tekniğin uygulanmasında bazik elektrod kullanma koşullarının tümüne uyulması gerekir. Genel olarak ön tav uygulanmış borulara kurutulmuş elektrodlar kullanılarak gerçekleştirilen bu yöntemin fazla tercih edilmemesinin nedeni kaynak süresinin daha uzun olması ve elektrod sarfiyatının fazla olmasıdır. Burada kök aralığı biraz daha fazladır. Nüfuziyeti sağlayabilmek için kök pasoda 2,5 mm çok kalın etli borularda ise 3,25 mm çapında elektrodlar kullanılır. Dolgu ve kapak pasolarında ise 3,25 ve 4 mm'lik elektrodlar tercih edilir [34,77].

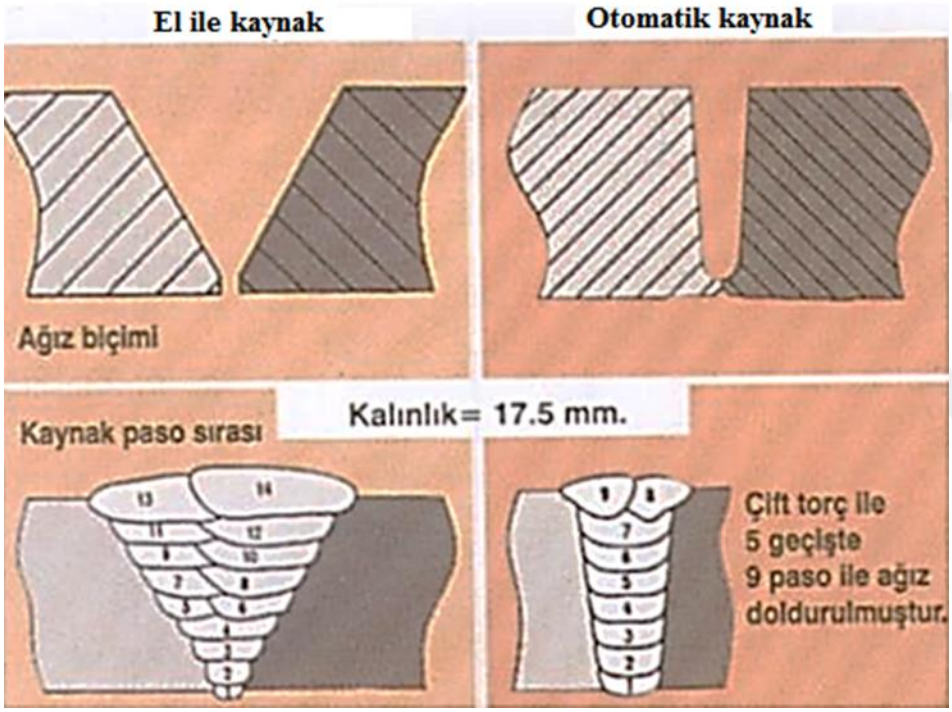
Bu teknikte selülozik elektrodların aksine, kök paso çekilirken elektrodun ucuna bir salınım hareketi verilir. Elektrod daima kısa ark boyu ile olabildiği kadar boru yüzeyine dik tutulur. Kaynak sırasında kaynak yapılan yerin yağmur ve rüzgârdan korunması, cüruf temizleme işlemine de çok özen gösterilmesi gereklidir [34,75].

4.3. Otomatik MIG / MAG Kaynağı

MIG-MAG (Metal İnert Gaz – Metal Aktif Gaz) kaynak yönteminde kaynak için gerekli olan ısı, sürekli beslenen ve ergiyen bir tel elektrodla kaynak banyosu arasında oluşturulan ark ve elektrodtan geçen kaynak akımının elektroda oluşturduğu direnç ısıtması yoluyla üretilir. Elektrod çıplak bir tel olup, bir elektrod besleme tertibatıyla kaynak bölgesine sabit bir hızda sevk edilir. Çıplak elektrod, kaynak banyosu, ark ve esas metalin kaynak metaline komşu olan bölgeleri, atmosfer kirlenmesine karşı, dışarıdan sağlanan ve bölgeye bir gaz memesinden iletilen uygun bir gaz veya gaz karışımı tarafından korunur [34,78].

Boru hatlarında alışılmış olarak uygulanan örtülü elektrod ile ark kaynağına alternatif olarak MIG/MAG kaynak yönteminin kullanımı ile ilgili ilk uygulamalar 1950'li yılların sonlarında başlamıştır. Orbital kaynak adı ile anılan bu yöntemlerde geliştirilen makineler yardımı ile borunun dışarıdan da kaynağı rahatlıkla yapılabilmektedir. Yöntemde kullanılan koruyucu gazın arazi koşullarında esen rüzgârlar ile koruyucu etkisini kaybetmesi, kaynak yerini örten ve taşınabilen portatif kulübe sistemi ile ortadan kaldırılmıştır.

Boru hatlarında kullanılan otomatik MIG / MAG kaynak makineleri kök pasoyu da iç kısımdan yapabilecek konstrüksiyonlarda geliştirilerek makinelerin sahip olduğu donanım sayesinde hem ağızlama hem de kaynak problemi ortadan kaldırılmıştır. Otomatik boru kaynağında hazırlanacak olan kaynak ağzı örtülü elektrod için hazırlanan ağza nazaran daha dardır, zira kullanılan teller 0,9 mm çaplarında olduğundan ağzın kök bölgesine telin ulaşmasında bir sorun yoktur (Şekil 4.5). Bu şekilde bir uygulama ile kaynak hızı arttığı gibi yığılan kaynak metali de az olacağından birim conta kaynağı başına düşen kaynak maliyeti de düşmektedir [34,79,80].

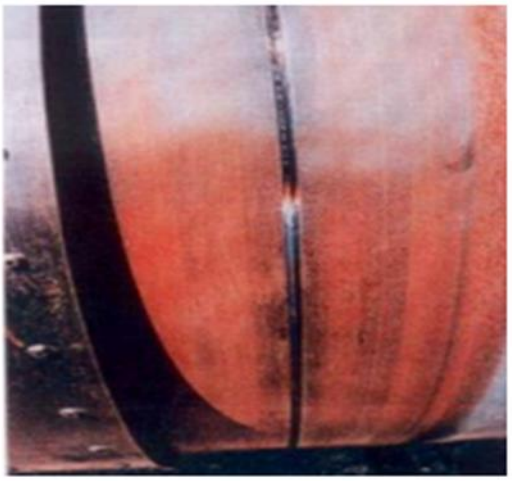


Şekil 4.5. Boru çeliklerinin kaynağında el ile yapılan kaynak ile otomatik kaynakta kaynak ağızlarının karşılaştırılması [34,79]

Boruların otomatik MIG/MAG kaynağında kullanılan sistemin üç ana ünitesi bulunmaktadır. Bunlar; boru ağızlama makinesi, içten kaynak (kök paso kaynağı) ve merkezleyici makine ile dış kaynak makinesidir.

Özel olarak talaşlı işlem ile dar aralık kaynak ağzı açılmış olan boruların hassas bir biçimde uç uca getirilmesi ve dikişlerin merkezlenmesinin yapılması gerekmektedir. Bunun için özel olarak geliştirilmiş hidrolik tahrikli makineler çeşitli firmalar tarafından üretilmiştir. Bu makinelerin kullanımı ile ağızlama işlemi 2 ila 5 dakika içinde yapılabilmekte olup, 4″ (100 mm) çapından 60″ (1524mm) çapa kadar borular için

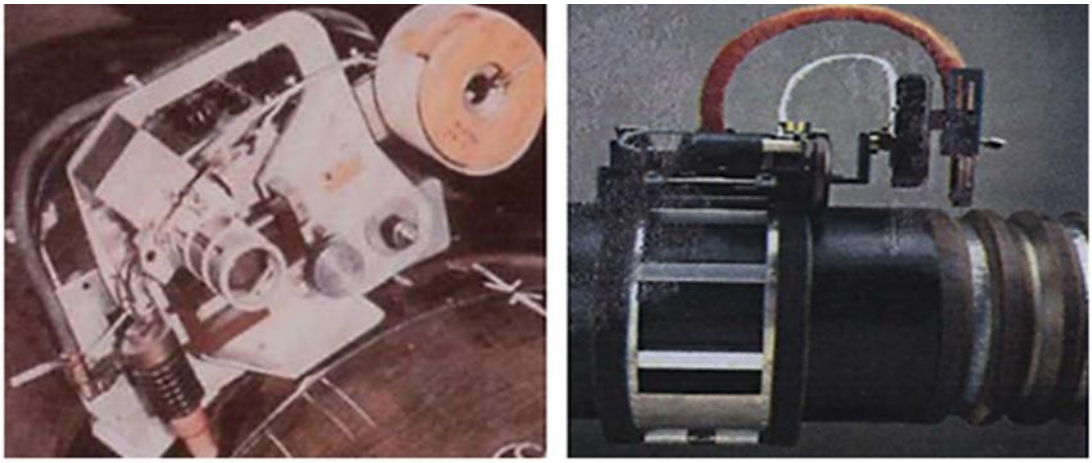
geliştirilmiş ağızlama makineleri bulunmaktadır. Zira pasoların tam ağız eksenine göre kaliteli olarak yapılması çok büyük bir öneme sahiptir [34,79].



Resim 4.2. İç kaynak işlemi ile kök pasonun yapılışında arkın dıştan görünümü [34,79]

Boruya açılmış kaynak ağzının kök pasonun kaliteli olarak iç kısımdan kaynak edilmesini sağlamak üzere boru içi kaynak makinesi geliştirilmiştir. Bu makine, borunun hidrolik tahrikle ağızlanmasını ve kaymaları önleyecek bir ekipman sistemi ile kombine edilmiştir. Özel olarak tasarlanmış birden fazla MIG/MAG torcunun (4 ila 6 adet torç) kök ağzı eksenini takip ederek yörüngesel olarak döndüğü bu makinede 24″ (610 mm) ila 60″ (1524 mm) çaplı borularda rahatlıkla kullanılabilir. Dört kaynak torçlu sistemde iki torç bir tarafta diğer iki torçta diğer tarafta kaynak yaparak örneğin 42″ (1067 mm) çapında bir borunun kök paso işlemi yaklaşık 1,5 dakikada tamamlanır. Boruya açılan kaynak ağzının dışa bakan üst kısmının kaynak edilmesi için geliştirilen kaynak makineleri ise, iyice ağızlanmış ve kök pasosu gerçekleştirilmiş dikiş üzerine sıcak paso, dolgu pasoları ve kapak pasonun yapılabilmesi esasına göre tasarlanmışlardır (Resim 4.2) [34,79].

Boru çevresine monte edilen krameyer dişli bir sistem veya özel olarak dizayn edilmiş ray üzerinde yörüngesel olarak hareketli arabaya monte edilmiş bir veya iki MIG/MAG torcu aynı anda hareket ederek ve aynı zamanda dalga hareketi yaparak sürekli beslenen tel ile ve sürekli beslenen gaz altında kaynak işlemini yapar (Resim 4.3).



Resim 4.3. Tek torçlu otomatik boru kaynak makinesi ve kullanımı [34,71,79]

Otomatik kaynak işlemi ile hız ve güvenilirlik artırılmış ve kaynakçıların daha az yorulması sağlanmıştır. Ayrıca, bu konuda kaynakçıların yetiştirilmeleri çok daha kolay hale gelmiştir [34,79].

4.3.1. Boru hatlarının otomatik kaynağında kullanılan koruyucu gazlar

Bu yöntemde alışılmış MIG/MAG kaynağında az alaşımlı çelikler için geliştirilmiş olan koruyucu gazlar kullanılır. Bu yöntemin ilk geliştirildiği yıllarda kök pasoların saf CO2 ile kısa arkta metal geçişi çok yaygın olarak kullanılmaktaydı ve son pasolarda argonca zengin karışım gazlar tercih ediliyordu. Ancak, zaman içinde boru malzemelerindeki gelişmeler ve darbeli MIG/MAG kaynağının kullanıma girmesi ile tüm pasoların yapılmasında Ar + Karbondioksit (CO_2) gaz karışımları kullanılmaya başlanmıştır. Bu karışımlar ile kaynak metalinin gözenek oluşum tehlikesi hemen hemen ortadan kalkar iken daha mukavemetli ve az sıçrantılı kaynak yapmak mümkündür. Günümüzde %80 Ar +%20 CO_2 karışım gazları daha çok tercih edilmektedir [34,79,80].

4.3.2. Boru hatlarının otomatik kaynağında kullanılan tel elektrodlar

Boru hatlarında özellikle doğalgaz borularında basıncın yüksek olması dolayısı ile daha yüksek kalitede (X70 veya X80) boru çelikleri kullanılarak boru et kalınlığının azaltılması ile kalın etli borularda ortaya çıkan gevrek kırılma problemi önlenmeye çalışılmıştır. Bu gelişmeler otomatik kaynakta daha mukavemetli kaynak metali veren tellerin kullanımını gerektirmiştir. Genellikle, kaynak torcunu taşıyan araba üzerine takılan küçük boyutlu

makaralara sarılmış olan tellerde 0,9 mm çaplı olanlar çok sık kullanılır. Bu teller American Welding Society (AWS) standardına göre ER70S-6 kalitesinde üretilirler, ancak mukavemet özelliklerini iyileştirmek için ve kaynak metalinin tanelerini inceltmek için de Ti ile modifiye edilmişlerdir [34].

X80 kalite boru çeliklerinin kaynağında çentik–darbe mukavemet değerlerini elde edebilmek için bazik örtülü elektrodlar kullanmak gerekmektedir. Ancak bu tür elektrodlar ile yukarıdan aşağı kaynak yapmak gerekmektedir ki bu da boru kaynağında zor kabul edilen bir uygulamadır ve tercih edilmez. Dolayısı ile bu tür uygulamalar için metal özlü tel elektrodlar geliştirilmiştir ve E81T1-Ni1 teli en çok tercih edilen teldir [34].

Bu özlü teller, karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin her pozisyonda kaynağı için üretilmişlerdir. İçeriklerinde yaklaşık olarak % 1 civarında Ni vardır. Özellikle, düşük sıcaklıklarda çentik darbe mukavemeti yüksek kaynak metali oluştururlar. Mükemmel ark kararlılığı vermelerinin yanı sıra düşük sıçrantı özellikleri ve hızlı katılaşan cürufları çok kolay kalkar. Tek pasolu ve çok pasolu kaynak uygulamaları için idealdir. %100 CO_2 ile kullanılabilmelerinin yanı sıra %75 Ar-%25CO_2 karışım gazı ile kullanılabilir ve karışım gaz kullanımı ile oksitlenme ile oluşacak alaşım elementi kaybı azalacağından kaynak dikişinin mukavemet özellikleri de artar [34,79].

4.4. Tozaltı Conta Kaynağı

Bu yöntem, ergiyebilir granül bir toz altında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar dizisidir. Ergimeyi sağlayacak olan elektrik arkı çıplak tel elektrod ile kaynatılacak metal malzeme arasında meydana gelmektedir. Elektrod malzemeye yaklaştırıldığında kısa devre oluşur ve ısı artışı meydana gelir. Böylece malzeme ergir ve bir kısmı buharlaşır. Bu şekilde ısı daha da yükselir ve zincirleme devam eder.

Bu yöntemde kullanılan kaynak tozları, ergimiş metal ve sıcak kaynak dikişini atmosferin kötü etkilerinden korur ve gerektiğinde bir alaşım elemanı gibi kaynak dikişine katkıda bulunarak, kaynak kalitesi ve dayanımı üzerinde etkin bir rol oynar.

Tozaltı kaynağında iyi bir kaynak dikişi elde etmenin ön koşulu uygun kaynak parametreleri ile çalışmaktır. Bu parametreler; kaynak akım şiddeti, toz tipi ve tane

dağılımı, kaynak hızı ve gerilimi, elektrod çapı ve mesafesi, toz tabakasının genişliği ve derinliği sayılabilir [34,40].

Aşağıda tozaltı kaynağı ile yapılan conta kaynağını diğer kaynak pozisyonlarından ayıran üç temel özellik verilmiştir.

İlk olarak kaynak tozu ve metalinin önemine değinilecektir. Kaynak tozu ve kaynak metali iş parçasının eğiminden dolayı yer çekiminin etkisiyle kaynak bölgesinden uzaklaşmak ister. Bu olumsuzluğu önleyebilmek amacıyla;

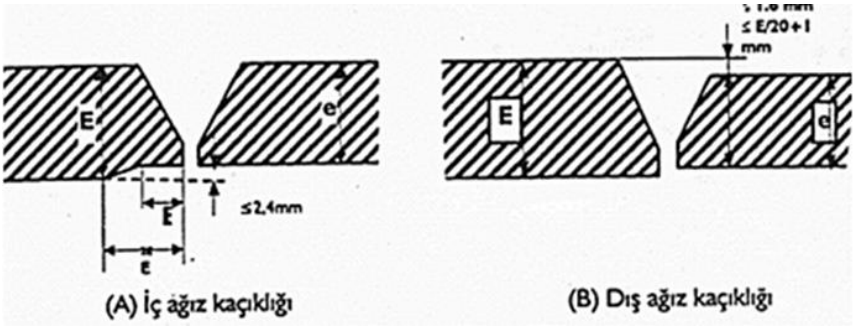
- Tel pozisyonu doğru ayarlanmalı
- Düşük amper ve/veya düşük voltaj ve/veya kaynak hızı vasıtasıyla kaynak metalinin akışkanlığının sınırlanması toz akışının sürekli kaynak metali üzerine olması sağlanmalıdır.

İkincisi de cürufun önemidir. Eğer çok pasolu kaynak yapılacaksa sonraki pasoya geçmeden önce cüruflar temizlenmelidir. Bu da conta kaynağının düzgünlüğünü ve şeklini kontrol altına almaya yarar. Üçüncü olarak da borudaki ovallik ve yerçekiminin kaynağı etkilemesidir [34,71].

4.5. Boru Hatlarının Kaynağı

4.5.1. Kaynak işlemine hazırlık

Borular toz, yağ ve paslardan arındırılmalıdır. Kaynak işleminden önce borunun iç ve dış bölgeleri temizlenmelidir. Boru iç çapı en az iki bölgeden ölçülmeli ve ovalite olup olmadığı tespit edilmelidir. İki boru arasındaki dış yüzeydeki kaçıklık, maksimum 1,6 mm'yi geçmemelidir. Eğer ağız kaçıklığı 1,6 mm'yi geçerse kaynağa izin verilmemelidir. Saha mühendisinin onayı ile 1,6 mm`den daha büyük lokal kaçıklık bronz kaplı çekiçle dövülerek düzeltilmelidir. İki boru arasındaki iç ağız kaçıklığı 2,4 mm'den daha büyük olmamalıdır. Boru ve bağlantı malzemelerinin kaynak ağzı fabrikada açılmış şekilde sahaya gelmektedir. Kaynaktan önce tüm çevrede kaynak ağzı yüksekliği 1,6 mm, olup olmadığı incelenmelidir. Gerekirse taşlanıp eşitlenmelidir [34,35,76].



Şekil 4.6. İç ve dış ağız kaçıklığı [34,35,76]

Isıl işlem aşamaları

Gerek tamirat işleminde gerekse ilk montaj anında kaynak sırasında ana metalin soğuk çatlamasına engel olmak için, kaynak bölgesini ön tavlama tabi tutmak yararlıdır.

Ön tavlama işlemi soğuma hızını yavaşlatmak için yapılır. Özellikle karbon eşdeğerliği ($C_{eş}$) > 0,45 olan, alaşımlı ve kalın malzemelerde önemlidir. Hızlı soğuma;

a) Metalurjik yapıyı daha sert yapar.

b) Hidrojenin ve diğer gazların kaçmasına zaman vermez. Kaim parçalarda ise deformasyon imkânı az olduğundan soğurken çekme nedeniyle çatlaklara yol açma tehlikesi vardır. Dolayısıyla ön tavlamaya, kimyasal bileşim ve kalınlığa bakılarak karar verilir. Genel bir kural olarak Ceş > 0,45 ise 150-200 °C; Ceş > 0,60 ise 200-400 °C sıcaklık aralığında ön tavlama uygulanır.

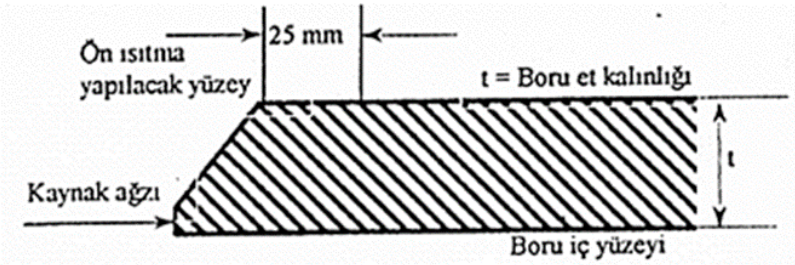
Kaynağın ısıl işlemi aşağıdaki işlemlerin tümünü içeren bir genel deyimdir.
• Parçanın kaynak öncesi ısıtılması
• Pasolar arasının sıcak tutulması
• Gerilme giderme

Gerilme giderme; kaynak sırasında oluşan iç gerilmeleri minimize etmeyi amaçlar. Ancak bu arada kopma mukavemetinde bir miktar düşme söz konusudur. Bu nedenle mukavemet iç gerilme durumu optimize edilmelidir. Boru hatların da gerilme giderme olayı çok pahalı bir olaydır. Bu nedenle dizaynda dikkat edilir ve gerilme giderme tavlamasını gerekli kılacak gerilmelere yol açmamaya çalışılır.

Bir kaynak işleminde bütün bu ısıl işlem aşamalarının uygulanması gerekmez. Şartlar bu aşamalardan bazılarının veya tümünün uygulanmasını gerektirebilir veya aksine hiçbirinin uygulanmasını gerektirmeyebilir [34,35,76].

Çevre şartları

Çevre sıcaklığı 5 ºC`nin altında ise borunun veya bağlantı elemanlarının kaynak yapılacak uçlarında uygun bir ısıtıcı ile kaynak ağzından en az 25 mm uzaklığa kadar olan bölgeler ön tavlama yapılmalıdır [34,35] (Şekil 4.7).



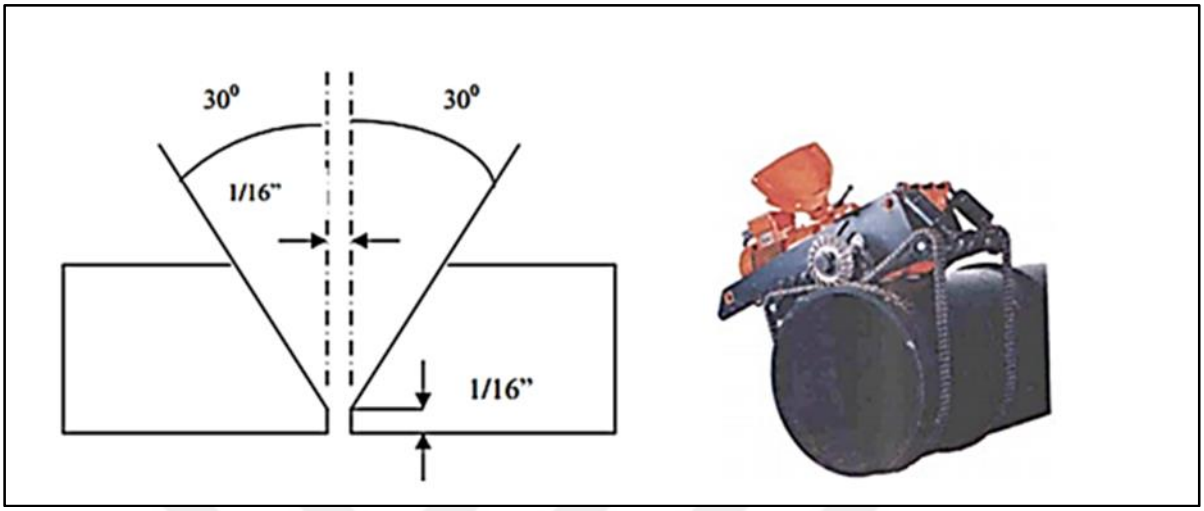
Şekil 4.7. Ön tavlamaya tabi tutulacak kaynak bölgesinin şematik gösterimi [34,35,76]

Ön tavlama sıcaklığı boru et kalınlığı 0,275 inç`den (7mm) az ise 95 ºC olmalıdır. Boru et kalınlığı 0,275 inç'den (7 mm ) büyük ise 150 ºC olmalıdır. Çevre sıcaklığı +5 ºC`nin üstünde olmasına rağmen yağmurlu günlerde sabah saatlerinde rutubetin alınması için boru 20-30 ºC`ye kadar ısıtılmalıdır. Hava şartları uygun olana kadar veya hava koşullarının üstesinden gelmeyi mümkün kılabilecek önlemler alınana kadar kaynak yapılmasına izin verilmemelidir [34,35,76].

Boruların kaynaklanmasında kaynak ağzı hazırlığı

Boru hatlarında hatasız ve kaliteli bir kaynaklı birleştirme elde etmenin ön koşulu kaynak ağzının gereken şekilde hazırlanmasıdır. Boruların birbirini ağızlayabilmesi için çevre geometrilerinin birbirileriyle uyum sağlaması gereklidir. Zira spiral kaynaklı borularda üretim yönteminden kaynaklanan bir ovallik vardır. Boyuna kaynaklı borularda ise kaynak dikişinin bulunduğu kısımda bir düzlük görülür. Boru hatlarının döşenmesinde kaynak öncesi boruların birbirlerini ağızlayıp ve puntaların yapılabilmesi için özel tutturma tertibatları kullanılır. Kaynak ağzı açılmış borular bu tutturma ve merkezleme tertibatı

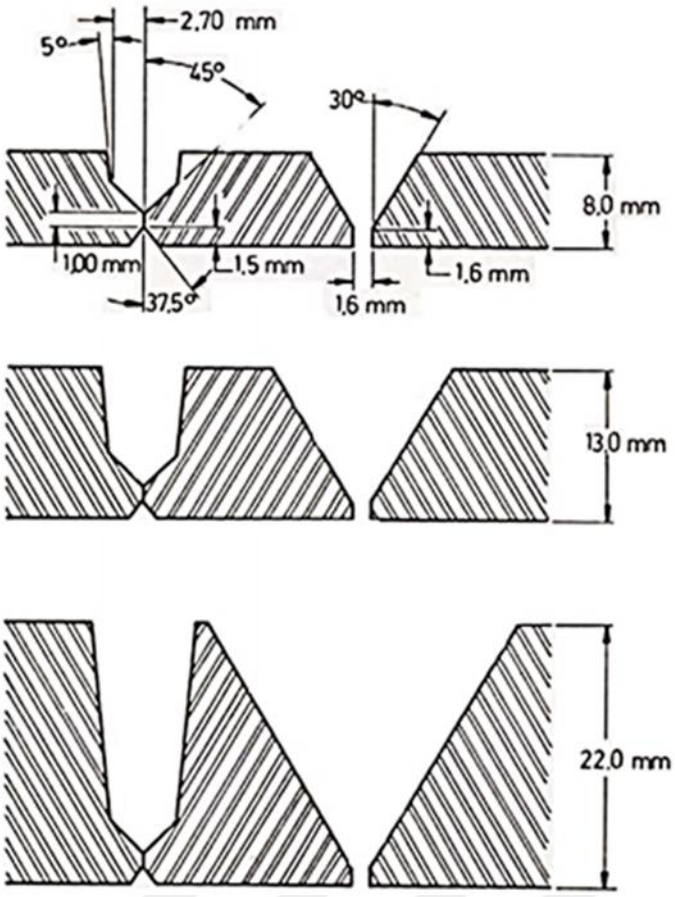
içinde birbirlerini ağızlar iken kaynak ağzının kök aralığı da standardın öngördüğü ölçüde olmalı ve bu aralık bütün çevre boyunca korunmalıdır [34,35,75,76].



Şekil 4.8. Kaynak ağzı şekli ve kaynak ağzı açma aparatı [34,35,71,81]

Kök nüfuziyeti açısından kök yüksekliği ve aralığı çok önemlidir. Yükseklik az olursa içeriye akma yapar, çok olursa nüfuziyet sağlanamaz. Açı dar olursa yanlarda ergime eksikliği, cüruf sıkışması olabilir. Kök aralığı çok olursa yanlarda yanma çentiği ve akma meydana gelir, az olursa nüfuziyet sağlanamaz. Boru kaynaklarında, kaynak ağzı tercihen mekanik olarak açılmalıdır. Kaynakçı, duruma göre ark boyu, hız ve elektrod yönlendirmesi ile nüfuziyeti ayarlayabilmelidir [34,35].

Özellikle boru hattı kaynağı için geliştirilen küçük çaplı tel kullanılan MAG kaynağıdır. Fabrikadan 30º'lik V kaynak ağzı açılarak sevk edilen borular, bu tip kaynak için uygun değildir. Kaynak ağzında olabilecek küçük kaçıklıklar el kaynağında sorun çıkarmayabilir, fakat otomatik MAG kaynağında çok ciddi sorunlar yaratabilir. Bu yüzden kaynaktan önce makinenin özel tornası ile özel kaynak ağzı açılır (Şekil 4.8). Kaynatılacak olan borular otomatik MAG kaynak makinesinin kendi iç kelepçesiyle ağız ağıza getirildiğinde arada hiçbir aralık bırakılmaz. Dolayısıyla gerekli kaynak metali miktarı, el kaynağına göre daha az olur [34,35].



Şekil 4.9. 30 º'lik standart kaynak ağızları (sağ) ile otomatik MAG kaynağı, kaynak ağzı mukayesesi [34,35]

Otomatik MAG kaynağında kök paso içerden çekilir, bu suretle kök pasoda olabilecek yanma çentikleri en aza indirilir. Diğer bir avantaj da, kök paso bitmeden, dışarıdan sıcak paso kaynağına başlanabilir. Bu suretle kaynak işlemi hızlandığı gibi iç kelepçe sökülmeden daha mukavemetli bir kaynak elde edilir [34,35].

Uygulamada boru hatlarının kaynağında mekanik olarak talaş kaldırarak hazırlanmış kaynak ağızları tercih edilir. Borular döşenecekleri hatta kaynak ağızları boru imalatçısı tarafından hazırlanmış olarak getirilir. Nakliye sırasında da boru ucunun her hangi bir yere çarparak zedelenmemesine özen gösterilir.





Resim 4.4. Boruların plazma kesme aparatları [34,35,71]

Borular birbirlerine kaynak öncesi puntalanmalıdır. Bu puntalama işlemi boruları ağızlayıp merkezleyen tertibat yardımı ile yapılmalıdır ve kök alın aralığı parça kalınlığına ve uygulanan kaynak yöntemine göre 1/16 ile 1/8 inç. (1,6 ila 3,2 mm.) arasında seçilmeli ve bu değer tüm çevre boyunca sabit tutulmalıdır. Boru çapının 350 mm'yi aştığı hallerde merkezleme tertibatı içten takılan hidrolik tahrikli türden olmalıdır. Zira boru hatlarında kök alın aralığı 1,6 mm olarak sınırlanmıştır. Kalın çaplı borularda bu koşul ancak içten takılan ve hidrolik tahrikli merkezleme tertibatları ile sağlanabilmektedir [71,35,81].





Resim 4.5. Conta kaynaklarının merkezleme tertibatı [34,35,71]

4.5.2. Boru kaynağında kullanılan kaynak sırası

Boru kaynağında uygulanan paso sıraları, malzeme et kalınlığı 3 ile 4 mm arasında ise işlem üç pasoda kök, sıcak ve kapak şeklinde, et kalınlığı 4 mm'yi geçen borularda kaynak işlemi en az; kök, sıcak, dolgu, kapak olarak 4 paso halinde yapılmalıdır.

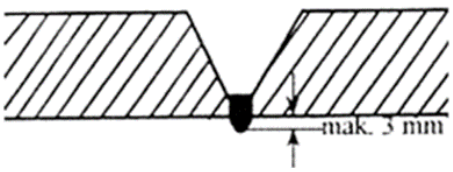
Kök paso

Kök pasoda nüfuziyet ve süreklilik çok önemlidir. Boru et kalınlığına uygun çapta elektrod seçilir. Çapı 4 inç'ten 12 inç'e kadar olan borularda 2,5 mm'lik elektrod kullanılır [34,35]. Çizelge 4.1'de boru çapı ve et kalınlığına bağlı olarak kullanılan elektrod çapları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Boru çapları ve et kalınlıklarına uygun elektrod çapları [34,35,76]

Boru çapı (inç)	Boru cidar kalınlığı (mm)	Kök	Sıcak	Dolgu 1	Dolgu 2	Kapak
4	4,37	2,5	2,5	3,25	-	3,25
6	4,37	2,5	2,5	3,25	-	3,25
8	4,78	2,5	3,25	3,25	-	4
12	5,56	2,5 – 3,25	3,25	3,25	-	4
16	6,35	3,25	3,25	4	-	4
20	7,14	3,25	3,25	4	-	4
24	7,92	3,25	3,25	4	4	4-5
28	9,52	3,25	3,25	4	4	5

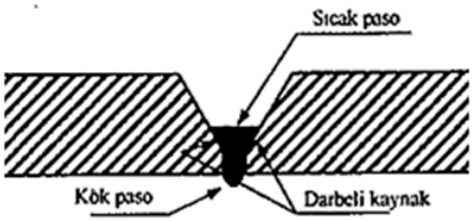
Kaynak ağzı, fabrikasyon olarak hazırlanmış boru–boru kaynağında kök paso yukarıdan aşağı (4 ve 6″ hariç) doğru yapılması durumunda elektroda kesinlikle salınım hareketi verilmemelidir. Elektrodun arkı tamamen borunun iç tarafında oluşmalıdır. Kök paso tamamlandıktan sonra cüruf tüm kaynak boyunca metal parlaklığı görülüne kadar titizlikle temizlenmelidir. Kök paso cürufunun giriciliği fazladır. Bu yüzden temizlik sırasında kaynak metali ile ana metalin birleşme noktalarına dikkat edilmeli, taş kaçırmadan ve pasoyu fazla inceltmeden cüruflar temizlenmelidir. Kök pasoda elektrod eksi kutuplanabilir. Boru bağlantısı kök pasonun bitmesinden sonra yapılacak paso tamamlana kadar kesinlikle hareket ettirilmemelidir. Çapı 12″ den büyük olan borularda kök kaynağı yapılırken kelepçe takılı durumda olmalıdır. Kök pasoda müsaade edilebilecek sarkma en fazla 3 mm olmalıdır (Şekil 4.10) [34,35,75-77].



Şekil 4.10. Kök pasoda sarkma [34,35,76]

Sıcak paso

Sıcak pasoda doğru akım elektrod (+) kutupta kullanılır. Paso yukarıdan aşağı yöntemiyle yapılır. Kök pasonun taşla en kısa sürede temizlenmesinden sonraki 5 dakika içinde sıcak pasonun atılması gerekir. Aksi takdirde soğumanın etkisiyle kılcal çatlaklar meydana gelebilir (Şekil 4.11) .



Şekil 4.11. Sıcak paso [34,35,76]

Sıcak paso yüksek amperle çekilir ve özellikle kenar kısımlarda (ana metal ile kök pasonun birleşme bölgeleri) darbeli uygulanır. Böylece yüksek amperle çalışıldığında kök paso tamamen temizlenmiş ve aynı zamanda temperlenmiş olur. Bu durumda kök pasonun delinme riskine karşı dikkatli olunmalıdır. Sıcak paso düşük amperle çekildiği zaman kök ve ana metal arasında sıralı cüruf hataları kalabilir [34,35,75,76].

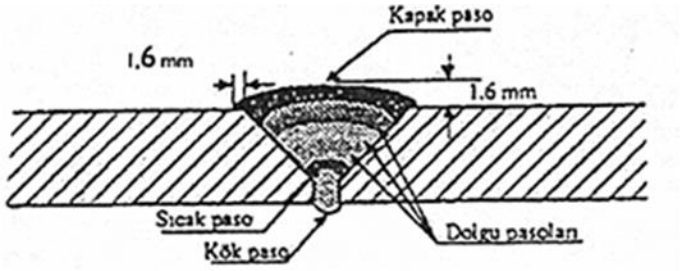
Dolgu pasosu

Dolgu pasosu et kalınlığına bağlı olarak birden fazla olabilir. Farklı pasoların başlangıç noktaları bir önceki pasonun bitiş noktasından en az 5 cm geriden başlamalıdır. Dolgu pasoları, elektrod çapına uygun amper ve dolgu için gerekli el hareketi ile yapılmalıdır. Her paso tamamlandıktan sonra cüruf kalmayacak şekilde tel fırça veya uygun aletlerle temizlenmelidir. Dolgu pasoları tamamlandıktan sonra kaynak metali boru yüzeyi ile aynı seviyede olmalıdır. Düşük olan bölgelerde kısa ek pasolar takviye yapılmalı ve boru yüzeyiyle aynı hizaya getirilmelidir [34,35,75,76].

Kapak paso

Kapak pasonun düzgün olması için elektroda çok düzgün bir salınım verilmesi gerekir. Kapak yüksekliği ve kenar bindirmeleri 1,6 mm civarında olmalıdır. Tamamlanmış kaynak

yüzeyi, orijinal kaynak ağzı genişliğinden 2–3 mm daha büyük olmalıdır (Şekil 4.12) [34,35,75,76].



Şekil 4.12. Tamamlanmış kaynak kesiti [34,35,76]

Kaynak sonrası yapılan işlemler

Sıcak, dolgu ve kapak pasoları atıldıktan sonra cüruflar tel fırça ile titizlikle temizlenmelidir. Kaynak sırasında oluşan sıçrantılar boruya hasar vermeden bir keski ile temizlenmelidir. Taşlamalar sırasında kaynak ağız bölgesi dışında taş kaçırmalarına müsaade edilmemelidir [34,35,76,77].

Sıcak, dolgu ve kapak pasoda ortaya çıkan hataların tamirinde dikkat edilmesi gereken konular aşağıda belirtilmektedir;

- Hatanın bulunduğu yer taşlanarak yok edilir, taşlama derinliği ve genişliği hata içeren kaynak pasosunun tümünü kapsayacak boyutta olmalı ve boyu da 100 mm'den az olmalıdır. Tamir yapılacak bölgeye ön tav uygulanır. Ön tav ile kaynak edilen borular tamir edilecek ise tamir ön tav sıcaklığı, birincil ön tav sıcaklığının altında olmalıdır.

- Tamir işleminde esas metalin özellikleriyle uyum gösteren rutil veya selülozik örtülü elektrod kullanılabilir. Rutil elektrod kullanılması halinde, elektrod çapı 3,25 mm seçilmeli ve aşağıdan yukarı pozisyonda bir kaynak tekniği uygulanmalıdır [34,35,75].

5. DENEYSEL TASARIM TEKNİKLERİ

Herhangi bir deneyde amaç, kesin çıkarımlarda bulunmak ya da üzerinde çalışılan konuya ilişkin bazı hipotezler hakkında bilgi vermektir. Kararlar kesin olmama halinin ışığı altında verilir. İstatistik, kesin olmama halinin ışığı altında karar verebilmek için kullanılan bir araç olarak adlandırılır. Kesin olmama hali hiçbir bilgi olmadığını değil, yalnız kesin sonucun tam olarak önceden kestirilmediğini belirtir. İstatistiksel teknikler deney yapısında kullanıldığında, karar verirken göz önüne alınacak riskin büyüklüğü belirlenebilir. Karar verme, istatistiksel yöntemlerin kullanımına dayandığında veri toplamayı gerektirir. Bu nedenle verinin toplanma yöntemi büyük önem kazanır. Bir deneyin tasarlanması, basit olarak deneyde izlenecek sıra (yol, düzen) olarak tanımlanır. Deneysel tasarımlar veri toplamadaki hatayı azaltmaya yardım ederler. Deneysel olarak çalışılacak bir projede, tasarım ve çözümleme evresindeki her bir aşamanın dikkatlice uygulanması gerekir [82,83].

Deneysel bir çalışmada en iyi çıktı, sistematik bir yaklaşım dikkate alındığı zaman elde edilir. Farklılıklar olmasına rağmen genel olarak deneysel bir çalışma; problemin tanımı, bağımlı ya da yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin seçimi, bağımsız değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi ve etken düzeylerinin nasıl birleştirileceği basamaklarını içermektedir. Deneysel tasarım; alınan gözlemlerin sayısı, deney sırası, kullanılacak rasgeleleştirme yöntemi ve deneyi tanımlayan matematiksel model temel bileşenlerinden oluşmaktadır. Çözümleme ise; veri toplama ve işleme, deney istatistiklerinin hesaplanması ve sonuçların yorumlanmasını içerir [82].

Taguchi, Yapay Sinir Ağları gibi teknikler deneysel tasarım ve modelleme tekniklerinden bazılarıdır. Bu çalışmada deney düzeneklerinin belirlenip, kaynak işlemlerinde sonuçların en optimal şekilde dizayn edilip, optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi Metodu kullanılmıştır.

5.1. Taguchi Metodu

Kaynak parametrelerinin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak, harcanan zamanı ve malzemeyi azaltmak için Taguchi metodu alternatif bir yaklaşım olarak devreye girmektedir.

Temel olarak Taguchi metodu, yüksek kalite sistemleri için güçlü bir yöntemdir. Maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Taguchi son yıllarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Taguchi metodu, bir ürün ya da prosesin mühendislik optimizasyonunu; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır [82,84].

Klasik deney tasarım yöntemlerinin kullanımı endüstriyel şartlar altında verimli olamamaktadır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı da hızlı bir şekilde artmakta, maliyetler yükselmekte, uygulamalar zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda kesirli faktöriyel tasarım olan Taguchi Metodu (TM) uygulanması daha verimli ve kolay olacaktır. Karar vermeyi gerektiren birçok durumda da TM başarı ile uygulanabilmektedir [85].

Genichi Taguchi, kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesindeki verimliliği arttıracak bir çözüm getirmiştir [86]. Böylece deney öncesi yapılan çalışmalar sonucunda deney sayılarında önemli derecede azalma gözlenmiştir [85].

Taguchi yönteminin esas amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılmasıdır. Temeli deney tasarımına dayanmaktadır. Bu yöntem, kesirli faktöriyel deney tasarımı yöntemine, robust tasarım ve ortogonal diziler gibi kavramları eklemektedir. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. S/N oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir [85].

Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirebilmesini sağlaması ve bunun içinde tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur [86].

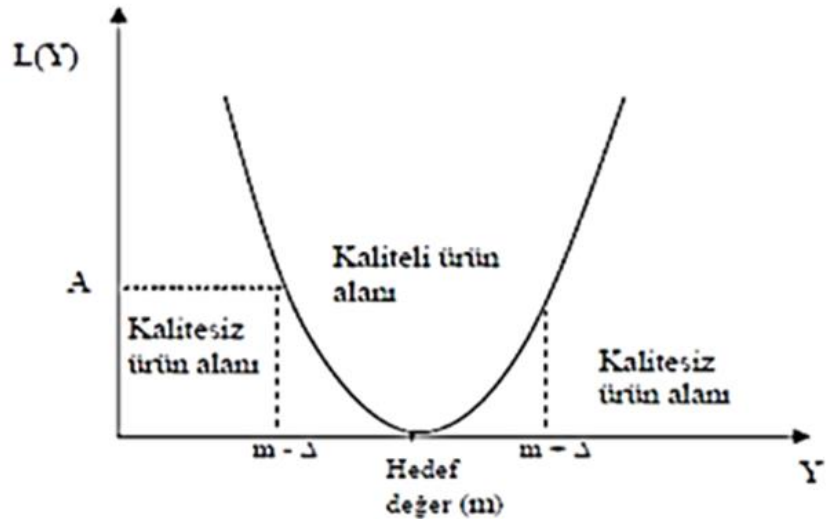
5.1.1. Taguchi yönteminin gelişimi

Dr. Taguchi, Ronald Fisher'in geliştirdiği deney tasarımı yöntemine kattığı yeniliklerle, ikinci dünya savaşı sonrasında Japonya'daki en önemli projelerden birisi olan Japon telefon sisteminin geliştirilmesi projesinde yaptığı çalışmalardaki başarısıyla adını dünyaya duyurmuştur. Projenin amacı ABD'deki AT&T Bell telefon şirketinin laboratuvarlarında kullanılan iletişim sisteminin aynısını Japonya'ya kurmaktı. Ancak Nippon telefon ve telgraf araştırma merkezinin büyüklüğü AT&T'nin %2'si kadar olduğundan projenin bitirilmesinin yaklaşık 20 yıl süreceği tahmin ediliyordu. Dr. Taguchi robust tasarım ve kesirli faktöriyel tasarım yöntemlerinin kullanılmasını önererek projenin sadece 4 yılda bitirilmesini sağlamıştır. Robust tasarımı geliştiren ve birçok ürünün geliştirilmesinde kullanan Taguchi 1962'de kalite alanında en önemli ödüllerden biri olarak kabul edilen Deming ödülüne layık görülmüştür [87].

5.1.2. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu

Taguchi'nin kalite felsefesinin dayandığı temel nokta kayıp fonksiyonudur. Kayıp fonksiyonu, üründeki kalitesizlikten dolayı meydana gelen tüketici memnuniyetsizliğinin derecesini belirleyen sürekli bir fonksiyondur [88].

Düşük kalite, tüketiciyi beklentilerini karşılayacak başka ürünler aramaya yöneltecektir. Bu durumda toplumda meydana gelen kayıp aynı zamanda işletmeyi de etkileyecektir [87].



Şekil 5.1. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu [89]

Performans karakteristiği Y olan bir ürünün herhangi bir tüketiciye vermiş olduğu kayıpların parasal değeri L(Y) ile gösterilir ve Y'nin kayıp fonksiyonu olarak adlandırılır [87].

$$LY = k(Y - m)^2 \tag{5.1}$$

Burada k, hedeften sapan bir birim ürünü tekrar hedef değerine getirebilmek için üreticinin alacağı önlemlerin birim maliyetini gösterir Hedeflerin her iki yönde olacak uzaklaşmalarının aynı anlamı taşıdığı dikkate alındığında eşitlik 5.2 yazılabilir [85].

$$L\,m + \Delta = k\,m - \Delta - m^2 \quad A = k.\Delta^2 \tag{5.2}$$

Buradan,

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \tag{5.3}$$

Kayıp fonksiyonunun biçimi, performans karakteristiği (Y)'nin özelliğine göre belirlenir. Y'nin özelliğine göre kullanılan kayıp fonksiyonları bazı durumlarda simetrik, bazı durumlarda simetrik olmayan bir yapı gösterir. Taguchi'nin geliştirdiği farklı amaca uygun üç fonksiyon vardır. Bunlar;

Performans karakteristiği adı verilen sonucun en düşük en iyi olduğu durumda:

$$S_N = -10\log\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} y_i^2 \tag{5.4}$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S_N = -10\log\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}\frac{1}{y_i^2} \tag{5.5}$$

Nominal en iyi olduğu durumda;

$$S_N = 10 \log \frac{\overline{y}^{\,2}}{s^2} \tag{5.6}$$

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n} y_i \tag{5.7}$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n} y_i - y^2 \tag{5.8}$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} y_i^2\right) \tag{5.9}$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \tag{5.10}$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n} y_i - y^2 \tag{5.11}$$

Burada y_i = Performans karakteristiğini i: gözlem değeri, n = 1 denemedeki test sayısı = gözlem değerlerinin ortalaması S^2 = Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür [85].

5.1.3. Çevrim içi kalite kontrol

Üretimine başlanan ürünün, muayene yöntemleri ile kalitesinin sağlanmaya çalışılması aşamasıdır. Bu kontrol çalışmaları sırasında istenilen spesifikasyon değerleri dışında kalan ürünlerin ayıklanarak, ıskartaya ayrılması veya düzeltme işlemlerine tabii tutulması aşamasıdır. Aynı zamanda müşteriye iletildikten sonra kusurlu olarak geri gelen ürünün servis ve bakım aşamasıdır [90].

Ürünün imalatına geçilmesinden sonra çevrim içi kalite kontrol başlar. Çevrim içi kalite kontrol, Ürünün imalatı sırasındaki ve imalatı sonrasındaki kalite geliştirme faaliyetleridir.

İstatistiksel proses kontrol ve çeşitli muayeneler bu kalite kontrol faaliyetleri içerisindedir [91].

5.1.4. Çevrim dışı kalite kontrol

Yeni geliştirilen bir ürün için pazar araştırması ile ürün veya üretim prosesinin geliştirilmesi, var olan bir kalite probleminin çözümü için ise problemin tespiti ve problemin ortadan kaldırılması sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler ürüne doğrudan müdahaleler yerine, üretim başlamadan önce gerçekleştirilen tasarım faaliyetleridir [91].

Sistem tasarımı

Sistem tasarımı aşaması Taguchi Metodunun ilk adımını oluşturmaktadır. Sistem tasarımındaki temel amaç, müşteri ihtiyaçları ve işletmenin yeteneklerini kullanarak üretim sürecindeki spesifikasyonlar ve toleranslar temelinde en küçük maliyetle gerçekleşecek mamul üretimini tasarlamaktır. Bu aşamada tasarımcı tarafından üründen beklenen fonksiyonların elde edilebilmesi için gerekli olan üretim teknolojileri tasarlanır ve ürün için en uygun olanı seçilir. Fakat bu işlemler tam müşteri tatminini sağlayacak olan hedef değerden minimum sapma ile yapılmalıdır. Üretilmesi düşünülen ürünle ilgili olarak öncelikle mevcut pazarın tanımlanması, yeniliklerin değerlendirilmesi, bilimsel ve mühendislik bilgilerinin toplanması, malzeme ve ekipmanla ilgili gerekli tercihlerin yapılması bu aşamanın konusunu oluşturur. Ayrıca bu aşamada ürün ağacındaki parçaların, malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesinde gerekli olan karakteristiklere ilişkin bir takım kararlar verilir. Bu adımda iyileştirme yapılacak süreç çok iyi kavranmalı ve ihtiyaçlar net olarak ortaya konmalıdır [82,85].

Herhangi bir ürün için sistem tasarımı süreç aşamasında da gerçekleştirilir. Süreç, ürünü etkileyebilecek faktörlere karşı minimum duyarlı hale getirilir. Amaç, ürünü en ideal kalitede ve mümkün olduğunca minimum maliyetle belirlenen tolerans limitleri dâhilinde, üretebilecek bir üretim sistemini tasarlamaktır [82,75,92].

Sistem tasarımı yeni ürün ve süreç gelişiminin evrensel safhasıdır. Kavramlar önceki deneyimleri, bilimsel temelleri, mühendislik bilgileri, yeni gelişimleri ve bunların tümünün

uygun kombinasyonlarını temel almaktadır. Sistem tasarımının arkasındaki strateji; yeni fikirler almak ve bunları çalışır hale getirmektir [82,93].

Parametre tasarımı

Taguchi Metodunun ikinci adımı olan parametre tasarımı hem ürün hem de süreç tasarımı için ürün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapıldığı aşamadır [82].

Parametre tasarımının gerçekleştirilmesindeki amaç, üründe ve proseste değişkenlik meydana getiren kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin en iyi seviyelerinin seçilerek ürün ve prosesteki değişkenlikleri en aza indirgemektir [94].

"Ürün performansındaki değişkenliği azaltarak, ürünün hem imalat hem de kullanımı ve bakımı esnasında oluşacak maliyetleri düşürecek şekilde ürün parametrelerinin en iyi değerleri belirlenir. Böylelikle ürün, imalatı ve kullanımındaki performansı yönüyle değişkenlik yaratan faktörlere –gürültü faktörleri (noise factors)– karşı duyarsız olacaktır" [85,95].

Ürün parametre tasarımı, ürün parametreleri, malzeme formülasyon değerleri, çeşitli boyutlar, yüzey örnekleri gibi kriterlerin optimal değerlerinin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Ürün parametre tasarımı ve süreç parametre tasarımında amaç, üründe ve süreçte, varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini optimal seçerek, ürün ve süreçteki varyasyonu en aza indirmektir. Taguchi bu amaçla gerçekleştirilen ürün ve süreç tasarımına sağlam (robust) tasarım demektedir. Burada belirtilen sağlam tasarım, kontrol edilemeyen nem, toz, ısı, gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız ürün ve süreç tasarımı anlamında kullanılmaktadır. Sağlam tasarımda, kalitesizlik yaratan ve kontrol edilemeyen bir faktörün etkisi, kontrol edilebilen başka faktörlerin ayarlanması sonucu azaltılmaktadır. Deney tasarımı bu amaçla kullanıldığı zaman, maliyeti arttırmadan kaliteyi geliştirmek mümkün olmaktadır [82,96].

Ürün ve süreç parametre tasarım aşamalarında, optimal değerlerinin belirlenmesi gereken birbiriyle ilişkili çok sayıda kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktör vardır. Bu

faktörlerin, ürün ve ürünün performansına olan etkilerinin belirlenebilmesi için en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Deney tasarımı aracılığıyla bir çok faktörün ürün üzerindeki etkisini ekonomik olarak belirlemek ve varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemleri tasarım aşamasında almak mümkün olmaktadır [82,96].

Tolerans tasarımı

Tolerans tasarımında parametre belirleme çalışmaları, sonucu istenilen hedefe ulaşılamadığı durumda yapılan ilave çalışmalardan ibarettir. Bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır [85].

Parametre tasarımında, tasarım parametreleri için gerekli olan hedef değerler ayarlanır. Üretim sırasında olabildiğince bu hedef değerlere ulaşılmaya çalışılır. Fakat üretim sürecinde her zaman bir değişim söz konusu olduğundan bir tolerans aralığı verilmesi gerekir. Tolerans tasarımı, parametre çalışmaları sonucu istenilen hedefe varılamadığı takdirde yapılacak süreç veya ürün parametreleri için en iyi toleransları belirleme çalışmalarını ifade etmektedir. Bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır [82].

Sistem tasarımını tamamlayıp, sistemi oluşturan elemanların parametrelerinin optimal değerleri belirlendikten sonra oluşacak kalite kaybı katlanılacak kalite maliyeti ile birlikte değerlendirilerek, her bir parametre (faktör) için tolerans elde edilir. Tolerans sınırları daraldıkça üretim maliyetleri artacağı için ürün de daha maliyetli olarak üretilir. Üretim maliyetlerindeki artışın nedeni üretim hattının daha sıkı kontrol edilmesi, daha dar toleransla çalışan teknolojik açıdan daha pahalı tezgâhlara ihtiyaç duyulmasıdır. Aksi takdirde, tolerans sınırları genişledikçe, ürünün ilgilenilen fonksiyonunun hedef değerden sapmaları da büyüyecektir. Bunun sonucu olarak kalite kayıpları artacaktır. Tolerans tasarım adımında en ekonomik tolerans belirlenir. Belirlenen bu toleranslar ile hedef değerden kabul edilebilir sapmalara göre ürün maliyeti minimize edilmektedir [82].

Üretim sürecindeki değişimler olabildiğince azaltılsa bile amaç hala hedef değere ulaşmaktır. Ne yazık ki bazı durumlarda değişkenlik çok büyük olmakta ve değişkenliği düşürmek için toleransların küçültülmesi gerekmektedir. Tipik olarak her bir kontrol parametresinin yaklaşık olarak katkısını belirleyebilmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmakta böylece tolerans daraltmada, gelişmiş malzeme kullanma durumunda veya diğer yüksek maliyetle kaliteyi geliştirmeye değecek faktörler tanımlanmış olmaktadır. Üretici daha düşük malzeme özellikleri kullanarak bir üründen daha fazla kar elde etmek amacıyla ürün karakteristiklerinin tolerans limitlerinin uç noktalarına yaklaşılmasına izin vermemelidir. Tasarım parametreleri seçilirken toplam ürün maliyeti ile müşteri maliyetinin toplamı göz önüne alınmalıdır. Tolerans değerleri, ürün karakteristiklerinin hedef değerden olan sapmalarının oluşturduğu toplumsal kayıpla, ürün karakteristiklerinin tolerans dışına çıktığında üreticinin bunu düzeltmek amacıyla yaptığı harcamaları dengeleyecek bir biçimde seçilir. Toleransların uygun seçilmesi önemli bir ekonomik konu olması kadar önemli bir kalite konusudur [82,97].

Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni vardır;

- *En büyük en iyi:* Bu tip tolerans çalışmalarında kalite değişkeninin bir üst sınırı yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Ölçü büyüdükçe verimlilik de artacaktır.

- *En küçük en iyi:* Bu tip toleranslar üretim sürecindeki hurda yüzdesi gibi amaç değerin sıfır olduğu toleranslardır. Tolerans azaldıkça sistemin verimliliği artacaktır.

- *Hedef değer en iyi:* Sapmaların iki yönde de oluşabildiği tolerans tipidir.

Tolerans tasarımı kalite geliştirme sürecinin bir adımı olmasının yanında aynı zamanda bir kalite değerleme faaliyetidir [82].

5.1.5. Taguchi'nin sinyal/gürültü (S/N) oranları

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir.

Taguchi, uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir S/N oranı tanımlamıştır [82].

En Küçük - En İyi

Bu tür problemlerde, kalite değişkeni y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal/gürültü oranı şöyle tanımlanabilir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} y_i^2\right) \tag{5.12}$$

En Büyük - En İyi

Bu durumda y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/gürültü oranı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \tag{5.13}$$

Hedef Değer - En İyi

Bu tür problemlerde, y için belli bir hedef değer (örneğin, ürün boyutları gibi) verilmiştir. Bu durumda,

$$\frac{S}{N} = 10 \log(\mu^2 / \sigma^2) \tag{5.14}$$

Her üç tip problemde de, amaç S/N oranını maksimize etmektir. Taguchi'ye göre, S/N oranlarının maksimize edilmesi, bir yandan sinyali arttırırken, diğer yandan da değişkenliği azaltmaktadır [82].

5.1.6. Taguchi deney tasarımı aşamaları

Taguchi‟nin deneysel tasarım adımları;

1. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi,
2. Faktör düzeylerinin seçilmesi
3. Uygun ortogonal düzenin seçilmesi
4. Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması,
5. Testlerin yapılması,
6. Sonuçların analiz edilmesi,
7. Doğrulama deneylerinin yapılması [95].

Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi

Var olan problemin çözümüne ilişkin amaç ortaya konduktan sonra, klasik tasarımda olduğu gibi, beyin fırtınası, süreç akış şeması ve sebep-sonuç diyagramı gibi yöntem ve teknikler kullanılarak değerlendirmeye alınacak faktör veya etkileşimler seçilmektedir [85].

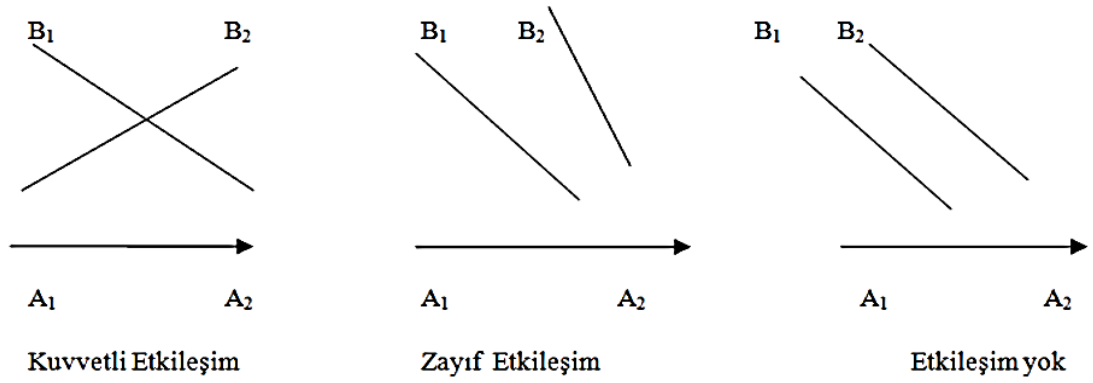
Taguchi; faktörleri kontrol edilebilen ve gürültü faktörü olarak da ifade edilen kontrol edilemeyen faktörler olarak ikiye ayırmaktadır. Faktör düzeyleri belirlenmeden önce faktörler belirlenmekte ve kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler olarak ayrılmaktadır. Kontrol edilebilen faktör sayısına göre tasarım belirlenmekte ve denemeler yapılmaktadır [85,90].

Faktör düzeylerinin seçilmesi

Performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin düzey sayısı belirlenmektedir. Faktörlerin seviyeleri iki, üç veya daha çok olabilmektedir. Faktör seviyeleri serbestlik dereceleriyle ilişkili bir fonksiyondur. Serbestlik derecesi, faktör seviyelerinden hareketle hesaplanmaktadır. Serbestlik derecesi, deneyin büyüklüğünü tespit etmek açısından önemlidir. Bir faktörün serbestlik seviyesi, o faktörün seviyesinin

bir eksiğidir. Ayrıca, faktörlerin bireysel etkilerinin yanı sıra faktörler arası oluşan etkileşimler de belirlenir [85].

İki faktörün etkileşimli olması, bir faktörün (örneğin A), kalite değişkenine olan etkisi, diğer faktörün (örneğin B) hangi değerde bulunduğuna bağlıdır. Bu durum AXB olarak gösterilir. Etkileşimli faktörlerin bulunduğu durumlarda, etkileşimlerde faktör gibi kabul edilerek diziye atanmaktadır [85,86].



Şekil 5.2. Etkileşim grafik gösterimi [86]

Uygun ortogonal düzenin seçilmesi

Ortogonal dizinin kullanımı sadece Taguchi'ye mahsus değildir. Ancak Taguchi, kullanımları basitleştirmiştir. Ortogonal dizinin ilk kullanılması, 1910'lu yıllarda, İngiltere'de Fisher tarafından olmuştur. Ortogonal dizi, dengelenmiş dizi anlamında kullanılmaktadır [82,98].

Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün en az sayıda test edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlamasıdır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre, 2 kademeli, 3 kademeli, 2 ve 3 kademeli olarak belirlenmektedir. Ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir. Genel gösterimi;

d: Toplam deney sayısı,
a: Faktörlerin düzey sayısı

k: Faktör sayısı

L: Ortogonal dizini olmak üzere,

$$L_d(a)^k \; ya \; da \; L_d \tag{5.15}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4, L_8, L_{16} ve L_{32} ve 3 seviyeliler için L_9, L_{18} ve L_{27} dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır [82].

Ortogonal Dizinler tam faktöriyel tasarım gereği (2k veya 3k) çok sayıda yapılması gereken denemeleri büyük oranda azaltmaktadır. Örneğin tam faktöriyel tasarıma göre 3^4=81 adet deneme yapılması gerekirken, ortogonal dizinler sayesinde deneme sayısı 9'a düşmektedir. Ortogonal dizinin seçiminde faktör gurubunun toplam serbestlik derecesine bakılır. Faktör gurubunun serbestlik derecesi, tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Toplam serbestlik derecesi dizilerden hangisine uygunsa o tercih edilir. Toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde deneme sayısına eşitse uygunluk sağlanır. Toplam serbestlik derecesi deneme sayısından büyük veya eşitse bir üst dizi uygundur [85].

Faktör ve/veya etkileşimlerin kolonlara atanması

Faktör ve/veya etkileşimlerin seçilen ortogonal düzene göre kolonlara atanmasında, Dr. Taguchi tarafından geliştirilen doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar kullanılmaktadır. Doğrusal grafikler, faktörlerin atanacağı sütunları ve hangi sütunların bu faktörlerin etkileşimini kullanılacağını göstermektedir. Üçgensel tablolar ise faktörler arasında gerçekleşen tüm etkileşimleri içermektedir [85].

Testlerin yapılması

İlgilenilen problemin çözümü için birden fazla performans karakteristiğinin özelliklerine uygun olarak performans istatistiği seçilmektedir. Verilerin analizi seçilen performans istatistiğine göre yapılmaktadır. Bu nedenle performans istatistiğinin doğru belirlenmesi çok önemli bir husustur. Taguchi tasarımlarında en çok kullanılan performans istatistiği S/N oranıdır ve bu oran sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılır [85].

Testler, problemin belirlediği ortogonal dizinin satırlarının öngördüğü denemelerden oluşur. Deney boyunca hatayı minimize edebilmek, gürültü faktörlerinin etkisini görebilmek, gözlem değerleri sayısının çokluğuna bağlıdır. Seçilen her bir deney tasarımı ne kadar çok sayıda test edilirse deneyin güvenilirliği o ölçüde artış göstermektedir [85].

Sonuçların analiz edilmesi

Ürün performansına etkisi olan faktörler ve uygun düzeyleri belirlendikten sonra, sadece kritik olan faktör ve/veya etkileşimler yer alacak şekilde bir model oluşturulur ve analizi yapılır. Elde edilen gözlem değerlerinin analizinde, varyans analizi, faktör etkilerinin grafiksel gösterimi metodu, hesap tablosu metodu gibi yöntemler kullanılmaktadır [85].

Varyans analizi

Test yapmanın amacı ürün veya proses değişimini kontrol etmek ve performansı etkileyen faktörleri bulup problemin çözümüne ilişkin karar vermektir. Varyans analizinde (Analysis of Variance: ANOVA) test edilen parça gruplarının performansları arasındaki farklılığı göstermek için çizelge oluşturulur. Varyans analizine F testi de denmektedir [82,85].

Varyans analizine ait formüller;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_C \quad Genel\ Kareler\ Toplamı \tag{5.16}$$

$$SS_A = {}_{i=2}^{N}\, y_i^2 - \frac{T^2}{N} \qquad Genel\ Kareler\ Toplamı \tag{5.17}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}} - \frac{T^2}{N} \qquad A\ Faktörünün\ Kareler\ Toplamı \tag{5.18}$$

$$SS_{AXB} = \sum_{i=1}^{c} \frac{AxB_i^2}{n_{AXB\,i}} - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \qquad A\ ve\ B\ etkileşiminin\ K.Toplamı \tag{5.19}$$

$$SS_e = KT_T - KT_A - KT_B - KT_{AXB} \tag{5.20}$$

Burada;

SS_T = Genel kareler toplamı

SS_A = A faktörüne ait kareler toplamı

SS_B = B faktörüne ait kareler toplamı

SS_C = C faktörüne ait kareler toplamı

SS_{AXB} = A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı

SS_E = Hatanın kareler toplamı

N = Gözlemlerin toplam sayısı

y_i = i. Gözlem değeri

T = Tüm gözlemlerin toplamı

k_A = A faktörünün seviye sayısı

A_i = Ai seviyesindeki gözlemlerin toplamı

n_{Ai} = Ai seviyesi altındaki gözlem sayısı

c = Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı

$(AxB)_i$ = A ve B faktörlerinin i. Koşulu altındaki verileri toplamı

Varyans analizini yapabilmek için serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır [85].

$$V_T = V_A + V_B + V_{AXB} + V_e \tag{5.21}$$

Burada

V_T = Toplam serbestlik derecesi

V_A = A faktörünün serbestlik derecesi

V_{AxB} = AxB faktörünün serbestlik derecesi

V_e = Hata serbestlik derecesi

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğidir [85].

$$V_T = N - 1 \tag{5.22}$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir [85].

$$V_A = k_A - 1 \tag{5.23}$$

Etkileşimin serbestlik derecesi ise etkileşim faktörlerinin serbestlik derecelerine eşittir [85].

$$V_{AXB} = (V_A).(V_B) \quad (5.24)$$

Hata serbestlik derecesi ise toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerinin serbestlik derecelerinden çıkartılması ile bulunur [85].

$$V_e = V_T - V_A - V_B - V_{AXB} \quad (5.25)$$

Denemelerin tekrarları söz konusu olduğunda ise serbestlik derecesi;

$$V_T = (Deneme\ sayısı).(Tekrar\ sayısı) - 1 \quad (5.26)$$

Varyans değerinin hesaplanması, varyans analizi tablolarıyla yapılmaktadır. Faktörlerin varyanslar; faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür [85].

$$V_A = \frac{SS_A}{V_A} \quad A\ faktörünün\ varyansı \quad (5.27)$$

Hata varyansı da hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür. Hatayı kontrol edilemeyen faktörler ve ölçüm yanlışlıkları oluşturmaktadır [85].

$$V_e = \frac{SS_e}{V_e} \quad (5.28)$$

Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra, F testi hangi faktörlerin önemli olduğunu gösterir. F testi uygulanırken hesaplanan F değerleriyle, istenen güven düzeyindeki F tablo değerleri karşılaştırılır. F değeri tablodaki değerden büyükse 1-α güvenle kabul edilir. Varyans analizi (ANOVA) tablosundan elde edilen F değeri, faktör ya da etkileşim varyansının hata varyansına oranıdır [85].

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (5.29)$$

Burada; $F_{tablo} = \alpha, \upsilon 1, \upsilon 2$

α = Anlamlılık düzeyi

υ1= Faktörün serbestlik derecesi

υ2= Hata serbestlik derecesi

ANOVA tamamlandıktan sonra önemli faktörler ve etkileşimler belirlenir, sonuçlar

yorumlanır. Ortalamanın tahmin edilmesi, tahmin edilen ortalamanın etrafında güven aralığının belirlenmesi kullanılan metotlardır [85]. Ortalamanın tahmin edilmesi, kombinasyondaki faktör seviyelerinin ortalama değerleri,

$$\mu_{A_1B_2} = A_1 + B_1 - n - 1\,T \tag{5.30}$$

Burada;

n = belirlenen faktör-seviye kombinasyondaki faktör sayısı

T =Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalamasıdır

Tahmin edilen ortalama etrafında güven aralığı,

$$G.A = \overline{F_{a,sd_{t,sd_e}}.V_e\,\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}} \tag{5.31}$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+c} \tag{5.32}$$

Burada;

c = μ bulunurken kullanılan tüm faktörlerin toplam serbestlik derecesi

r = Yapılan doğrulama deneyi sayısı

ν_T = Ortalamaya ait serbestlik derecesi olup daima 1 dir.

ν_e = Hata serbestlik derecesi

V_e = Hata varyansı

N = Deney sayısı

$$\alpha_\mu - G.A. \leq performans\ karakteristiği\ değeri \leq\ d_\mu + G.A. \tag{5.33}$$

Doğrulama deneylerinin yapılması

Deney analiz sonucunda seçilen en iyi şartlar altında tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deney doğrulama deneyidir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaştırırsa istenen durum gerçekleşmiş ve deney amacına ulaşmış olur [82,85].

6. LİTERATÜR TARAMASI

Boru hattı sistemleri; gaz, petrol ya da buhar gibi akışkan ürünlerin güvenli bir şekilde taşınması işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Doğalgaz ve petrol taşımacılığında kullanılan boru hatları; toprak kayması, göçük gibi dış kuvvetlerin sebep olduğu plastik deformasyona maruz kalabilir. Bu nedenle boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemlerinin, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [30-33].

X65 çeliklerinin kimyasal ve mekanik şartnameleri API 5L standardına göre belirlenmiştir [37]. API 5L X65 çelikleri, büyük çaplı gaz boru hatlarının yapım işlerinde kullanılan yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik (HSLA) serilerinden biridir. Bu çelikler, boru hatları için tercih edilen ve ince taneli asiküler ferritin hâkim olduğu, kontrollü termomekanik haddeleme yöntemi ile üretilen karbon çelikleridir [58-60]. Karbon çelikleri doğalgaz ve petrol ürünlerinin taşındığı boru hattı sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çelikler mühendislik uygulamaları için önemli ölçüde ekonomik özellikleri ile düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [7,63,64]. API çeliklerinin üretiminde kullanılan termomekanik haddeleme; dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşme adı altındaki iki farklı yumuşatma mekanizması ile gerçekleşmekte olup, çeliklerin mikro yapı dönüşümleri ve mekanik özelliklerini kontrol etmek için haddeleme esnasında ve sonrasında sıcak deformasyon uygulanmaktadır [61,62].

Doğalgaz ve petrol boru hatları için üretilen borular genellikle tozaltı kaynak yöntemi ile üretilmekte olup, boruların sahada birleştirme işlemleri ise örtülü elektrodla elektrik ark kaynak yöntemi ile gerçekleşmektedir. Son zamanlarda, yapım işi imalat sürecini hızlandırarak, enerji, maliyet ve zamandan tasarruf etmek için sahada yapılan birleştirme işlemlerinde gazaltı kaynak yöntemleri de denenmektedir [99]. Örtülü elektrodla ark kaynağı manuel bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercih edilmesine ve kaynakçının maharetine bağlıdır.

Doğalgaz ve petrol taşımak için üretilen çelik borular, dağıtım ve iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek işletme basınçları altında, petrol ve doğalgaz hat

borularının performansına yönelik kalite ihtiyaçları ise her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, uygulanacak kaynak yöntemi, bu kaynak yöntemine uygun ekipmanlar, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, ilave kaynak metali miktarı, kaynak hızı, kaynak yönü ve diğer kaynak parametreleri petrol ve doğalgaz hat borularının performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Belirtilen bu faktörlerin tümü kaynak tasarımı çalışmalarının önemini vurgulamaktadır. Farklı yöntemler ve parametreler dâhilinde gerçekleşen kaynak işlemleri farklı performanslar ortaya koymaktadır.

Yüksek basınç uygulamalarına güvenle cevap verilebilecek boruların üretilmesi ve boru hatlarının inşa edilmesinde gerekli kalite seviyesinin yakalanabilmesi için kaynak tekniğinin ve buna bağlı olarak kaynak parametreleri seçiminin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ülkemizde boru fabrikalarında ve boruların birleştirildiği yapım işlerinde, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik-kimyasal özellikleri ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (sertlik ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulamadığı, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile belirlendiği görülmektedir. Kaynak tekniğinin doğru seçilememesi kalite kontrol işlemlerinde alışılmışın dışına çıkılmasını engelleyerek, ya gereksiz yönde fire verilmesine ya da belirli hataların farkına varılamamasına yol açmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı, kaynak güvenirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimliliğin düşmesine hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik sistematik bir yöntemin oluşturulamamasıdır.

Günümüzde kaynak işlemleri gerçekleştirirken, kaynak parametrelerinin seçiminde yaşanan zorluklar bu alanda üretici için bir eksiklik oluşturmaktadır. Oluşan bu eksiklik ve zaman kaybını azaltmak için, elde edilen verilerin uygun bir şekilde kayıt ve optimize edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon denince karar vermede matematiksel yöntemlerin kullanılması anlaşılmaktadır. Bu matematiksel yöntemlere literatürde sayısal optimizasyon veya matematiksel programlama metotları da denmektedir. Etkili bir karar verme için tasarım problemlerinin uygun bir matematiksel formatta ifade edilmesi gerekmektedir [100]. Bunu ifade edebilmek için çalışmadan elde edilen verilerin belirli programlar yardımı ile en uygun ve verimli koşulların tespiti ve tahmin edilmesi gerçekleştirilmelidir. Bu sebepten dolayı günümüzde yapılan çalışmalarda iş verimliliği araştırmaları yapılmakta

olup, kaynak işlemlerinde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi ve kaynak işlemlerinde oluşan hataların en aza indirilmesi için kaynak işleminin en uygun optimizasyon şartlarının tespiti gerekmektedir. Kaynak işlemlerinde harcanan işgücü ve maliyetin yüksek olması nedeniyle de söz konusu optimizasyon işlemlerinin en aktif şekilde tasarlanabilmesi için bilgisayar ortamında ve yardımcı bir program kullanımı ile çalışmalar gerçekleşebilmektedir [101]. Bunu sağlamak maksadı ile uygun giriş parametrelerine sahip veriler elde edilerek zaman ve maliyetten kazanımlar sağlanabilmektedir. Araştırmacılar ise çeşitli parametreleri kullanarak uygun ve verimli sonuçlar çıkarmak için çalışmalara devam etmektedir [102]. Bu sebeplerden dolayı kaynak işlemlerinin optimizasyonunda Taguchi optimizasyon metodu yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [103].

Tarng ve arkadaşları yaptıkları Taguchi çalışması [104] ile optimum kaynak işlemi parametrelerini tespit etmiştir. Kumar ve arkadaşları ise yaptığı çalışmada [105], mekanik özelliklerini iyileştirmek ve kaynak işlem parametrelerini optimize etmek için Taguchi yöntemi ve regresyon modeli kullanarak optimizasyon işlemini sağlamışlardır. Deneysel çalışmada kaynak akımı, kaynak hızı ve frekansın mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. Shojaeefard ve arkadaşları ise [106]; Taguchi L9 yöntemini kullanarak sürtünme- karıştırma kaynağında dönüş hızı, takım eğme açısı ve kaynak hızını optimize etmişlerdir. Ghosh ve arkadaşları ise; östenitik paslanmaz çelikler ve alaşımlarının kaynakları üzerine yaptıkları çalışmada, elde ettikleri sonuçlarda Taguchi yönteminin sağladığı eşsiz özelliklerden yararlanmışlardır [107]. Shanmugarajan ve arkadaşları ise lazer kaynak yöntemi ile yaptığı Taguchi çalışmasıyla optimizasyon işlemini gerçekleştirmiş ve elde ettiği verimli sonuçlarla çalışmalarında gelişme sağlamıştır [101]. Ayrıca Nandagopal ve arkadaşları ise Anova ve Taguchi metodunu mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanmışlardır [108].

Son yıllarda kaynak işlemlerinde maliyeti azaltmak ve üretim paramatrelerinin verimliliğini artırmak için analiz yöntemlerinin kaynak işleminde sağladığı eşsiz faydalar ve katkılardan yararlanılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı neredeyse bütün kaynak yöntemlerinde optimizasyon yöntemleri kullanılmaya çalışılarak, üretim hızı ve maliyetten faydalar sağlama düşüncesi mevcuttur. Kaynak işlemi üzerine yapılan optimizasyon işlemlerinde kullanılan Taguchi metodunun parametrelere entegrasyonu ve elde edilen gelişmeler üzerine çalışılan makaleleri ayrıca incelediğimizde; aşağıda yapılan güncel çalışmalar karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmalarda Huang; MIG/MAG kaynağında daha iyi penetrasyon ve erimiş bölgenin dar bir genişliğe sahip olması için optimal işletme parametrelerini tespit etmiştir [109]. Bu çalışma Taguchi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Khan ve arkadaşları [110], lazer kaynak parametrelerini kaynak damlacığının geometrik özelliklerini deneysel tasarım yöntemini kullanarak geliştirmiştir. Amaç, kaynak damlacık genişliğini en aza indirgemek ve penetrasyon derinliğini maksimize etmek için optimum parametrelerin belirlenmesi olmuştur. Bidi ve arkadaşları [111], bir plakalı hibrid lazer-MIG işlemi durumunda kaynak veya yeniden yükleme işlemi sırasında termal etkinin sayısal modellemesi ile deneysel tasarım yaklaşımını kullanarak deneysel modellemeyi birleştirmişlerdir. Bu kombinasyon, belirli bir etkililik faktörü penceresi için deneylerin sayısının azaltılmasıyla, ergimiş bölge ve parçaların içindeki sıcaklık alanının öngörülmesinde bir imkan sağlamıştır. Ascari ve ark. [112], 8 mm kalınlığındaki düz parçaların kaynak işlemi sırasında gözenek oluşumu üzerine üç parametrenin etkilerini istatistiksel olarak incelemişlerdir. Bu durumda kullanılan kaynak işlemi, hibrid lazer-MIG kaynağı olmuştur. Dongxia ve arkadaşları [113] Taguchi yaklaşımını, lazer kaynak bağlantısının şeklini optimize etmek için üç parametrenin optimal kombinasyonunu (lazer gücü, kaynak hızı, tel atış oranı) kullanmışlardır. Lazer-MAG hibrit kaynağı kullanılarak 4 mm kalınlığında yassı çelik parçaların birleştirilmesi durumunda kaynak damlacığının stabilitesi ve dış kalitesi üzerine bir araştırma Moradi ve ark. tarafından önerilmiştir [114]. Bu çalışma, deneysel modelleme yöntemini kullanarak çalışma parametresinin deneysel tasarım yaklaşımıyla etkilerinin analizine dayanmaktadır. Zhao ve arkadaşları ise [115], çalışmalarında deneysel tasarım yaklaşımına, parametrelere ve etkileşimlerinin enerji üzerindeki etkilerini tahmin etmeye, kaynak ile enerjinin çalışma parametrelerini ilişkilendiren bir matematiksel model geliştirmeye çalışmışlardır. Casalino ve arkadaşları [116], lazerden kaynaklanan enerjinin ve ark kaynaklı enerjinin, kaynak damlacık geometrisi, gözenekler ve termal olarak etkilenen bölgenin yakınındaki artık gerilmeler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Leo ve arkadaşları ise Al-Mg alaşımlarında fiber lazer kaynağı ile üretim aşamasında Taguchi metodunu kullanarak alanda yeni bir yaklaşım oluşturmuşlardır [117]. Sapakal ve Teslang [118], yumuşak çelik üzerinde maksimum penetrasyon derinliğini elde etmek için işlem parametresi akım, voltaj ve kaynak hızının optimize işleminde Taguchi yönteminden yararlanmıştır. Chandresh ve Chaudhary [119], TIG ve MIG kaynak işlemleri için AISI 1020 malzemesinin kaynak damlacık sertliği üzerindeki işlem parametresinin etkisini araştırmışlardır. Balasubramanian [120], titanyum tabakalarının titreşimli TIG kaynağı için matematiksel model denklemlerini elde etmiş ve geliştirilen matematiksel ilişkilerin

istenen kaynak kürecik boyutlarını elde etmek için bir program formunda otomatik kaynakta kolayca kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Haragopal ve arkadaşları MIG kaynaklı alüminyum alaşımlı eklemlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için proses parametrelerini optimize etmişlerdir [121]. Sathish ve ark. [122] Taguchi yöntemi kullanılarak farklı boru bağlantıları için TIG kaynak parametrelerini optimize etmişlerdir. Yüksek ısı girdisinin daha düşük çekme mukavemeti ile sonuçlandığı sonucuna varmışlardır. Aydın ve ark. [123], Taguchi tabanlı gri ilişkisel analizi kullanarak uygun çekme mukavemeti ve uzama değerini sağlamak için optimal bir parametrik kombinasyon için sürtünmeli karıştırma kaynak yönteminin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Singh ve arkadaşları metal ark kaynağı yaparken uyguladıkları vibrasyon sayesinde kaynak bölgesinde tane incelmesi elde etmişler ve buna bağlı olarak da mekanik özelliklerde olumlu sonuçlar almışlardır. Uyguladıkları Taguchi yöntemi, çalışmalarında kaynak hızı ve kaynak akımı gibi parametrelerin optimizasyonunda kolaylık sağlamıştır [124]. Javadi ve arkadaşları ise 5086 Alüminyum malzemede uyguladıkları sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerinde yararlandıkları Taguchi metodu ile kaynak parametrelerinden besleme hızı, dönme hızı, pim çapı ve omuz çapı gibi parametrelerin belirlenmesinde faydalanmışlardır [125]. Srirangan ve arkadaşları ise TIG kaynak yönteminde Taguchi metodundan faydalanarak çalışmalarında kolaylıklar sağlamıştır [126]. Yapılan literatür çalışmaları ışığında, birçok kaynak yöntemi için optimizasyon sistemleri geliştirilmiş olup, doğalgaz ve petrol borularının kaynak işlemi için yalnızca Moghaddam ve arkadaşlarının yaptığı araştırmada, API 5L X42 alaşımının MAG kaynak yöntemi ile çok kriterli modellemesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Modelleme için gerekli deneysel veriler, L36 Taguchi matrisine göre hesaplanmıştır. Çalışmada yapılan doğrulama testleri, kullanılan çok ölçütlü modelleme yönteminin, kaynak prosedürünün optimizasyonunda oldukça etkili olduğunu göstermiştir [127].

Yapılan literatür incelemeleri neticesinde; bu çalışmaya benzer bir çalışmaya rastlanılamamıştır. 3600 mm çapında bir borunun kaynak işlemi yaklaşık olarak 1 gün sürmekte olup, yaklaşık 40 kg civarında elektrod malzemesi kullanılmaktadır. Herhangi bir sistematiği olmayan, tamamen kaynakçının tecrübesine ve deneme yanılma yöntemlerine dayalı sistemler hem hızı, hem de verimliliği olumsuz etkilemektedir. Olası bir hatanın telafisi ise ciddi zaman ve maliyet kaybına neden olmakta, bu da gereksiz malzeme ve enerji sarfiyatını ortaya koymaktadır. Bu nedenle oluşan ihtiyacı ortadan kaldırmak ve

sistematiği geliştirebilmek için tez çalışması ortaya konulmuştur. Bu haliyle çalışmamız; üzerine yeni araştırmalar yapılan bir çalışma niteliğindedir.

Bu çalışmada; yukarıda belirtilen eksikliklerin giderilmesine yönelik olarak petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L kalitesindeki çelik boruların kaynakla birleştirilmesinin Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak, kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik test sonuçları (sertlik, tokluk, akma ve çekme dayanımı) elde edilmesi planlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, API 5L standardındaki çelik boruların birleştirme işlemlerindeki kaynakların performansı araştırılmış ve API 5L X65kalitesinde çelikten doğalgaz/petrol borusu kullanılmıştır. Boruların birleştirilme işlemlerinde, endüstride yaygın olarak kullanılan örtülü elektrodla ark kaynağı kullanılmıştır. İlk olarak, boruların birleştirme işlemlerinde uygulanacak yöntemlere ait parametrelerin istatistiksel proses kontrol yöntemleri (Taguchi) ile optimizasyonu yapılarak yeni modeller geliştirilecektir. Performans göstergesi olarak her bir kontrol yöntemine uygun girdi parametreleri (akım, kaynak yönü, elektrod türü) belirlenmiş, mekanik test sonuçları (akma-çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, sertlik) analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre de boruların kaynaklı birleştirilmeleri için gerekli optimizasyon sağlanmış olacaktır.

Kaynaklı birleştirmelerin kendisinden beklenilen lokal özelliklerini yerine getirebilmesi için en uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Doğru parametrelerin seçilmesi için yüzlerce deney yapmak gerekebilir. Bu çalışmada Taguchi metodu yardımıyla daha az deney yaparak, en uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Taguchi yöntemi içindeki istatiksel yöntemlerle kaynaklı birleştirmelerin mekanik test sonuçları analiz edilmiştir. Taguchi yöntemi ile elde edilen tahminsel sonuçlar, gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılıp, en uygun model belirlenmiştir.

7. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, API 5L X65 kalitesindeki çelik boru kaynaklı birleştirmelerinin Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak, kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik test sonuçları (sertlik, akma, çekme ve darbe dayanımı) elde edilmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda öncelikle deney düzeneği belirlenmiştir. Deney düzeneği Taguchi metodu kullanılarak tespit edilmiştir. Doğru parametrelerin seçilmesi için yüzlerce deney yapmak gerekeceğinden, Taguchi metodu kullanılarak belirlenen parametrelerle kapsamlı sonuçlara ulaşılması amaçlanmıştır. Taguchi metodunun uygulandığı Minitab 16 yazılım programı üzerinde akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türü olmak üzere üç değişken ile uygun parametre belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılması planlanan deneysel çalışmalar için 8 farklı akım şiddeti, iki farklı kaynak yönü ve iki farklı elektrod değişken olarak seçildiğinde, Taguchi metodu bize onlarca deney yapmak gerekirken daha az deney ile uygun parametrenin belirlenmesi işlemini sağlayabilmektedir. En uygun dizin olarak, Taguchi L16 (8*2*2)ortogonal dizini esas alınarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Taguchi metodu ile oluşturulan deney düzeneği Çizelge 7.1'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 7.1. Taguchi deney düzeneği

Deney No	Akım Şiddeti (Amper)	Kaynak Yönü	Elektrod Türü
1	110 - 140	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik
2	110 - 140	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik
3	120 - 150	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik
4	120 - 150	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik
5	130 - 160	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik
6	130 - 160	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik
7	140 - 170	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik
8	140 - 170	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik
9	150 - 180	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik
10	150 - 180	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik
11	160 - 190	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik
12	160 - 190	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik
13	170 - 200	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik
14	170 - 200	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik
15	180 - 210	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik
16	180 - 210	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik

Deneysel çalışmaların, Taguchi metoduna uygun olarak yukarıda belirtilen deney düzeneğine uygun olarak gerçekleştirilebilmesi için çelik boru, elektrod ve gerekli ekipmanlar sağlanmış ve birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

7.1. Materyal

Deneylerde Çizelge 7.2'de kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri verilen API 5L X65 kalitesinde 12,7 mm et kalınlığında ince taneli yapı çeliği kullanılmıştır. İlave tel (elektrod) olarak ise selülozik ve bazik elektrodlar kullanılmıştır. Selülozik elektrod ile yapılan birleştirmelerde kök pasoda 3,25 mm çapında E6010 AWS kodlu elektrod kullanılmış olup, sıcak paso, ara paso ve kapak pasolarda ise 4,00 mm çapında E8010 AWS kodlu elektrod kullanılmıştır. E6010 ve E8010 kodlu selülozik elektrodların kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Çizelge 7.3 ve 7.4'te verilmektedir. Bazik elektrod ile yapılan birleştirmelerde ise Tempo B70 Mo kodlu elektrod kullanılmış olup, kök pasoda 3,25 mm, diğer pasolarda ise 4,00 mm çapında elektrodlar tercih edilmiştir. Tempo B70 Mo kodlu elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri ise Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.2. Deneylerde kullanılan X65 malzeme kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	0,064	0,29	1,61	0,008	0,0018	0,021	0,001	0,001
	Cu	Al	Ti	V	Nb	N	Fe	$C_{EŞ}$
	0,008	0,035	0,023	0,051	0,052	0,0028	97,83	0,348
Mekanik Özellikler	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)		0 ºC'deki Darbe Enerjisi (Joule)	
	566		650		34		209	

Çizelge 7.3. AWS/ASME FA.5.1. E6010 kodlu selülozik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri

Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi			Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)			
C	Si	Mn	Akma Muk. (min) (N/mm2)	Çekme Muk. (min) (N/mm2)	Uzama (%)	-20°C'deki Çentik Darbe Enerjisi (min) (Joule)
0,10	0,20	0,50	470	530	26	60

Çizelge 7.4. AWS/ASME FA.5.1. E8010 kodlu selülozik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri

Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi				Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)			
C	Si	Mn	Ni	Akma Muk. (min) (N/mm2)	Çekme Muk. (min) (N/mm2)	Uzama (%)	-20°C'deki Çentik Darbe Enerjisi (min) (Joule)
0,10	0,20	0,80	0,90	500	570	24	60

Çizelge 7.5. E55 5 MnMo B H5 kodlu Tempo B70Mo bazik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri

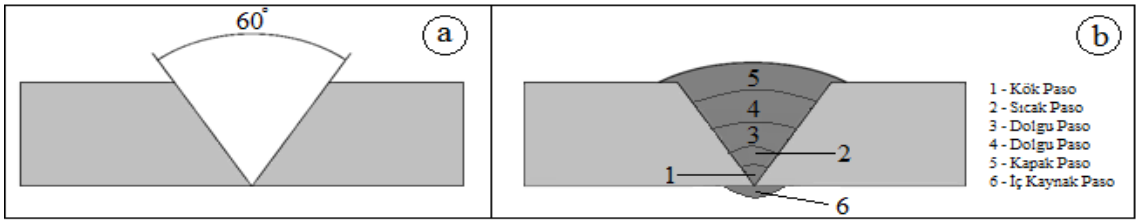
Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi				Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)		
C	Si	Mn	Mo	Akma Muk. (min) (N/mm2)	Çekme Muk. (N/mm2)	-50°C'deki Çentik Darbe Enerjisi (min) (Joule)
0,075	0,40	1,60	0,45	550	610-780	47

7.2. Metot

Birleştirme metodu olarak saha birleştirmelerinde en yoğunlukla kullanılan örtülü elektrodla elektrik ark kaynak yöntemi tercih edilmiş olup, kaynaklı birleştirme işlemleri; Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojisi Bölümü, Kaynak Teknoloji Programı atölyelerinde mevcut Magmaweld marka, TD355 model redresör kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. Makinenin teknik özellikleri Çizelge 7.6'daki gibidir. Birleştirme işlemlerinde kaynak ağzı geometrisi ve paso sıralaması Şekil 7.1'de verilmektedir.

Çizelge 7.6. Magmaweld TD355 redresör kaynak makinesi teknik özellikleri

Magmaweld TD 355	Teknik Özellikler
Şebeke Gerilimi (3 Faz) (V)	380 / 50 Hz
Şebekeden Çekilen Güç (kVA)	20 (%35)
Şebekeden Çekilen Akım (A)	31 (%35)
Tavsiye Edilen Şebeke Sigortası (A)	3 x 32
Kaynak Akım Ayar Sahası (ADC)	60 – 350
Anma Kaynak Akımı (ADC)	350 (%35)
Açık Devre Gerilimi (VDC)	54 – 64
Elektrod Çapı (mm)	2.00 – 5.00
Boyutlar (u x g x y) (mm)	950 x 660 x 650
Ağırlık (kg)	125
Koruma Sınıfı	IP 22



Şekil 7.1. a) Kaynak ağzı geometrisi, b) Paso sıralaması

Kaynaklı birleştirme işlemlerinde; parçalar öncelikle kaynak işlemine hazırlanmıştır. Tozaltı kaynak yöntemiyle spiral olarak üretilmiş olan 42” (1.066,8 mm) çapında, 12,7 mm et kalınlığındaki API 5L X65 kalitesindeki çelik borular 300 mm genişliğinde otomatik plazma kesme makinesi ile kesilerek ve kaynak ağızları 30° olacak şekilde kaynak işlemine hazırlanmıştır. Her bir deney yarım boru birleştirmesi olacak şekilde, yani tam bir boru çevresi ikiye bölünerek, bir çevreden iki deney elde edilecek şekilde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.2). Toplam 16 boru parçası bir araya getirilerek 8 tam boruda, 16 yarım boruyu kapsayan toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler, yeterli miktarda numune hazırlayabilmek için her boru birleştirmesinden 2 adet olacak şekilde tekrar edilmiştir. Kaynak işlemi için hazırlanmış borular Resim 7.1’de görüldüğü gibidir



Resim 7.1. Kaynak işlemi için hazırlanan borular

Taguchi metodu yardımıyla maliyet ve zaman kriterleri dikkate alınarak, en uygun kaynak parametreleri Çizelge 7.1’de verildiği gibi L16 (8*2*2) düzeninde belirlenmiş ve kaynak işlemleri bu düzenlemeye uygun olarak aşağıdaki çizelgede (Çizelge 7.7) belirtildiği şekilde seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kök pasolar sabit bir akım değerinde (100

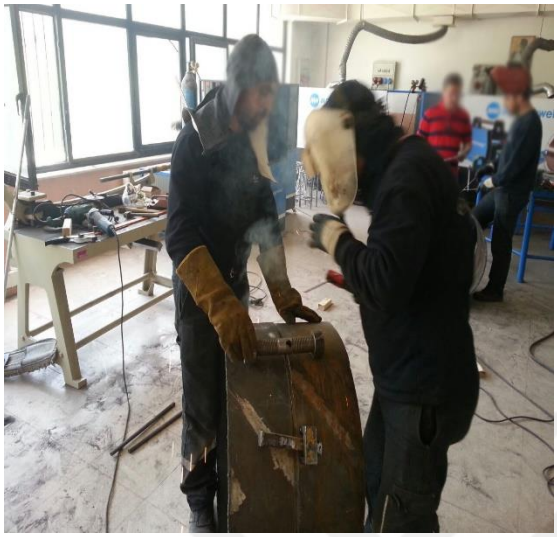
Amper) birleştirilmiş olup, elektrodun ergime gücü ve metal yığma kapasitesi düşünülerek, akım şiddeti sıcak paso ile birlikte her pasoda 10 Amper arttırılmıştır. Kaynak işleminin sonunda borular kapak pasoda (5. paso) kullanılan akım şiddeti değerinde, içeriden de ayrıca iç kaynak (6. paso) işlemine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda belirlenen deney düzeneğinin nihai hali, paso geçişlerinde akım şiddeti değerlerinin yükseltilmesi ihtiyacına binaen ve Çizelge 7.1'de belirtilen akım şiddeti değerlerinin sabit oranda (10 A) arttırılması neticesinde Çizelge 7.7'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kaynak hızı sabit tutulmuş olup, birleştirmeler kök pasoda 120 mm/dak, diğer pasolarda ise 150 mm/dak kaynak hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan bazik elektrodlar 250 – 300 ºC'de 1 saat süre ile kurutularak hiç bekletmeden, selülozik elektrodlar ise özelliği gereği kurutulmadan kaynak işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 7.7. Deneylerde kullanılan parametreler

Deney No	Kaynak Yönü	Elektrod Türü	Akım Şiddeti (Amper)					
			Kök Paso	Sıcak Paso	Dolgu Pasoları		Kapak Paso	İç Kay. Pas.
			Ø 3,25 mm	Ø 4,0 mm				
			-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-
1	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik	100	110	120	130	140	140
2	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik						
3	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik	100	120	130	140	150	150
4	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik						
5	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik	100	130	140	150	160	160
6	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik						
7	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik	100	140	150	160	170	170
8	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik						
9	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik	100	150	160	170	180	180
10	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik						
11	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik	100	160	170	180	190	190
12	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik						
13	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik	100	170	180	190	200	200
14	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik						
15	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik	100	180	190	200	210	210
16	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik						

Her boruda iki adet deney yapılmış olup, borular ortadan ikiye bölünerek alt ve üst noktalar belirlenmiştir (Şekil 7.2). Kaynaklı birleştirme işlemleri Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Kaynak Teknolojisi Programı atölyesinde gerçekleştirilmiş

olup, kaynak işlemleri esnasında alınan bazı fotoğraflar ise Resim 7.2 - 7.5'te görülmektedir.



Resim 7.2. Kaynak işlemleri



Resim 7.3. Dış kaynak işlemi



Resim 7.4. İç kaynak işlemi



Resim 7.5. Tamamlanmış kaynak işlemleri

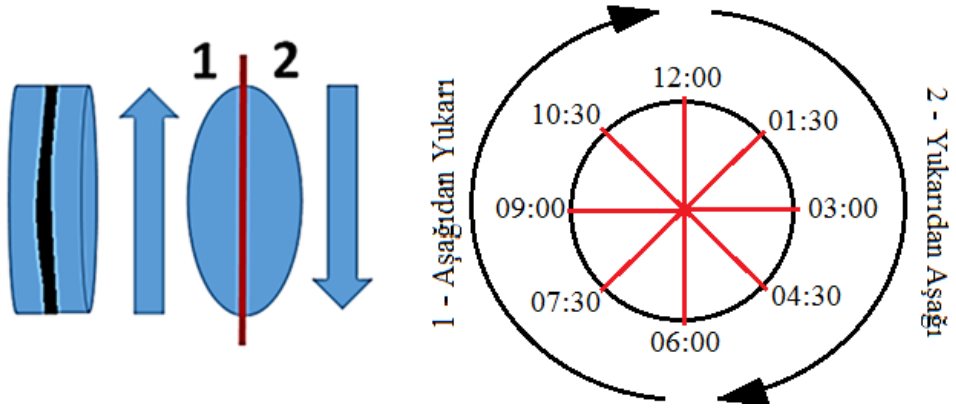
7.3. Radyografi Testi

Kaynak işlemleri gerçekleştirilen borular daha sonra tahribatsız muayene işlemlerinden radyografik teste tabi tutulmuştur. Radyografi testleri boru birleştirmelerinin kalite kontrolü için en uygun yöntemlerden biridir. Hâlihazırda BOTAŞ'ın yapım işini gerçekleştirdiği boru hatlarındaki kaynaklı birleştirmeler radyografi testleri ile muayene edilmekte ve arşiv – raporlama işlemleri söz konusu teste istinaden yapılmaktadır. Bu

nedenle tez çalışmamızda kaynaklı birleştirmeler Radyografik teste tabi tutulmuştur. Radyografi testleri EN 1435 standardına uygun olarak Emek Boru A.Ş'nin Ankara fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Bölüm 8'de deney sonuçlarının ele alınacağı Sonuçlar ve Tartışma kısmında da görüleceği üzere, Emek Boru A.Ş'de EN 473 standardına uygun olarak vasıflandırılmış RT (Radyografik Test) Seviye 2 sertifikasına sahip kalifiye bir personel tarafından yapılan değerlendirmede, teste tabi tutulan boruların kaynaklı birleştirmelerinde çalışmamızı etkileyecek bir hataya rastlanmamış, bu yüzden bir sonraki aşamaya, tahribatlı mekanik testler ve mikro-makroyapı analizleri için numune hazırlama safhasına geçilmiştir.

7.4. Numune Hazırlama

Doğalgaz ve petrol iletim hatlarında kullanılan API 5L X65 borularının kaynaklı birleştirmelerin mekanik performansını incelemek için gerçekleştirilen mekanik testler API 1104 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama safhasında; kaynak işlemlerinde elektrod açısına bağlı olarak kaynak pozisyonunun etkileri düşünülerek, her bir deneye ait boru parçası, Şekil 7.2'de şematik olarak görüldüğü gibi dört bölgeye ayrılmış ve incelemeler bölge bölge yapılmıştır. Yine incelemeler; kaynak yönüne göre (aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı) değerlendirilmiş olup, her bir deney parçasından alınan test sonuçları, kendi içerisinde değerlendirilmek üzere bölgesel olarak incelenmiştir. Yukarıdan aşağı yönde 12:00 – 1:30, 1:30 – 3:00, 3:00 – 4:30 ve 4:30 – 6:00 saat pozisyonu ve aşağıdan yukarı yönde 6:00 – 07:30, 07:30 – 09:00, 09:00 – 10:30 ve 10:30 – 12:00 saat pozisyonları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu noktada; her deney için, farklı saat pozisyonlarındaki 4 bölgeden numuneler ayrı ayrı alınmıştır. Mekanik testler kapsamında her bir test için 5'er adet test numunesi hazırlanmıştır. 16 deney kapsamında, toplamda 64 bölge ve ana malzemenin mekanik test (çekme, makrosertlik, kaynaklı kırılma (nick – break), çentik - darbe, eğme) işlemleri ile makro - mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir.



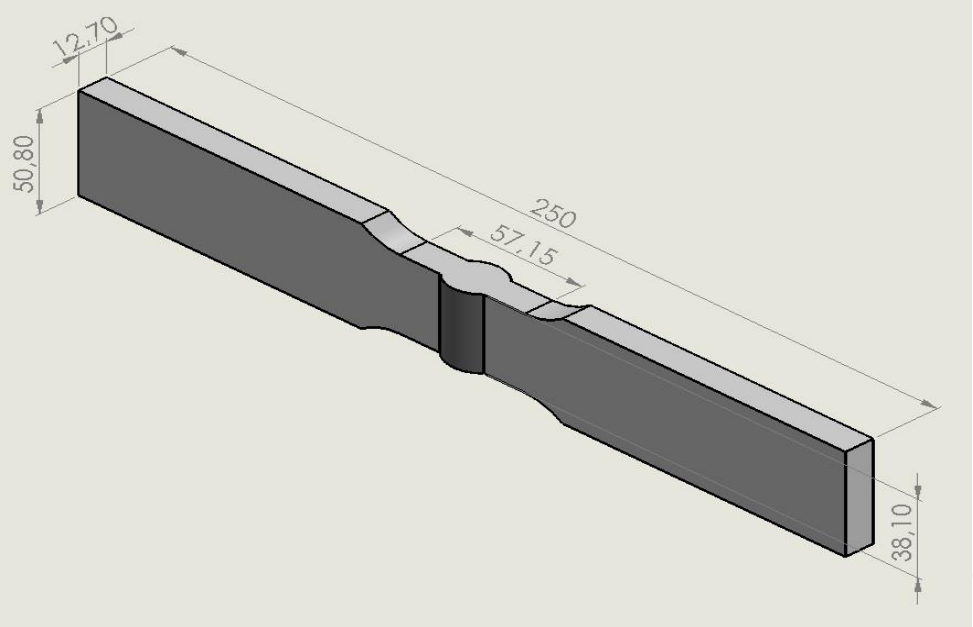
Şekil 7.2. Mekanik test ve mikroyapı numunesi alınan bölgelerin şematik gösterimi

7.5. Mekanik Testler

Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelere çekme, kaynaklı kırılma (nick-break), çentik – darbe ve eğme testleri kapsamında, standart test numuneleri hazırlanmıştır.

7.5.1. Çekme testleri

Çekme deneyi, kaynaklı malzemelerin tek doğrultuda sabit hız ve sıcaklıkta koparılıncaya kadar uygulanan tahribatlı bir muayene yöntemidir. Kaynaklı bağlantıların akma, çekme, kopma mukavemetleri ile % uzama gibi verilerin elde edilmesinde kullanılır. Çekme testleri kapsamında her bir deney için test numuneleri ASTM (American Society for Testing and Materials) E8 standardına uygun olarak, ana malzeme ve Şekil 7.2'de belirtilen 4 ayrı bölgeden 5'er adet alınarak hazırlanmıştır. 16 deney için 64 bölge ve ana malzemeden alınan toplam 325 adet numune hazırlanmıştır. Çekme testi için standarda uygun olarak hazırlanan numunelerin şematik gösterimi Şekil 7.3'te, bu gösterimdeki ölçülere uygun olarak hazırlanan numunelerin görüntüsü ise Resim 7.6'da verilmektedir.



Şekil 7.3. Çekme testi numunesinin şematik gösterimi



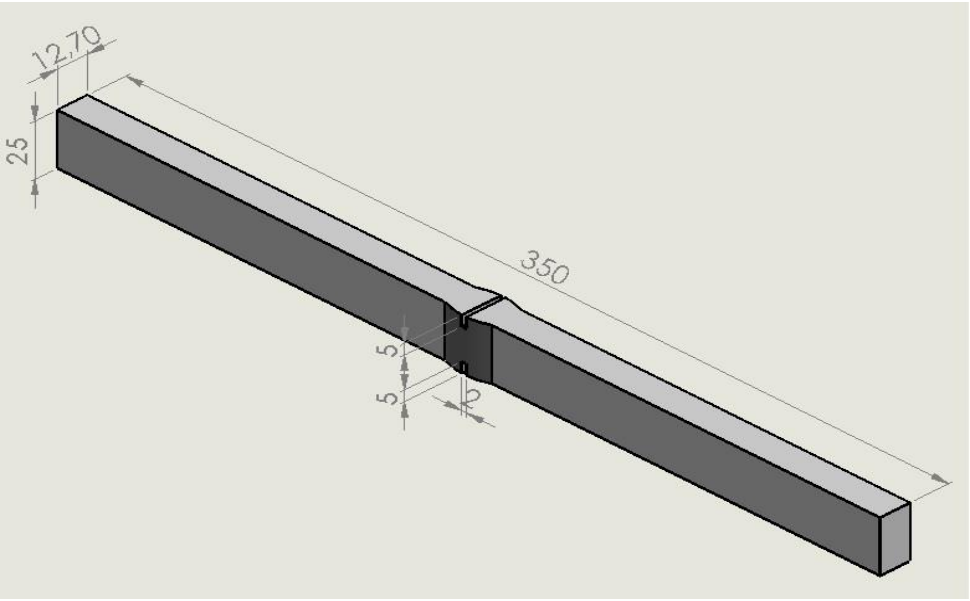
Resim 7.6. Çekme test numuneleri

Çekme testleri Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş'nin Ankara Fabrikasında bulunan 600 kN çekme kapasitesine sahip Instron marka cihazda ASTM E8 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın kalibrasyon belgeleri Ek-1'de verilmiştir.

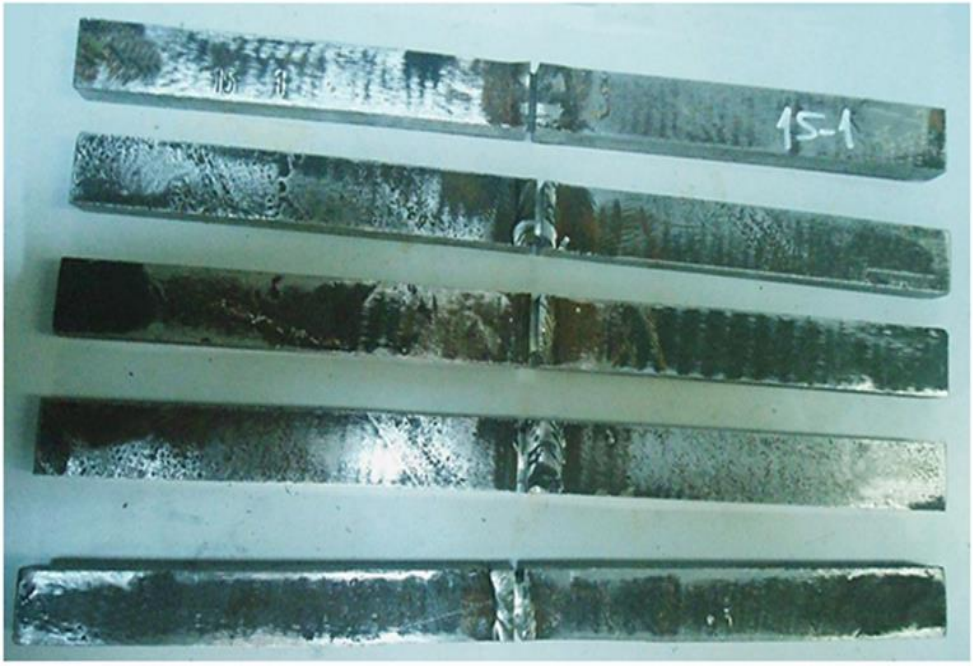
Boru birleştirmeleri haricindeki kaynaklı birleştirmelerin test numunelerinin hazırlama işlemlerinde çekme testi aşamasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü hassasiyeti için kaynaklı yüzeylerin (kep ve kök) traşlanması gerektiği bir gerçektir. Ancak boru malzemelerde ovalite nedeniyle kaynak kepi ve kökü traşlandığında, kaynak bölgesi metalurjik özelliklerini kaybedeceğinden, çekme numuneleri Resim 7.6'da görüldüğü üzere traşlanmamıştır.

7.5.2. Kaynaklı kırılma (nick break) testleri

Kaynaklı kırılma testleri malzemelerin kaynak metali ve çevresindeki yetersiz ergime, gözeneklilik, cüruf kalıntıları v.b. hataların görsel olarak incelenmesi için gerçekleştirilmektedir. Kaynaklı kırılma (nick break) test numuneleri API 1104 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler her bir deney için Şekil 7.2'de belirtilen 4 ayrı bölgeden 5'er adet ve standarda uygun ölçülerde alınmıştır. 16 deney kapsamında 64 bölgeden alınan toplam 320 adet nick break test numunesi hazırlanmıştır. Nick break test numunelerinin şematik görüntüsü ve bu ölçülere uygun olarak alınan numunelerin fotoğrafı sırasıyla Şekil 7.4 ve Resim 7.7'de görülmektedir. Kaynaklı kırılma (nick break) testleri çekme testlerinin gerçekleştiği cihazda gerçekleştirilmiş olup, cihazın kalibrasyon belgeleri Ek-1'de verilmiştir.



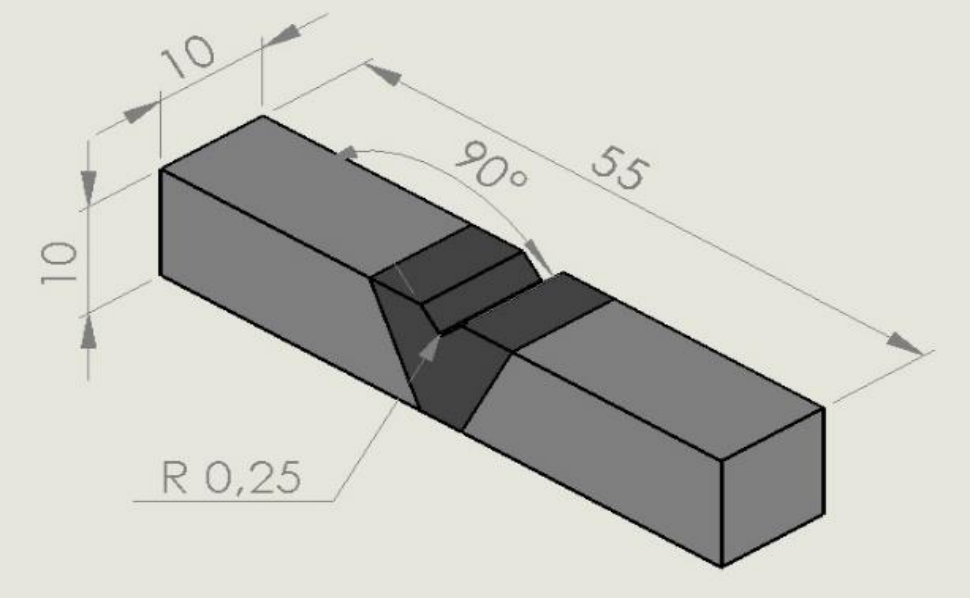
Şekil 7.4. Kaynaklı kırılma (nick break) test numunesinin şematik gösterimi



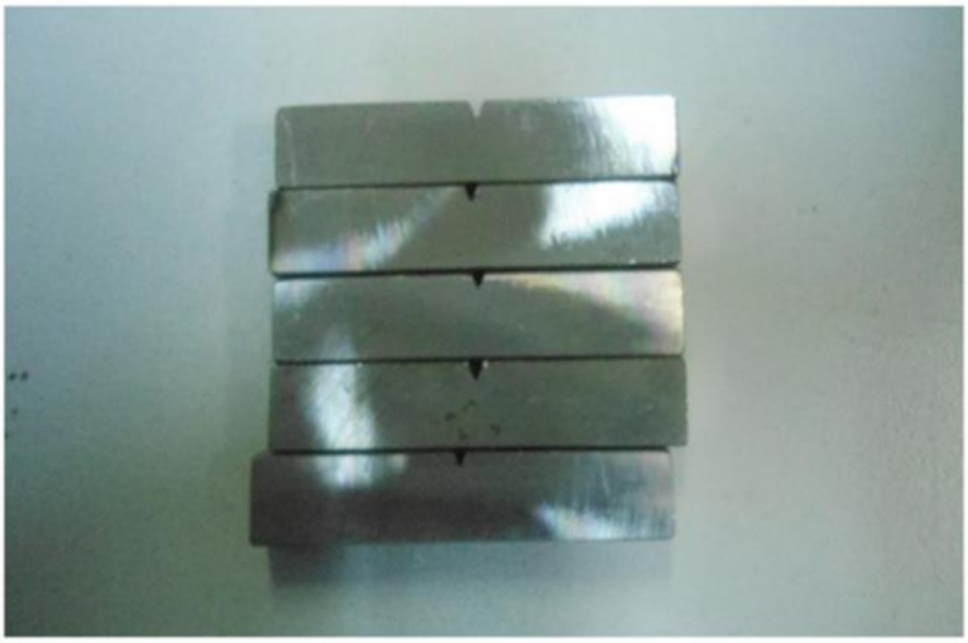
Resim 7.7. Kaynaklı kırılma (nick break) test numuneleri

7.5.3. Çentik – darbe testleri

Kaynaklı birleştirmelerin darbelere karşı direncini (tokluk) kontrol edebilmek için numunelere çentik darbe testleri uygulanmıştır. Çentik - darbe testleri TS EN ISO 148-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standarda uygun hazırlanan numuneler, ana malzeme ve her bir deney için Şekil 7.2'de belirtilen 4 ayrı bölgeden 5'er adet alınmıştır. 16 deney kapsamında 64 bölge ve ana malzemeden alınan toplam 325 adet çentik – darbe test numunesi hazırlanmıştır. Çentik darbe test numunelerinin şematik görüntüsü ve bu ölçülere uygun olarak alınan numunelerin fotoğrafı sırasıyla Şekil 7.5 ve Resim 7.8'de görülmektedir. Çentik darbe testleri Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş'nin Ankara Fabrikasında bulunan maksimum 450 Joule enerji ölçebilen ve çarpma hızı 5,23 m/sn olan Zwick marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Çentik – darbe test cihazının kalibrasyon belgeleri Ek-2'de verilmiştir. Kaynaklı birleştirilen numunelerin test için hazırlanmasında kaynak metalinin merkezine ve kaynağın kep tarafına olacak şekilde tek taraflı "V" çentikler açılmıştır. Böylece kaynaklı birleştirmelerin darbe dayanımları belirlenmiştir. Çentik darbe testleri soğutma sıvısı içerisinde 0 °C sıcaklıkta, ±1 ºC hassasiyette uygulanmıştır.



Şekil 7.5. Çentik - darbe test numunesinin şematik gösterimi

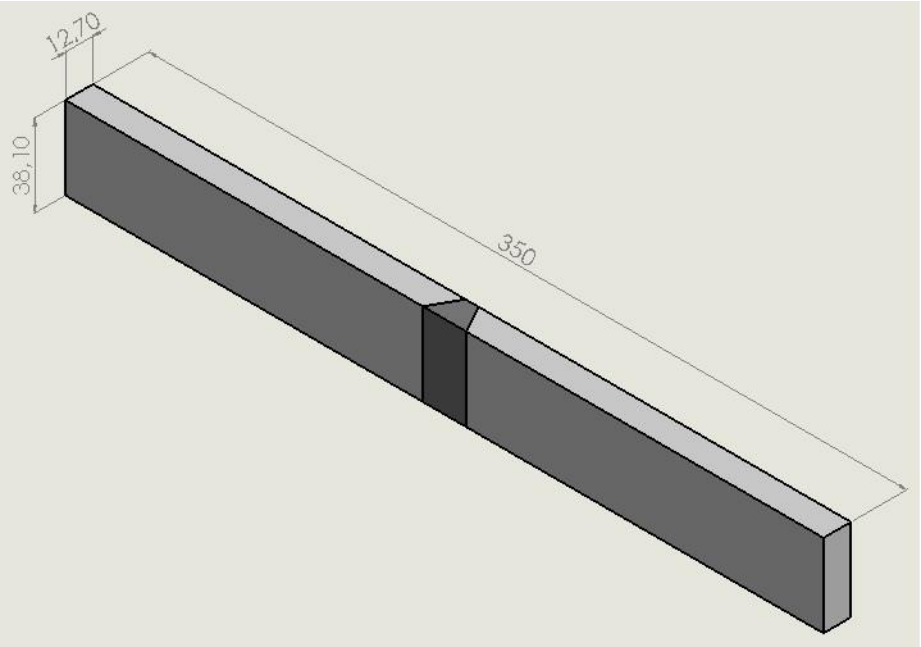


Resim 7.8. Çentik darbe test numuneleri

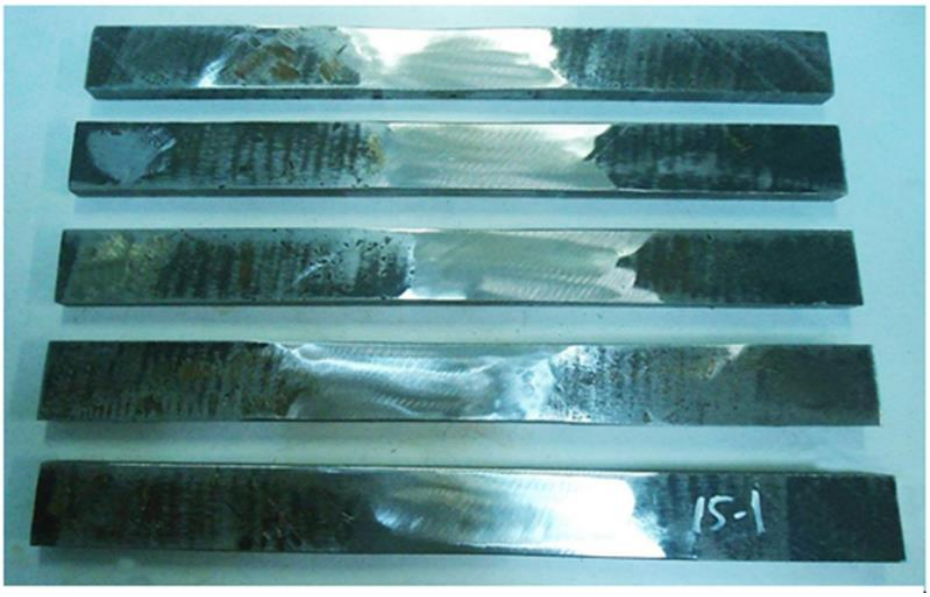
7.5.4. Eğme testleri

Eğme deneyi, kaynaklı malzemelerin kaynak dikişi ve çevresinin şekil değiştirme kabiliyeti ve kaynak dikişi ile esas metal arasında iyi bir bağlantı olup olmadığını belirlemek için birleştirmelerin kaynak kökü ve yüzeyinde oluşabilecek eğilme ve bükülmelerde gösterebileceği tavrı kontrol etmek için uygulanmıştır. Test numuneleri TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak kök ve yüzey için ayrı ayrı hazırlanmıştır.

Numuneler, ana malzeme ve her bir deney için Şekil 7.2'de belirtilen 4 ayrı bölgeden 5'er adet ve standarda uygun ölçülerde alınmıştır. 16 deney kapsamında 64 bölgeden alınan toplam 640 adet (kök ve yüzey bükme için ayrı ayrı olmak üzere) eğme test numunesi hazırlanmıştır. Eğme test numunelerinin şematik görüntüsü ve numunelerin fotoğrafı sırasıyla Şekil 7.6 ve Resim 7.9'da görülmektedir. Eğme testleri Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş'nin Ankara Fabrikasında bulunan Instron marka cihazda gerçekleştirilmiş olup cihazın kalibrasyon belgeleri Ek-1'de verilmiştir.



Şekil 7.6. Eğme test numunesinin şematik gösterimi



Resim 7.9. Eğme test numuneleri

7.5.5. Makroyapı – mikroyapı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve makrosertlik incelemeleri

Çizelge 7.7'deki parametrelere bağlı kalınarak yapılan kaynak işlemlerinden sonra her bir deney kapsamında birleştirmelerin makrosertlik davranışlarını kontrol etmek ve makro - mikroyapı analizleri için metalografik test numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, standart metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra önce 6, 3 ve 1 μm'lik keçe ve uygun solüsyonlar ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler % 3 Nital (HNO_3) çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin makroyapı fotoğrafları Emek Boru Mak. San. A.Ş. Laboratuvarındaki Leica marka stereo mikroskop ile, mikroyapı fotoğrafları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki LEICA marka ters optik mikroskop yardımıyla, SEM fotoğrafları ise Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Quanta marka FEG 250 model cihaz ile çekilmiştir. Sertlik uygulamaları boru imalatçılarının kullandığı 10 kg'lık yük ile TS EN 9015-1 standardına uygun olarak Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş. Laboratuvarlarında Struers marka, Duramin A300 model, tam pinomatik, değişken yüke sahip, Vickers cinsinden ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sertlik cihazının kalibrasyon belgeleri Ek-3'te verilmiştir. Mikroyapı numunelerinin tümünü gösteren fotoğraf Resim 7.10'da verilmektedir.



Resim 7.10. 16 deney ve 64 bölgeden alınan metalografik inceleme numuneleri

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

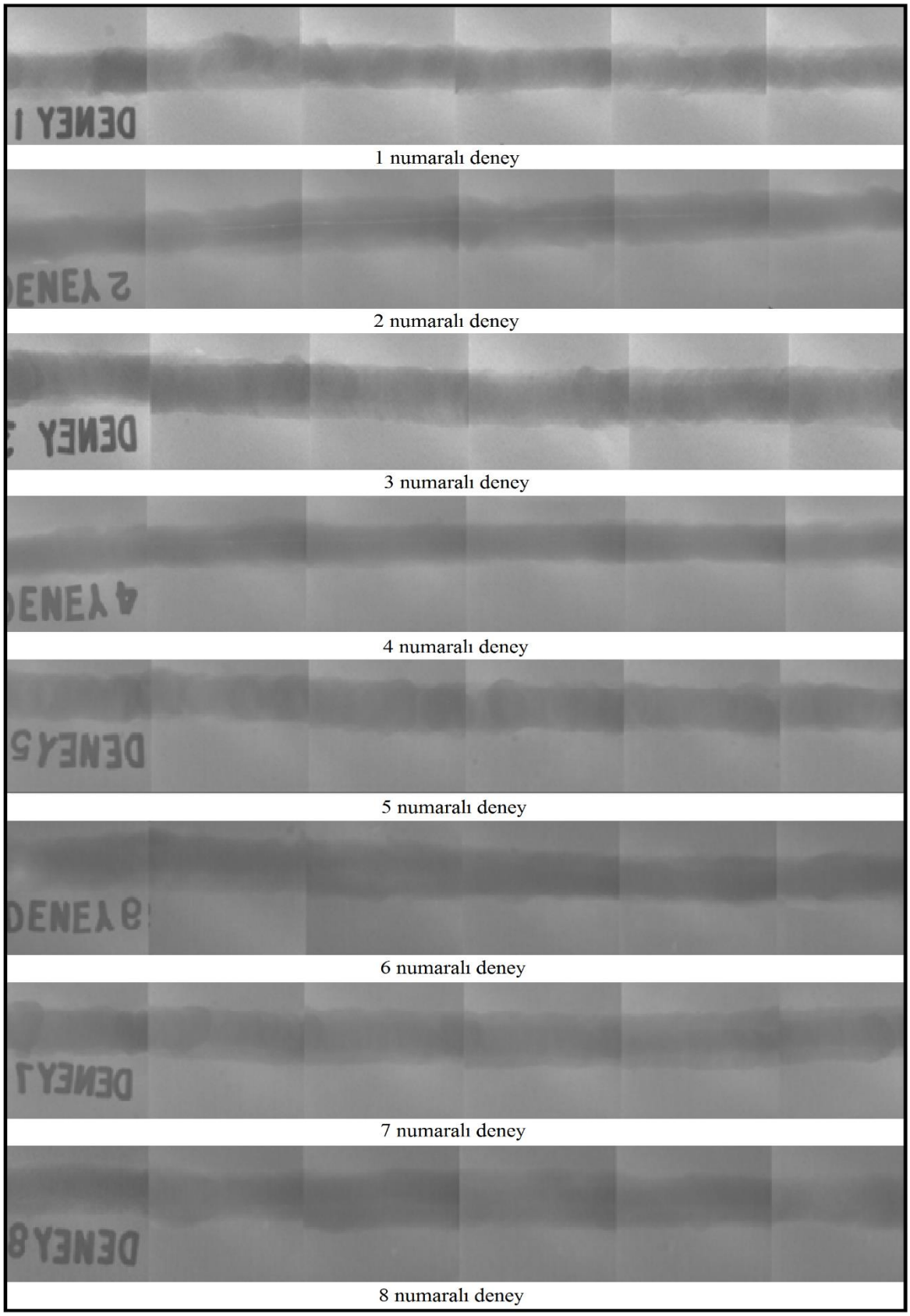
Doğalgaz ve petrol iletim hatlarında kullanılan çelik boruların kaynaklı birleştirmelerinde kaynak parametresi belirleme işlemi genellikle saha tecrübesi merkezli yapılmaktadır. Parametrelerin belirlenmesi deneme yanılma metoduyla belirlenmekte bu da ciddi kayıplara neden olmaktadır. Örneğin; 2500 mm çapında, 21 mm kesit kalınlıktaki bir borunun (Büyük İstanbul İçme Suyu Projesi, Melen Sistemi) birleştirilmesi için yaklaşık 40 kg elektrod malzemesi harcanmakta, kaynaklı birleştirme işlemi ise yaklaşık 1 gün boyunca sürmektedir. Parametre seçiminden kaynaklanan hataların telafisi için harcanan zaman ve enerji ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada kaynak parametrelerinin optimum bir şekilde belirlenmesi için Taguchi metodu kullanılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.7'de verilen parametrelere uygun olarak birleştirilen API 5LX65 kalitesindeki borular, radyografik muayeneye, metalografik inceleme ve mekanik testlere (sertlik, çekme, çentik – darbe, nick break, eğme) tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sırasıyla bu bölümde ayrı ayrı verilerek tartışılmıştır.

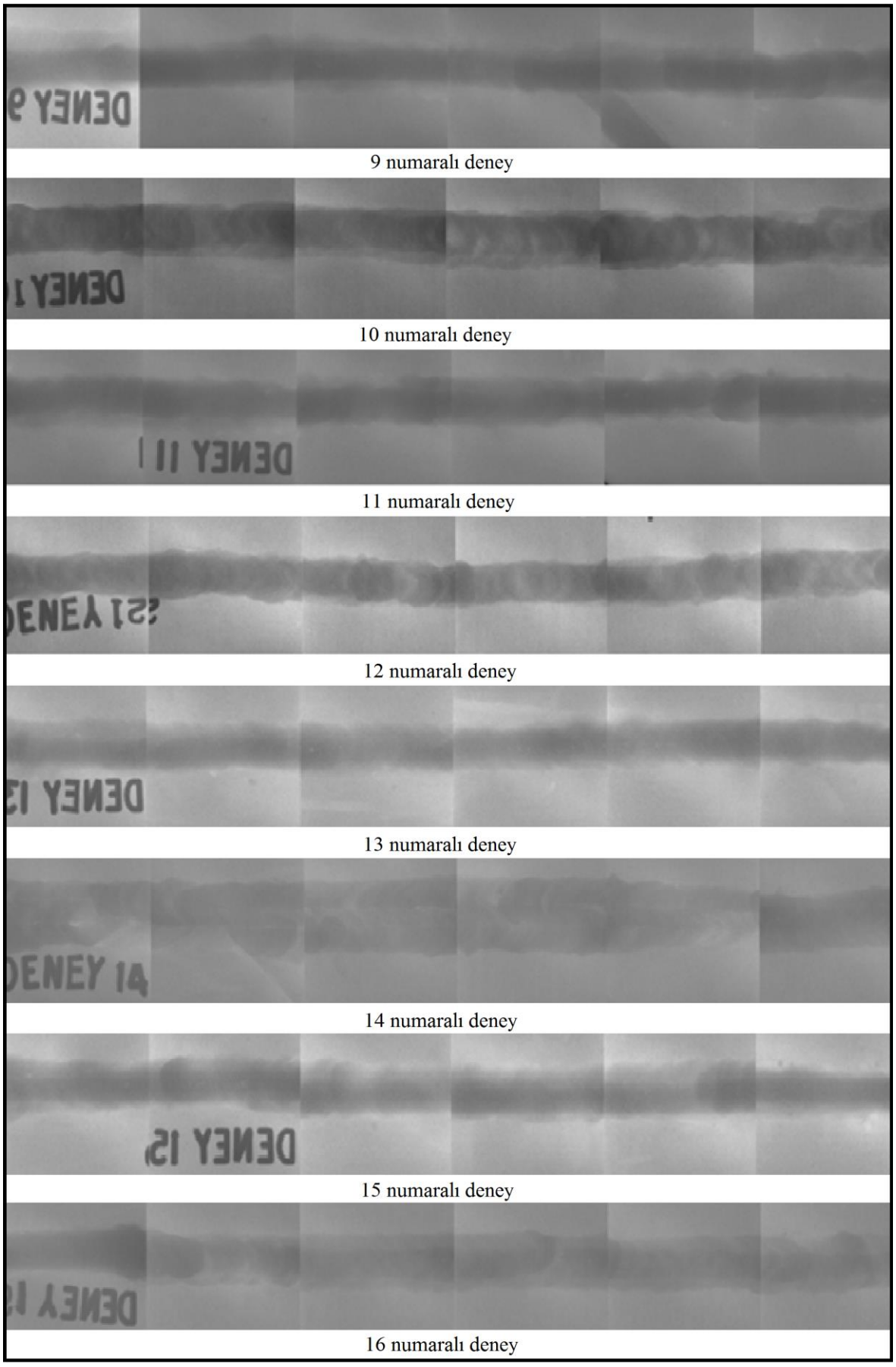
8.1. Radyografi Testi

Kaynaklı birleştirme işlemlerinden sonra yapılan radyografik incelemeler, kaynak bölgesinde gözenek, boşluk, çatlak, cüruf kalıntısı, yetersiz ergime, dikişte süreksizlik, yanma oluğu gibi hataların tespit edilmesi için yapılmaktadır. Radyografik inceleme sonucu kaynak dikişlerinde olası bu hataların olup olmadığı, kaynak dikişinin kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Radyografi testinde rastlanabilecek olası bu hatalar kaynaklı bağlantının kalitesizliğini göstermekte ve bu hatalar giderilmeden diğer test işlemleri gerçekleştirilememektedir. Bu amaç doğrultusunda, bu tez çalışmasında kaynak işlemleri gerçekleştirilen borular mekanik test ve metalografik inceleme öncesi tahribatsız muayene işlemlerinden radyografik teste tabi tutulmuştur. Radyografi testleri Emek Boru A.Ş'de EN 1435 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş, değerlendirme ise EN 473 standardına uygun olarak vasıflandırılmış Seviye 2 bir personel tarafından, ISO 5817 standardına uygun olarak Kabul Seviyesi C'de gerçekleştirilmiştir. Testi gerçekleştiren kalifiye

personele ait sertifika Ek-4'te, test raporu ise Ek-5'te verilmiştir. Radyografik incelemelerden alınan görüntüler ise Resim 8.1'de görüldüğü gibidir.



Resim 8.1. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayene görüntüleri



Resim 8.1. (devam) Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayene görüntüleri

Emek Boru A.Ş'de EN 473 standardına göre RT Seviye 2 vasıflandırılmış personelin ISO 5817 standardına uygun olarak Kabul Seviyesi C'de gerçekleştirdiği değerlendirmelere göre (Ek-5); 2 ve 4 numaralı deneylerde yetersiz ergime nedeniyle birleşme eksikliği hatası tespit edilmiş, bu nedenle söz konusu deneylerde kaynaklı birleştirmeler reddedilmiştir. Bu deneylerin haricinde 9, 11, 13, 14, 15 ve 16 numaralı deneylerde gözenek, 14 ve 15 numaralı deneylerde ise cüruf kalıntısına rastlanmış, fakat söz konusu süreksizlikler kabul kriterlerine göre hata boyutunda olmadığı için ilgili deneyler kabul edilmiştir. Genel olarak 2 ve 4 numaralı deneylerin haricinde kaynaklı birleştirmelerin kusursuz bir şekilde gerçekleştirildiği, kabul kriterlerinin üzerinde hata boyutunda başkaca süreksizliklere rastlanmadığı tespit edilmiştir.

2 ve 4 numaralı deneyler bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda gerçekleşen deneyler olup, söz konusu deneylerin radyografik incelemesinde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların oluştuğu gözlemlenmiştir. Resim 8.1'de verilen radyografi resimlerinde düz bir çizgi halinde beliren bu hata yetersiz ergime nedeniyle oluşan birleşme noksanlığı hatasını ifade etmektedir. Bazik elektrodla, yukarıdan aşağı pozisyonda, deneylerdeki en düşük akım şiddeti değerlerinde (110 - 140 ve 120 - 150 A) gerçekleşen birleştirme işlemlerinde yeterli nüfuziyetin sağlanamadığı görülmüştür. Söz konusu belirtilen hatanın seçilen bu değerlerin bazik elektrod için yukarıdan aşağı kaynağında yeterli nüfuziyeti sağlayamaması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Kaynak uygulama sürecinde görülen söz konusu hatalar, parametre optimizasyonu için iptal edilmemiş ve özellikle parametrelerin optimizasyon sonuçları kapsamında mukayese edilmesi düşünülerek, radyografik incelemesi olumsuz olan deneyler için mikroyapı ve mekanik test inceleme işlemleri de gerçekleştirilmiştir.

Resim 8.1'de verilen radyografik inceleme görüntüleri detaylı incelendiğinde 2 ve 4 numaralı deneyler haricinde genel olarak kaynaklı birleştirmelerin kusursuz bir şekilde gerçekleştirildiği, makro düzeyde, hata boyutunda süreksizliklere rastlanmadığı görülmektedir. 2 ve 4 numaralı deneyler bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda gerçekleşen deneyler olup, söz konusu deneylerin radyografik incelemesinde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların oluştuğu gözlemlenmiştir. Radyografi resimlerinde düz bir çizgi halinde beliren bu hata yetersiz ergime nedeniyle oluşan birleşme noksanlığı hatasını ifade etmektedir. Bazik elektrodla, yukarıdan aşağı pozisyonda, deneylerdeki en düşük akım şiddeti değerlerinde (110 - 140 ve 120 - 150 A)

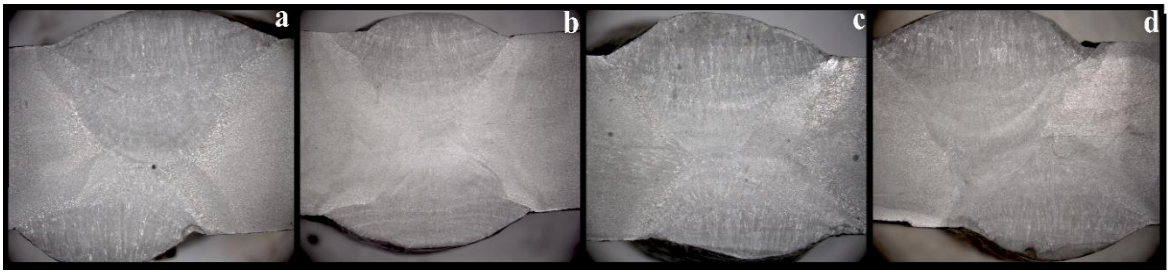
gerçekleşen birleştirme işlemlerinde yeterli nüfuziyetin sağlanamadığı görülmüştür. Söz konusu belirtilen hatanın seçilen bu değerlerin bazik elektrod için yukarıdan aşağı kaynağında yeterli nüfuziyeti sağlayamaması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Kaynak uygulama sürecinde görülen söz konusu hatalar, parametre optimizasyonu için iptal edilmemiş ve özellikle parametrelerin optimizasyon sonuçları kapsamında mukayese edilebilmesi düşünülerek, radyografik incelemesi olumsuz olan deneyler için mikroyapı ve mekanik test inceleme işlemleri de gerçekleştirilmiştir.

Radyografik muayenede temel prensip olarak; boşluklar veya hatalar farklı koyuluktaki bölgeler olarak görülmesi gerekirken yukarıda verilen radyografi görüntülerinde 2 ve 4 numaralı deneyler haricinde, kabul kriterleri dışında böylesi farklılıklar görülmemektedir. Dolayısıyla; bu da kaynaklı birleştirmelerde hata boyutunda herhangi bir çatlak, gözenek, kalıntı, boşluk ve süreksizlik içermediğini göstermekte olup, 2 ve 4 numaralı deneyler hariç diğer kaynaklı parçalarda sağlıklı bir birleştirmelerin gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.

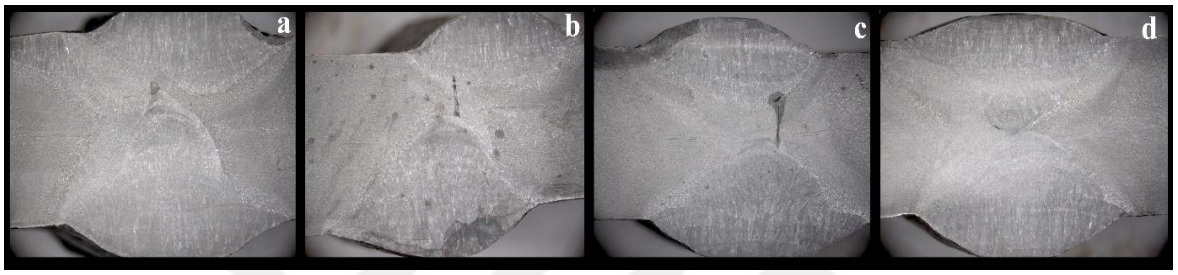
Resim 8.1'de verilen radyografi görüntülerinde farklı genişliklerde kaynak dikişlerinin elde edilmesinin nedeni deneylerin farklı parametrelerde gerçekleşmesindendir. Tüm birleştirmelerde borulara açılan kaynak ağız açısı 30º olup, birleştirmeler 6 pasoda gerçekleşmiştir. Buna karşın, akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türü dikiş genişliğinin farklı oluşmasına etki etmektedir. Genel olarak görüntülerde, akım şiddetinin artması ile kaynak dikişi genişliğinin arttığı görülmüştür. Ayrıca kaynak işlemi manuel gerçekleştirildiğinden kaynaklı birleştirmelerin dikiş genişliklerinde doğal alarak farklılıklar gözlemlenmiştir.

8.2. Makroyapı Çalışmaları

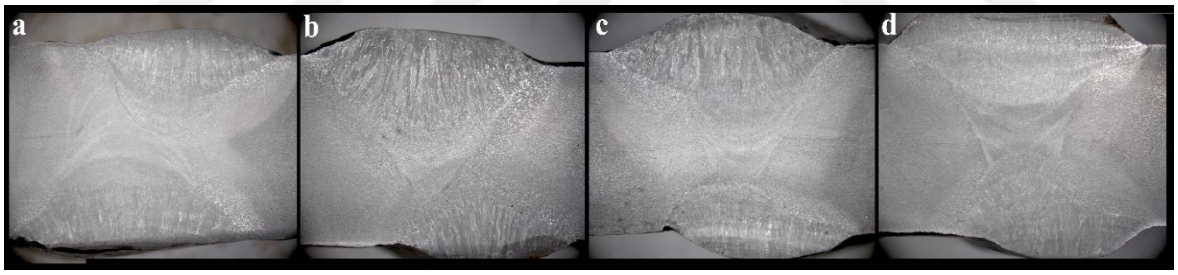
Çizelge 7.7'de verilen parametrelere uygun olarak birleştirilen API 5L X65 kalitesindeki borulardan alınan metalografik inceleme numunelerinin makroyapı görüntüleri Resim 8.2 – Resim 8.17'de verilmektedir. Görüntüler Şekil 7.2'de şematik olarak verilen bölgelerden alınan metalografik inceleme numunelerinden elde edilmiştir.



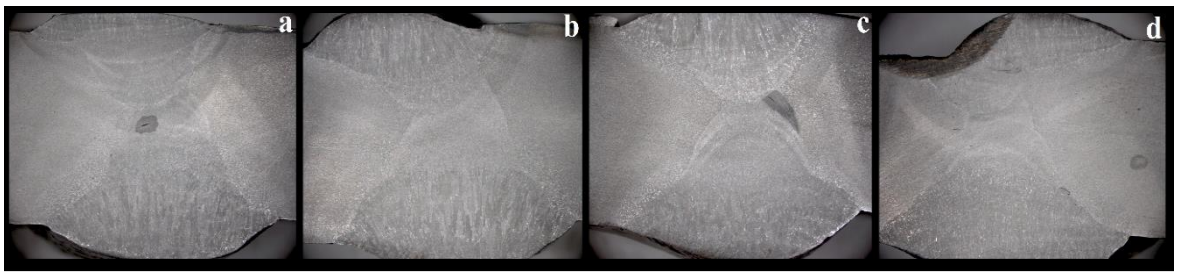
Resim 8.2. 1 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



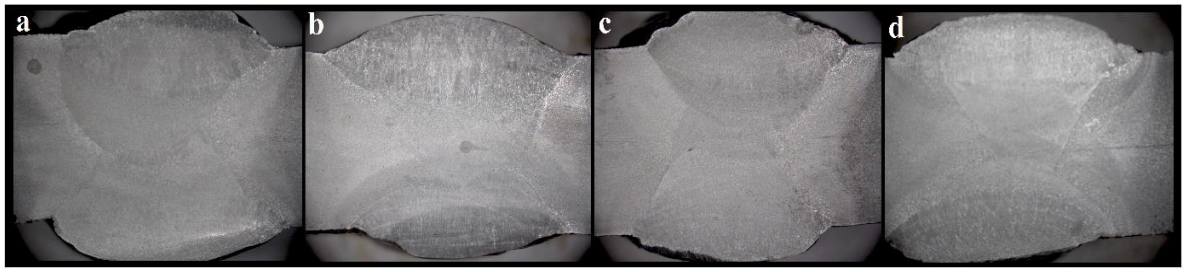
Resim 8.3. 2 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



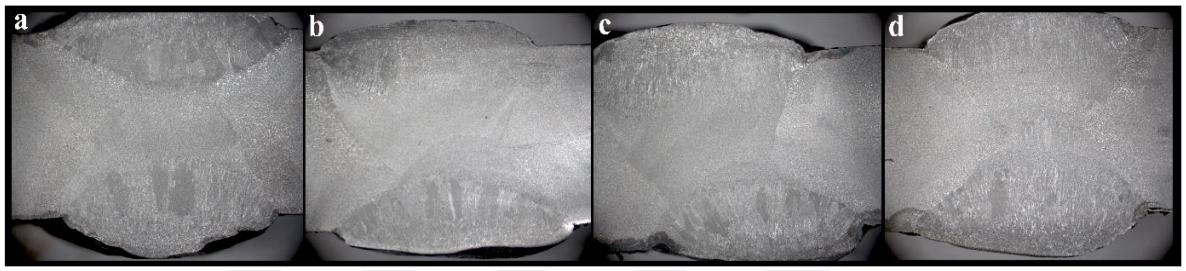
Resim 8.4. 3 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



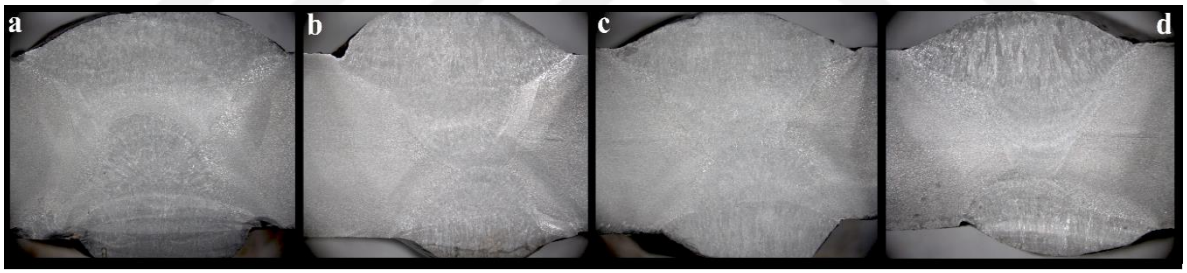
Resim 8.5. 4 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



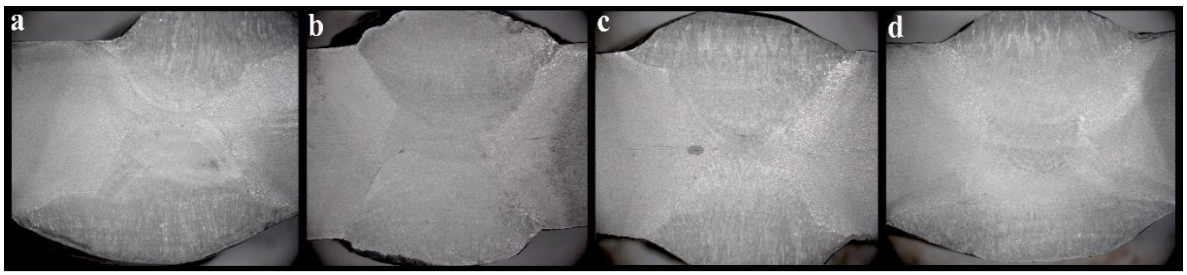
Resim 8.6. 5 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



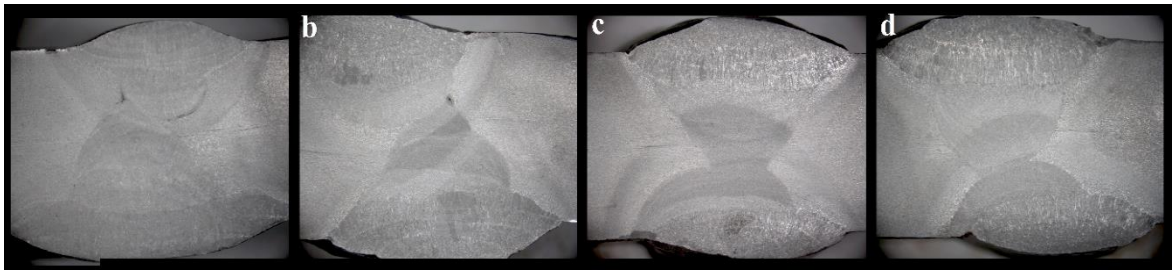
Resim 8.7. 6 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



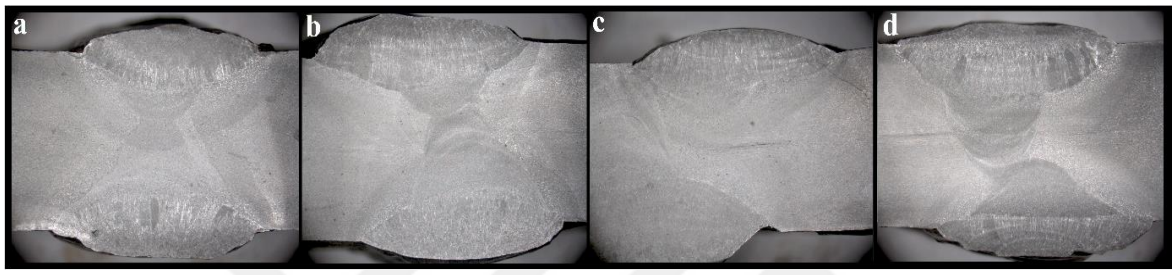
Resim 8.8. 7 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



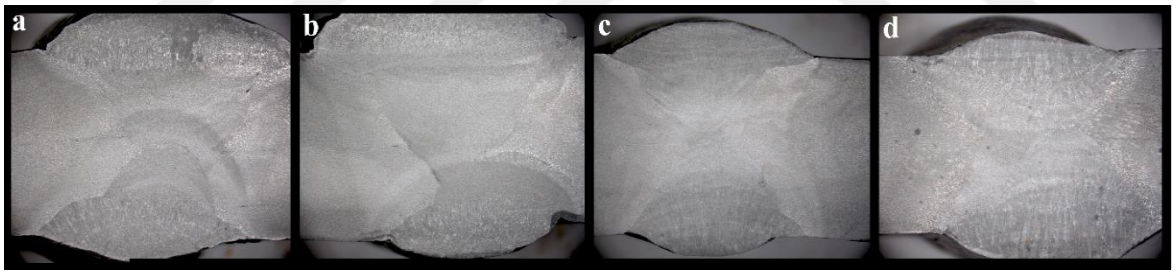
Resim 8.9. 8 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



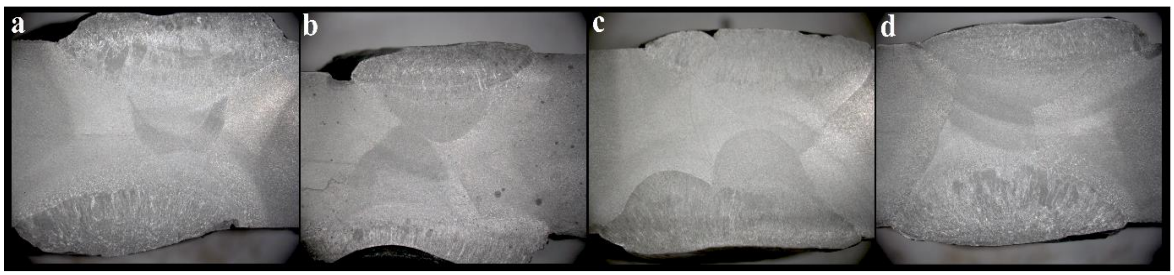
Resim 8.10. 9 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



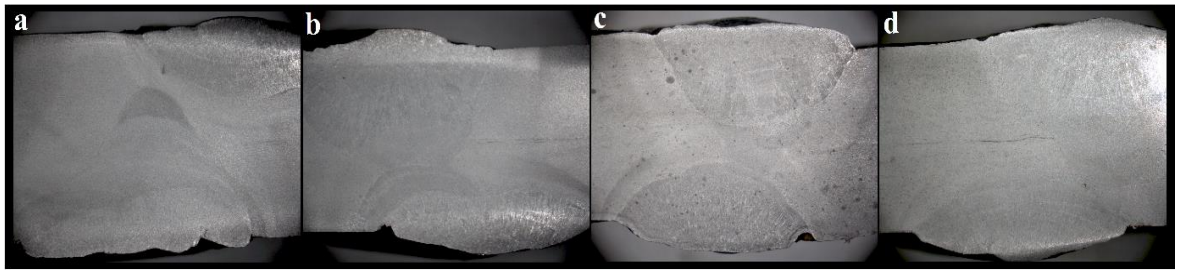
Resim 8.11. 10 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



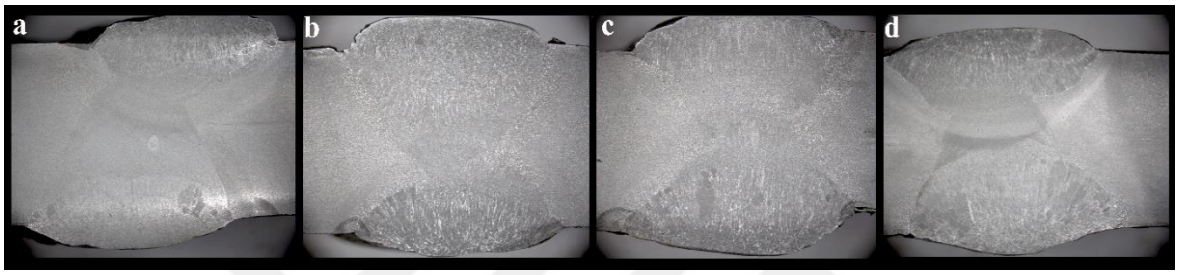
Resim 8.12. 11 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



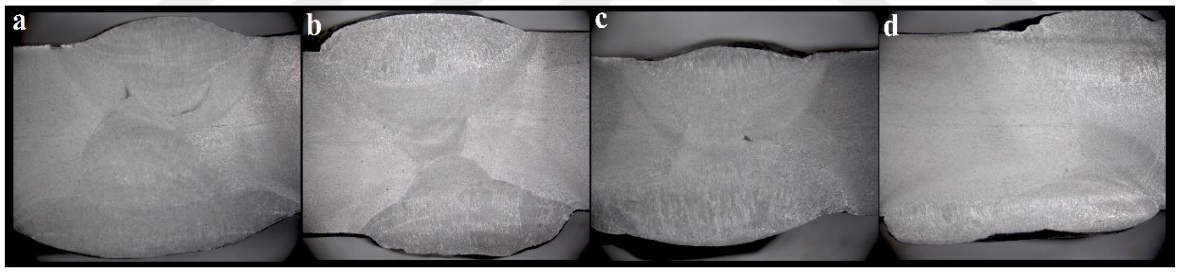
Resim 8.13. 12 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



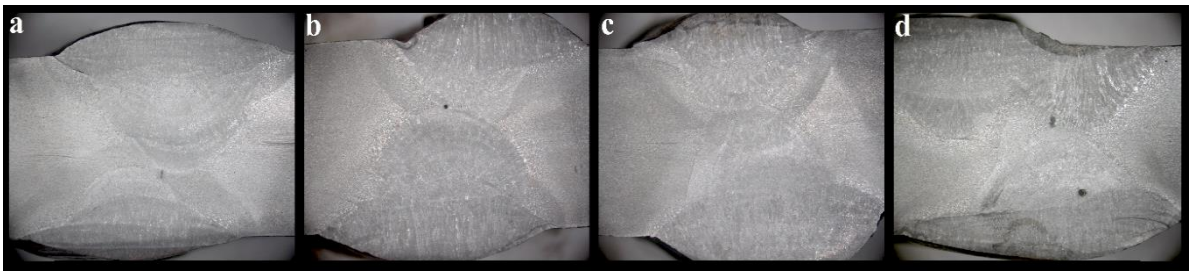
Resim 8.14. 13 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



Resim 8.15. 14 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu



Resim 8.16. 15 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu



Resim 8.17. 16 numaralı deneyden elde edilen makroyapı görüntüleri a) 12:00 – 1:30 saat pozisyonu b) 1:30 – 3:00 saat pozisyonu c) 3:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu

Resim 8.2 – 8.17'de verilen makroyapı fotoğrafları incelendiğinde yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile birleştirilen 2 ve 4 numaralı deneylerde (Resim 8.3 a-c, Resim 8.5 a-c) yetersiz ergime sebebi ile birleşme eksikliği görülmekte olup diğer görüntülerde herhangi bir hata görülmemektedir. Radyografi deneylerinden elde edilen görüntüler ve radyografik test raporu bu durumu desteklemektedir (Resim 8.1, Ek-5). Çalışmalarda uygulanan kaynak işlemi ve boru ağızlama işlemleri manuel yapıldığı için bazı numunelerde iç-dış kaynaklarda eksenel kaçıklık hatası olmuştur. Bu durum makro görüntülere yansımış ancak kaynak kalitesini etkileyecek bir veri tespit edilmediği için hata olarak değerlendirilmemiştir.

Bazik elektrod ile yukarıdan aşağı yapılan birleştirmelerde en düşük akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 2 ve 4 numaralı deneylerde yetersiz ergime sebebiyle birleşme eksikliği görülmüştür. Bu durum 2 ve 4 numaralı deneylerde ısı girdisinin yeterli miktarda olmadığını, bu nedenle yeterli ergime ve birleşmenin sağlanamadığını göstermektedir.

2 ve 4 numaralı deneyler haricindeki birleştirmelere bakıldığında; birleştirmelerde tam nüfuziyetin sağlandığı gözlenmiş ve makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği v.b.) rastlanılmamıştır. Kaynaklı birleştirmelerde oluşabilecek hataların kök pasoda oluşması kuvvetle muhtemeldir. Kök pasoda oluşması muhtemel hataların önüne geçebilmek adına, birleştirmelere son olarak iç paso kaynak işlemi uygulanmıştır. İç paso kaynak işlemi oluşabilecek hataların önüne geçtiği gibi, tam nüfuziyetin oluşmasını da ayrıca sağlamıştır. Makroyapı görüntülerinin tümünde ise ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak metali ve bölgesel sınırlar net olarak görülmektedir. Ayrıca fotoğraflardan, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönlendiği net bir şekilde gözlenmektedir. Birleştirme işlemlerinde önceki pasolar, daha sonra uygulanacak pasolara aynı zamanda ön tav ısıl işlemi görevi de yapmaktadır.

6 pasoda gerçekleşen kaynaklı birleştirme işleminde (Şekil 7.1.b), paso geçişleri makroyapı fotoğraflarından görülebilmektedir. Merkez bölgede yer alan ilk pasoların ince taneli, iç ve dış kapakları oluşturan son pasoların ise iri ve sütunsal taneli yönlenmiş yapıları belirgin olarak seçilebilmektedir. Bu görünüm aslında tipik kaynak yapısıdır. Her paso kendinden önceki pasolar üzerine yüksek sıcaklıklarda bir ısıl işlem uygular. Her yeni pasonun çekilişinde alttaki pasoların ısıl işlemi tekrarlanır. Bu ısıl işlemler tanesel yapıyı

normalize ederler. Dolayısıyla taneler küçülür, yönlenme kaybolur. Fakat son pasoda böyle bir durum söz konusu olmadığı için, son pasolar orijinal halini muhafaza ederler [128].

Yine ilave metal ile birlikte ana malzeme de ergiyerek ve yoğun türbülansın etkisiyle birlikte katılaşarak, kaynak metali yapısını oluşturmuştur. Kaynak metalindeki katılaşmanın epitaksiyel olarak ana metalin tanelerinden başlayarak merkeze doğru ilerlediği bilinmektedir [129]. ITAB, katılaşmanın başladığı çizgiden ana metale kadar uzanan ve yapısal farklılıkların, geçiş bölgesi olarak net bir şekilde makro olarak görülebildiği bir yapıdır. Ana metal ve kaynak metali arasında ergime - katılaşma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan bu bölgeler makroyapı fotoğraflarından görülmektedir [129,130]. Maruz kaldığı ısı miktarına göre ITAB içerisinde de yapısal farklılıklar oluşmaktadır. Kaynak metali sınırında iri tanelerden oluşan ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Mikroyapı incelemelerinde de oluşan bu yapısal farklılıklar açıkça görülmektedir.

Yine makroyapı görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde; nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin malzemeye uygulanan kaynak yönü - elektrod türü - akım şiddetinin bir neticesi olan ısı girdisine bağlı olarak değişiklik gösterdiği görülmektedir. Aynı elektrod türü ile aynı yönde yapılan birleştirmelerde uygulanılan akım şiddetinin değiştirilmesi ile ısı girdisi miktarı değişiklik göstermektedir. Elektrik ark kaynağında ısı girdisi formülü Eşitlik 8.1'de verilmekte olup, söz konusu eşitliğe göre akım şiddeti ile ısı girdisi arasında doğru orantı bulunmaktadır. Diğer değişkenler sabit tutularak akım şiddeti arttırıldığında, ısı girdisi de aynı oranda artmaktadır. Akım şiddetinin yüksek olduğu deneylerde, ısı girdisi miktarı yükselmekte ve nüfuziyet derinliği - ITAB genişliği daha geniş bir alanda oluşmaktadır. Makroyapı fotoğrafları ayrıntılı olarak incelendiğinde bu durum net bir şekilde gözlemlenmektedir.

$$Q = U \times I \times 60 / V \qquad (8.1)$$

Eşitlik 8.1'de Q; ısı girdisini ifade etmekte olup birimi J/mm'dir. U; ark gerilimi (Volt), I; akım şiddeti değeri (Amper), V ise kaynak hızıdır (mm/dakika).

Diğer parametreler sabit tutularak elektrod türünde değişikliğe gidilmesi ısı girdisinde bariz bir değişikliğe neden olmamakla birlikte kaynak yönünün değiştirilmesi birleştirmelere uygulanılan ısı girdisini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Aşağıdan yukarı kaynak yönünde, pozisyon gereği kaynak hızı çok az da olsa yavaşladığından ısı girdisi daha yoğun bir şekilde oluşmaktadır. Makro fotoğraflar incelendiğinde, aşağıdan yukarı kaynak pozisyonlarında daha geniş bir nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin oluştuğu görülmektedir.

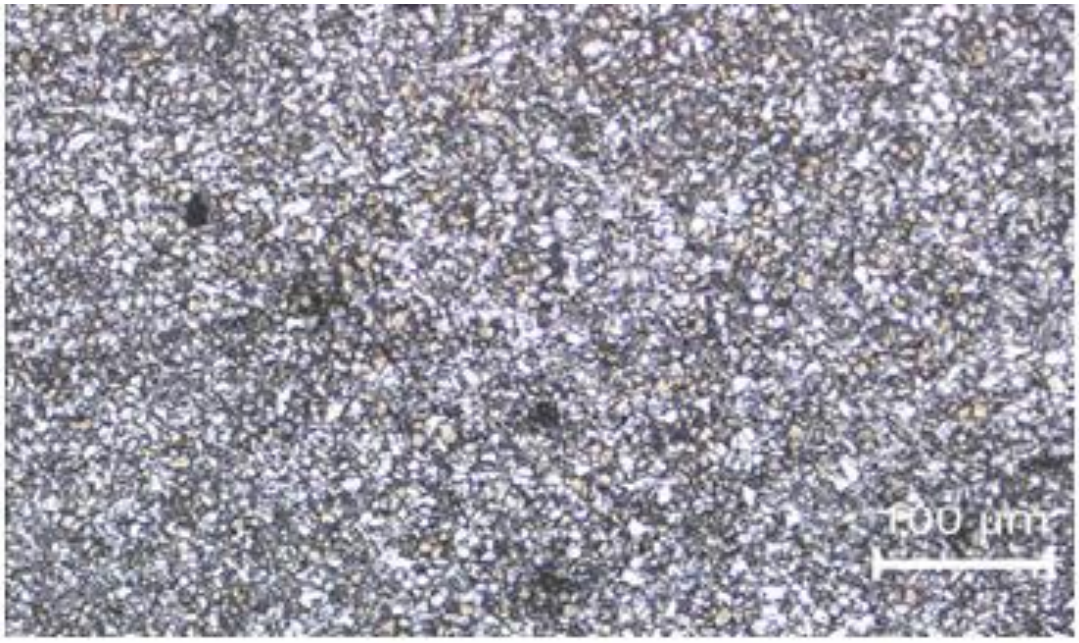
Makroyapı fotoğraflarında, genel olarak benzerlikler görülmektedir. Isı girdisi miktarına bağlı olarak bölgelerin ve tanelerin görüntüleri de değişmektedir. Isı girdisi miktarının yoğun olduğu birleştirmelerde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB'ların daha geniş olduğu yine fotoğraflardan görülebilmektedir. Kaynak metalinde ergime ve katılaşmanın etkisiyle asiküler ferrit oluşumunun artmasıyla birlikte tane yapısı incelmektedir. $\Delta t_{8/5}$ soğuma süresinin artmasıyla asiküler ferrit miktarı da artış göstermektedir. Isı girdisinin artması $\Delta t_{8/5}$ soğuma süresini arttırmakta, aynı oranda yapıdaki asiküler ferrit oranı da artış göstermektedir. Bu durumda kaynak metali tane yapısının daha ince bir şekilde oluşmasına neden olmaktadır [131].

8.3. Mikroyapı Çalışmaları

Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde birleştirilen X65 kalitesindeki boruların kaynaklı bölgelerinde yapılan mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilen görüntüler aşağıda sırasıyla optik mikroskop ve SEM çalışmaları şeklinde verilmiştir.

8.3.1. Optik mikroskop çalışmaları

Kaynaklı birleştirmelerin gerçekleştirildiği API 5L X65 ana malzemenin mikroyapı görüntüsü Resim 8.18'de verilmiştir. Fotoğrafa bakıldığında tane yapısının, tipik bir çelik malzeme tane yapısı olan eş eksenli yapıda olduğu görülmekte olup, literatürde de belirtildiği gibi, yapıda bulunan Nb, Ti ve V gibi alaşım elementlerinin tane inceltici etkisi nedeniyle tane yapısının ince tanelerden oluştuğu görülmektedir [132].



Resim 8.18. Ana malzemeden alınan mikroyapı görüntüsü

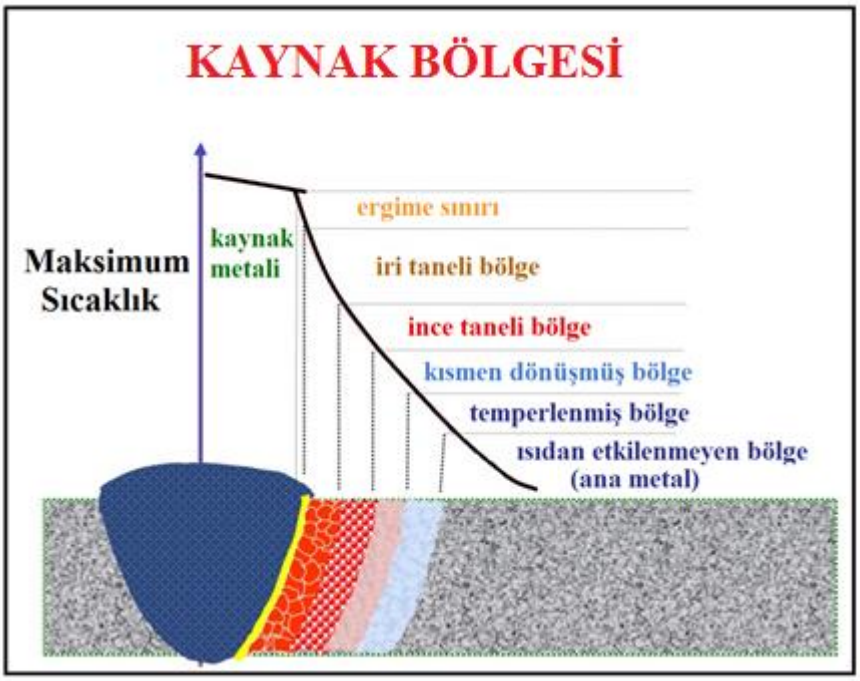
Birleştirmelerin kaynak bölgesi, kaynak metali ve ITAB'dan meydana gelmektedir. Kaynak bölgesinin mekanik özellikleri, kaynak metali ve ITAB'da oluşan mikroyapılara bağlı kalmaktadır. Oluşan bu mikroyapıların ise, kaynak edilen parçanın kalınlığı, kimyasal bileşimi ve enerji girişine bağlı olarak değişim gösterdiği bildirilmiştir [133].

Birleştirmelerin kaynak metali geçiş bölgelerinden elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla Resim 8.19 – Resim 8.40'da verilmektedir. Söz konusu görüntüler 50 büyütme olarak ITAB (iri ve ince taneli bölgeler) ve kaynak metali bölgelerini kapsamaktadır. 50 büyütme olarak alınan görüntülere kaynak metali bölgesi ile ITAB'ın iri ve ince taneli bölgeleri ancak sığabilmektedir. Optik mikroskop ile daha küçük büyütmede görüntü alınamadığı için ITAB'ın diğer bölgeleri (kısmen dönüşüme uğramış bölge, temperlenmiş bölge) ile ana metal bölgesi görüntülerde yer alamamıştır. Görüntülerde I numara ile belirtilen bölgeler; ITAB'da ince taneli bölgeyi, II numara; ITAB'da iri taneli bölgeyi, III numara ise kaynak metalini göstermektedir. Tüm deneylerin görüntüleri aynı şekilde alındığı için birleştirmelerin ITAB genişliklerinin, iri taneli bölgenin genişliğiyle doğru orantılı olarak artış gösterdiği düşünülerek, deneylerden alınan görüntülerde II numara ile belirtilen iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak birleştirmelerin nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliği hakkında yorumlar yapılmaya çalışılmıştır. Yine görüntüler, inceleme imkânları çerçevesinde en düşük büyütme olan 50 büyütmede alınan görüntüler olmasına rağmen ince taneli bölgelerin bütünü görüntülere sığmamıştır. Bu nedenle ITAB

genişliklerinin tespitinde II numara ile belirtilen iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak yorumlamalar yapılmaya çalışılmıştır.

Kaynak dikişinin fiziksel sınırı metalin ergime sınırıdır. Çalışmamızda incelenen numunelerin parlatılıp dağlanan kesitinde bu sınır çıplak gözle de görülebildiği gibi Resim 8.2 – 8.17'de verilen makroyapı görüntülerinde de gerek kaynak dikişinin ve gerekse her bir pasonun sınırları net bir şekilde seçilebilmektedir. Ancak kaynağın yüksek sıcaklığı ergime sınırının ötesinde kalan kesimler üzerinde de etkili olur. Isıl etki sıcaklığın alt kritik sınıra (723ºC) ulaştığı yere kadar uzanır. Kaynak dikişini çevreleyen bu bölgeye "Isının Tesiri Altındaki Bölge" (ITAB) denir [128].

Şekil 8.1. maruz kalınan sıcaklık aralığına bağlı olarak kaynak bölgesinde oluşan bölgeleri ifade etmektedir. Şekilde en yüksek sıcaklık değerlerinde kaynak metalinin oluştuğu görülürken, sıcaklık değerinin düşmesiyle önce ergime sınırı dediğimiz ergime – katılaşma çizgisi, daha sonra sırasıyla iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmüş bölge ve temperlenmiş bölge oluşmaktadır. ITAB'ın en düşük sıcaklık değerine maruz kalan bölgesi ise ana metal tanelerinden oluşan dönüşüme uğramayan bölgedir.



Şekil 8.1. Kaynak bölgesinde maruz kalınan sıcaklık aralığına bağlı olarak oluşan bölgeler [134]

Şekil 8.1'de verilen yapılar incelendiğinde ITAB dört ayrı bölgeden oluşmakta ve yapıda belirgin bir şekilde iri (kaba) ve ince taneli bölge oluşmaktadır. Kaynak işlemi esnasında ITAB farklı sıcaklık aralıklarına maruz kalmaktadır. Kaynağa komşu olan ve sıcaklığın 1100 ºC'nin üzerinde olduğu, fakat ergime derecesine varmayan iri (kaba) taneli bölgede taneler birbirine kaynayarak daha büyük taneler haline dönüşmektedir. Sıcaklığın etkisiyle en iri taneler hemen kaynak dikişi sırasında oluşur ve sınırdan uzaklaştıkça taneler giderek küçülür. Çeliklerde 1100 ºC kırmızı akkorluğun, beyaz akkorluğa dönüştüğü sıcaklık düzeyidir. Diğer taraftan çelik bu sıcaklık düzeyinin üzerinde çok, altında ise az eriticidir. Al, V, Nb, Zr gibi çelik içinde bulunması muhtemel alaşım elementleri veya kalıntılar bahsedilen sıcaklığın altında çökelmek, ayrışmak ve tane sınırlarında toplanmak eğilimindedir. Çeliğin tane sınırlarında bahsettiğimiz alaşım elementlerinden oluşan duvar, tanelerin birbirlerine kaynamalarını önler. Yani 1100 ºC'nin altında tane büyümesi zayıf olasılıktır. İri taneli bölgenin bir başka özelliği de kaynak dikişi ve çevresinde en fazla martensitin oluştuğu bölge olmasıdır. Dolayısıyla bu bölgede sertlik doruğa ulaşmaktadır. İleride anlatılacak olan sertlik testlerinden elde edilen sonuçlar bu durumu desteklemektedir. Özetlenecek olursa iri taneli bölgede, hem kaba ve iri, hem de sert bir tane yapısı mevcuttur. Kaynak dikişinin en zayıf yeri normal olarak burasıdır. Gerek çatlama ve gerekse korozyondan etkilenme en fazla bu bölgede olmaktadır [128]. Yine ilerleyen bölümlerde anlatılacağı üzere kaynaklı numunelerin geneli bu bölgeden kırılmıştır.

Yine Şekil 8.1'de verilen yapılardan ince taneli bölge sıcaklığın alt kritik sınır olan 723 ºC'nin üzerine çıktığı, fakat tane büyümesi oluşturacak kadar (1100 ºC üzeri) yükselmediği ana malzeme bölgesidir. Bu bölgede ferrit ve perlit taneleri kısmen veya tamamen östenite dönüşmüşler, fakat tomurcuklanan yeni taneler büyüme ve irileşme fırsatını bulamamışlardır. Gerek sıcaklığın nispeten düşük kalması ve gerekse bu sıcaklıkta kalış süresinin kısalığı ince taneli bir yapının oluşmasına sebep olmuştur. Bu bölgede taneler malzemenin orijinal tanelerinden de küçüktür ve martensit oluşumu da azdır. Dolayısıyla sertleşme fazla değildir. Dolayısıyla ince taneli bölge kaynak dikişinin hemen yanında az sorunlu olan bir dış bölgedir [128].

Şekil 8.1'de iri ve ince taneli bölgenin dışında verilen bölgeler ise; kaynak sırasında kritik alt sıcaklık olan 723 ºC'ye ulaşmayan bir sıcaklık aralığında oluştuğu için söz konusu bölgelerde önemsenecek bir kalıcı etki meydana gelmez [128].

Kısacası; iri taneli bölge yüksek ısıdan dolayı tane irileşmesi tavlama sıcaklığına maruz kalırken, ince taneli bölge yaklaşık 800 - 900 ºC sıcaklık aralığında normalizasyon ısıl işlemine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla nomalizasyon ısıl işleminin amacının da tane incelterek eş eksenel bir yapı elde etmek olduğu düşünüldüğünde, bu bölgede meydana gelen değişimler beklenen bir durum olarak değerlendirilebilir.

Kaynak metalini irdeleyecek olursak da; düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynak metalinde oluşan mikroyapılar soğuma hızına bağlı olarak; primer ferrit (tane sınırı ferrit (allotriomorfik) ve poligonal ferrit), Widmanstatten ferrit, asiküler ferrit, perlit, beynit ve martensit olarak belirtilmektedir [133,135-137]. Svensson [137], kaynak metalinde oluşan yapıların aynılarına ITAB'da da rastlanabilmektedir demektedir. Ancak, asiküler ferrit taneleri genellikle metalik olmayan inklüzyonlar üzerinde çekirdeklenmektedir. Bu nedenle bu faza inklüzyonlar açısından zengin olan kaynak metalinde rastlanmaktadır [135–137].

Mikroyapı fotoğraflarının tümü incelendiğinde; kaynak esnasında çeliğin kaynak metalinde katılaşması sırasında östenit A_3 sıcaklığının altına düşürüldüğünde, kolon tipi östenit tane sınırlarında önce tane sınırı ferritler (allotriomorfik ferrit) oluşturmaktadır. Çünkü tane sınırı ferrit A_3 sıcaklığının hemen altında oluşan bir fazdır [133,135,136]. Daha sonra ise ferrit – östenit tane sınırlarında widmanstatten kenar levhaları veya ferrit tane levhaları çekirdeklenmesi ve büyümesi gerçekleşir. İlk iki fazın büyüme hızı östenitte karbon yayınma hızına bağlıdır [131]. Soğumanın ilerlemesiyle, östenit taneleri içinde var olan metalik olmayan inklüzyonlar üzerinde asiküler ferrit taneleri çekirdeklenmekte ve büyümektedirler. Asiküler ferrit taneleri büyümeleri sırasında, bünyelerinde çözündüremedikleri karbonu geride kalan östenit içerisinde difüzyonla vermektedir. Böylece asiküler ferrit taneleri arasında karbonca zengin hale gelen çok küçük östenit adacıkları, soğumanın da hızlı olması nedeniyle martensit fazına dönüşmektedirler [133,138].

Kaynakta soğuma hızına bağlı olarak asiküler ferrit teşekkül etmez ise tane sınırı ferrit ve beynit dönüşümü gerçekleşir. Yavaş soğuma hızlarında tane sınırı ferrit, hızlı soğuma hızlarında beynit oluşur [131]. Asiküler ferrit taneleri büyüdükten sonra kalan östenit mikrofazlara dönüşür. Mikrofaz martensit, dejenere perlit, beynit, kalıntı östenit olabilir.

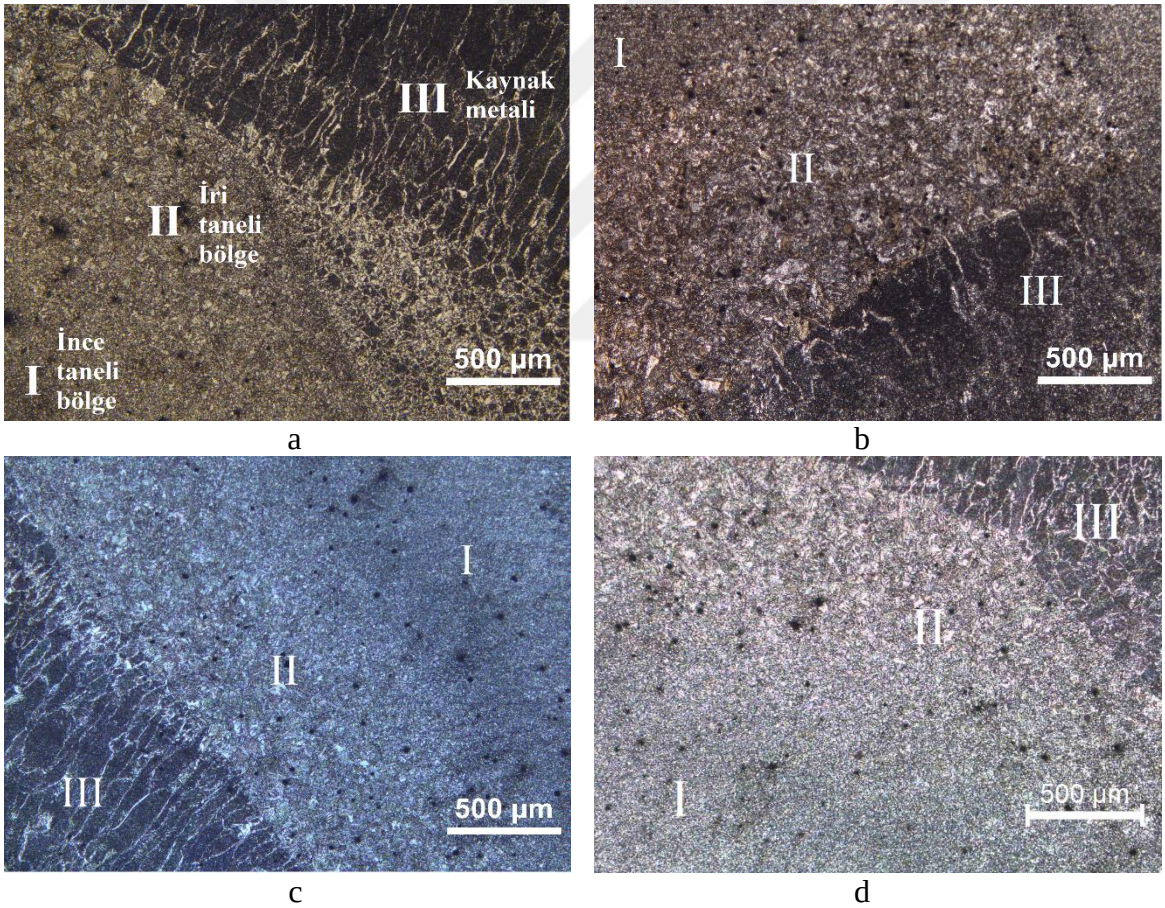
Bu fazlar genellikle kaynak metalinde az hacim oranı teşkil ettiklerinden mikrofaz olarak adlandırılırlar [133].

Resim 8.19 ve Resim 8.20'de aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde birleştirilen deneylerden alınan mikroyapı görüntülerinin grup halinde incelemelerini görmek mümkündür. Grup halinde yapılan incelemeler; yukarıda bahsedildiği gibi, I numara; ince taneli bölgeyi, II; iri taneli bölgeyi, III ise kaynak metali bölgesini yansıtacak şekilde Şekil 7.2'de belirtilen saat pozisyonlarının belirtildiği bölgelerden alınan numunelerin pozisyona bağlı değişimlerini görmek amacıyla alınmıştır.

Resim 8.19'da Deney 1 için aşağıdan yukarı pozisyonda selülozik elektrod ile 110 – 140 A akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilen kaynak işleminin grup mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Resim 8.19.a; 6:00 – 7:30 saat pozisyonu, Resim 8.19.b; 7:30 – 9:00 saat pozisyonu, Resim 8.19.c; 9:00 – 10:30 saat pozisyonu, Resim 8.19.d ise; 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleridir.

Aşağıdan yukarı yönde, 6:00 – 7:30 saat pozisyonu bölgesinde (Resim 8.19.a) yüksek ısı girdisi nedeniyle ITAB'ın iri taneli bölgesinin daha geniş bir alanda oluştuğu görülmektedir. Resim 8.19.b ve Resim 8.19.c'de, her iki resimde kaynak pozisyonu nedeniyle uygulanılan ısı girdisi hemen hemen birbirine yakın değerler olmaktadır. Bu nedenle söz konusu resimlerde mikroyapı görüntüleri birbirine çok benzemekte ve iri taneli bölge aynı genişliklerde oluşmaktadır. Yukarıya doğru devam eden kaynak işlemi esnasında ısı girdisinin pozisyon gereği azaldığı görülmektedir. Bu nedenle iri taneli bölge, Resim 8.19 b ve c'de gösterilen 7:30 – 9:00 ve 9:00 – 10:30 saat pozisyonlarında, Resim 8.19.a'daki 6:00 – 7:30 pozisyonundaki kaynak işlemine oranla daha dar bir alanda oluşmuştur. Resim 8.19.d ise 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgesinden alınan mikroyapı görüntüsünü ifade etmektedir. Bu bölgede ısı girdisi kaynak pozisyonunun etkisiyle diğer bölgelere nazaran daha düşük oluşmaktadır. Bu nedenle söz konusu bölgede iri taneli bölge daha dar bir alanda oluşmuştur. Buradan yola çıkarak aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde en yoğun ısı girdisinin 6:00 – 7:30 saat pozisyonu, en düşük ısı girdisinin ise 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinde oluştuğunu söylemek mümkündür. İri taneli bölgelerin (resimlerde II numara ile gösterilen bölge) genişlikleriyle orantı kurularak ITAB genişlikleri hakkında da yorum yapmak mümkündür. Resim 8.19.a ile gösterilen bölge, ısı girdisinin en yoğun olduğu bölge, 6:00 – 7:30 saat pozisyonunun

olduğu bölgedir. Burada tavan kaynağı pozisyonunda en geniş iri taneli bölge elde edildiğinden, söz konusu pozisyonda oluşan ITAB genişliğinin diğer bölgelere nazaran en geniş olduğunu söylemek de mümkündür. Resim 8.19.b ve c; 7:30 – 9:00 ve 9:00 – 10:30 saat pozisyonlarında 6:00 – 7:30 saat pozisyonuna (Resim 8.19.a) nazaran iri taneli bölgeler daha dar bir alanda oluştuğundan söz konusu bölgelerin ITAB genişliklerinin daha dar bir alanda oluştuğu söylenebilir. Resim 8.19.d ise alın kaynağı pozisyonu diyeceğimiz 10:30 – 12:00 saat pozisyonunda birleştirildiği için en düşük ısı girdisine maruz kalmıştır. Bu nedenle söz konusu resimde iri taneli bölge daha dar bir alanda oluşmuştur. Dolayısıyla aşağıdan yukarı yönde 10:30 – 12:00 saat pozisyonunda en dar ITAB genişliğinin elde edildiği söylenebilir.



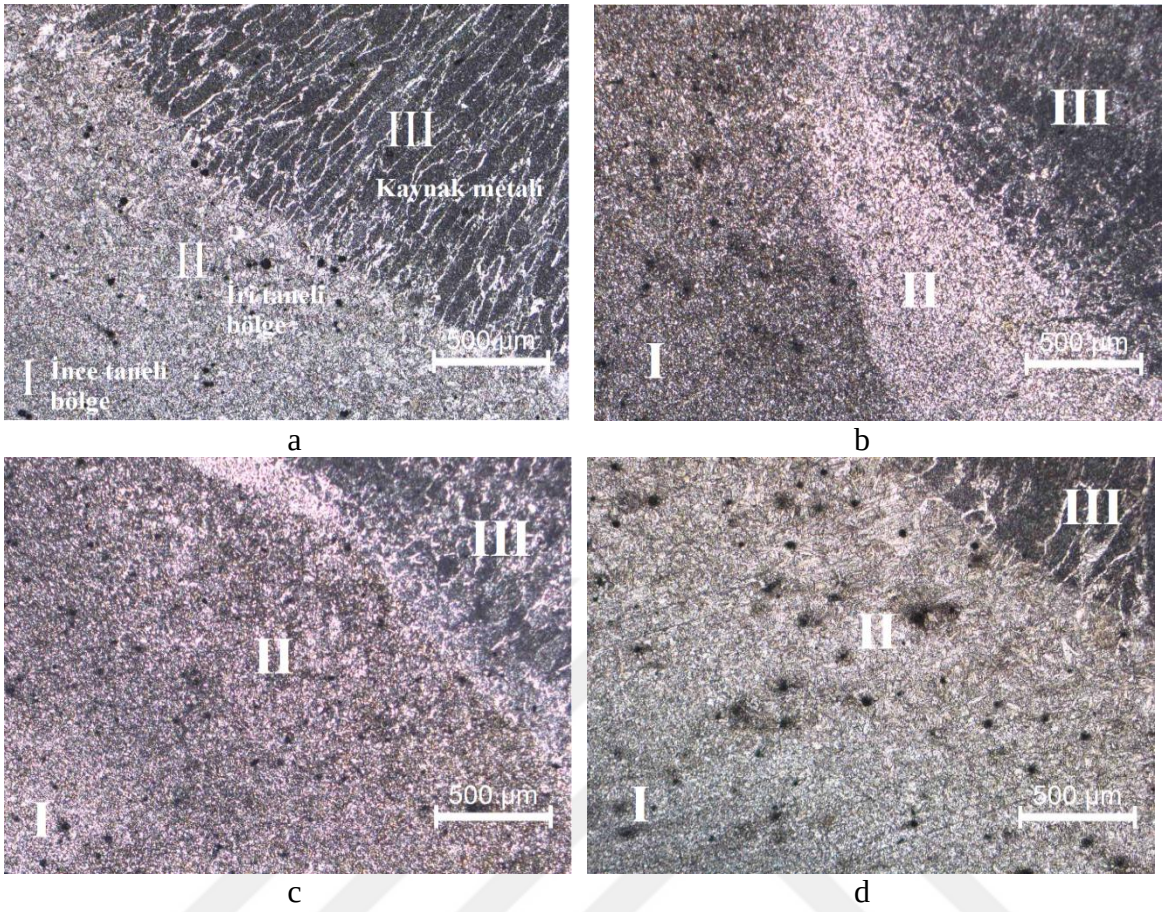
Resim 8.19. 1 numaralı deneyden alınan mikroyapı görüntüleri a) 6:00 – 7:30 saat pozisyonu b) 7:30 – 9:00 saat pozisyonu, c) 9:00 – 10:30 saat pozisyonu, d) 10:30 – 12:00 saat pozisyonu

Yukarıdaki resimlerin tümü ayrıntılı olarak incelendiğinde; I numara ile belirtilen ince taneli bölgelerde eş eksenli benzer mikroyapıların oluştuğunu söylemek mümkündür. II numara ile belirtilen iri taneli bölgeler ise genel olarak birbirine benzemekte olup, kaynak

işlemi esnasında oluşan yüksek ısı nedeniyle, kaynak metali sınırlarında daha iri taneli olarak oluşmaktadır. Ayrıca ergime sınırından uzaklaştıkça tane irileşmesinin azaldığı görülmektedir.

Yine resimlerde iri taneli bölgelerin daha geniş oluştuğu bölgelerde, ısı girdisinin etkisiyle, tane yapısının daha da iri taneli yapıda oluştuğu da gözlemlenmektedir. Buna nazaran kaynak metalinde ise daha ince taneli bir yapının oluştuğu görülmektedir. Kaynak bölgesinde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak oluşan asiküler ferrit tanelerinin yoğunluğu nedeniyle, kaynak metali içerisinde ince taneli yapıların oluştuğu düşünülmektedir. Kaynak esnasında oluşan yüksek türbülanstan dolayı kaynak metalindeki tanelerin diğer bölgelere oranla çok daha homojen bir şekilde ve daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde tane yapısı olarak; klasik kaynak metalindeki dendritik yapının hâkim olduğu belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca, taneler genel olarak ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde, kaynak merkezine doğru yönlenmiştir.

Aşağıdaki resimlerde ise; Deney 2 için yukarıdan aşağı pozisyonda ve 110 – 140 A akım şiddeti değerlerinde bazik elektrod ile gerçekleştirilen kaynak işleminin grup görüntüleri verilmektedir (Resim 8.20). Kaynak işlemi Şekil 7.2'de ifade edilen bölgeler baz alınarak değerlendirildiğinde, kaynak pozisyonu nedeniyle, saat 1:30 – 3:00 ve 3:00 – 4:30 saat pozisyonlarının olduğu bölgelerde düşük ısı girdisi oluşmaktadır. Yine yukarıdan aşağı kaynak yönü nedeniyle en düşük ısı girdisi 12:00 – 1:30, en yüksek ısı girdisi de tavan pozisyonu olarak değerlendirebileceğimiz 4:30 – 6:00 saat pozisyonlarında oluşmuştur. Uygulanan ısı girdisine bağlı olarak, iri taneli bölgenin genişliği Resim 8.20 b ve c'de benzer bir şekilde ve dar bir bölgede, Resim 8.20 a'da daha geniş olarak, Resim 8.20 d'de ise en geniş bölgede oluşmaktadır. Yine aşağıdan yukarı kaynak pozisyonunda anlatıldığı gibi geniş bir alanda oluşan iri taneli bölge yapısı yüksek ısı girdisi nedeniyle, diğer bölgelerdeki yapılara oranla daha iri taneli olarak oluşmuştur.



Resim 8.20. 2 numaralı deneyden alınan mikroyapı görüntüleri, a) 12:00 – 01:30 saat pozisyonu b) 01:30 – 03:00 saat pozisyonu c) 03:00 – 4:30 saat pozisyonu d) 4:30 – 6:00 saat pozisyonu

Deney 2 için yukarıda verilen grup görüntülerinde, Resim 8.20.a; 12:00 – 01:30 saat pozisyonu, Resim 8.20.b; 01:30 – 03:00, Resim 8.20.c; 03:00 – 04:30, Resim 8.20.d ise; 04:30 – 06:00 saat pozisyonundan alınan numunelerin mikroyapı görüntülerini yansıtmaktadır. Yukarıdaki görüntüler ayrıntılı olarak incelendiğinde, Resim 8.19'da gözlemlenen yapılara benzer görüntülerin elde edildiği görülmektedir. İnce taneli bölgeler yine eş eksenli bir yapıda oluşmuş, iri taneli bölge ise; normalize olmuş ince taneli bölgenin yakınlarında daha ince yapıda iken, ısısının etkisiyle kaynak metali sınırlarında daha iri taneli yapılara dönüşmüştür. Kaynak metali tanelerinin ise; asiküler ferrit yapının hâkim olduğu tipik kaynak metali tane yapısında olduğu değerlendirilirken, bölgede dendritik ve sütunsal yapıların oluştuğu ve kaynak metali merkezine doğru yönlenmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

Resim 8.20.a'da 12:00 – 01:30 saat pozisyonunda oluşan iri taneli bölgenin diğer görüntülerde oluşan iri taneli bölgelerden saat pozisyonunun etkisi ve dolayısıyla ısı girdisi

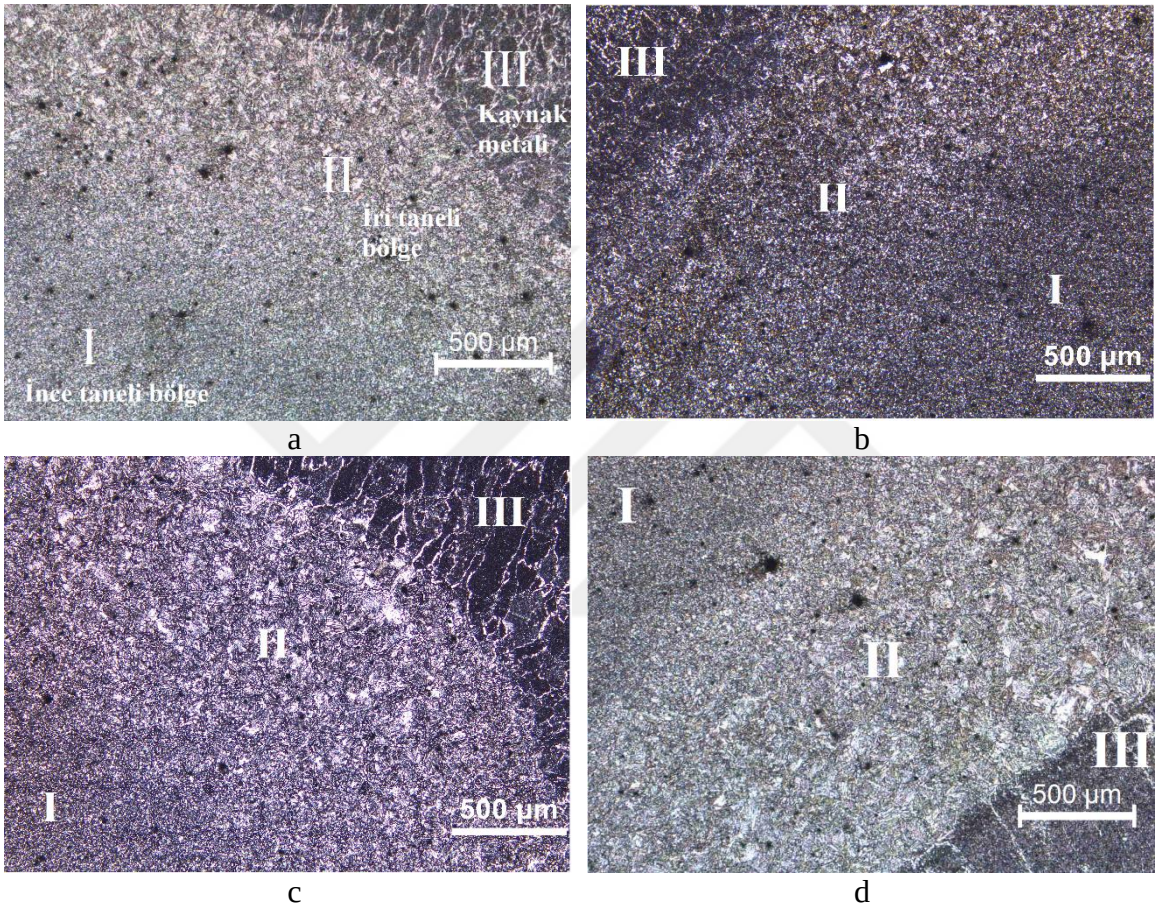
nedeniyle daha dar bir alanda oluştuğu söylenebilir. Resim 8.20 b ve c'deki resimlerde ısı girdisinin pozisyon nedeniyle arttığı düşünüldüğünde oluşan iri taneli bölgenin daha geniş bir alanı kapsadığı görülmektedir. Resim 8.20.d'de ise pozisyonun tavan kaynağı pozisyonuna karşılık gelmesi nedeniyle (4:30 – 6:00 saat pozisyonu) ısı girdisinin artışına bağlı olarak iri taneli bölge en geniş alanda oluşmaktadır. İri taneli bölgenin ITAB genişlikleriyle doğru orantılı olarak değişim gösterdiği düşünüldüğünde; yukarıdaki resimler içerisinde en geniş ITAB genişliğinin 4:30 – 6:00 saat pozisyonunda Resim 8.20.d'de, en düşük ITAB genişliğinin ise Resim 8.20.a'da (12:00 – 01:30 saat pozisyonu) oluştuğunu söylemek mümkündür.

Resim 8.19 ve 8.20'de, selülozik ve bazik elektrodlarla aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde 4 ayrı saat pozisyonu bölgesini gösteren grup fotoğrafları ayrıntılı olarak incelendiğinde, tüm görüntülerde benzer mikroyapı fotoğraflarının oluştuğu görülmektedir. Grup incelemelerindeki fotoğraflar birbirine benzerlik gösterdiği için karışıklığa yol açmamak gayesiyle bundan sonraki deneylerden sadece bir pozisyonun görüntüsü alınarak deneylerin birbiriyle mukayesesi yapılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle; mikroyapı görüntüleri aşağıdan yukarı pozisyonda saat 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgesinden, yukarıdan aşağı pozisyonda ise 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgesinden alınarak elde edilmiştir. Her ne kadar farklı yönlerde gerçekleşen deneyler olmasına rağmen yukarıda verilen saat pozisyonları her iki kaynak yönü içerisinde birbirine en yakın olanlarıdır.

Grup olarak aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde incelenen Deney 1 ve 2'den alınan numunelerin mikroyapı incelemelerinden sonra, deneylerin ve parametrelerin mikroyapıya etkisini daha detaylı inceleyebilmek için, deneyler gruplandırılarak inceleme yoluna gidilmiştir. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen Deney 1, 3, 5 ve 7, yine aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleşen Deney 9, 11, 13 ve 15 uygulanılan akım şiddeti miktarlarına bağlı olarak kendi aralarında değerlendirilmiştir. Benzer şekilde yukarıdan aşağı yönde bazik elektrodla gerçekleştirilen Deney 2, 4, 6 ve 8, yine yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen Deney 10, 12, 14 ve 16 uygulanılan akım şiddeti miktarlarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirmeler ile kaynak yönü, elektrod türü ve akım şiddeti miktarı ayrıntılı olarak mukayese edilebilmiştir.

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı numuneleri saat 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinden alınmış olup, görüntüler sırasıyla Resim 8.21'de verilmektedir.



Resim 8.21. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri a) 1 numaralı deney, b) 3 numaralı deney, c) 5 numaralı deney, d) 7 numaralı deney

Resim 8.21 aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen görüntülerdir. Deneylerde kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken akım şiddeti değerleridir. Tüm deneylerde kaynaklı birleştirmeler kök pasoda 100 Amperlik sabit bir akım şiddeti değerinde selülozik elektrod ile birleştirilmiştir. Çizelge 7.7'de verilen kaynak parametrelerinden de görüleceği üzere, Deney 1; sıcak paso ve diğer pasolar sırasıyla 10 Amperlik sabit bir değerde arttırılarak 110 - 140 A, Deney 3; 120 - 150 A, Deney 5; 130 - 160 A, Deney 7 ise; 140 - 170 A akım şiddeti aralığında birleştirilmiştir.

Görüntüler detaylı incelendiğinde akım şiddeti değerinin artmasına bağlı olarak kaynak bölgesindeki ısının artması ile II numara ile belirtilen iri taneli bölgelerin genişliğinde artış görülmektedir. Görüntülerde Deney 1'de en düşük iri taneli bölge genişliği elde edilirken (Resim 8.21.a), Deney 3'teki iri taneli bölgenin genişliği (Resim 8.21.b), Deney 1'e nazaran daha geniş bir alanda oluşmuştur. Deney 5'deki iri taneli bölge genişliği (Resim 8.21.c) daha geniş olup, en geniş iri taneli bölge (Resim 8.21.d) 7 numaralı deneyden elde edilmiştir. Yukarıda görüldüğü gibi; iri taneli bölgenin genişliğinin artmasındaki belirleyici neden birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmıştır. Isı girdisinin artması ise iri taneli bölgelerin daha geniş bir alanda oluşmasına neden olmuştur.

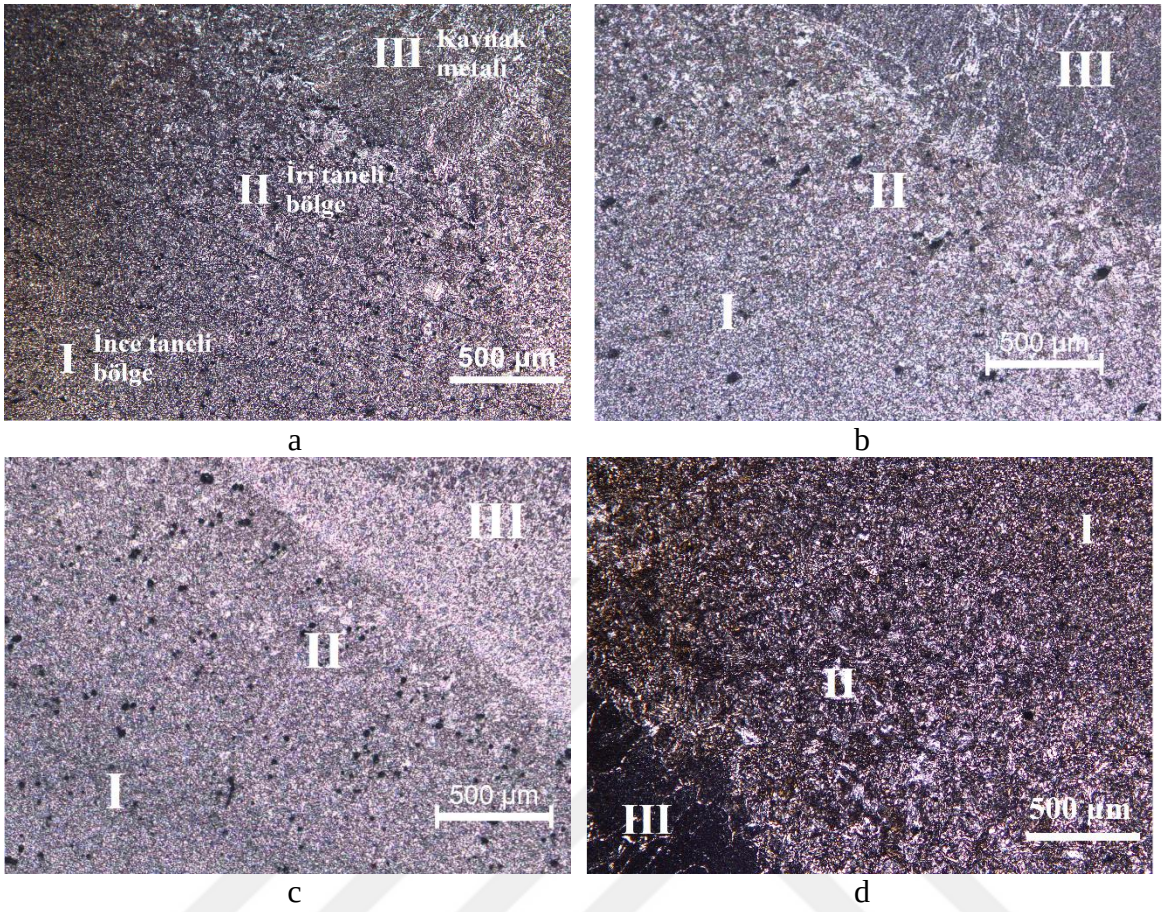
Yine iri taneli bölgelerin ITAB genişliğiyle ilişkileri göz önüne alındığında; yukarıda söylenenlerden yola çıkılarak ısı girdisinin etkisiyle en geniş ITAB'ın Deney 7'de, en dar ITAB'ın ise Deney 1'de oluştuğunu söylemek mümkündür.

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 10, Deney 12, Deney 14 ve Deney 16'dan elde edilen mikroyapı numuneleri saat 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgelerinden alınmış olup, görüntüler sırasıyla Resim 8.22'de verilmektedir.

Resim 8.22 selülozik elektrodla yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen görüntüler olup, Resim 8.22.a Deney 10'dan, Resim 8.22.b Deney 12'den, Resim 8.22.c Deney 14'ten, Resim 8.22.d ise Deney 16'dan elde edilmiş mikroyapı görüntüleridir.

Daha önceki deneylerde olduğu gibi kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken yine akım şiddeti değerleridir. Tüm deneylerdeki kaynaklı birleştirmeler kök pasoda 100 Amperlik sabit bir akım şiddeti değerinde birleştirilmiştir. Çizelge 7.7'de verilen kaynak parametrelerinden de görüleceği üzere, 10 numaralı deneyde sıcak paso ve diğer pasolar sırasıyla 10 Amperlik sabit bir değerde arttırılarak 150 - 180 A, Deney 12'de 160 - 190 A, Deney 14'te 170 - 200 A, Deney 16'da ise 180 - 210 A akım şiddeti aralığında birleştirilmiştir.

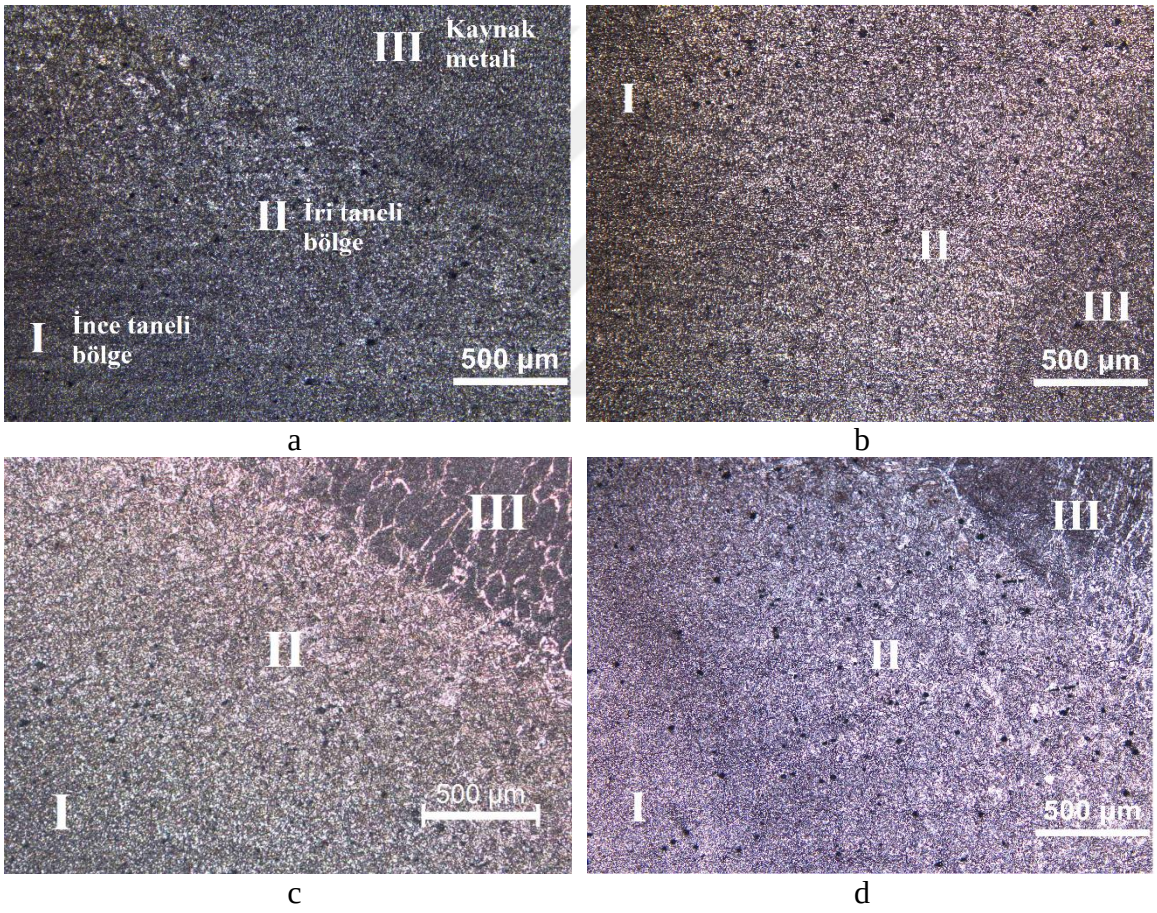


Resim 8.22. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri a)10numaralı deney, b) 12 numaralı deney, c) 14 numaralı deney, d) 16 numaralı deney

Görüntüler detaylı incelendiğinde önceki deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla doğru orantılı olarak görüntülerden elde edilen iri taneli bölgelerin genişlikleri de artmıştır. Görüntüler içerisinde en düşük iri taneli bölge genişliği Deney 10'dan elde edilirken, Deney 12'de oluşan iri taneli bölgenin genişliği, Deney 10'a göre daha geniş bir alanda oluşmaktadır. Uygulanılan akım şiddeti değerlerine uygun olarak, Deney 14'deki iri taneli bölge genişliği daha geniş bir alanda oluşurken, 16 numaralı deneyde en büyük iri taneli bölge genişliği elde edilmiştir. Daha önceki deneylerde olduğu gibi, iri taneli bölgenin genişliğini belirleyen ana unsur birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin artması ise iri taneli bölgenin daha geniş bir alanda oluşmasına neden olmuştur. Buradan yola çıkarak yine iri taneli bölge ile ITAB arasında bağlantı kurularak, en geniş ITAB 16 numaralı deneyde, en dar ITAB ise 10 numaralı deneyde oluşmuştur.

Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinden alınan ve aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri Resim 8.23'de verilmektedir. Söz konusu deneyler Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde kaynak yönü ve elektrod türü sabit, uygulanılan akım şiddeti miktarı tek değişken olan parametreler dâhilinde birleştirilmiştir. Çizelge 7.7'den de görüleceği üzere, Deney 9, 11, 13 ve 15 aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile yapılan deneyleri ifade etmektedir. Resim 8.23'te I numara ince taneli bölgeyi, II numara iri taneli bölgeyi, III numara ise kaynak metali bölgelerini ifade etmektedir.



Resim 8.23. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri a) 9 numaralı deney, b) 11 numaralı deney, c) 13 numaralı deney, d) 15 numaralı deney

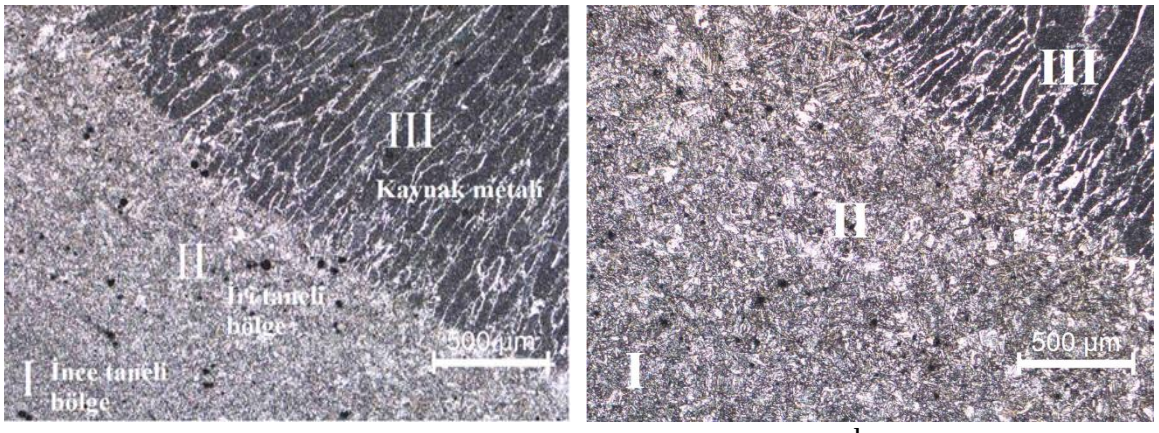
Bazik elektrod ile aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen görüntüler Resim 8.23'te verilmektedir. Selülozik elektrodla yapılan birleştirmelerde olduğu gibi, bazik elektrodla yapılan birleştirmelerde kök paso 100 A'de 3,25 mm çapındaki elektrodla, sıcak paso ve diğer pasolar sırasıyla Deney 9'da 150 - 180 A, Deney

11’de 160 - 190 A, Deney 13’te 170 - 200 A, Deney 15’te ise 180 - 210 A akım şiddeti aralığında her pasoda 10’ar A arttırılmak suretiyle uygulanarak birleştirilmiştir (Çizelge 7.7).

Yukarıdaki görüntüler incelendiğinde selülozik elektrodla yapılan deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasına bağlı olarak görüntülerden elde edilen iri taneli bölgelerin genişlikleri de artmıştır. Görüntüler içerisinde en düşük iri taneli bölge genişliği akım şiddeti değerinin en düşük olduğu Deney 9’dan elde edilirken, Deney 11’deki iri taneli bölgenin genişliği, Deney 9’a göre daha geniş bir alanda oluşmuştur. Deney 13’teki iri taneli bölgenin genişliği daha geniş oluşurken, 15 numaralı deneyde en geniş iri taneli bölge elde edilmiştir. Buradan ITAB genişlikleri hakkında yorum yapmaya çalıştığımızda ise; en geniş ITAB, akım şiddeti ve artan ısı girdisinin etkisiyle Deney 15’ten alınan görüntüde elde edilirken, en dar ITAB ise, en düşük akım şiddeti aralığı ve ısı girdisi nedeniyle Deney 9’da oluşmuştur.

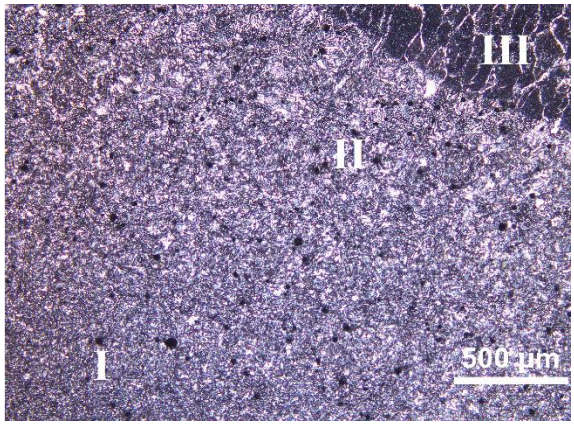
Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 2, Deney 4, Deney 6 ve Deney 8’den elde edilen mikroyapı numuneleri saat 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgelerinden alınmış ve görüntüler sırasıyla Resim 8.24’te verilmiştir.

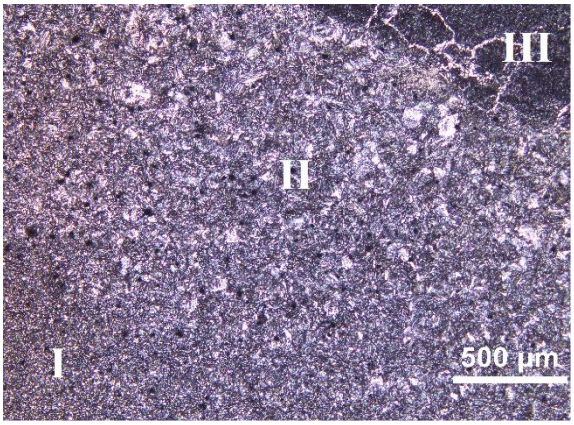


a b

Resim 8.24. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri a) 2 numaralı deney, b) 4 numaralı deney, c) 6 numaralı deney, d) 8 numaralı deney



c



d

Resim 8.24. (devam) Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı görüntüleri a) 2 numaralı deney, b) 4 numaralı deney, c) 6 numaralı deney, d) 8 numaralı deney

Resim 8.24'te a; Deney 2, b; Deney 4, c; Deney 6, d ise; Deney'8'den alınan mikroyapı görüntülerini anlatmaktadır. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerde sıcak paso ve diğer pasolar sırasıyla Deney 2'de 110 – 140 A, Deney 4'te 120 – 150 A, Deney 6'da 130 – 160 A, Deney 7'de ise 140 – 170 A akım şiddeti aralığında birleştirilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde uygulanılan akım şiddeti miktarına bağlı olarak ITAB genişliklerinin değişiklik gösterdiğini söylemek mümkündür. 110 - 140 A akım şiddeti aralığında kaynak işlemleri gerçekleşen 2 numaralı deneyde diğer görüntülere oranla daha düşük bir iri taneli bölge genişliği belirlenirken, 120 – 150 A akım şiddetinde 10'ar A daha yüksek değerlerde gerçekleşen 4 numaralı deneyde nispeten iri taneli bölge genişliği biraz daha geniş oluşmuştur. 130 – 150 A akım şiddeti aralığında uygulanılan 6 numaralı deney, doğal olarak diğer deneylerdekinden daha geniş bir iri taneli bölge genişliğini ortaya koymaktadır. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleşen deneyler içerisinde en büyük iri taneli bölge genişliği ise 140 – 160 Amper akım aralığında gerçekleşen 8 numaralı deneyde oluşmuştur. Buradan yine iri taneli bölge ile ITAB arasında bağlantı kurulduğunda; en geniş ITAB Deney 8'de oluşurken, en dar ITAB Deney 2'de oluştuğunu söylemek mümkün olmuştur.

Genel değerlendirme

Tüm görüntüler incelendiğinde, görüntülerde I numara ile belirtilen bölgeler ITAB'da ince taneli bölgeleri, II numara ile belirtilen bölgeler iri taneli bölgeleri, III numara ile belirtilen bölgeler ise kaynak metali yapılarını teşkil etmektedir. I ve III numara ile gösterilen bölgelerde ince taneli bölge ve kaynak metali tanelerinin homojen dağılımlı tane yapısında oluştuğu görülmektedir. Tüm görüntülerde, kaynak işleminde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak oluşan asiküler ferrit tanelerinin yoğunluğu nedeniyle, kaynak metali içerisinde ince taneli yapıların oluştuğu görülebilmektedir [63, 139]. ITAB'da iri taneli bölgede ise ısının etkisi ile ana metal ve kaynak metalinde oluşan yapılardan daha farklı yapıların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum tüm görüntülerdeki II numaralı bölgelerde açıkça görülmektedir. Bu bölgelerdeki iri taneli bölgede tanelerin, ana metal yönünden kaynak metali yönüne doğru dendritik olarak uzadığı görülmektedir. Dendritik yapının hâkim olduğu iri taneli bölgede yer yer iğnemsi widmanstatten yapının oluştuğu da tespit edilmiştir [140]. Yine kaynak metali içerisinde sütunsal ferrit tanelerinin yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Tanelerin ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde oluştuğu görülürken, yüksek türbülansın etkisiyle tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağıldığı görülmektedir. Kaynak metali mikroyapısı daha ince tanelerden oluşmaktadır. Literatürde ergitmeli kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilmiş birleştirmelerde kaynak metalinde beyaz iğnemsi şekle sahip fazların asiküler ferrit olduğu rapor edilmiştir [141]. Bazı araştırmacılar ise; kaynak metalinin tokluğunu ve dayanımını arttıran asiküler ferritin oluşmasına, paso sayısının artmasıyla birlikte ısı girdisinde meydana gelen artış ve yavaş soğuma hızının neden olduğunu söylemektedirler [142,143].

Tüm görüntüler genel olarak incelendiğinde; akım şiddeti miktarının artmasıyla görüntülerdeki iri taneli bölgelerin ve dolayısıyla ITAB genişliklerinin arttığı gözlenmiştir. Aynı şekilde bu durum kaynak nüfuziyeti için de söz konusudur. Akım şiddetinin arttırılmasıyla daha nüfuziyetli kaynak birleştirmeleri elde edilmiştir. Buna neden olarak, akım şiddeti miktarının artmasıyla ısı girdisinin artmasıdır. Isı girdisinin artması ve üç boyutlu ısı dağılımı ile ITAB daha geniş bir alanda oluşurken kaynak nüfuziyeti de benzer olarak artış göstermiştir.

Deney düzeneği Minitab 16 yazılım programı tarafından otomatik oluşturulduğu için üç faktörden (akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türü), ikisi sabit, biri değişken parametreler oluşturulamadığı için, Taguchi metoduyla ortaya konan deneylerden söz konusu deneylerde değişken parametrenin etkinliğini net olarak ortaya koymak mümkün olmamıştır. Bu nedenle parametreler birbiri içerisinde gruplandırılıp, mukayese edilerek en sağlıklı yorumlamalar yapılmaya çalışılmıştır.

Yukarıdaki anlatılan duruma istinaden elektrod türlerinin verimliliğini yorumlamaya çalışırsak; selülozik elektrod ile gerçekleşen birleştirmelerin hem makro hem de mikro görüntülerinde daha geniş iri taneli bölge genişlikleri dikkat çekmektedir. Bu durum selülozik elektrod ile yapılan birleştirmelerde daha yoğun ısı girdisi oluştuğunu ifade etmektedir. Aynı akım şiddeti değerlerinde yapılan birleştirmeler mukayese edildiğinde 1 ve 3 numara ile selülozik, 2 ve 4 numara ile bazik elektrod birleştirmeleri gerçekleştirilmiştir. 110 – 140 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 1 ve 2 numaralı deneylerde 1 numaralı deney olan selülozik elektrod ile uygun bir birleştirme sağlanırken, 2 numaralı bazik elektrod ile nüfuziyet yetersizliği ve birleşme eksikliği görülmüştür. Radyografi ve makroyapı görüntüleri bu sonuçları desteklemektedir (Resim 8.2 – 8.3, Resim 8.19 – 8.20). Yine aynı durum 3 ve 4 numaralı deneylerde de söz konusudur (Resim 8.4 – 8.5, Resim 8.21 – 8.24). Bazik elektrod ile söz konusu birleştirmelerde tam nüfuziyet sağlanamadığı gibi, iri taneli bölge genişliği, selülozik elektroda göre çok daha dar bir alanda oluşmuştur. Bu durum aynı akım şiddeti değerlerinde olsa da, selülozik elektrodda oluşan ısı girdisinin, bazik elektroda göre daha yoğun olduğunu ortaya koymaktadır.

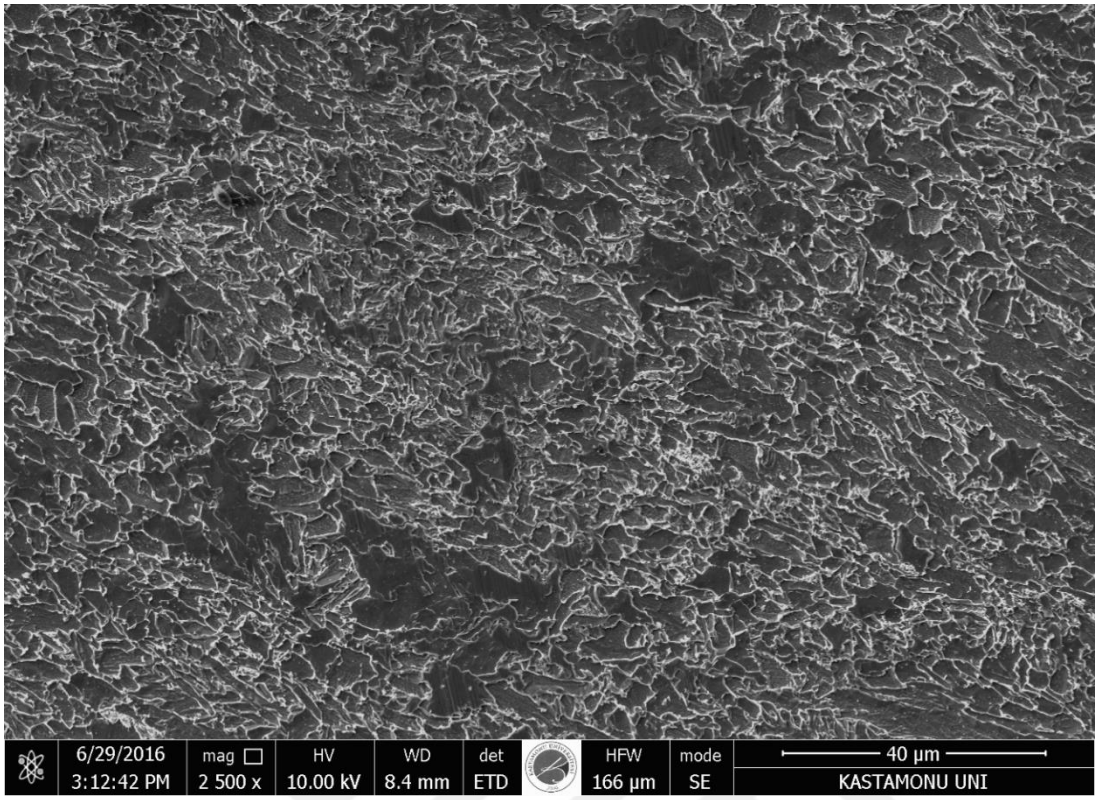
Çalışmada aynı akım değeri seçildiği için selülozik elektrod ile kaynaklarda ısı girdisinin yüksek olduğu bir gerçektir. Elektrod üretici firmaların vermiş oldukları akım aralıklarına bakıldığında; 4 mm çapındaki bazik elektrod için daha yüksek akım şiddeti değeri (130-190 A) önerilirken, aynı çaptaki selülozik elektrodda daha düşük akım şiddeti (80-150 A) önerilmektedir. Taguchi metodu ile oluşturulan parametreler arasındaki farkı kıyaslayabilmek için kaynak işlemlerinde zorunlu olarak aynı parametreler seçilmiştir. Bu nedenle selülozik elektrodda örtüdeki yanıcı maddelerin kaynak esnasında çıkarmış oldukları fazladan ısı girdisi nedeniyle iri taneli bölgeler daha geniş alanda oluşmuştur. Buradan yola çıkarak aynı parametrelerde gerçekleşen deneylerde selülozik elektrodda oluşan ITAB'ların daha geniş alanda oluştuğu söylenilebilir.

Yine aynı mantık içerisinde kaynak yönünün etkisi irdelenecek olursa; uygulanılan deneylerde aşağıdan yukarı yönde gerçekleşen deneylerde ısı girdisinin artışına bağlı olarak iri taneli bölge genişliklerinin arttığını söylemek mümkündür. Yukarıdan aşağı yönde yapılan deneylerde ise daha dar iri taneli bölge genişlikleri elde edilmiştir. Sebebi de kaynak bölgesindeki ısı girdisinin daha az olmasıdır.

8.3.2. SEM çalışmaları

SEM incelemeleri, mikroyapı incelemelerinde oluşturulan gruplandırma sistemi temel alınarak gerçekleştirilmiş olup, aşağıdan yukarı yönde selülozik ve bazik elektrod ile yapılan deneyler ile yukarıdan aşağı yönde selülozik ve bazik elektrod ile yapılan deneyler kendi içerisinde 4 grupta sınıflandırılmıştır. Boru kaynağının pozisyon etkisini ortadan kaldırmak için yine mikroyapı incelemelerinde olduğu gibi yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen deneyler saat 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgesinden, aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneyler ise saat 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgesinden alınmıştır.

Ana malzeme ve kaynak metali bölgelerinden alınan SEM görüntüleri Resim 8.25 – Resim 8.41'de verilmektedir. Resim 8.25'de ana malzemenin, Resim 8.26 – Resim 8.41'de ise kaynaklı birleştirmelerin kaynak metali bölgelerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerin tamamı 2500 büyütme olarak elde edilmiştir.

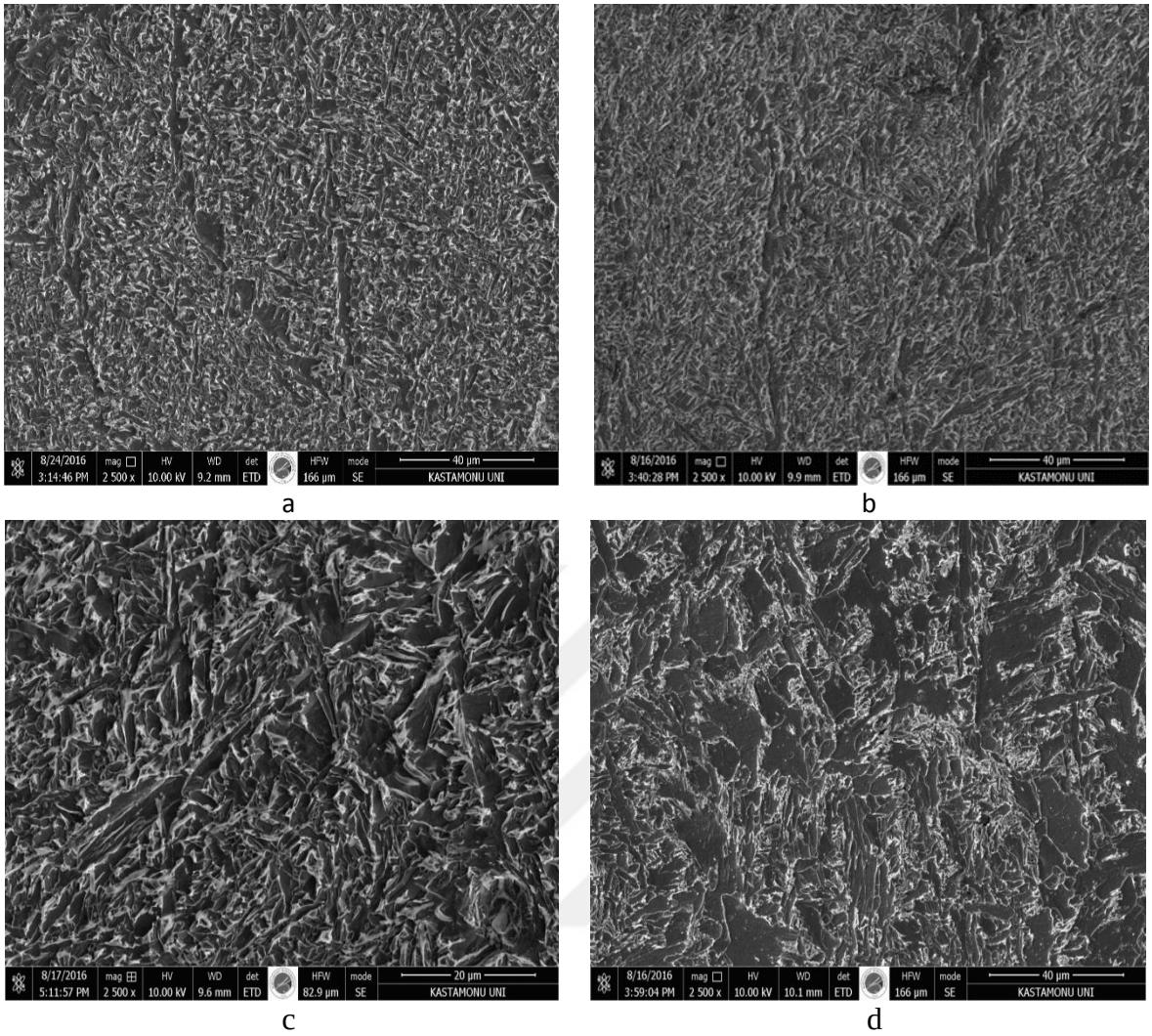


Resim 8. 25. Ana malzemeden alınan SEM görüntüsü

Ana malzemeden alınan SEM görüntüsünde genel olarak tane yapısının eş eksenli bir yapıda oluştuğu fotoğraftan görülmektedir. SEM görüntüsü (Resim 8.25.) mikroyapı incelemelerinde verilen ana malzeme mikroyapısına benzer bir özellik göstermektedir. Tanelerin şekli ve yönlenmesi mikroyapı fotoğraflarındaki gibidir.

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen 1, 3, 5 ve 7 numaralı deneylerden elde edilen SEM görüntüleri saat 10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinden alınan numunelerden elde edilmiş olup, görüntüler sırasıyla Resim 8.26'da verilmektedir. Görüntüler kaynak metali bölgelerini yansıtmaktadır.

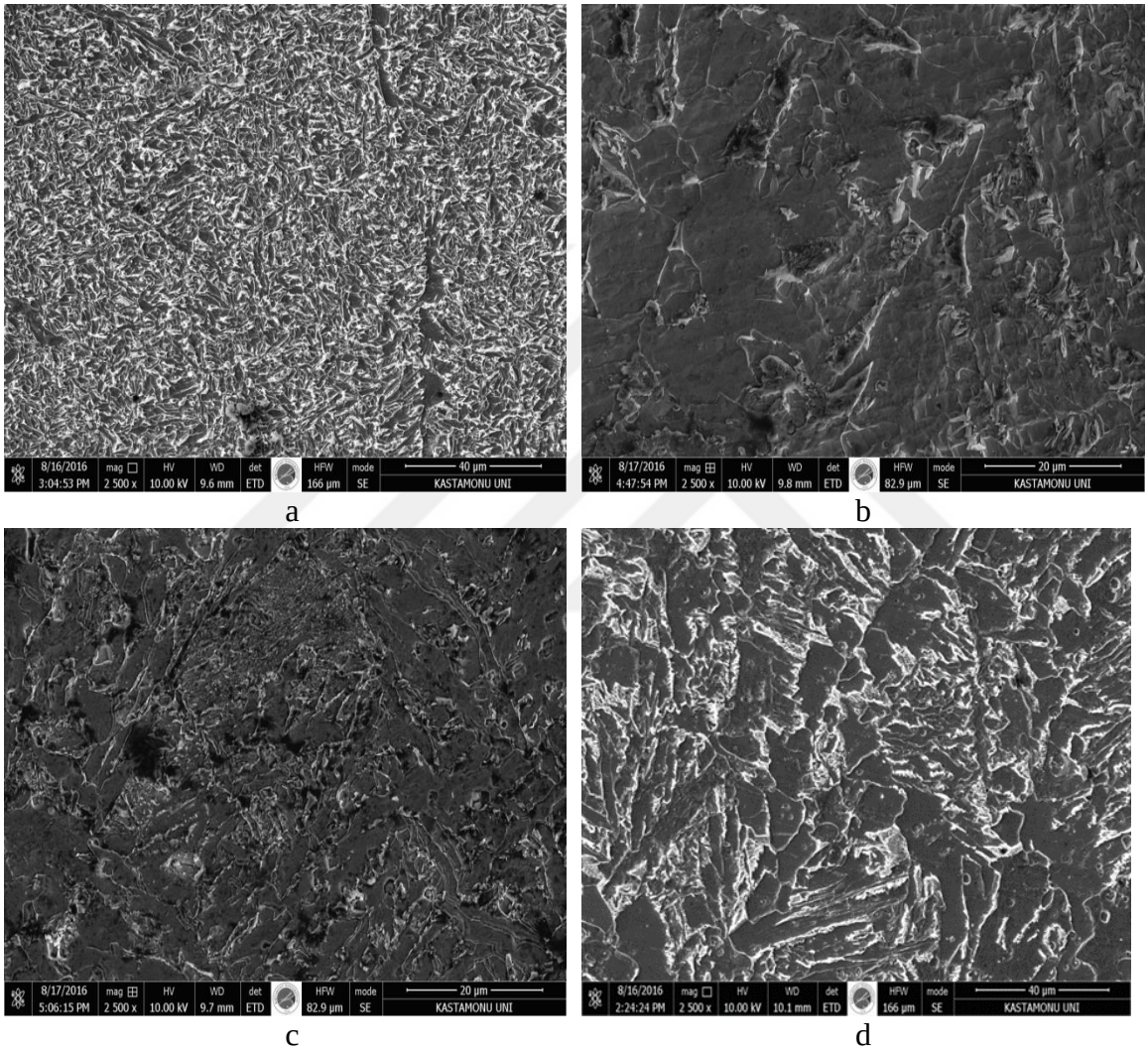


Resim 8.26. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri a) 1 numaralı deney, b) 3 numaralı deney, c) 5 numaralı deney, d) 7 numaralı deney

Yukarıdaki görüntüler, aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen 1, 3, 5 ve 7 numaralı deneylerin, kaynak metali bölgesinden alınan SEM görüntüleridir. Deneylerde kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken akım şiddeti değerleridir. Görüntüler detaylı incelendiğinde akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla kaynak metali bölgelerindeki tane yapısının değişiklik gösterdiği görülmektedir. Deney 1'de en küçük taneli yapılar elde edilirken, Deney 3'teki taneler, Deney 1'e nazaran daha iri oluşmuştur. Deney 5'deki taneler daha iri olup, en iri taneli yapılar 7 numaralı deneyden elde edilmiştir. Burada tane yapısı farklılığındaki belirleyici neden birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmıştır. Isı girdisinin artması ise, en geç soğuyan bölge olan kaynak metalinin daha da yavaş soğumasına neden olacağı için tane yapısı irileşmiştir.

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 10, Deney 12, Deney 14 ve Deney 16'dan elde edilen numuneler saat 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgelerinden alınmış olup, SEM görüntüleri sırasıyla Resim 8.27'de verilmektedir.



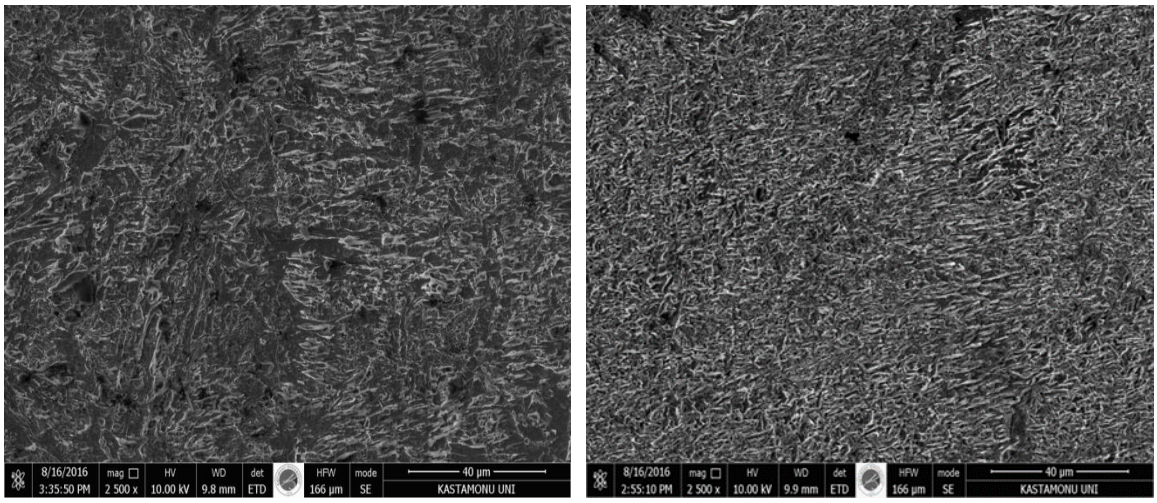
Resim 8.27. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri a) 10 numaralı deney, b) 12 numaralı deney, c) 14 numaralı deney, d) 16 numaralı deney

Resim 8.27 selülozik elektrodla yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen 10, 12, 14 ve 16 numaralı deneylerin kaynak metalinden alınan SEM görüntüleridir. Daha önceki deneylerde olduğu gibi kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken yine akım şiddeti değerleridir. Görüntüler incelendiğinde önceki deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin artmasına bağlı olarak görüntülerden elde edilen kaynak metali tanelerinin

yapısının irileştiği görülmüştür. Görüntüler içerisinde kaynak metali bölgesinde en ince taneli yapı Deney 10'dan elde edilen fotoğrafta görülürken (a), Deney 12'deki (b) tane yapısı, Deney 10'a göre daha iri taneli bir yapıda oluşmaktadır. Uygulanılan akım şiddeti değerlerine bağlı olarak, Deney 14'teki (c) tane yapısı daha iri bir yapıda oluşurken, 16 numaralı deneyde (d) en iri taneli yapı elde edilmiştir. Daha önceki deneylerde olduğu gibi, burada tane yapısını belirleyen ana unsur, birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin artmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin artması ise kaynak metalinin daha yavaş soğumasına neden olacağı için yapılar daha iri taneli oluşmuştur.

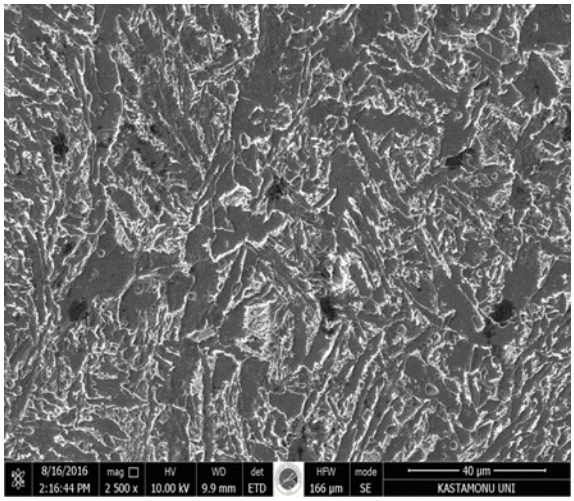
Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

10:30 – 12:00 saat pozisyonu bölgelerinden alınan ve aşağıdan yukarı doğru yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen 9, 11, 13 ve 15 numaralı deneylerden elde edilen ve kaynak metalinden alınan SEM görüntüleri Resim 8.28'de verilmektedir. Söz konusu deneyler Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde ve akım şiddeti miktarı tek değişken olarak birleştirilmiştir.

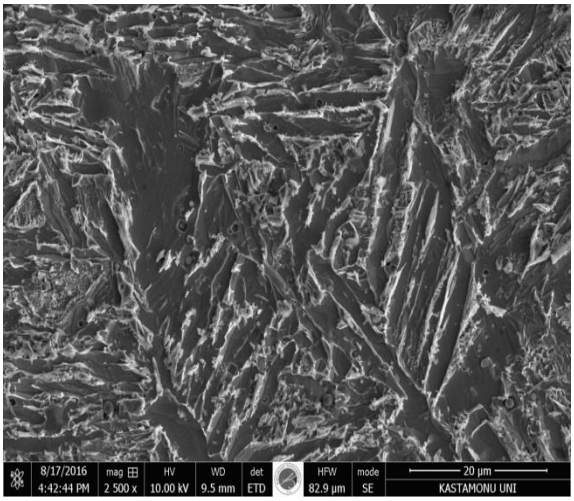


a b

Resim 8.28. Aşağıdan yukarı doğru yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri a) 9 numaralı deney, b) 11 numaralı deney, c) 13 numaralı deney, d) 15 numaralı deney



c



d

Resim 8.28. (devam) Aşağıdan yukarı doğru yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri a) 9 numaralı deney, b) 11 numaralı deney, c) 13 numaralı deney, d) 15 numaralı deney

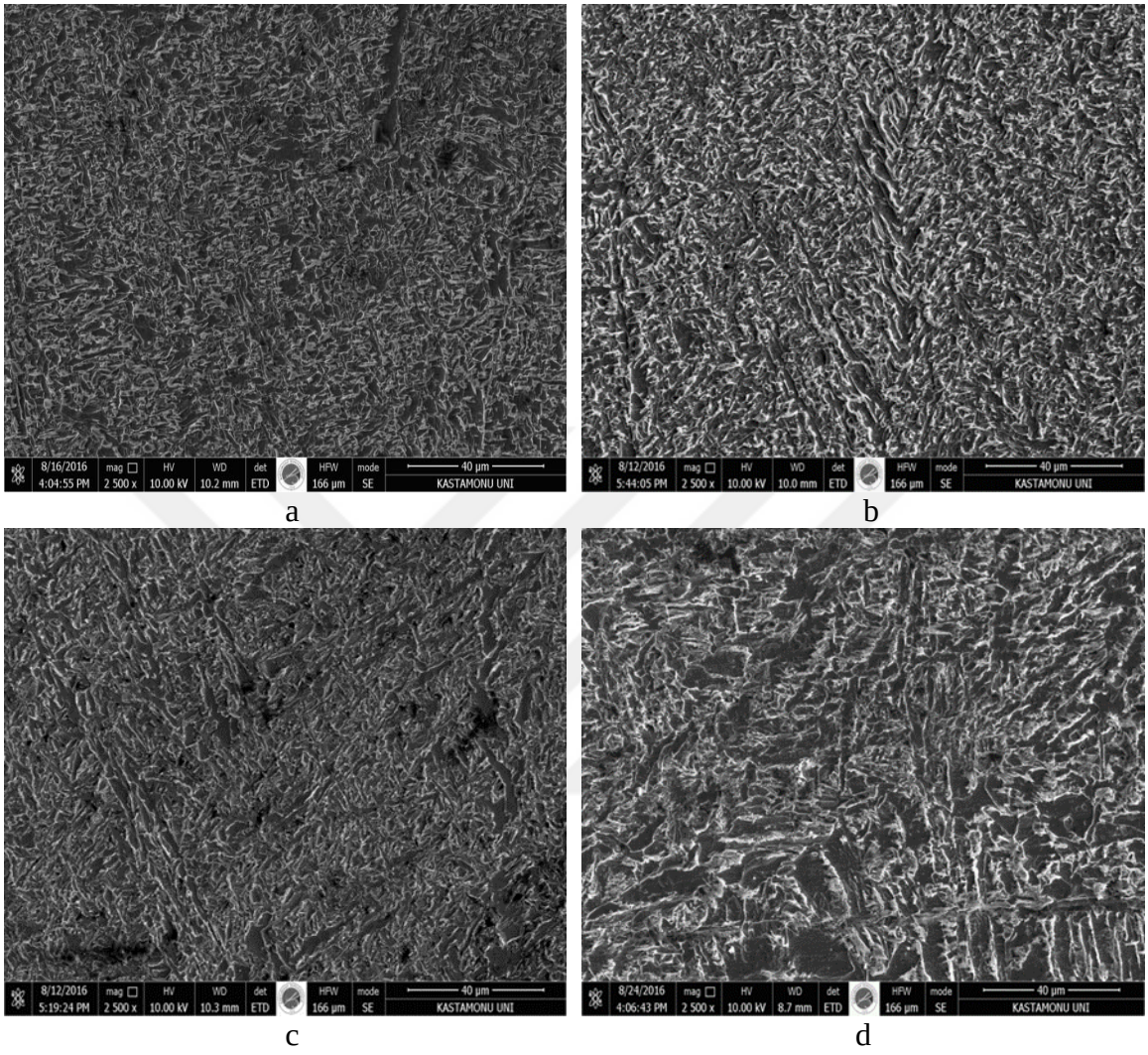
Selülozik elektrodla yapılan birleştirmelerde olduğu gibi, bazik elektrodla yapılan birleştirmelerde kök paso 100 A'de birleştirilmiş, diğer pasolar ise sırasıyla Deney 9'da 150, 160, 170 ve 180 A, Deney 11'de 160, 170, 180 ve 190 A, Deney 13'te 170, 180, 190 ve 200 A, Deney 15'te ise 180, 190, 200 ve 210 A olarak gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.7).

Görüntüler detaylı incelendiğinde selülozik elektrodla yapılan deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla orantılı olarak görüntülerden elde edilen tane yapıları irileşmiştir. Görüntüler içerisinde kaynak metali bölgelerinde en ince taneli yapı, akım şiddeti değerinin en düşük olduğu Deney 9'dan elde edilirken, Deney 11'deki tane yapısı, Deney 9'a göre daha iri taneli bir yapıda oluşmuştur. Deney 13'teki tane yapısı daha da iri halde oluşurken, 15 numaralı deneyde en iri taneli yapılar elde edilmiştir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi artmış, ısı girdisinin sebep olduğu soğuma süresinin artması ise en son katılaşma ve soğumanın olduğu kaynak metali tanelerinin daha iri yapıda oluşmasına sebep olmuştur.

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 2, Deney 4, Deney 6 ve Deney 8'den elde edilen ve saat 12:00 – 1:30 saat pozisyonu bölgelerinden alınan SEM

görüntüleri sırasıyla Resim 8.29'da verilmiştir. Görüntüler birleştirmelerin kaynak metali bölgelerinden alınmıştır.



Resim 8.29. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntüleri a) 2 numaralı deney, b) 4 numaralı deney, c) 6 numaralı deney, d) 8 numaralı deney

Yukarıdaki görüntüler incelendiğinde; diğer deneylerdeki gibi uygulanılan akım şiddetine bağlı olarak tane yapısının değişiklik gösterdiğini söylemek mümkündür. 110 - 140 A akım şiddeti aralığında sıcak paso işlemleri gerçekleşen 2 numaralı deneyde (a) diğer görüntülere oranla daha ince bir kaynak metali tane yapısı elde edilirken, 120 – 150 A akım şiddetinde 10 A daha yüksek değerlerde gerçekleşen 4 numaralı deneyde (b) nispeten daha iri taneli kaynak metali tane yapısı elde edilmiştir. 130 – 150 A aralığında akım şiddeti uygulanılan 6 numaralı deney (c), doğal olarak diğer deneylerdekinden daha iri taneli kaynak metali tane yapısını ortaya koymaktadır. Yukarıdan aşağı yönde bazik

elektrod ile gerçekleşen deneyler içerisinde en iri taneli kaynak metali tane yapısı ise 140 – 160 Amper akım aralığında gerçekleşen 8 numaralı deneyde (d) oluşmuştur.

SEM fotoğrafları genel olarak değerlendirildiğinde ısı girdisi ve soğuma süresinin etkisi ile tane yapılarında farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca, kaynak metali mikroyapıları, farklı pasoların farklı bölgelerinden alındığı için ve de sonraki pasonun bir önceki pasoyu ısıl işleme tabi tuttuğu düşünüldüğünde, ısı girdisine bağlı olarak tane irileşmesi veya küçülmesine ait bir bulguya rastlanılmadığı sonucuna varılmıştır.

8.4. Çekme Testi

Şekil 7.2'de şematik olarak gösterilen bölgelerden her bir deney için standarda (ASTM E8) uygun olarak 5'er adet numune alınmış ve numunelerin akma, çekme mukavemetleri ve % uzama değerlerine bakılmıştır. Çizelge 8.1'de ana malzemeden, Çizelge 8.2'de ise kaynaklı birleştirmelerden alınan 5 adet numunenin ortalama mukavemet ve uzama değerleri tespit edilmiş ve her bir deneyin ortalama değeri ortaya çıkmıştır. Her deney kapsamında 4 bölgeden toplam 20 numunenin değerleri hesaplanarak ortalama değer tespit edilmiştir.

Çizelge 8.1. Ana malzemeden alınan numunelerin çekme testi sonuçları

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Ana malzeme	572	661	34
	560	645	33
	57	645	32
	558	648	34
	565	651	35
Ortalama	566	650	34

Ana malzemeden elde edilen ve 5 numunenin teste tabi tutulduğu çekme testi sonuçları ortalamalarına göre, akma mukavemeti 566 MPa, maksimum çekme mukavemeti 650 MPa, yüzde uzama değeri ise %34 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 8.2. Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonuçları

Deney No	Kaynak Yönü / Elektrod Türü / Akım Şiddeti Aralığı	Saat Pozisyonu	Akma Mukavemeti (MPa)	Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Kopma Bölgesi
1	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 110 – 140 A	06.00 – 07.30	575	653	22	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	590	663	20	
		09.00 – 10.30	610	660	18	
		10.30 – 12.00	615	674	16	
		Ortalama	598	663	19	
2	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 110 – 140 A	12.00 – 01.30	501	556	9	Kaynak
		01.30 – 03.00	470	542	12	
		03.00 – 04.30	503	524	12	
		04.30 – 06.00	485	525	11	
		Ortalama	479	528	11	
3	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 120 – 150 A	06.00 – 07.30	573	672	21	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	585	678	24	
		09.00 – 10.30	588	660	21	
		10.30 – 12.00	594	665	19	
		Ortalama	585	669	21	
4	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik 120 – 150 A	12.00 – 01.30	488	550	10	Kaynak
		01.30 – 03.00	478	520	8	
		03.00 – 04.30	442	515	9	
		04.30 – 06.00	507	526	12	
		Ortalama	490	537	10	
5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 130 – 160 A	06.00 – 07.30	570	669	20	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	580	674	21	
		09.00 – 10.30	582	680	25	
		10.30 – 12.00	590	673	21	
		Ortalama	581	674	22	
6	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 130 – 160 A	12.00 – 01.30	607	672	22	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	602	655	19	
		03.00 – 04.30	600	662	17	
		04.30 – 06.00	597	665	24	
		Ortalama	602	664	21	
7	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 140 – 170 A	06.00 – 07.30	571	657	21	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	582	657	23	
		09.00 – 10.30	575	663	24	
		10.30 – 12.00	584	671	25	
		Ortalama	578	662	23	

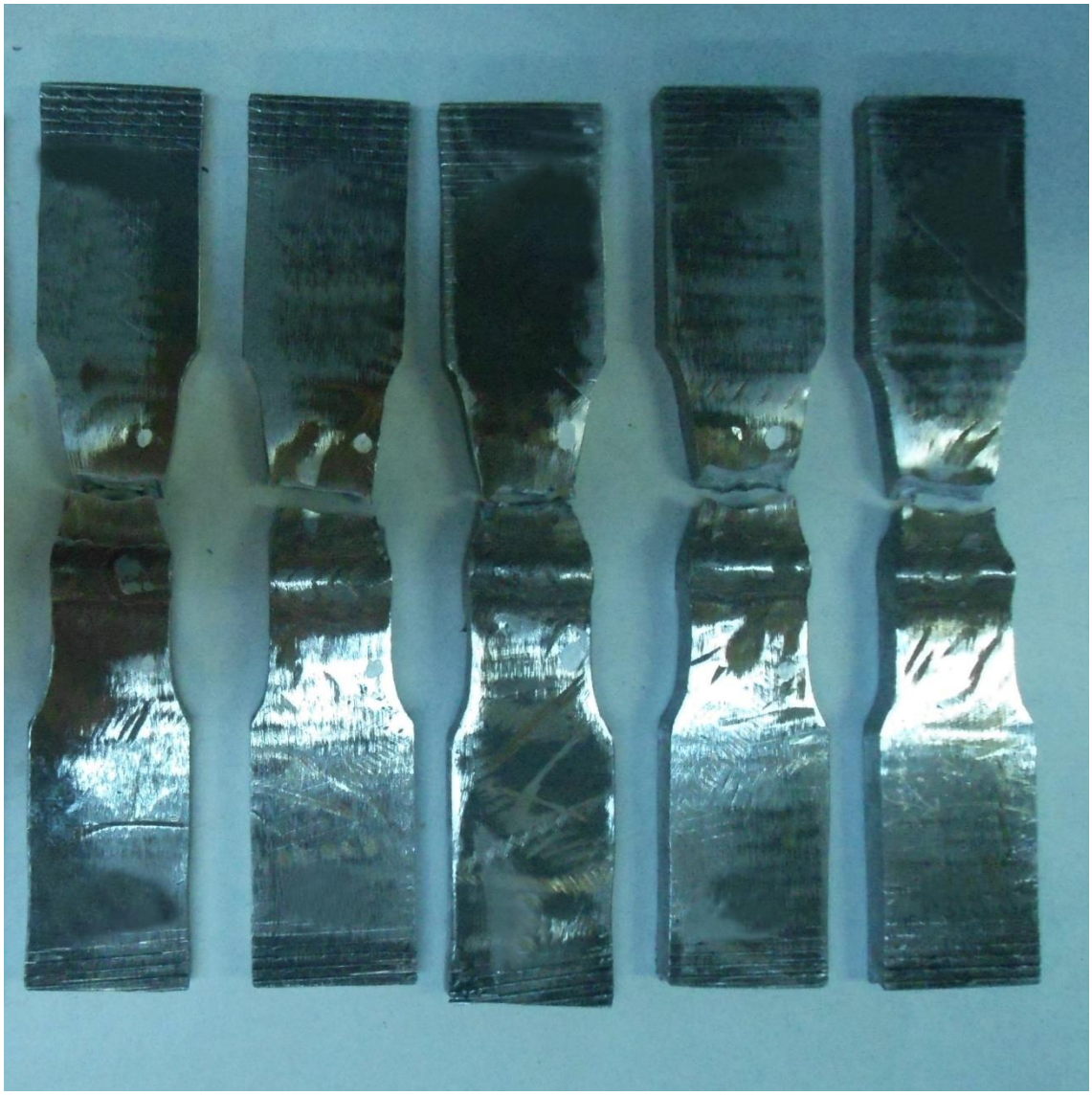
Çizelge 8.2.(devam) Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonuçları

8	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 140 – 170 A	12.00 – 01.30	602	665	23	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	595	661	27	
		03.00 – 04.30	595	652	26	
		04.30 – 06.00	589	659	22	
		Ortalama	595	659	25	
9	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 150 – 180 A	06.00 – 07.30	590	686	23	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	595	685	24	
		09.00 – 10.30	592	683	26	
		10.30 – 12.00	602	666	25	
		Ortalama	595	680	25	
10	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 150 – 180 A	12.00 – 01.30	611	657	24	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	613	667	22	
		03.00 – 04.30	608	660	21	
		04.30 – 06.00	607	653	25	
		Ortalama	610	659	23	
11	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 160 – 190 A	06.00 – 07.30	585	656	25	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	583	675	28	
		09.00 – 10.30	589	670	27	
		10.30 – 12.00	597	665	23	
		Ortalama	589	667	26	
12	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 160 – 190 A	12.00 – 01.30	610	658	23	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	607	655	26	
		03.00 – 04.30	609	654	24	
		04.30 – 06.00	600	655	22	
		Ortalama	607	656	24	
13	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 170 – 200 A	06.00 – 07.30	581	653	21	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	584	663	29	
		09.00 – 10.30	586	672	25	
		10.30 – 12.00	592	675	26	
		Ortalama	586	666	25	
14	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 170 – 200 A	12.00 – 01.30	577	649	25	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	572	653	26	
		03.00 – 04.30	568	654	28	
		04.30 – 06.00	565	663	24	
		Ortalama	571	655	26	
15	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 180 – 210 A	06.00 – 07.30	579	665	24	Ana malzeme
		07.30 – 09.00	580	660	28	
		09.00 – 10.30	582	654	26	
		10.30 – 12.00	590	669	27	
		Ortalama	583	662	26	

Çizelge 8.2.(devam) Çekme testi sonuçları

16	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 180 – 210 A	12.00 – 01.30	575	656	27	Ana malzeme
		01.30 – 03.00	570	653	27	
		03.00 – 04.30	565	653	26	
		04.30 – 06.00	559	642	26	
		Ortalama	567	651	27	

Çekme deney sonuçları incelendiğinde, 2 ve 4 numaralı deneylerde kopmaların kaynak metalinden gerçekleştiği, bu deneylerin haricindeki tüm deneylerde kopmaların tümünün ana malzemelerden olduğu tespit edilmiştir. Kopmalar ergime sınırının yaklaşık 20 mm ilerisinde ana malzemede gerçekleşmiştir. Test numuneleri, API 1104 standardında belirtilen ölçülere uygun olarak çıkarıldığı için, numune geometrisi nedeniyle çekme testi esnasında zorunlu bir yönlenme oluşmakta, bu nedenle boyun verme işlemi ITAB'ın hemen ilerisinde ana malzemede gerçekleşmektedir. 2 ve 4 numaralı deneylerde çekme testi esnasında kopmanın kaynak metalinden gerçekleşmesine; söz konusu deneylerde bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda yeterli akım şiddeti değerlerinin sağlanamamasının neden olduğu düşünülmektedir. Söz konusu deneyler kapsamında alınan radyografi raporu ve radyografi – makroyapı görüntüleri bu durumu destekler mahiyettedir (Ek-5, Resim 8.1, 8.3 ve 8.5). Söz konusu deneylerde akım şiddeti değerlerinin düşük olması nedeniyle yeterli nüfuziyet sağlanamamış, birleşme eksikliği görülmüştür. Bu yüzden; çekme testi uygulamalarında kaynak bölgesi kendisinden beklenen lokal özellikleri sergileyememiş, birleşme eksikliğinden kaynaklanan yetersiz ergime ve nüfuziyet nedeniyle kopmalar kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Diğer deneylerde ise kaynaklı birleştirmeler kendisinden beklenen görevleri yerine getirmiş ve daha mukavemetli bir özellik sergilemiştir. Bu nedenle kopmaların tümü ana malzemelerden olmuştur. Ana malzemelerden kopan bir deney grubuna ait görüntüler ise Resim 8.30'da verilmiştir.



Resim 8.30. Çekme testi sonrası numunelerin görüntüsü

Çizelge 8.2'deki çekme deney sonuçları incelendiğinde, 2 ve 4 numaralı deneyler haricindeki tüm deneylerde kopmaların ana malzemede meydana geldiği, kaynak metalinde herhangi bir kopma olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum; pratikte kaynak işleminin başarılı bir performans sergilediğini göstermekte olup, uygulanan kaynak işleminin statik yüklemelerdeki dayanımının kaynak metalinde, ana malzemeye göre daha iyi sonuçlar sergilediğini göstermektedir. Buna sebep olarak ise kaynaklı bölgede yüksek ısı girdileri ve hızlı soğumadan kaynaklanan ince taneli ve iğnemsi yapıların oluşması gösterilebilir. Oluşan ince taneli yapıların mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği daha önceki çalışmalarda da bildirilmiştir [144]. İnce taneli yapılar deformasyona karşı mukavemet gösterdiği için kopmalar kaynak metali dışında, deformasyonun nispeten daha kolay olduğu ve daha iri tane yapısına sahip olan ana malzemede meydana gelmiştir.

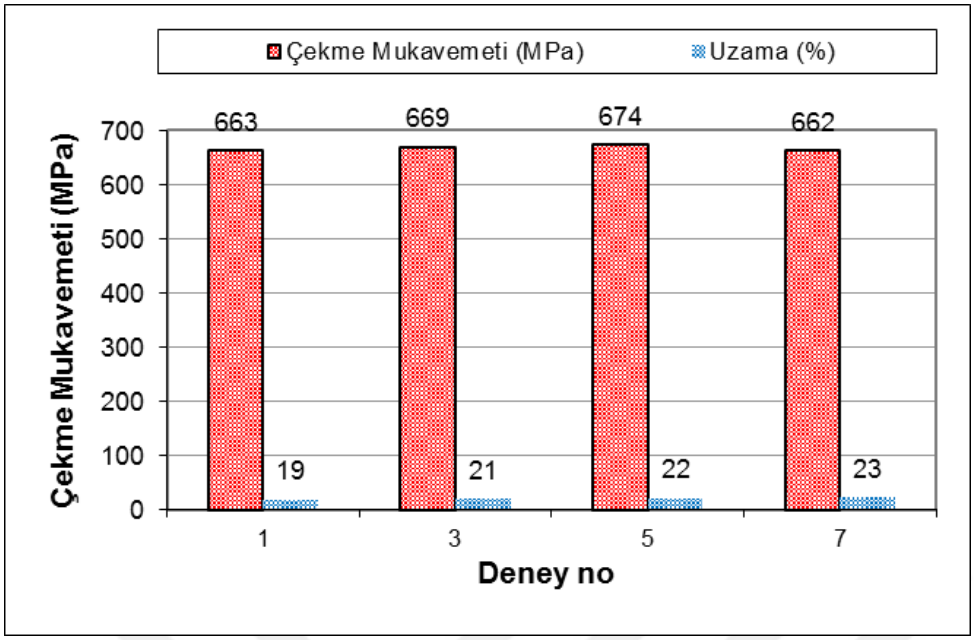
Ayrıca kaynak kepi ve kökünün standart gereği traşlanmaması, dolayısıyla kaynak metalinde kesit kalınlığın artması, kopmaların buradan olmasına mani olmuştur. Yine kaynaklı bölgenin çekme testi işlemlerinde numunelerin % uzama değerleri, ana malzemeye oranla daha düşük çıkmıştır. Buna paralel olarak kaynaklı numunenin, çekme mukavemetinin artması yine kaynaklı bölgenin deformasyona karşı gösterdiği direnç nedeniyledir [138,145].

Yine Çizelge 8.2'deki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek mukavemet değerleri, bazik elektrod ile aşağıdan yukarı yönde sırasıyla 150, 160, 170 ve 180 Amper akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 9 numaralı deneyde görülmüştür. Söz konusu deneyde 595 MPa akma mukavemeti ve 680 MPa değerinde maksimum çekme mukavemeti değeri elde edilmiştir. En düşük mukavemet değerleri ise 2 ve 4 numaralı deneylerde elde edilmiştir. En düşük mukavemet değeri 2 numaralı deneyde gerçekleşmiş olup, akım şiddetinin düşük değerlerde tercih edilmesinden dolayı nüfuziyet tam olarak sağlanamadığından kopma kaynak metalinden gerçekleşmiş ve 479 MPa akma mukavemeti, 528 MPa maksimum çekme mukavemeti ve %11 uzama değerleri elde edilmiştir. Diğer deneylerde ise akma mukavemeti değerleri 571 – 611 MPa, maksimum çekme mukavemeti değerleri 647 – 680 MPa arasında, yüzde uzama değerleri ise % 19 – 26 arasında değişmektedir.

Mikroyapı ve SEM incelemelerinde olduğu gibi çekme testleri için grup bazında yapılan değerlendirmeler ise aşağıdaki gibidir.

<u>Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler</u>

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen 1, 3, 5 ve 7 numaralı deneylerden elde edilen çekme testi sonuçları birbiri içerisinde daha kapsamlı mukayese edilebilmesi için Şekil 8.2'deki çekme testi sonuç grafiğinde verilmiştir.



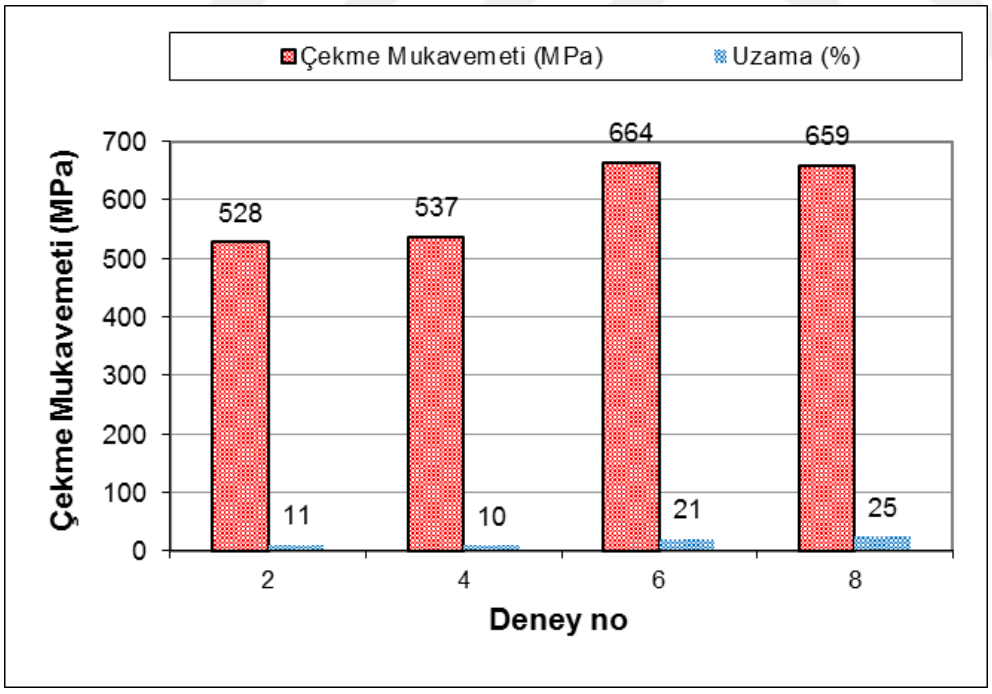
Şekil 8.2. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuç grafikleri

Şekil 8.2'deki grafik incelendiğinde; akma-maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri birbirine yakın değerler olup, bu değerlerdeki farklılığın mikroyapı ve SEM görüntülerinde de bahsedildiği gibi uygulanılan akım şiddeti ve ısı girdisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı yönde ve aynı elektrod türü ile gerçekleştirilen deneylerde tek değişken kullanılan akım şiddetidir. Akım şiddetinin artmasıyla, birleştirmelere uygulanan ısı girdisi artmakta, bu da birleştirmelerin ITAB genişliği ve tane yapısını etkilediği gibi mukavemet değerlerini de etkilemektedir. 110 - 140 A akım şiddeti aralığında gerçekleştirilen 1 numaralı deneyde 663 MPa çekme mukavemeti ve % 19 uzama değeri görülürken, 140 - 170 A akım şiddeti aralığında gerçekleştirilen 7 numaralı deneyde 662 MPa çekme mukavemeti ve % 23 uzama değerleri elde edilmiştir. Artan akım şiddeti değerlerine bağlı olarak ısı girdisi artarken, mikroyapı ve SEM görüntülerinde bu durum net olarak görülmüştür. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin mikroyapı görüntülerinde en geniş iri taneli bölge ve ITAB 7 numaralı deneyde elde edilirken, SEM görüntülerinde en iri taneli kaynak metali makroyapısının da 7 numaralı deney olduğu görülmüştür. Çekme testi sonuçları irdelendiğinde ise uygulanılan akım şiddeti ve ısı girdisi etkisiyle tane yapısı ve ITAB genişliklerinin artmasına bağlı olarak, mukavemet değerleri düşmüş, yüzde uzama değerleri ise artış göstermiştir. Bir sonraki inceleme aşaması olan sertlik testleri sonuçlarında ise; akım şiddetinin arttırılması neticesinde oluşan ısı girdisi ve soğuma

süresindeki artışın, mukavemet değerlerinde olduğu gibi sertlik değerlerinde de düşüşe neden olduğu açıklanmıştır. Sertlik testlerinde ısı girdisi ve soğuma süresinin daha çok olduğu 7 numaralı deneyde en düşük sertlik değerleri elde edilirken, en yüksek değerler, daha az ısı girdisi ve dolayısıyla kısa soğuma süresi olan 1 numaralı deneyde elde edilmiştir. Elde edilen tüm test sonuçları birbirini destekler mahiyette olup, bütünlük arz etmektedir.

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 10, Deney 12, Deney 14 ve Deney 16'dan alınan numunelerden elde edilen çekme testi sonuçları sırasıyla Şekil 8.3'teki grafikte verilmektedir. Şekil 8.3'te verilen grafik; selülozik elektrodla yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen 10, 12, 14 ve 16 numaralı deneylerden elde edilen çekme testi sonuçlarını anlatmaktadır. Daha önceki deneylerde olduğu gibi kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken yine akım şiddeti değerleridir.



Şekil 8.3. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuç grafikleri

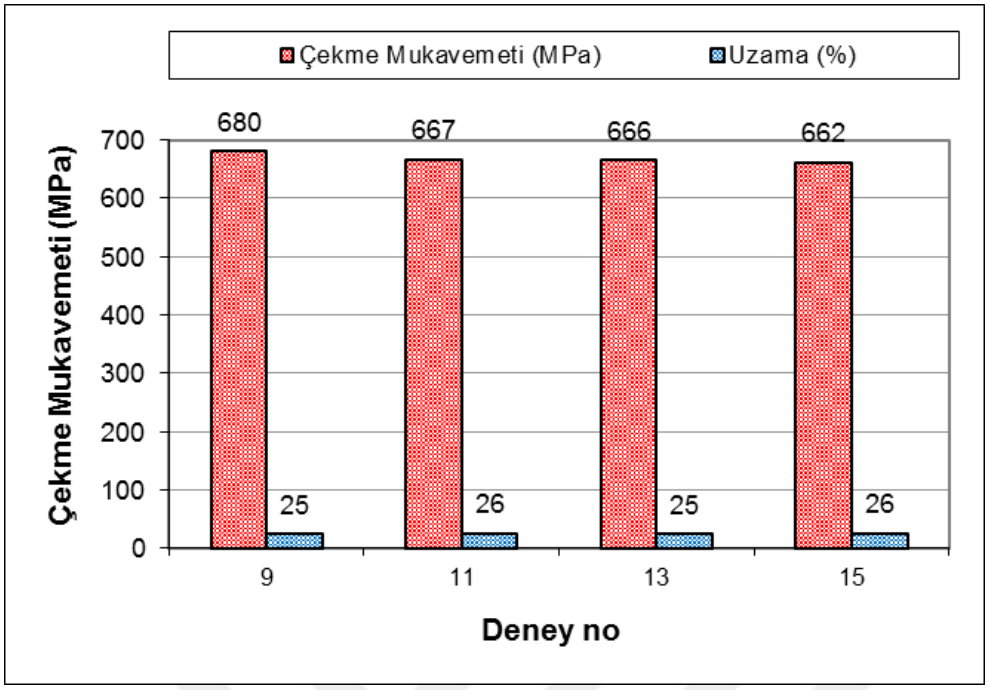
Sonuçlar detaylı incelendiğinde önceki deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla sonuçlardan elde edilen mukavemet değerlerinde düşüş gözlenirken yüzde

uzama değerlerinde bir miktar artış gözlemlenmektedir. Sonuçlar içerisinde en yüksek mukavemet değeri Deney 10'da (659 MPa) elde edilirken, 16 numaralı deneyde en düşük çekme mukavemeti değeri (651 MPa) tespit edilmiştir. Uzama değerleri ise bu durumun tam tersine 10 numaralı deneyde % 23 ile en düşük değerde görülürken, 16 numaralı deneyde % 27 ile en yüksek değerde oluşmuştur. Daha önceki deneylerde olduğu gibi, burada mukavemet ve yüzde uzama değerlerini belirleyen ana unsur birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin artmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin artması ise kaynak metali ve ITAB'ın daha yavaş soğumasına neden olacağı için burada yapılar daha iri taneli oluşmuştur. Kaynak metali bölgesinden alınan SEM görüntüleri bu durumu doğrular mahiyettedir. İri taneli yapılar ise daha düşük mukavemet davranışı sergilerken, yüzde uzama değerlerinde artışa sebep olmuştur. Bir sonraki aşama olan sertlik testi sonuçları da bu durumu doğrular mahiyettedir. Akım şiddeti miktarının yüksek olduğu 16 numaralı deneyde ısı girdisi ve soğuma süresi nedeniyle en düşük sertlik sonuçları elde edilirken, akım şiddeti miktarının en düşük olduğu 10 numaralı deneyde nispeten daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum yine deneylerin birbirleriyle ilişkilerini doğru açıklayan ve deneyler arasında bütünlük arz eden bir durumdur.

Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Aşağıdan yukarı doğru yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen 9, 11, 13 ve 15 numaralı deneylerden elde edilen çekme testi sonuçlarına ait grafik görüntüsü Şekil 8.4'te sırasıyla verilmektedir. Söz konusu deneyler Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde ve akım şiddeti miktarı tek değişken olarak birleştirilmiştir.

Selülozik elektrodla yapılan birleştirmelerde olduğu gibi, bazik elektrodla yapılan birleştirmelerde kök paso 100 A'de birleştirilmiş, diğer pasolar ise sırasıyla Deney 9'da 150 - 180 A, Deney 11'de 160 - 190 A, Deney 13'te 170 - 200 A, Deney 15'te ise 180 - 210 A akım şiddeti aralığında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.7).

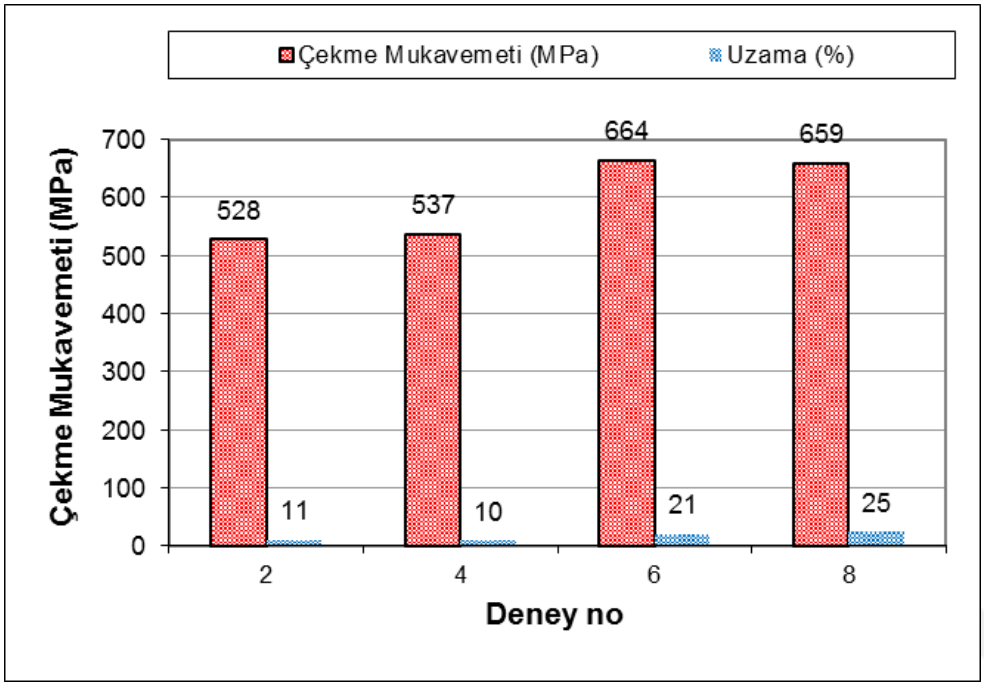


Şekil 8.4. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuçları

Şekil 8.4'te verilen aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuçları incelendiğinde; selülozik elektrodla yapılan daha önceki deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla ters orantılı olarak mukavemet değerleri azalmıştır. Sonuçlar içerisinde en yüksek çekme mukavemeti değerleri Deney 9'da görülürken (680 MPa), uzama değeri %25 olarak tespit edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti değeri ise en yüksek akım şiddeti değeri (180 – 210A) uygulanan 15 numaralı deneyde görülürken (662 MPa), uzama değeri %26 olarak tespit edilmiştir. Mukavemet ve % uzama değerlerini belirleyen ana unsur, yine birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi artmış, ısı girdisinin artması ile taneler daha iri taneli ve ITAB daha geniş alanda oluşmuştur. Yine mikroyapı ve SEM incelemelerinde söz konusu deneylerden elde edilen görüntüler bu durumu destekler niteliktedir. Tane yapısı irileşen malzemelerde ise mukavemet değerlerinde düşüş görülürken, yüzde uzama değerlerinde artış kaçınılmazdır. Sertlik testi sonuçlarına bakıldığında ise; yine bu durumu destekler sonuçlar elde edilmiştir. Isı girdisinin yoğun olduğu ve soğuma süresinin daha uzun olduğu dolayısıyla daha iri taneli yapıların oluştuğu 15 numaralı deneyde; çekme testlerinde olduğu gibi en düşük sertlik sonucu görülürken, akım şiddeti etkisiyle ısı girdisinin en düşük, soğuma süresinin ise daha az olduğu 9 numaralı deneyde daha yüksek sertlik sonuçları elde edilmiştir.

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 2, 4, 6 ve 8'den elde edilen çekme testi sonuçları sırasıyla aşağıda Şekil 8.5'teki grafikte verilmiştir.



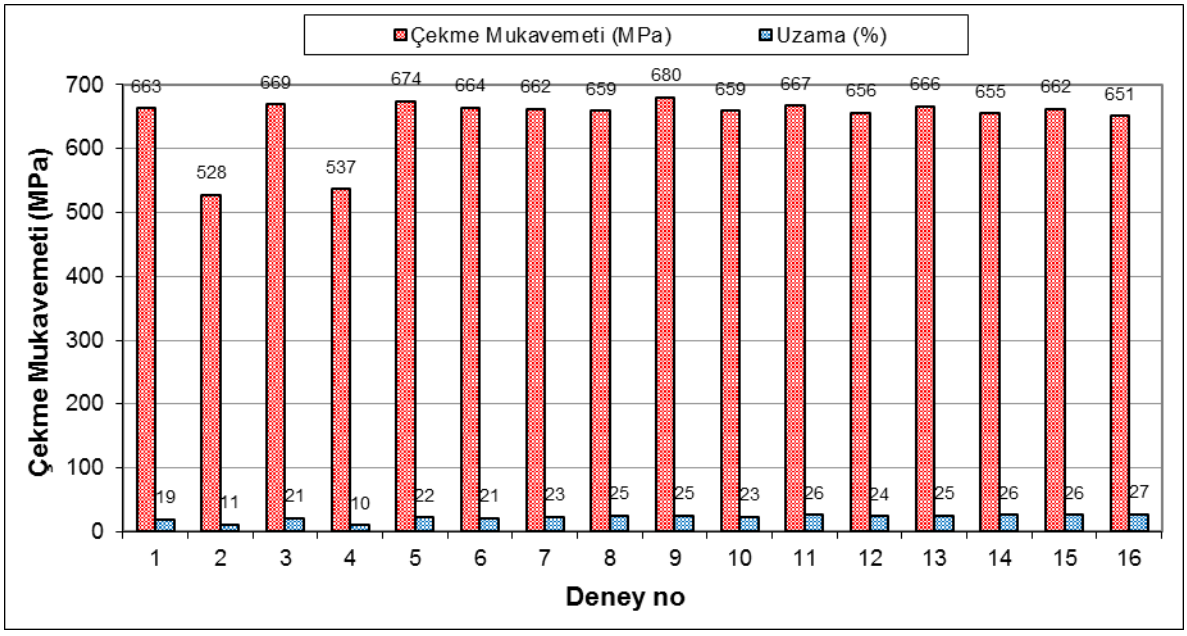
Şekil 8.5. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çekme testi sonuçları

2 ve 4 numaralı deneylerde yeterli birleşmenin sağlanmadığı radyografi ve makroyapı görüntülerinde de görülmektedir (Resim 8.1, 8.3 ve 8.5). Yeterli nüfuziyet ve birleşmenin sağlanamaması nedeniyle söz konusu deneylerde birleşme eksikliği görülmüş, bu durum yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere çekme testi sonuçlarına da yansımıştır (Şekil 8.5). Radyografik muayene ve makroyapı incelemelerinde de görüldüğü üzere, 2 ve 4 numaralı deneylerdeki yetersiz ergime, birleşme eksikliği, nüfuziyet noksanlığı gibi bir kaynak hatası nedeniyle çekme testi sonuçları tüm deneyler içerisinde en düşük değerleri sergilemiştir. Söz konusu deneyleri dışarda tutup 6 ve 8 numaralı deneyleri incelediğimizde ise, uygulanılan akım şiddeti miktarına bağlı olarak mukavemet ve yüzde uzama değerlerinin değişiklik gösterdiğini söylemek mümkündür. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile daha düşük akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 6 numaralı deneyde daha yüksek çekme mukavemeti değeri (664 MPa) ölçülürken, uzama değeri % 21 olarak tespit edilmiştir. Daha yüksek akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 8 numaralı deneyde ise çekme mukavemet değerinde düşüş gözlenirken, yüzde uzama değeri bu durumun tersi

olarak % 25 olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde; diğer deneylerdeki gibi uygulanılan akım şiddetine bağlı olarak mukavemet ve uzama değerlerinin değişiklik gösterdiğini söylemek mümkündür. Bir sonraki aşamada uygulanan sertlik testi sonuçları da mukavemet sonuçlarını destekler mahiyettedir. Isı girdisinin yoğun olduğu 8 numaralı deneyde düşük sertlik değerleri ölçülürken, en düşük ısı girdisinin olduğu 2 numaralı deneyde yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Yine bu durum tüm deneylerin birbiriyle ilişkisini doğruladığı gibi sonuçların bütünlüğünü ortaya koymaktadır. Tüm sonuçları ortaya koyduğumuzda; akım şiddeti miktarlarının artması ile ısı girdisi miktarı artmış, bu da mikroyapı ve SEM görüntülerinden de görüleceği üzere daha geniş ITAB'ların ve iri taneli yapıların oluşmasına sebep olmuştur. İri taneli yapılarda mukavemet ve sertlik değerlerinin ince taneli yapılara oranla daha düşük, yüzde uzama değerlerinin ise daha yüksek olduğu bilinmektedir [51].

Genel değerlendirme

Çizelge 8.2'de ayrıntılı sonuçları verilen çekme testlerinin, maksimum çekme mukavemeti ve uzama değerlerini gösteren grafik görüntüsü Şekil 8.6'da verilmektedir. Grafik irdelendiğinde; Deney 2 ve 4 haricindeki tüm deneylerde birleştirmelerin çekme mukavemetlerinde ana malzeme değerlerinin üzerinde sonuçlar görülmüştür.



Şekil 8.6. Çekme testi sonuçlarının genel grafik görüntüsü

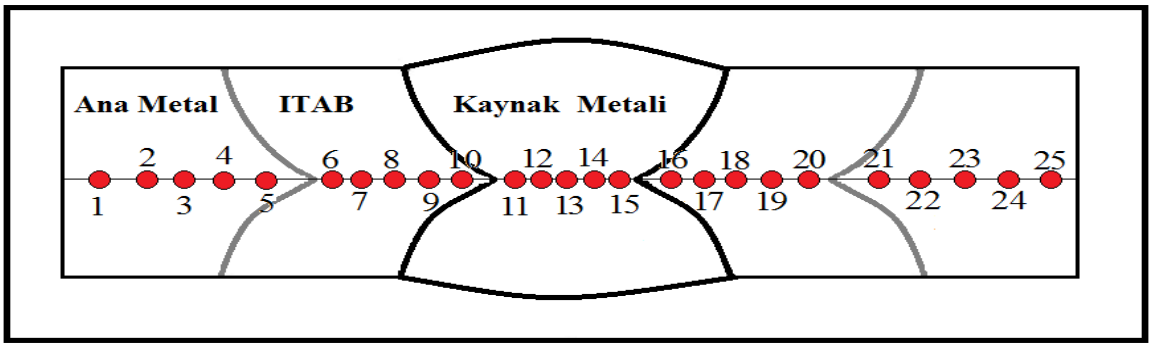
Çizelge 8.1'de görüldüğü üzere; ana malzemenin maksimum çekme mukavemeti 650 MPa, yüzde uzama değeri ise %34 olarak tespit edilmiştir. Deney 2 ve 4 için yapılan radyografik muayene ve makroyapı incelemesinde de ifade edildiği gibi birleşme eksikliği, yetersiz ergime, nüfuziyet noksanlığı hatası görülmüş, bu hata nedeniyle de birleştirmelerin akma ve çekme değerleri diğer deneylerden çok daha düşük çıkmıştır. Deney 2 için yapılan testlerde 528 MPa maksimum çekme mukavemeti, % 11 uzama değeri, Deney 4 için yapılan testlerde ise; 537 MPa çekme mukavemeti ve % 10 uzama değeri tespit edilmiştir. Her iki deneyde kaynak kendinden beklenen görevleri yerine getirememiş, bu nedenle kopmalar kaynak metalinden olmuştur. Söz konusu deneylerin haricindeki birleştirmeler ise; ITAB'ın hemen ilerisinde ana malzemeden kopmuştur. Kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesi plastik deformasyona karşı direnci arttırdığı için kopmalar plastik deformasyonun daha kolay olduğu ana malzemeden gerçekleşmiştir. Bir sonraki inceleme aşaması olan sertlik testlerinde kaynak bölgesinde (kaynak metali ve ITAB) en yüksek sertlik ölçümlerinin, ana malzemede ise en düşük ölçümlerin yapıldığı belirtilmekte olup, bu durum kaynak bölgesinde plastik deformasyona karşı direncin daha yüksek, ana malzemede ise daha düşük olduğu manasına gelmektedir. Bu kapsamda kopmaların ana malzemeden gerçekleşmesi hususu; testlerin bütünlüğü ve birbiriyle olan ilişkisini destekler mahiyettedir.

Şekil 8.6'da verilen grafik incelendiğinde ise; deneyler içerisinde en yüksek mukavemet değeri 9 numaralı deneyde elde edilmiştir. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile 150 – 180 A akım şiddeti aralığında gerçekleşen Deney 9'da 680 MPa çekme mukavemeti ile en yüksek mukavemet değeri görülmüştür. 2 ve 4 numaralı deneyleri bir kenarda tutup diğer deneyleri değerlendirdiğimizde; en düşük mukavemet değerleri 16 numaralı deneyde görülmüştür. Selülozik elektrod ile yukarıdan aşağı yönde 180 – 210 A akım şiddeti aralığında gerçekleştirilen 16 numaralı deneyde 651 MPa maksimum çekme mukavemeti görülmüştür. Bu değer ana malzeme mukavemet değerine hemen hemen eşit derecededir. Çekme testlerinde kaynaklı birleştirmelerin deformasyonu engellediği bilinmektedir. Bu yüzden; uygun bir şekilde gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin mukavemet değerlerinin ana malzemenin mukavemet değerlerinin üzerinde sonuçlar göstermesi beklenmektedir. Grup değerlendirmelerine bakıldığında ise en yüksek mukavemet değerleri bazik elektrod ile aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen Deney 9, 11, 13 ve 15'te görülmektedir. En düşük mukavemet değerleri ise aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen 1, 3, 5 ve 7 numaralı deneylerden elde edilmiştir.

Genel olarak bazik elektrod ile birleştirilen numunelerin mukavemet değerleri daha yüksek sonuçlar göstermiştir. Bu duruma bazik elektrodun sahip olduğu kimyasal kompozisyonun da etkisi vardır. Deneylerde kullanılan E55 5 MnMo B H5 kodlu Tempo B70Mo bazik elektrodun kimyasal analizi incelendiğinde (Çizelge 7.5); kompozisyon içerisindeki Mn ve Mo oranı mukavemet değerlerinin artışına sebep olmuştur. İçerik olarak % 1,60 Mn ve % 0,45 Mo içeren bazik elektrod ile gerçekleştirilen birleştirmeler daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olmuştur. Malzemelerdeki Mn oranının artmasıyla malzemenin mukavemet ve sertlik özelliklerinin arttığı görülmektedir. Ünlü ve ark. [146], Deniz [147] ve Kara'nın [148] yaptığı çalışmalarda C, Cu ve Mn gibi alaşım elemanlarının malzemenin mukavemet değerlerini ve sertliğini arttırdığını, kırılma tokluk değerlerinin ise sertlik ve mukavemet değerlerine bağlı olarak azaldığını belirtmektedirler. Yine yapı içerisindeki molibdenin tane inceltici özelliğe sahip olması nedeniyle mukavemet değerlerinde artışa sebep olduğu yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [147,149]. Bu nedenle içerdiği Mn ve Mo oranlarının yüksek olması nedeniyle bazik elektrod ile yapılan deneylerde daha yüksek mukavemet değerleri ölçülmüştür.

8.5. Sertlik Testi

Sertlik testleri TS EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak, Şekil 8.7'de şematik olarak görüldüğü gibi ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden enine ölçümler alınarak yapılmıştır. Kaynak metalinin her iki yönü olacak şekilde, sağa ve sola doğru gerçekleştirilen ölçümlerde her bir bölgeden 5 sertlik alınarak değerler elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme metodu ile boru imalatçılarının tercih ettiği 10 kg'lık yük altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.7. Sertlik ölçüm bölgelerinin şematik gösterimi

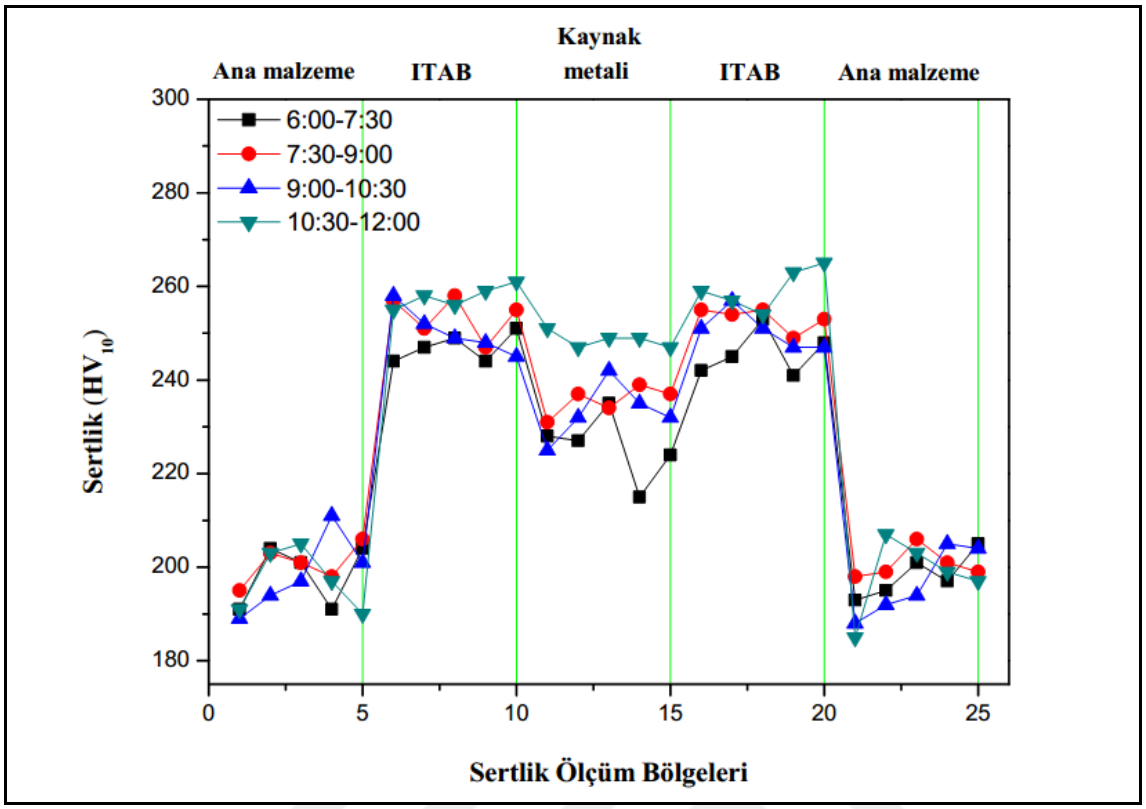
Boru kaynağında, pozisyon etkileri belirleyici bir rol oynadığı için; sertlik grafiklerinde her bir deney için 4 farklı saat pozisyonu bölgesinden sertlik ölçümleri alınmış ve sonuçlar grafiklerde verilmiştir. Aşağıdan yukarı deneylerde saat 6:00 – 7:30, 7:30 – 9:00, 9:00 – 10:30 ve 10:30 – 12:00 saat pozisyonlarından, yukarıdan aşağı deneylerde ise saat 12:00 – 01:30, 01:30 – 03:00, 03:00 – 04:30 ve 04:30 – 06:00 saat pozisyonlarından alınan metalografi numunelerinden ayrı ayrı ölçümler alınarak sonuç grafikleri oluşturulmuştur.

Şekil 8.7'de şematik olarak verilen ölçüm bölgeleri üzerinden gerçekleşen sertlik testi sonuçları, daha önceki incelemelerde olduğu gibi kaynak yönü ve elektrod türü sabit tutularak yapılan gruplandırmalar ile yorumlanmaya çalışılmıştır. Aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönde, selülozik ve bazik elektrod ile akım şiddeti değerinin tek değişken olarak gruplandığı incelemelerin sertlik yorumları aşağıdaki gibidir.

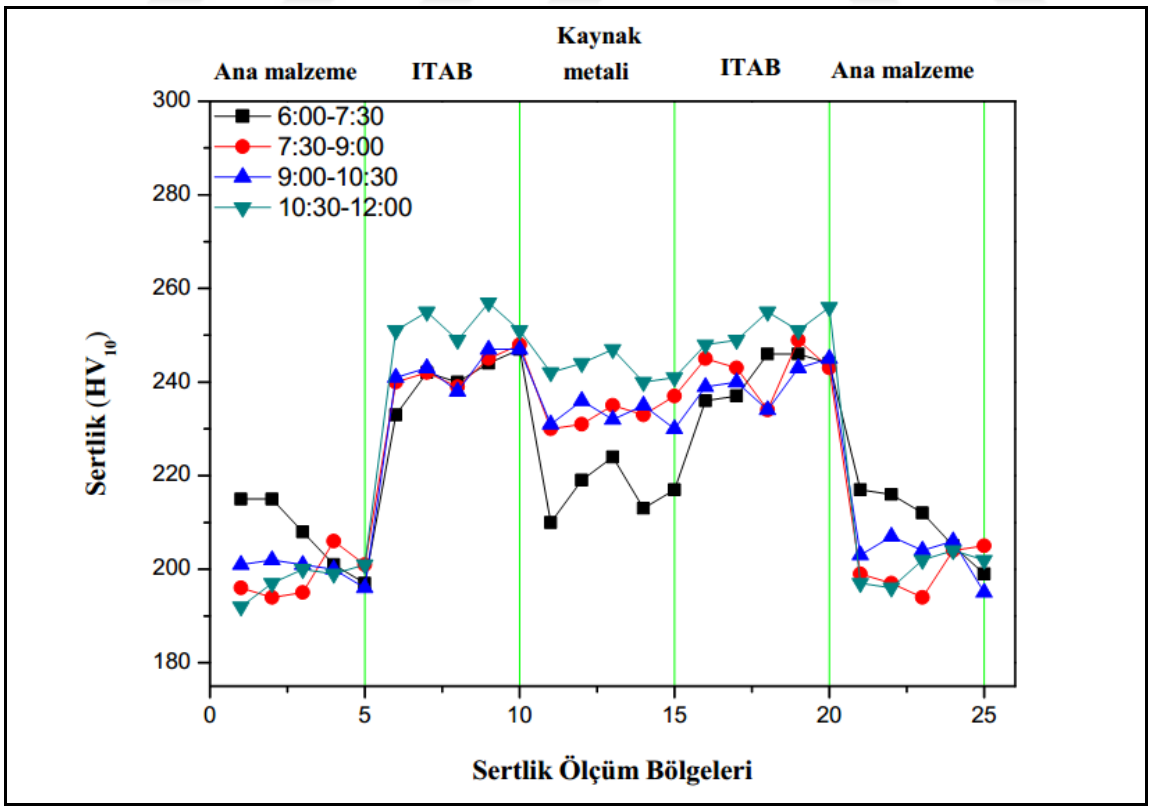
Parametrelerin, kaynaklı birleştirme sertlik davranışları üzerine etkilerini daha detaylı inceleyebilmek için, deneyler daha önceki incelemelerdeki (mikroyapı, SEM ve çekme testi) gibi gruplandırılmıştır. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen Deney 1, 3, 5 ve 7, yine aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleşen Deney 9, 11, 13 ve 15 uygulanılan akım şiddeti miktarlarına bağlı olarak kendi aralarında değerlendirilmiştir. Benzer şekilde yukarıdan aşağı yönde bazik elektrodla gerçekleştirilen Deney 2, 4, 6 ve 8, yine yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleşen Deney 10, 12, 14 ve 16 uygulanılan akım şiddeti miktarlarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirmeler ile kaynak yönü, elektrod türü ve akım şiddeti miktarının birleştirmelerin sertlik davranışları üzerine etkileri ayrıntılı olarak mukayese edilebilmiştir.

<u>Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler</u>

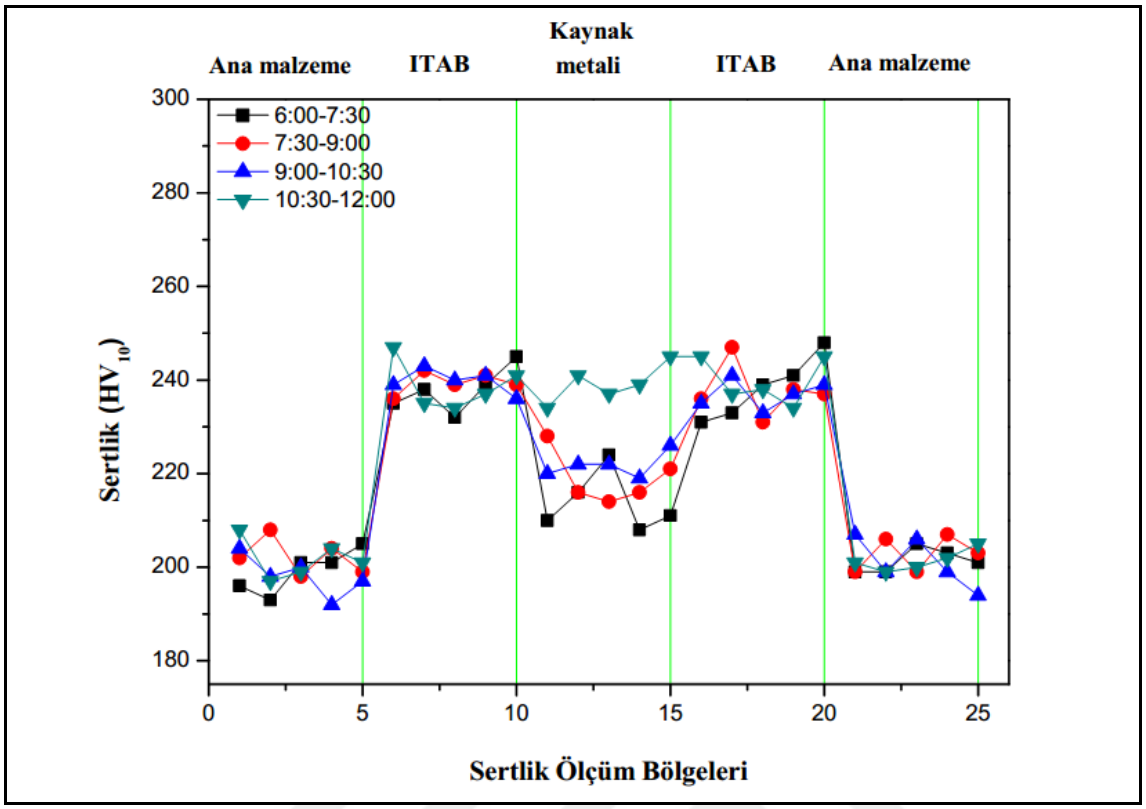
Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mikroyapı numuneleri Şekil 8.7'de şematik olarak verilen ölçüm bölgelerinden sertlik testine tabi tutulmuştur. Selülozik elektrod ile aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen Deney 1, 3, 5 ve 7'den elde edilen sertlik grafikleri Şekil 8.8 - 8.11'de verilmiştir.



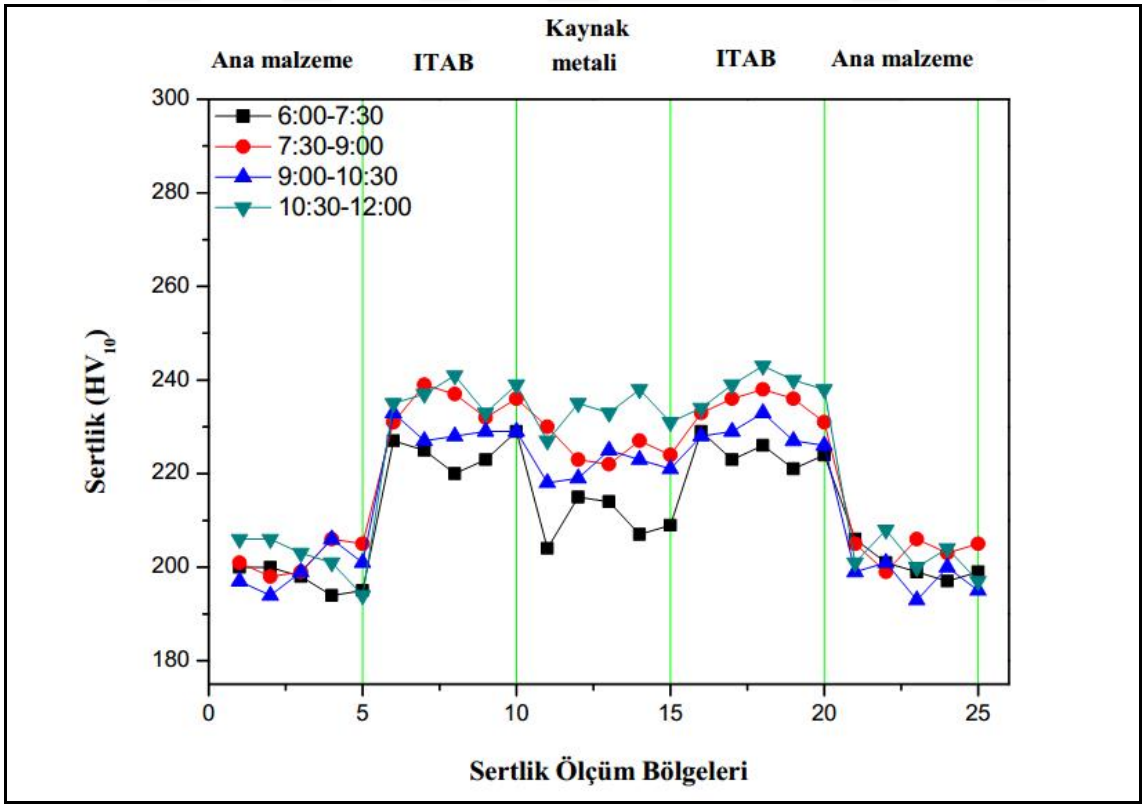
Şekil 8.8. 1 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.9. 3 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.10. 5 numaralı deney sertlik testi sonuçları



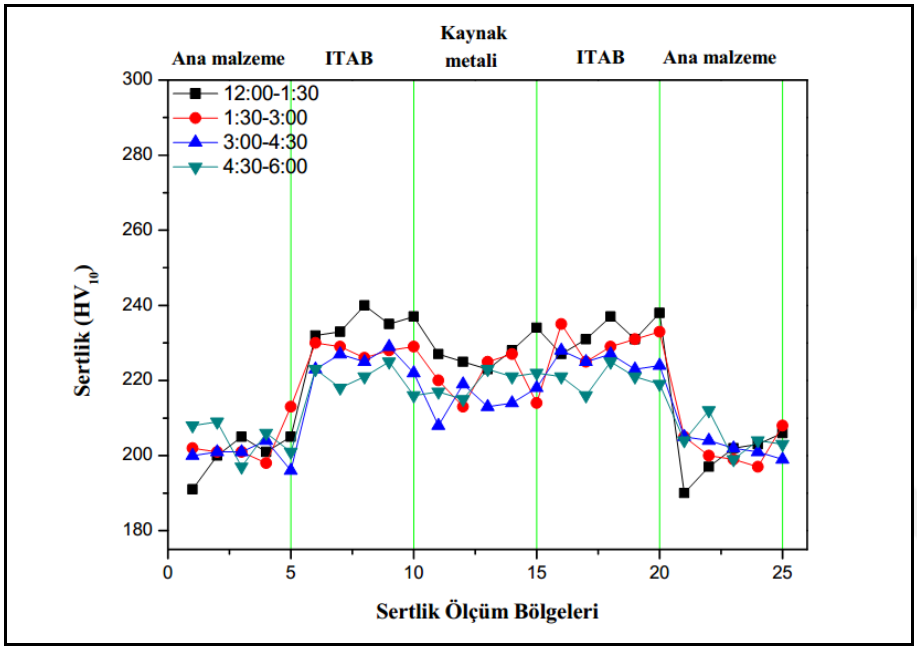
Şekil 8.11. 7 numaralı deney sertlik testi sonuçları

Yukarıdaki sertlik sonuçları incelendiğinde genel olarak kaynaklı malzemelerin benzer sertlik davranışlarını sergiledikleri görülmektedir. Ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinde oluşan sertlik değerleri mukayese edildiğinde, en yüksek sertliğin genelde ITAB'da olduğu onu sırasıyla kaynak metali ve ana malzemenin takip ettiği belirlenmiştir. Tüm deneylerde saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde ise; ana malzemenin dışında kalan bölgeler olan ITAB ve kaynak metali bölgelerinde genel olarak, en yüksek sertlik değerlerinin saat 10:30 – 12:00 pozisyonundan alınan numunelerden elde edilen sertlik sonuçlarında oluştuğunu görmek mümkündür. En düşük sertlik değerleri ise saat 6:00 – 7:30 saat pozisyonundan alınan numunelerden elde edilmiştir. Bu duruma neden olarak yine ısı girdisinin etkileri söylenebilir. Isı girdisi mikroyapı (ITAB genişliği ve tane yapısı) ve mukavemet-yüzde uzama değerlerine etki ettiği gibi, sertlik davranışını da direkt olarak etkilemektedir. Isı girdisinin yoğun olduğu, tavan pozisyonu olarak bilinen 6:00 – 7:30 saat pozisyonundan alınan numuneden elde edilen sertlik sonuçlarının düşük olduğu gözlenirken, ısı girdisinin daha düşük olduğu, yatayda alın kaynağı pozisyonu olan 10:30 – 12:00 saat pozisyonunda daha düşük ısı girdisi ve daha hızlı soğuma nedeniyle taneler daha küçük yapıda kalmış, bu da sertlik davranışının diğer pozisyonlardan daha yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Tüm deneylerde bu durum söz konusudur.

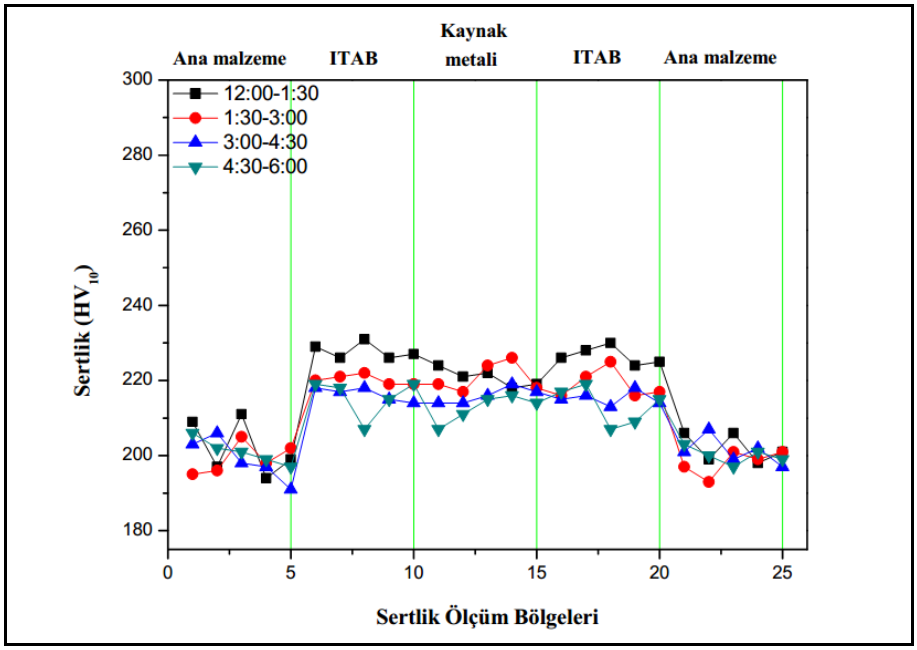
Akım şiddetinin değişken olduğu durum göz önüne alındığında ise akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum yine yukarıda bahsedilen sebepler nedeniyledir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmakta, ısı girdisinin artışına ters orantılı olarak sertlik değerleri ise düşmektedir. Bariz bir dalgalanma olmasa da yukarıdaki grafiklerden artan akım şiddeti değerlerinin tersine sertlik değerlerinin düştüğü açıkça görülmektedir. Yukarıdaki deney gruplandırmaları baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek sertlik değerlerinin daha düşük ısı girdisine sahip olan 1 numaralı deneyde olduğu gözlemlenirken, en yüksek ısı girdisi miktarının olduğu 7 numaralı deneyde ise en düşük sertlik değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Isı girdisinin artması malzemenin yavaş soğumasına bu da sertliğin düşmesine neden olur. Malzemenin sertlik değerlerinin mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda da, bu durum görülmüştür.

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

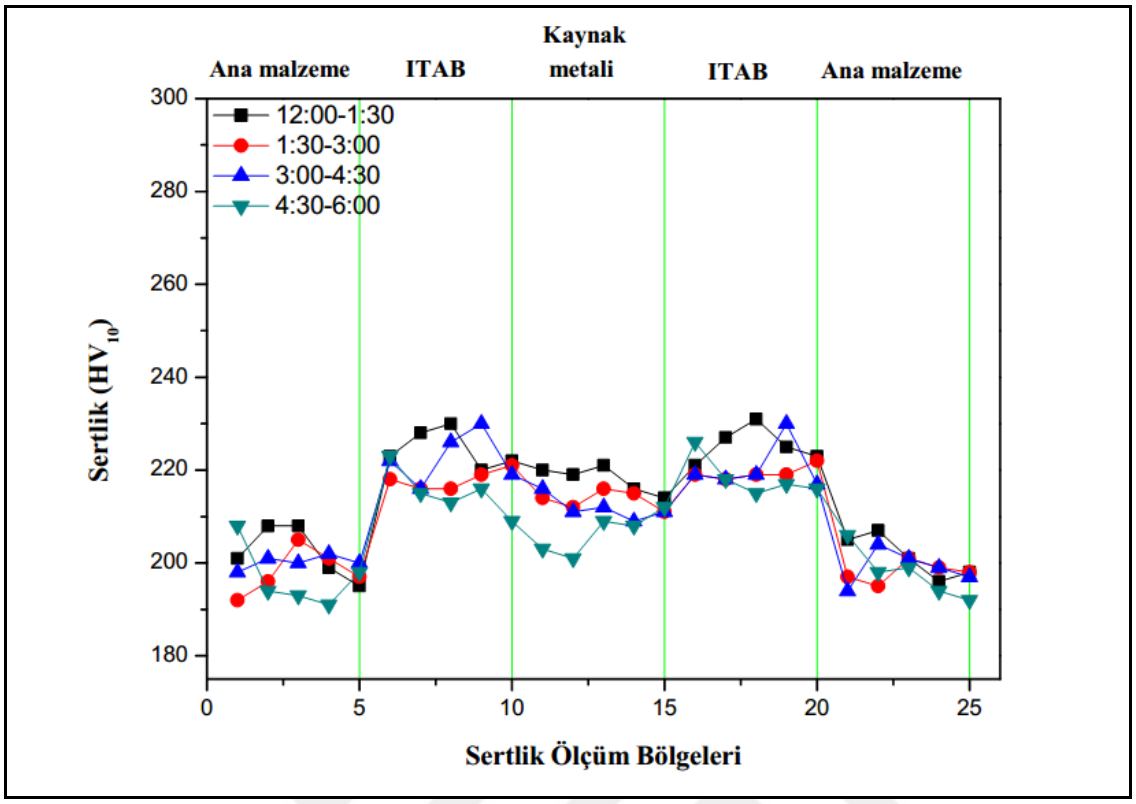
Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen 10, 12, 14 ve 16 numaralı deneylerden elde edilen sertlik sonuçları Şekil 8.12 – 8.15'te gösterilen grafiklerdeki gibidir.



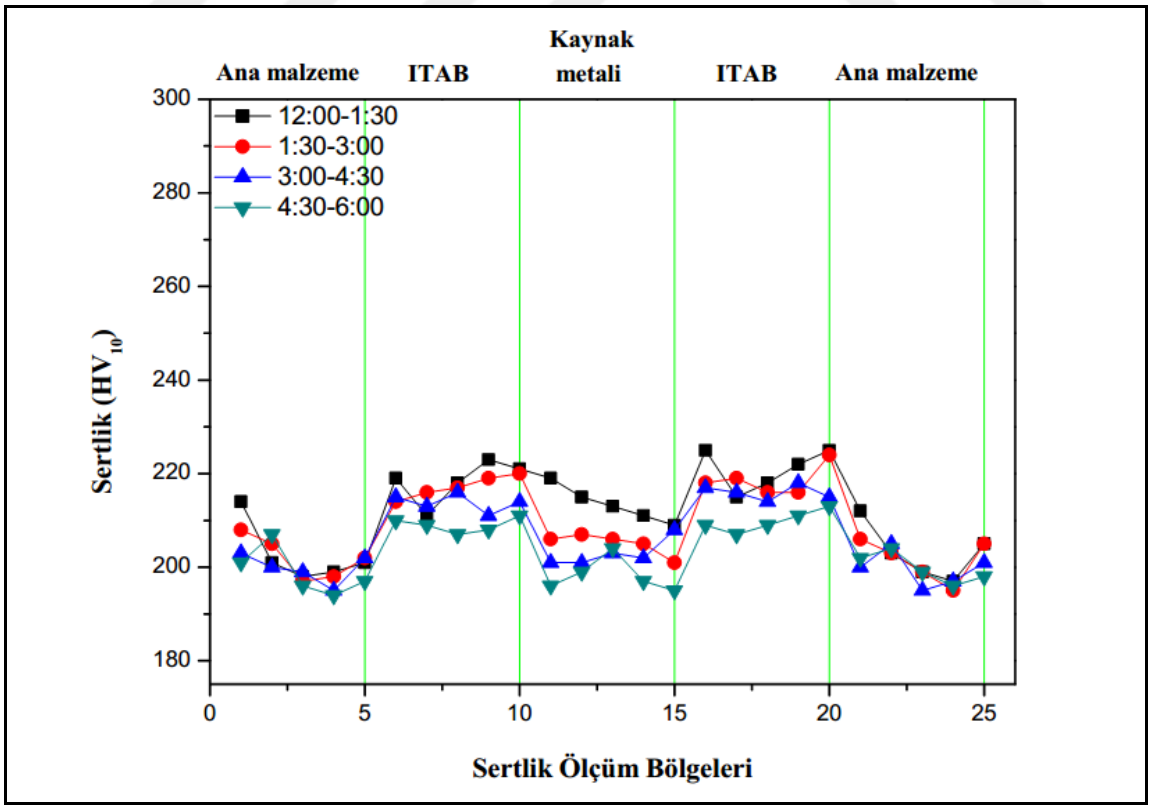
Şekil 8.12. 10 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.13. 12 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.14. 14 numaralı deney sertlik testi sonuçları



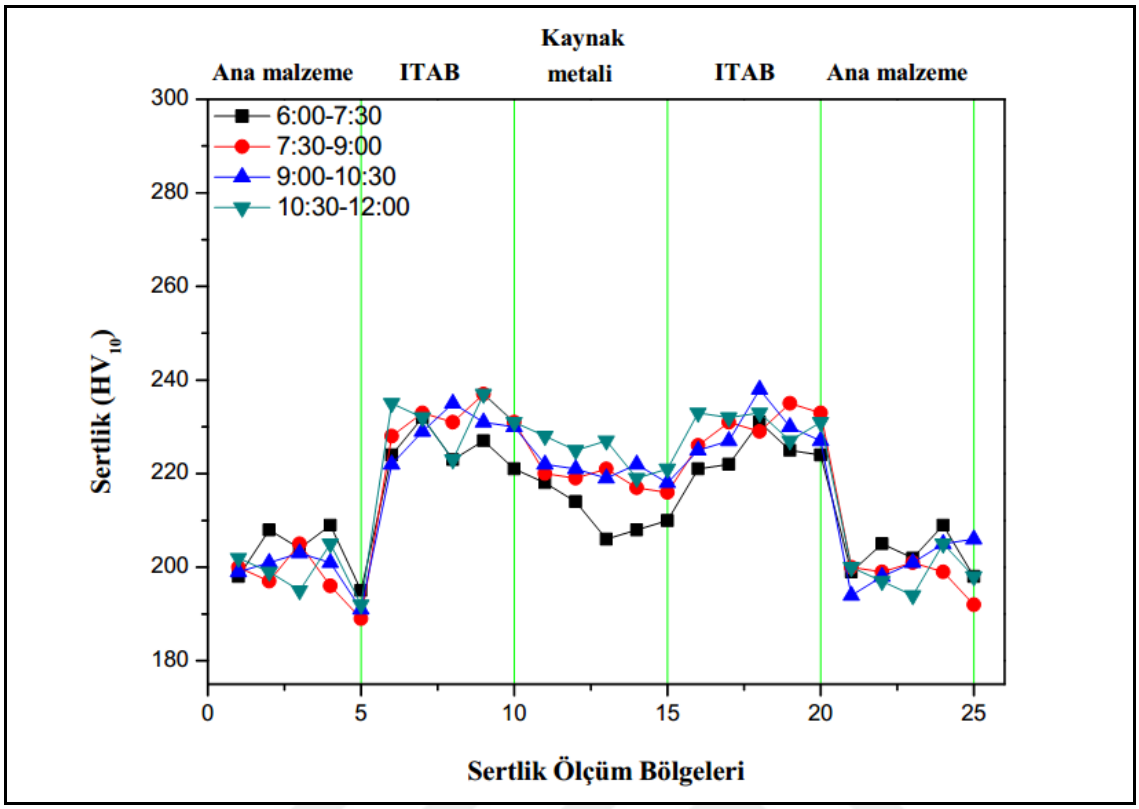
Şekil 8.15. 16 numaralı deney sertlik testi sonuçları

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin sertlik sonuçları için genel olarak benzer sertlik davranışlarını görebilmek mümkündür. Söz konusu kapsamdaki deneylerde saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde ana malzemenin dışında kalan bölgeler olan ITAB ve kaynak metali bölgelerinde genel olarak, en yüksek sertlik değerlerinin saat 12:00 – 01:30 saat pozisyonundan alınan numunelerden elde edilen sertlik sonuçlarında oluştuğu görülmektedir. Tavan pozisyonu olarak nitelendirebileceğimiz saat 4:30 – 6:00 saat pozisyonundan alınan numunelerin sertlik sonuçları ise en düşük sonuçları ortaya koymaktadır. Bu durum yukarıda da bahsedildiği gibi yine ısı girdisinin etkileri nedeniyledir. Isı girdisi sertlik davranışına direkt olarak etki etmektedir.

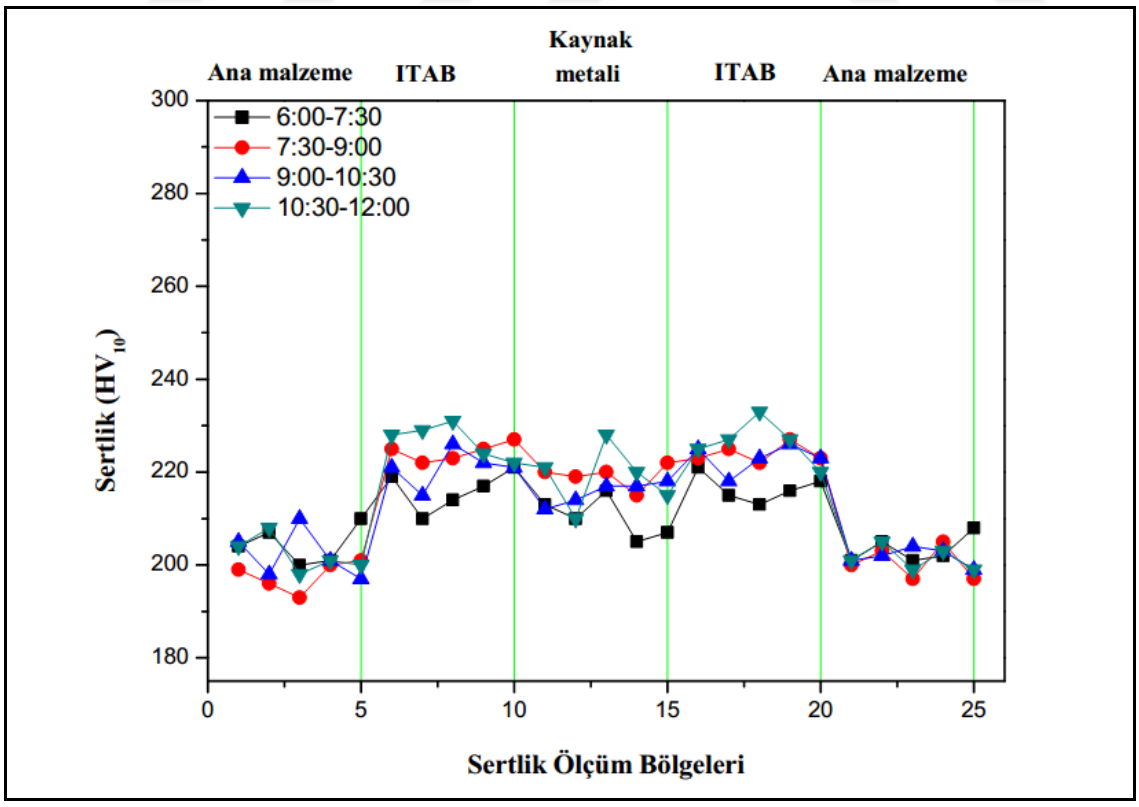
Yukarıdan aşağı yönde, selülozik elektrod ile sabit olarak birleştirilen ve akım şiddetinin tek değişken olduğu deneyler gruplandırılarak yapılan değerlendirmelerde akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. Daha düşük akım şiddeti değerinde birleştirilen Deney 10'da sertlik değerlerinin daha yüksek değerde oluştuğu gözlemlenirken, ısı girdisinin daha yoğun olarak oluştuğu en yüksek akım şiddeti değerinin tercih edildiği 16 numaralı deneyde ise ters orantılı olarak en düşük sertlik değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi artmakta, ısı girdisinin artışına bağlı olarak kaynak bölgesi daha yavaş soğuduğu için sertlik değerleri ise düşmektedir. Yukarıdaki grafiklerden artan akım şiddeti değerlerinin tersine, sertlik değerlerinin düştüğü açıkça görülmektedir. Yukarıdaki deney gruplandırmaları baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek sertlik değerlerinin daha düşük ısı girdisine tabi olan 10 numaralı deneyde oluştuğu gözlemlenirken, en yüksek ısı girdisi miktarının oluştuğu 16 numaralı deneyde ise en düşük sertlik değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

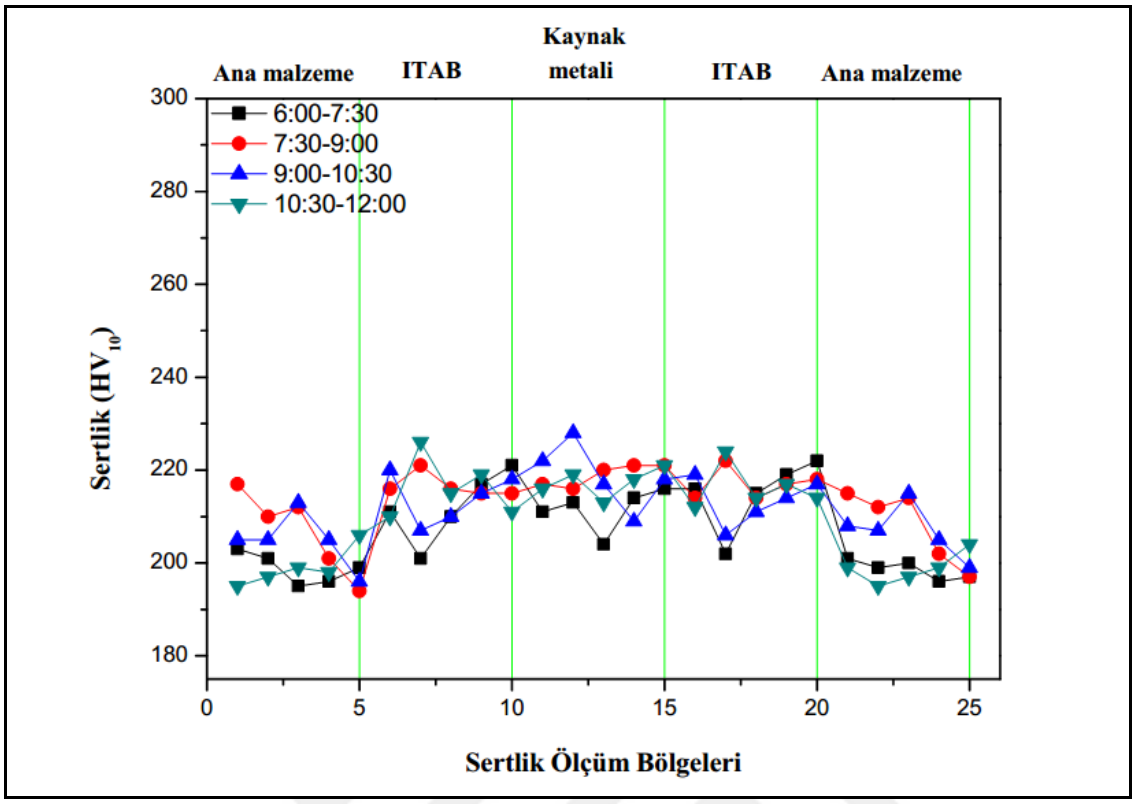
Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde, akım şiddeti miktarı tek değişken olarak aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile birleştirilen 9, 11, 13 ve 15 numaralı deneylerden elde edilen sertlik grafikleri sırasıyla Şekil 8.16 – 8.19'da sırasıyla verilmiştir.



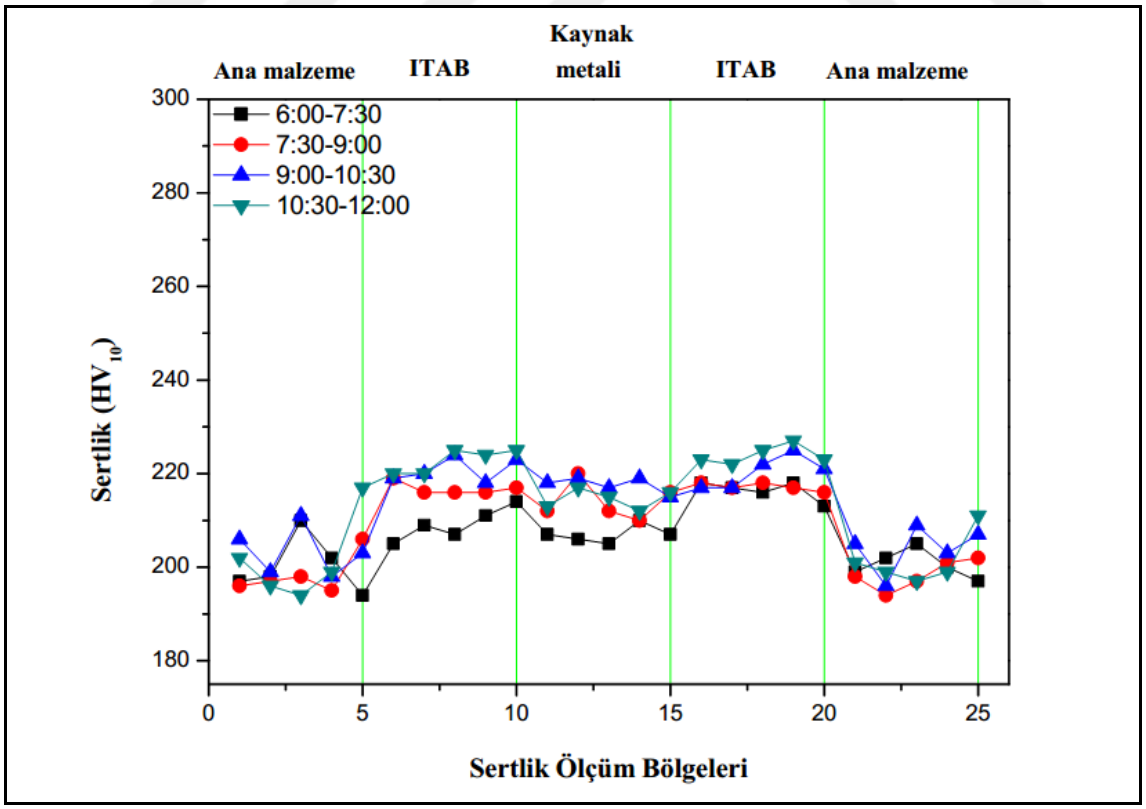
Şekil 8.16. 9 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.17. 11 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.18. 13 numaralı deney sertlik testi sonuçları



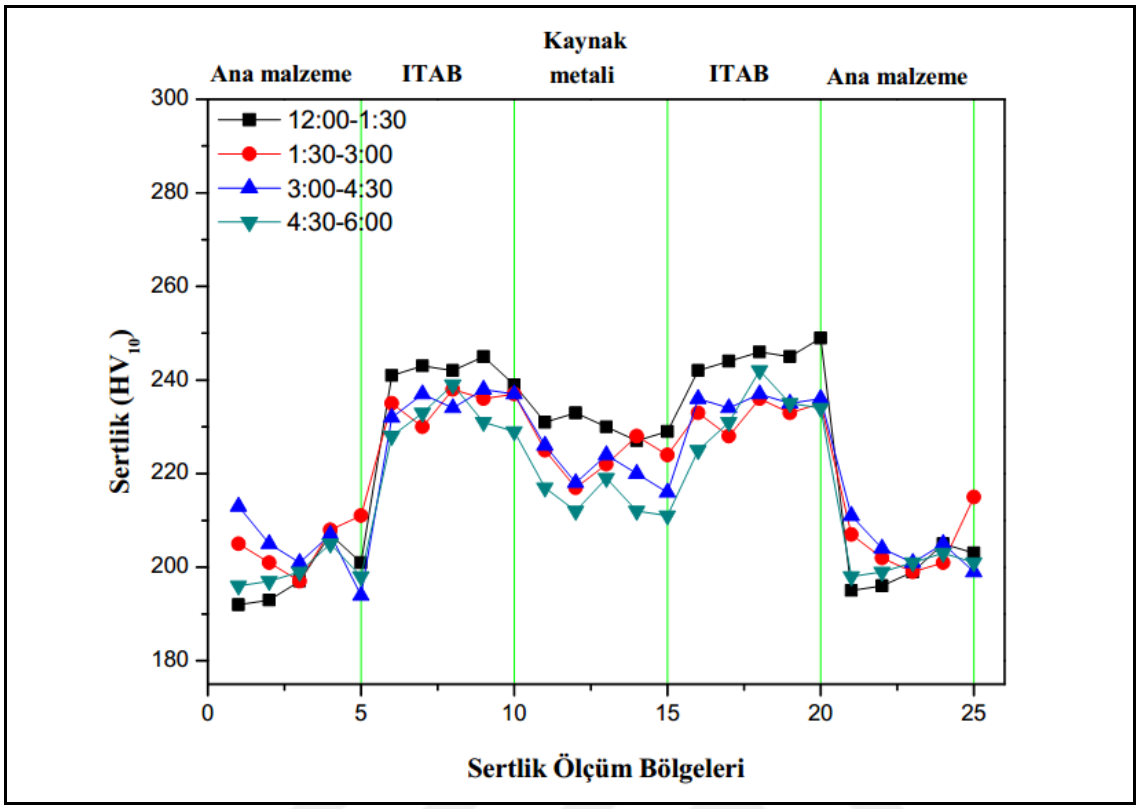
Şekil 8.19. 15 numaralı deney sertlik testi sonuçları

Selülozik elektrodla yapılan birleştirmelerde olduğu gibi, bazik elektrodla aşağıdan yukarı yönde yapılan birleştirmelerde, tüm deneylerde olduğu kök paso 100 A'de birleştirilmiş, sıcak pasolar ise sırasıyla Deney 9'da 150 - 180 A, Deney 11'de 160 - 190 A, Deney 13'te 170 - 200 A, Deney 15'te ise 180 - 210 A aralığında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.7).

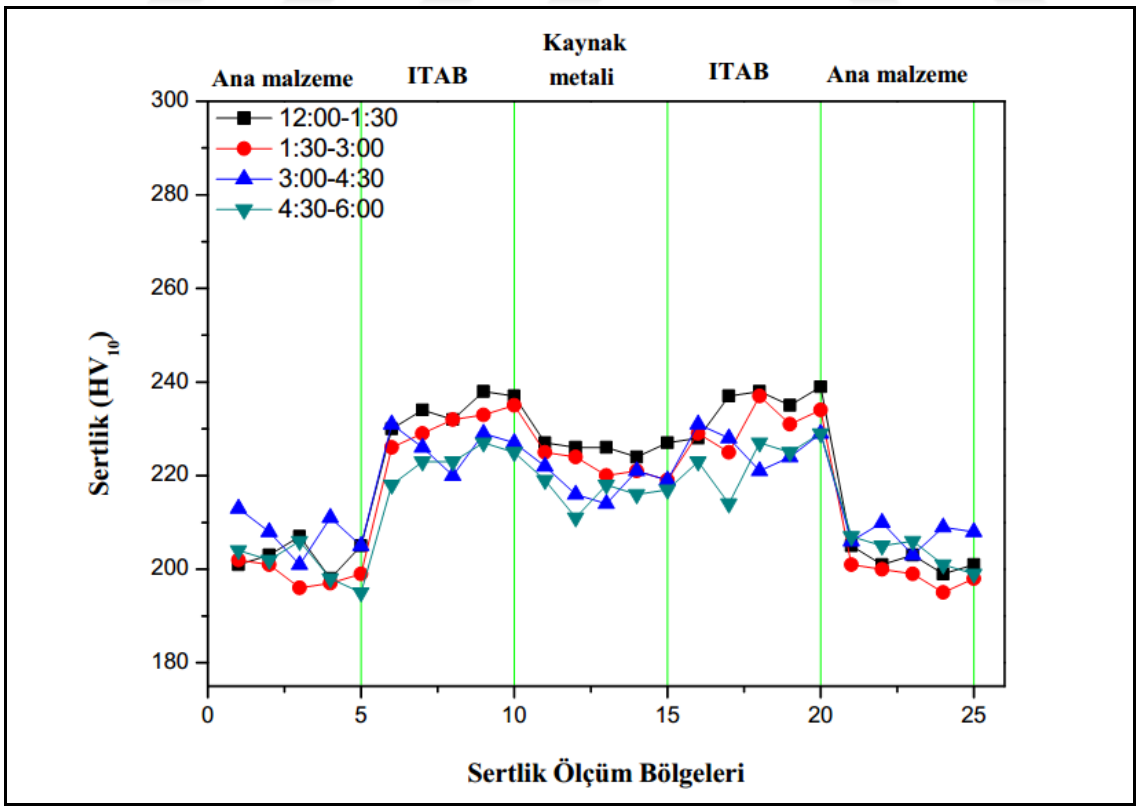
Şekil 8.16 – 8.19'da verilen aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin sertlik grafikleri incelendiğinde; selülozik elektrodla yapılan daha önceki deneylerde olduğu gibi akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla ters orantılı olarak, mukavemet değerleri gibi, sertlik değerleri de düşüş göstermiştir. Sonuçlar içerisinde en yüksek kaynak metali sertliği Deney 9'da görülürken (ortalama 219 HV), en düşük kaynak metali sertliği ise en yüksek akım şiddeti değeri (180-210 A) uygulanan 15 numaralı deneyde ortalama 213 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metali sertliğini belirleyen ana unsur, yine birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeridir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi artmış, ısı girdisinin artması ile taneler daha iri taneli ve ITAB daha geniş alanda oluşmuştur. Bu yüzden söz konusu iri tanelerde kaynak metali diğer deneylerden daha düşük sertlik değeri göstermiştir. Yine mikroyapı ve SEM incelemelerinde söz konusu deneylerden elde edilen görüntüler bu durumu destekler niteliktedir. Ayrıca çekme testlerinde tane yapısı irileşen malzemelerin mukavemet değerlerinde düşüş görülürken, yüzde uzama değerlerinde artış görülmüştür. Sertlik ve mukavemetin doğru orantılı olduğu yine daha önceki çalışmalardan da bilinmektedir.

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

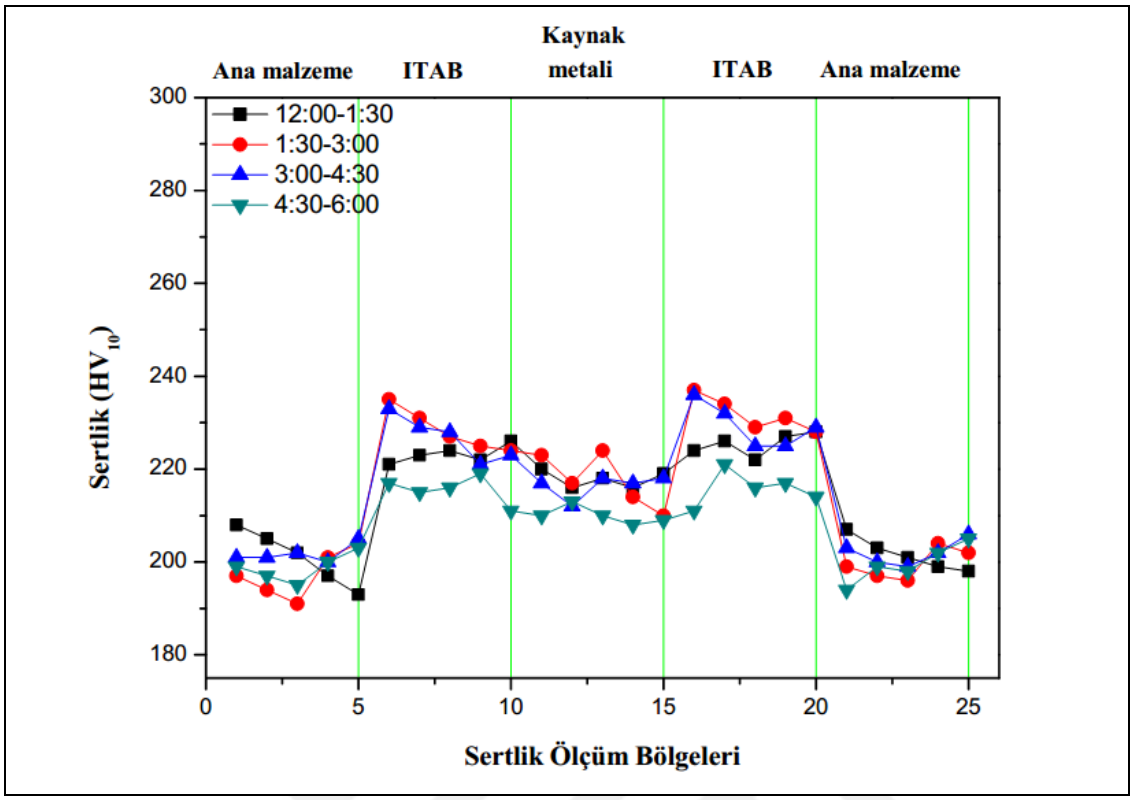
Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 2, Deney 4, Deney 6 ve Deney 8'den elde edilen sertlik grafikleri sırasıyla aşağıda Şekil 8.20 – 8.23'te verilmiştir.



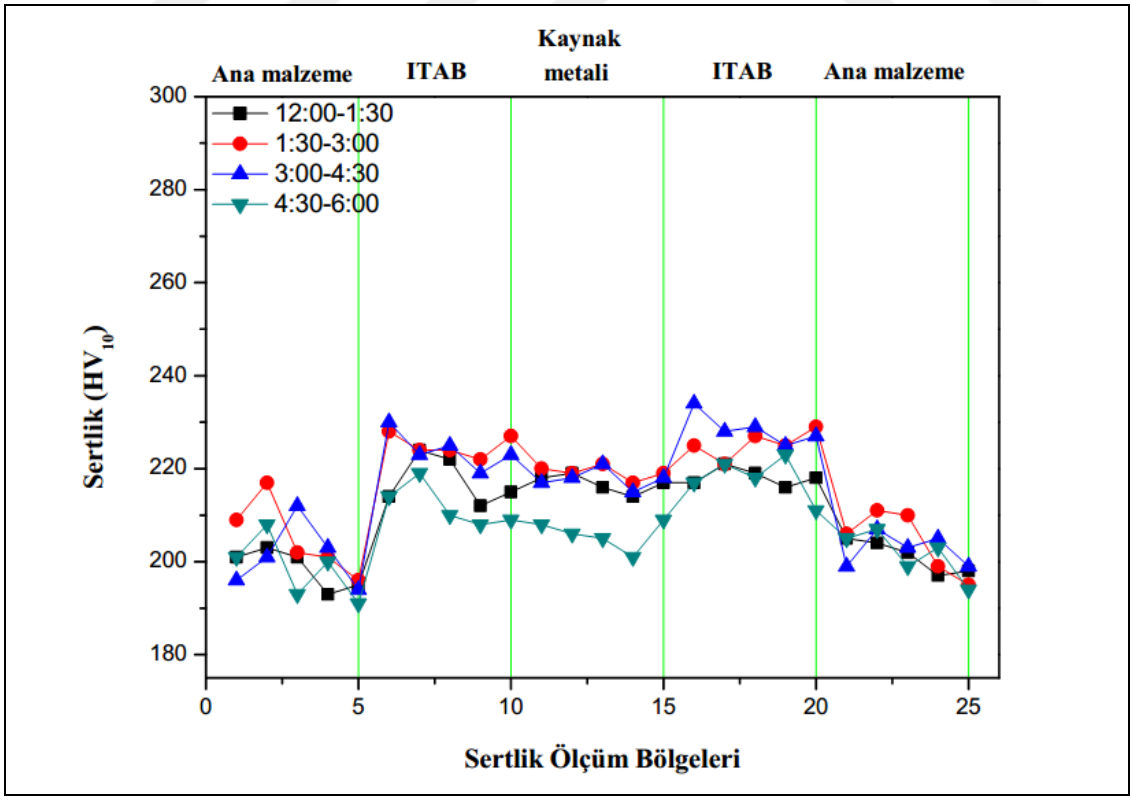
Şekil 8.20. 2 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.21. 4 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.22. 6 numaralı deney sertlik testi sonuçları



Şekil 8.23. 8 numaralı deney sertlik testi sonuçları

2 ve 4 numaralı deneylerde yeterli birleşmenin sağlanamadığı radyografi, makroyapı görüntülerinde tespit edildiği gibi, çekme testlerinde bu durum yine açıkça görülmüştür. Çekme numuneleri kaynak metalinden kopan 2 ve 4 numaralı deneylerin sertlik numunelerinde, normal bir kaynaklı numunenin gösterdiği sertlik tavırları görülmüştür.

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleşen deneylerde yine kaynak metali sertliği akım şiddeti değerlerine ters orantılı olarak değişiklik göstermiştir. Akım şiddeti değerinin en düşük olduğu (110 – 140 A) 2 numaralı deneyde ortalama kaynak metali sertliği 222 HV iken akım şiddeti değerlerinin arttırılmasıyla sertlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. 120 – 150 A akım aralığında birleştirilen 4 numaralı deneyde ortalama 221 HV, 130 – 160 A akım aralığında birleştirilen 6 numaralı deneyde ortalama 216 HV, 140 – 170 A akım aralığında birleştirilen 8 numaralı deneyde ise ortalama 215 HV değerinde kaynak metali sertliği elde edilmiştir. Buradan yükselen akım şiddeti değerine karşılık kaynak metali sertlik değerlerinin düştüğü açıkça görülmektedir. Akım şiddeti değerinin yükseldiği deneylerden alınan mikroyapı görüntülerinde tanelerin iri taneli yapıda olduğu da açıkça görülmüştür. Tane yapısı da kaynak metali sertliğini etkileyen önemli bir unsurdur. Tane yapısı irileştikçe kaynak metali sertliğinin azaldığı daha önceki deneylerde de anlatılmıştır.

Genel değerlendirme

Kaynak metali sertlik değerlerinin incelendiği X65 malzemeye ait farklı parametrelerde birleştirilen deneylerden elde edilen sertlik grafikleri genel olarak birbirine benzemekte olup, uygulanılan akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türüne göre sertlik değerleri farklılık göstermektedir. Tüm deneylerdeki sertlik grafiklerinde sertliğin en yüksek tayin edildiği bölge ITAB, en düşük tayin edildiği bölge ise esas metal bölgesidir. Kaynak metali bölgesi ise esas metal ve ITAB sertliklerinin arasında bir değerde olup, ITAB değerlerine daha yakın değerler göstermiştir. ITAB ve kaynak metalinde, esas metalden farklı sertlik değerleri tespit edilmiş olup, söz konusu değerlerin yüksek sıcaklıklarda uygulanılan kaynak işlemine bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir. Isının söz konusu bölgelerde, malzemeye bir nevi ısıl işlem uygulayarak etkin olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerlerine ITAB'da ulaşılmıştır. Buna sebep olarak kaynak esnasında en hızlı soğuyan bölge ITAB bölgesidir. Kaynak esnasında katılaşma ana malzeme sınırlarından başlayarak kaynak merkezine doğru gerçekleştiği için ITAB'da soğuma daha önce ve hızlı bir şekilde

gerçekleşmiş bu nedenle tüm deneylerde söz konusu bölgede en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. En son katılaşan bölge olduğundan yavaş soğuma nedeniyle kaynak metalinde ITAB'a göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde ve tane yapısı ve sertlik değerleri arasında bir ilişki kurulduğunda; normal şartlarda daha düşük sertlik değerleri sergilemesi gereken ITAB'daki iri taneli bölgelerde yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu durum tane yapısı ile alakalı olmayıp, tamamen soğuma hızıyla ilgilidir. Grafiklerde ölçülen iri taneli bölgelerdeki yüksek sertliğin sebebi, tane irileşmesinden değil, hızlı soğumadan dolayıdır. İri taneli bölgeler, en yüksek sıcaklığa maruz kaldığı için tane irileşir, fakat hızlı soğuduğu için de sertleşir.

Sertlik grafikleri incelendiğinde ana malzemelerdeki sertlik değerleri tüm deneylerde aynı değerlerde olup, yaklaşık 200 HV olarak gözlemlenirken, ITAB ve kaynak metalinde oluşan en yüksek sertlik değerlerinin aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile 110 – 140 A akım aralığında birleştirilen 1 numaralı deneyde oluştuğu görülmüştür. Söz konusu deneyde ITAB'da 252 HV'lik bir değere ulaşılırken, kaynak metalinde 236 HV'lik bir sertlik değeri tespit edilmiştir. Akım şiddetinin yükseltilmesi ile selülozik elektrod ile aynı yönde gerçekleştirilen diğer deneylerin (3, 5 ve 7 numaralı) sertlik değerlerinde, 1 numaralı deneye nazaran düşüş gözlemlenmiştir. Daha önceki incelemelerde belirtildiği gibi bu durum akım şiddeti miktarının artmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisinin artması nedeniyledir. Tüm deneyler içerisinde en düşük sertlik değeri ise yine selülozik elektrod ile yukarıdan aşağı yönde 180 – 210 A akım aralığında birleştirilen 16 numaralı deneyden elde edilmiştir. Söz konusu deneyde ITAB'da 215 HV, kaynak metalinde ise 205 HV'lik bir sertlik değeri ölçülmüştür.

Selülozik elektrod ile bazik elektrod mukayese edildiğinde ise, genel olarak bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerde daha düşük sertlik değerleri tespit edilmiştir. Bazik elektrodun tokluğunun yüksek olması gereği, doğal olarak sertlik değerleri daha düşük seviyelerdedir. Bazik elektrod ile yapılan deneylerde en yüksek sertlik değeri 2 numaralı deney için yapılan ölçümlerde ITAB'da 236, kaynak metalinde ise 222 HV olarak ölçülmüştür. En düşük ölçümler ise aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen 15 numaralı deneyde ITAB için 218 HV, kaynak metali içinse 213 HV olarak ölçülmüştür.

Sertlik ölçümlerinde kaynak yönü kendi içerisinde irdelendiğinde ise yine ısı girdisinin etkisiyle aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerin sertlik değerleri daha düşük

gözlemlenirken, yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen deneylerin sertlik değerleri nispeten daha yüksek olarak ölçülmüştür.

Sertlik ölçümleri diğer testler ve incelemeler ile birlikte değerlendirildiğinde testler ve incelemeler arasında bir bütünlük görülmektedir. Akım şiddeti değerinin yüksek olduğu deneylerde malzemeye uygulanılan ısı girdisi arttığından taneler daha iri taneli ve ITAB'lar daha geniş alanda oluşmuştur. Yine mikroyapı ve SEM incelemelerinde söz konusu deneylerden elde edilen görüntüler bu durumu desteklemektedir. Bu yüzden söz konusu iri tanelerin oluştuğu deneylerde, birleştirmelerin mukavemet değerlerinde düşüş görülürken, yüzde uzama değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Yine akım şiddetine bağlı olarak oluşan ısı girdisi ve soğuma hızının etkisiyle iri taneli yapıların oluştuğu deneylerde, daha ince taneli yapıların oluştuğu diğer deneylere göre daha düşük sertlik değeri görülmüştür. Sertlik ve mukavemetin doğru orantılı olduğu gerçekleştirilen çekme ve sertlik testlerinde de görülmüştür.

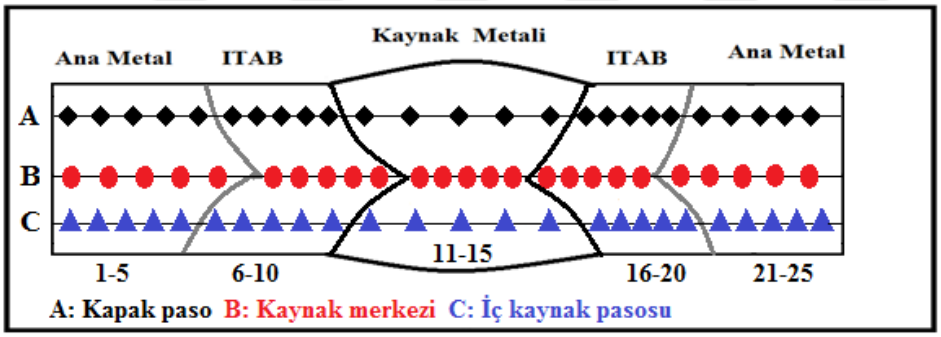
Farklı pasolardaki sertlik testi sonuçları

Çok pasolu kaynak işlemlerinin sertlik ölçümlerinde ısı girdisi, soğuma süresi, sonraki pasonun önceki pasoya bir nevi ısıl işlem uygulaması gibi birçok faktörün sonuçlara etki ettiği bilinmektedir [27, 28]. Bu faktörler içerisinde en önemlilerinden biri de farklı pasoların gösterdiği sertlik davranışlarıdır. Sonraki pasonun önceki pasolar üzerine ısıl işlem uygulama özelliği, önceki pasolarda gerçekleşen orijinal sertlik değerlerinin değişimine neden olmaktadır. Yine kapak paso ve iç kaynak pasosundaki kaynak işlemlerinde soğuma süresi, pasoların atmosferle doğrudan temas etmesi nedeniyle daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu da sertlik değerlerinde artışlara neden olmaktadır. Ayrıca kapak paso ve iç kaynak pasosu üzerinde bir paso işlemi daha olmadığından bu pasolar orijinal sertlik değerlerini korumaktadırlar.

Yukarıda bahsedilen farklılıkları görebilmek ve gözlemleyebilmek üzere selülozik ve bazik elektrodla aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde gerçekleşen birer deneye ait numunelerin, kaynak merkezi, kapak paso ve iç kaynak pasosundaki sertlik davranışlarını tespit etmek için testler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdan yukarı selülozik elektrodla gerçekleştirilen 1 numaralı deney, yukarıdan aşağı selülozik elektrodla gerçekleştirilen 10 numaralı deney, yukarıdan aşağı bazik elektrodla gerçekleştirilen 2 numaralı deney ile

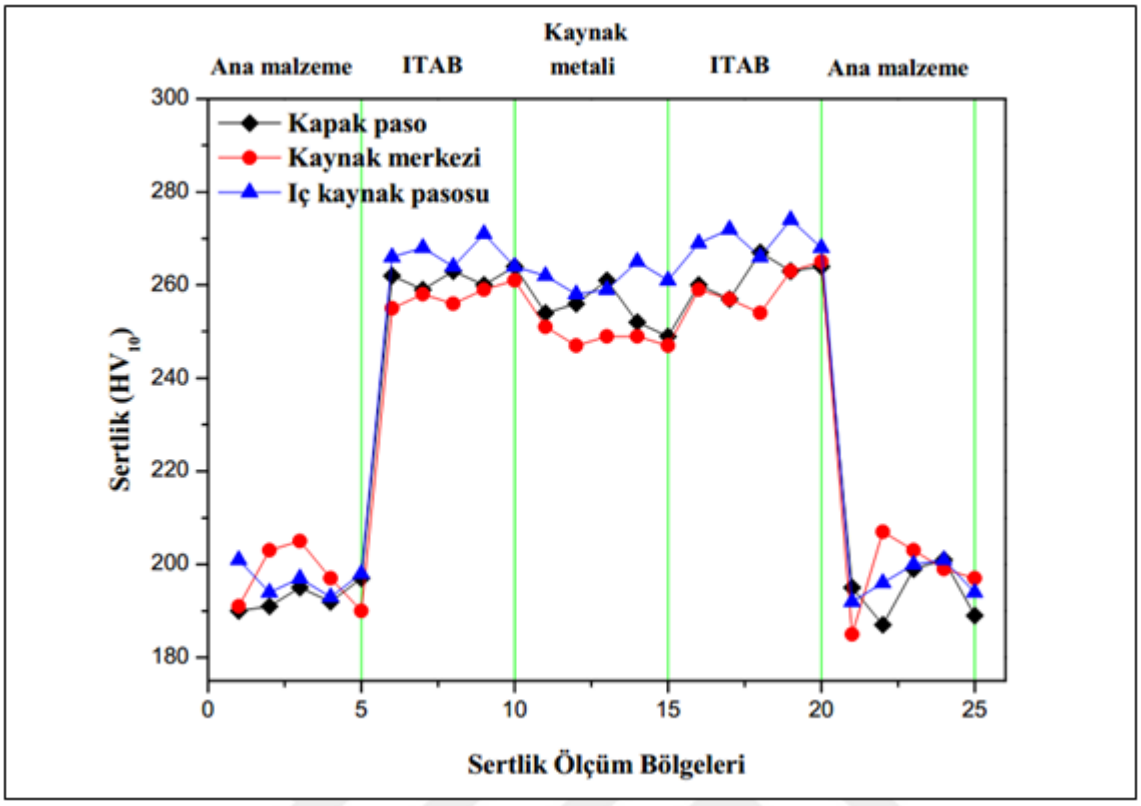
aşağıdan yukarı bazik elektrodla gerçekleştirilen 9 numaralı deneyden alınan numuneler sertlik ölçümlerine tabi tutulmuştur. Boru kaynağının pozisyon etkilerini minimuma indirmek üzere aşağıdan yukarı yönde gerçekleşen deneylerdeki numuneler 10:30 – 12:00 saat pozisyonundan, yukarıdan aşağı yönde gerçekleşen deneyler ise 12:00 – 01:30 saat pozisyonundan alınmıştır.

Farklı pasoların sertlik sonuçlarını incelemek amacıyla yapılan ölçümler üç ayrı bölgede, toplam 25 noktadan alınmıştır. Sertlik alınan bölgeler ve noktalar şematik olarak Şekil 8.24'te verilmektedir. Şekil 8.24; kaynak merkezi, kapak paso ve iç kaynak pasosunda, ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinden her bölgede 5'er sonuç alınarak, toplamda 25 noktadan ölçümler yapıldığını göstermektedir.

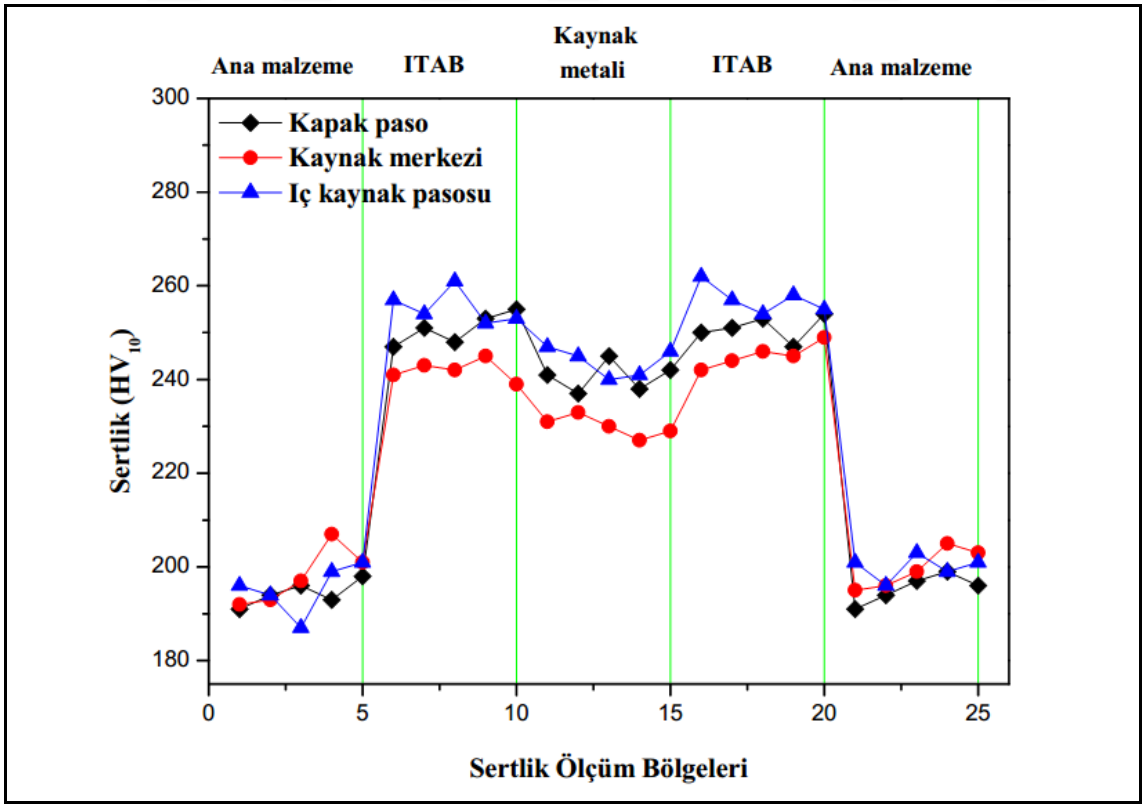


Şekil 8.24. Farklı pasolar için sertlik ölçüm bölgeleri ve noktaları

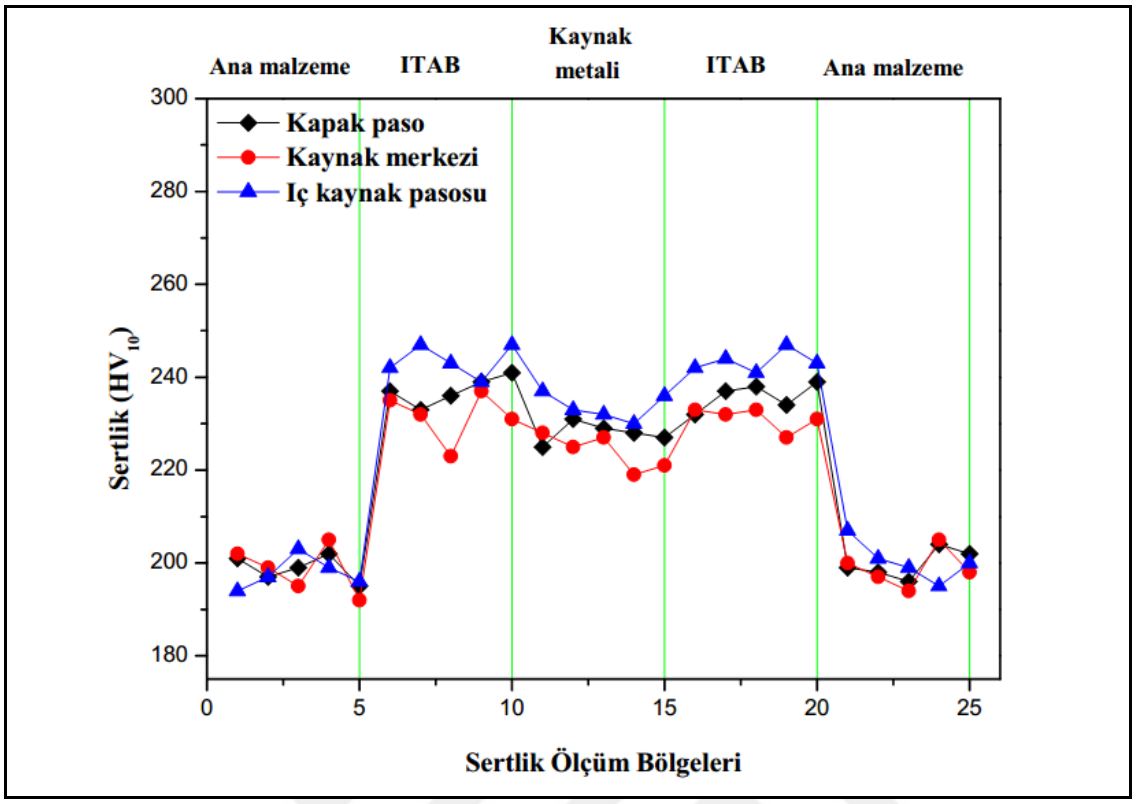
1, 2, 9 ve 10 numaralı deney için Şekil 8.24'te şematik olarak gösterilen pasolardan alınan sertlik sonuçları Şekil 8.25 – 8.28'de verilen grafiklerdeki gibidir. Şekil 8.25'deki grafik 1 numaralı deneyi, 8.26'daki grafik 2 numaralı deneyi, Şekil 8.27'deki grafik 9 numaralı deneyi, Şekil 8.28'deki grafik ise 10 numaralı deneyi ifade etmektedir.



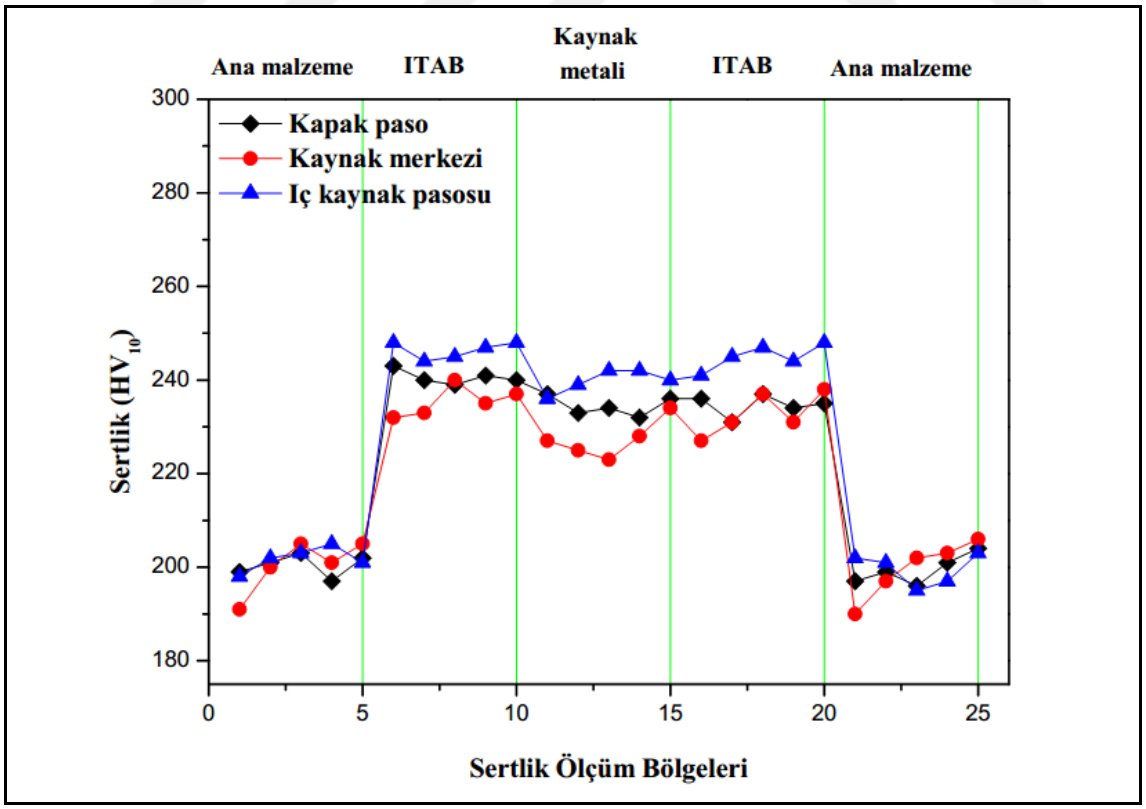
Şekil 8.25. 1 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları



Şekil 8.26. 2 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları



Şekil 8.27. 9 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları



Şekil 8.28. 10 numaralı deneyin farklı paso işlemlerindeki sertlik sonuçları

Şekil 8.25 – 8.28'deki sertlik sonuçları incelendiğinde; grafiklerin birbirine benzer şekilde oluştuğunu söylemek mümkündür. Tüm deneylerde en yüksek sertlik değerleri en son paso olan iç kaynak pasosunda ölçülmüş, en düşük sertlik değerleri ise kaynak merkezinden alınan sonuçlardan (dolgu pasoları) elde edilmiştir. Kapak pasoda ise kaynak metali merkezinden daha yüksek, iç kaynak pasosundan ise daha düşük sertlik sonuçları tespit edilmiştir. Şekil 7.1.b'de verilen şematik gösterimdeki paso sıralaması göz önüne alındığında sıralama önce kök paso, sonra sıcak paso, daha sonra dolgu pasoları ve kapak paso, en son paso olarak da iç kaynak pasosu şeklinde oluşmaktadır. Bu sıralama neticesinde pasolar arası sertlik değerlerinde de farklılıklar meydana gelmektedir. Sonraki pasonun önceki pasolar üzerine bir nevi ısıl işlem uygulama özelliği, önce uygulanan kaynak pasolarının sertliğinde düşüşe neden olmakta, bu çevrim devam ettikçe de sertlik değerleri düşmeye devam etmektedir. Paso sıralaması dikkate alındığında kesit kalınlığın tam orta çizgisinde bulunan ve kaynak metali merkezini oluşturan 3. ve 4. pasoya karşılık gelen dolgu pasoları sertlik ölçümü yapılan diğer pasolardan daha önce gerçekleştiği için söz konusu dolgu pasolarından alınan sertlik ölçümleri en düşük sonuçları göstermiştir. Kapak paso ve iç kaynak paso işlemleri daha önceki dolgu pasolarına ısıl işlem uygulayarak burada sertliğin düşmesine neden olmuştur. Daha sonra ise kapak ve iç kaynak pasoları dolgu pasolarının atmosferle temasını kesmiş, kapak ve iç kaynak paso işlemlerinde soğuma dışarıdan merkeze doğru olacağı için önce dıştaki pasolar soğumuş, en son soğuma ısının tesiri altında kalan kaynak merkezinde yani dolgu pasoların bulunduğu bölgelerde gerçekleştiği için kaynak merkezindeki sertliğin daha da düşmesine neden olmuştur. Kapak paso ise yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı daha hızlı soğuyarak daha yüksek sertlik sonuçları göstermiştir. En yüksek sertlik sonuçları ise en son paso olan iç kaynak pasosunda gerçekleşmiştir. İç kaynak pasosunda gerçekleşen kaynak işleminde ısının etkisiyle diğer pasoların sertlik değerlerinin etkilendiği muhakkaktır. Bu noktada son pasoda en hızlı soğuma iç kaynak pasosunda gerçekleşirken, yüzeyden merkeze doğru soğuma nedeniyle dolgu pasolarının daha yavaş soğuduğu düşünülmektedir. Bu nedenle farklı pasolardan alınan sertlik sonuçlarında en yüksek sonuçlar iç kaynak pasosundan elde edilirken, kapak paso çok az bir değer ile iç kaynak pasosunun sertlik değerinden düşük sonuçlar vermiştir. En düşük sonuçlar ise atmosferle teması olmayan ve kesit kalınlığın orta merkezini oluşturan çizgiden alınan dolgu pasolarında ölçülmüştür.

Farklı pasoların sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik sonuçları yine daha önceki deneylerde elde edilen sonuçlar gibi ITAB'larda görülmüştür. ITAB'lardaki sertlik değerlerini kaynak metallerinden elde edilen sertlik değerleri takip ederken, en düşük değerler ana malzemelerde ölçülmüştür.

8.6. Kaynaklı Kırılma (Nick Break) Testi

API 1104 standardına uygun olarak hazırlanan kaynaklı kırılma (nick break) test numunelerine ait sonuçlar Çizelge 8.3'te verilmektedir. Her deney kapsamında 4 bölgeden 5'er adet numune alınmış ve numunelerin kırılma yüzeyleri gözle ve SEM incelemeleriyle muayene edilmiştir.

Çizelge 8.3. Kaynaklı kırılma (nick break) testi sonuçları

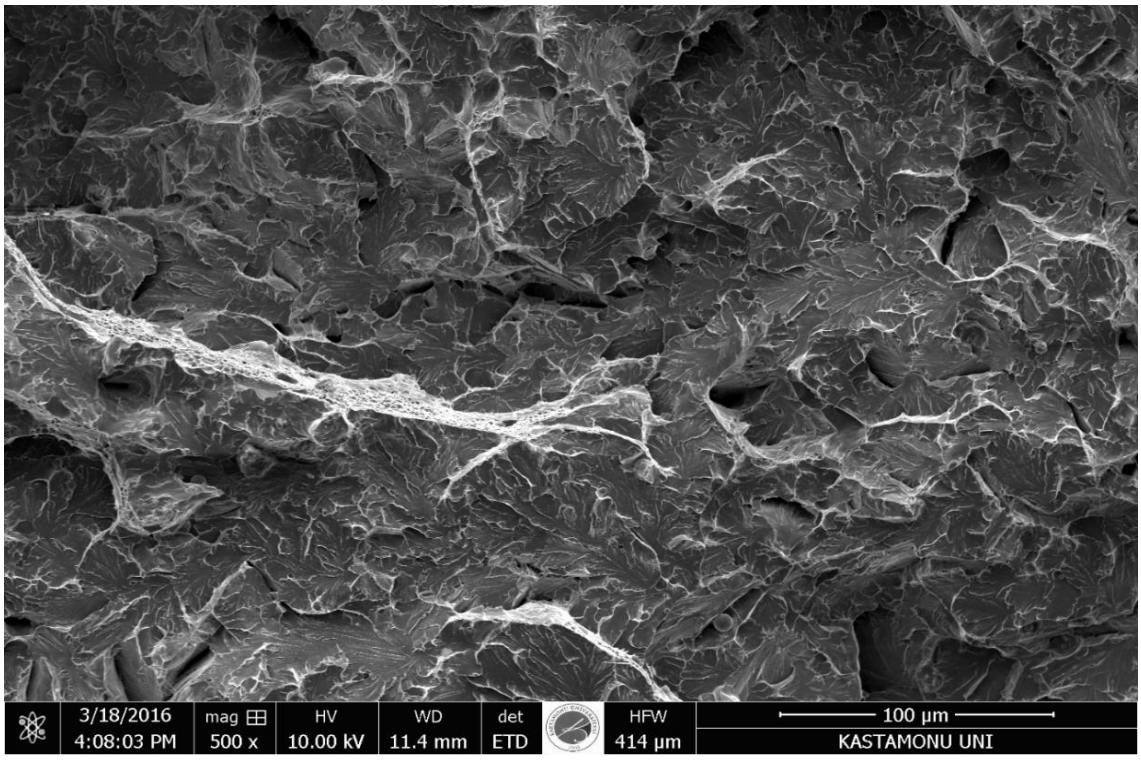
Deney No	Numune No	Kaynak Yönü / Elektrod / Akım Şiddeti Değeri	Saat Pozisyonu	Sonuç
1	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 110 – 140 A	06.00 – 07.30	Kabul
			07.30 – 09.00	
			09.00 – 10.30	
			10.30 – 12.00	
2	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 110 – 140 A	12.00 – 01.30	Red (Birleşme eksikliği)
			01.30 – 03.00	
			03.00 – 04.30	
			04.30 – 06.00	
3	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 120 – 150 A	06.00 – 07.30	Kabul
			07.30 – 09.00	
			09.00 – 10.30	
			10.30 – 12.00	
4	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik 120 – 150 A	12.00 – 01.30	Red (Birleşme eksikliği)
			01.30 – 03.00	
			03.00 – 04.30	
			04.30 – 06.00	
5	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 130 – 160 A	06.00 – 07.30	Kabul
			07.30 – 09.00	
			09.00 – 10.30	
			10.30 – 12.00	
6	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 130 – 160 A	12.00 – 01.30	Kabul
			01.30 – 03.00	
			03.00 – 04.30	
			04.30 – 06.00	

Çizelge 8.3. (devam) Kaynaklı kırılma (nick break) testi sonuçları

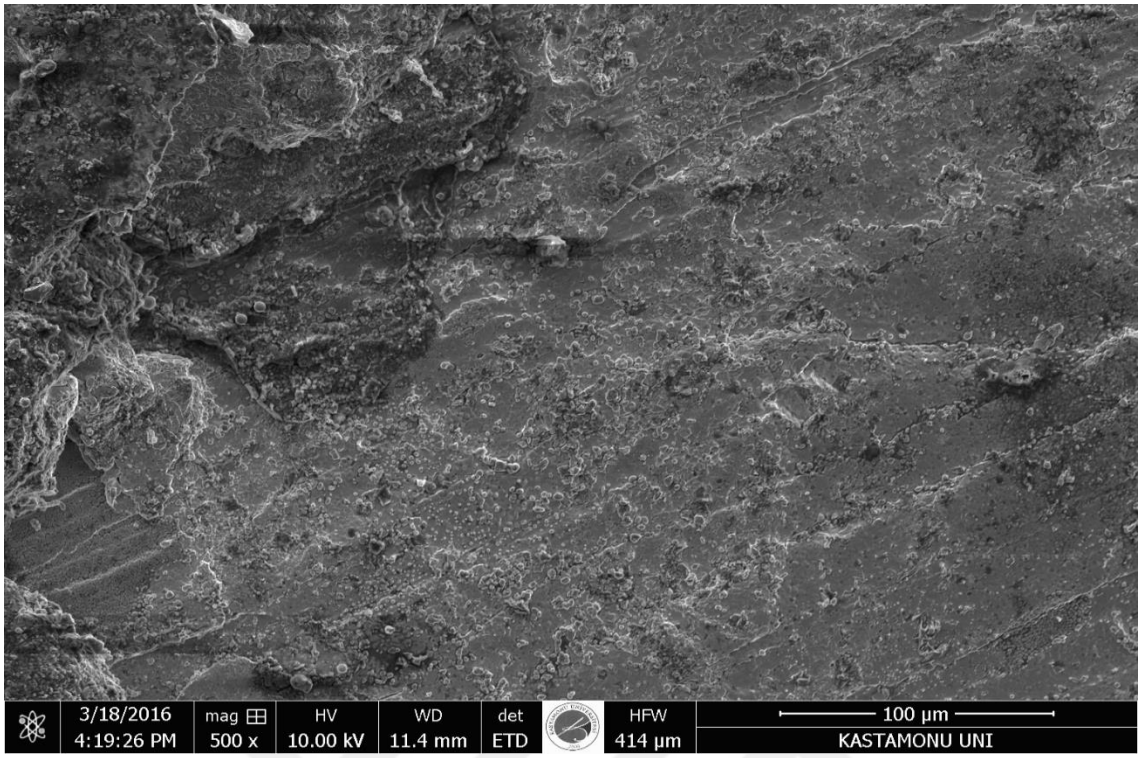
7	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 140 – 170 A	06.00 – 07.30 07.30 – 09.00 09.00 – 10.30 10.30 – 12.00	Kabul
8	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 140 – 170 A	12.00 – 01.30 01.30 – 03.00 03.00 – 04.30 04.30 – 06.00	Kabul
9	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 150 – 180 A	06.00 – 07.30 07.30 – 09.00 09.00 – 10.30 10.30 – 12.00	Kabul
10	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 150 – 180 A	12.00 – 01.30 01.30 – 03.00 03.00 – 04.30 04.30 – 06.00	Kabul
11	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 160 – 190 A	06.00 – 07.30 07.30 – 09.00 09.00 – 10.30 10.30 – 12.00	Kabul
12	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 160 – 190 A	12.00 – 01.30 01.30 – 03.00 03.00 – 04.30 04.30 – 06.00	Kabul
13	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 170 – 200 A	06.00 – 07.30 07.30 – 09.00 09.00 – 10.30 10.30 – 12.00	Kabul
14	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 170 – 200 A	12.00 – 01.30 01.30 – 03.00 03.00 – 04.30 04.30 – 06.00	Kabul
15	1-5	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 180 – 210 A	06.00 – 07.30 07.30 – 09.00 09.00 – 10.30 10.30 – 12.00	Kabul
16	1-5	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 180 – 210 A	12.00 – 01.30 01.30 – 03.00 03.00 – 04.30 04.30 – 06.00	Kabul

Çizelge 8.3’te verilen kaynaklı kırılma (nick break) testi sonuçları incelendiğinde 2 ve 4 numaralı deneylerin kabul edilmediği görülmektedir. Buna sebep, söz konusu deneylerde birleşme eksikliği, yetersiz ergime veya nüfuziyet noksanlığı olarak adlandırılan hatanın görülmesidir. Daha önceki incelemelerde bu durum açıkça görülmüş ve ifade edilmiştir.

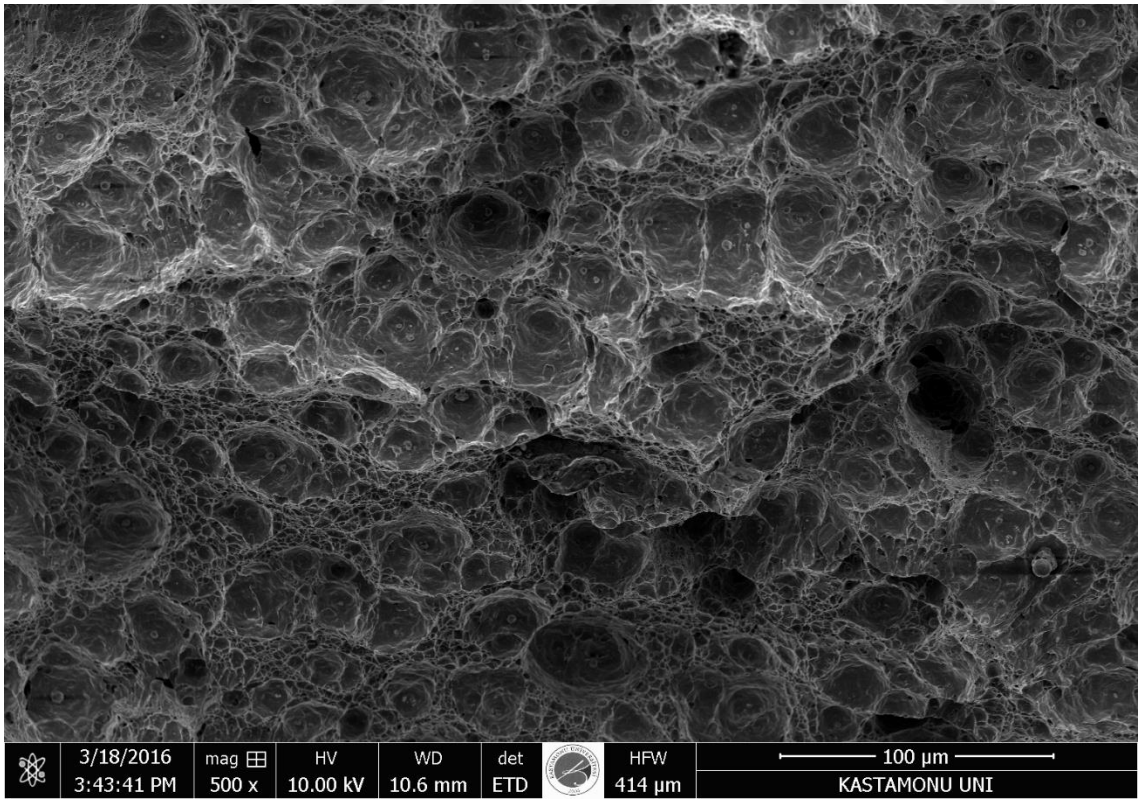
Kaynaklı kırılma testlerinde kaynak metalinden kopan numunelerin kırık yüzey SEM incelemelerinde numunelerin kırılma davranışları tespit edilmeye çalışılmış, kırılma yüzeyleri incelenen numunelere ait görüntüler Resim 8.31 – Resim 8.46’da verilmiştir.



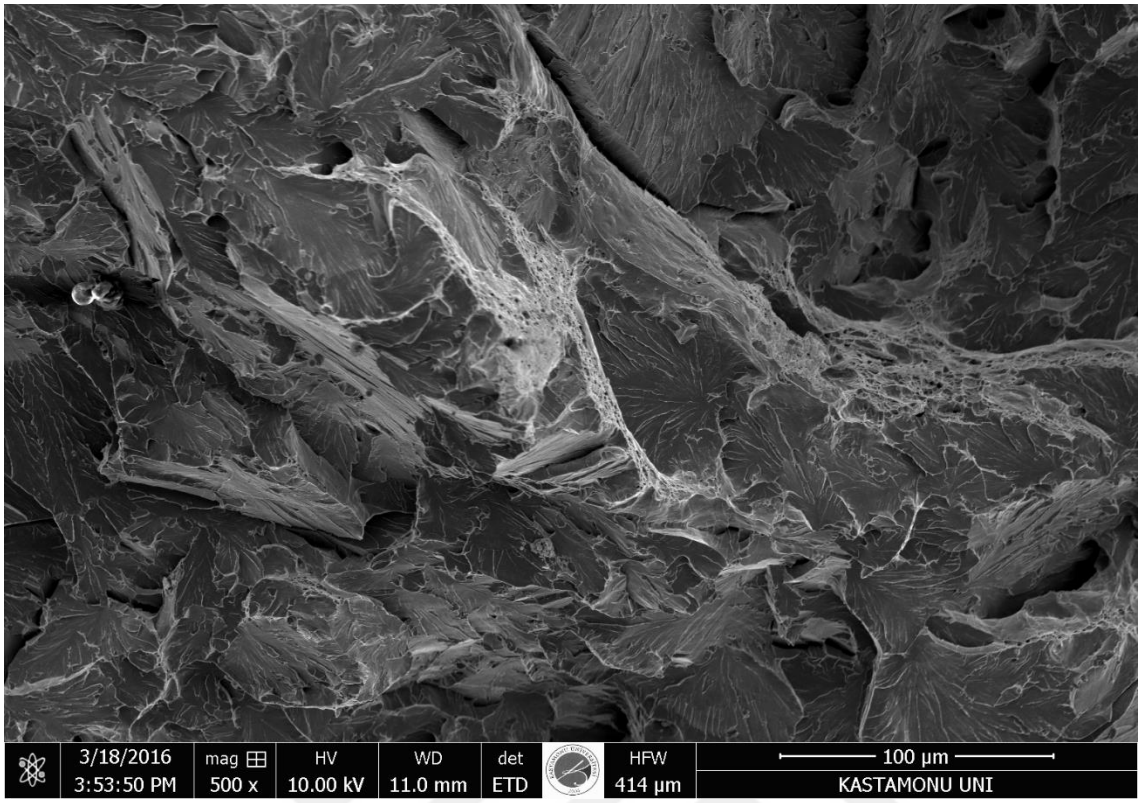
Resim 8.31. 1 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



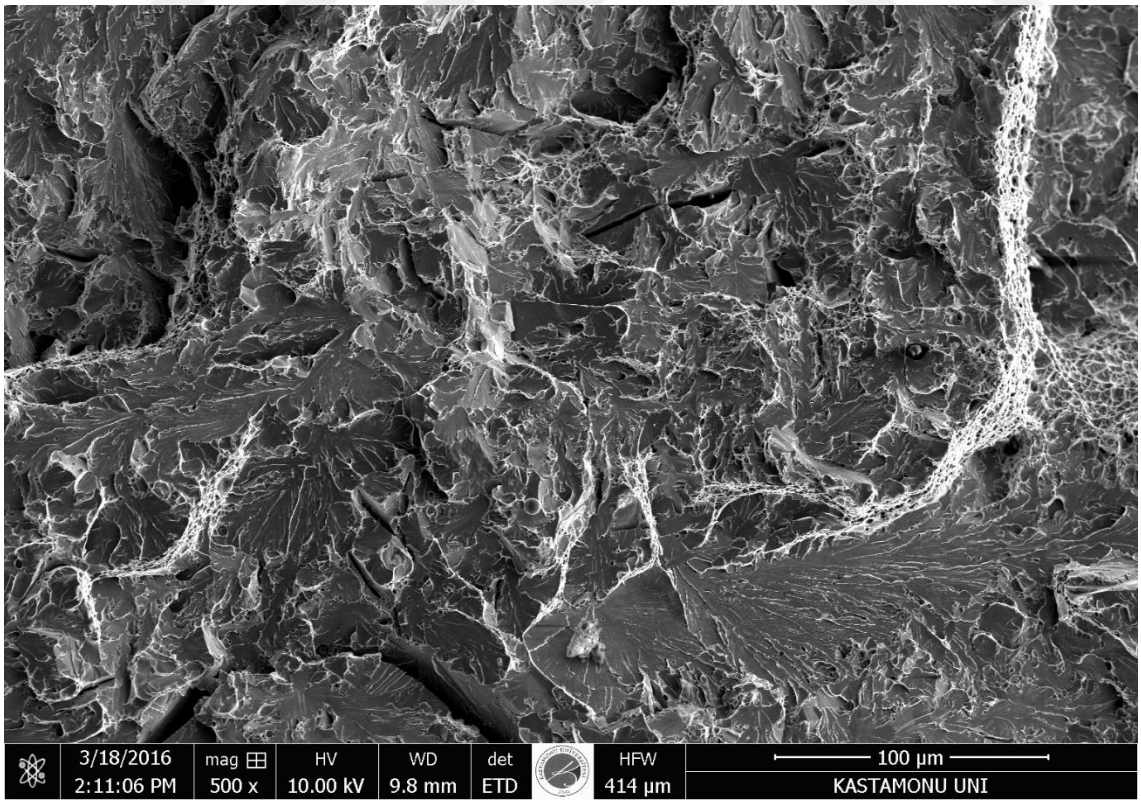
Resim 8.32. 2 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



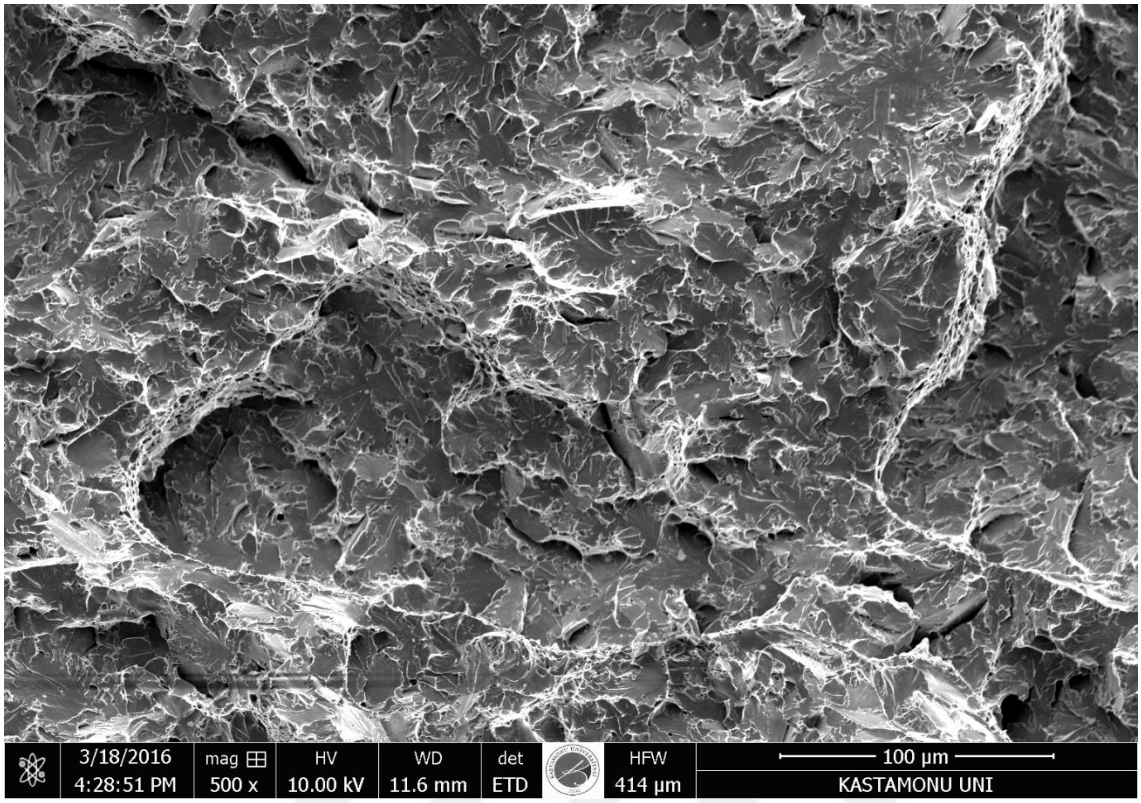
Resim 8.33. 3 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



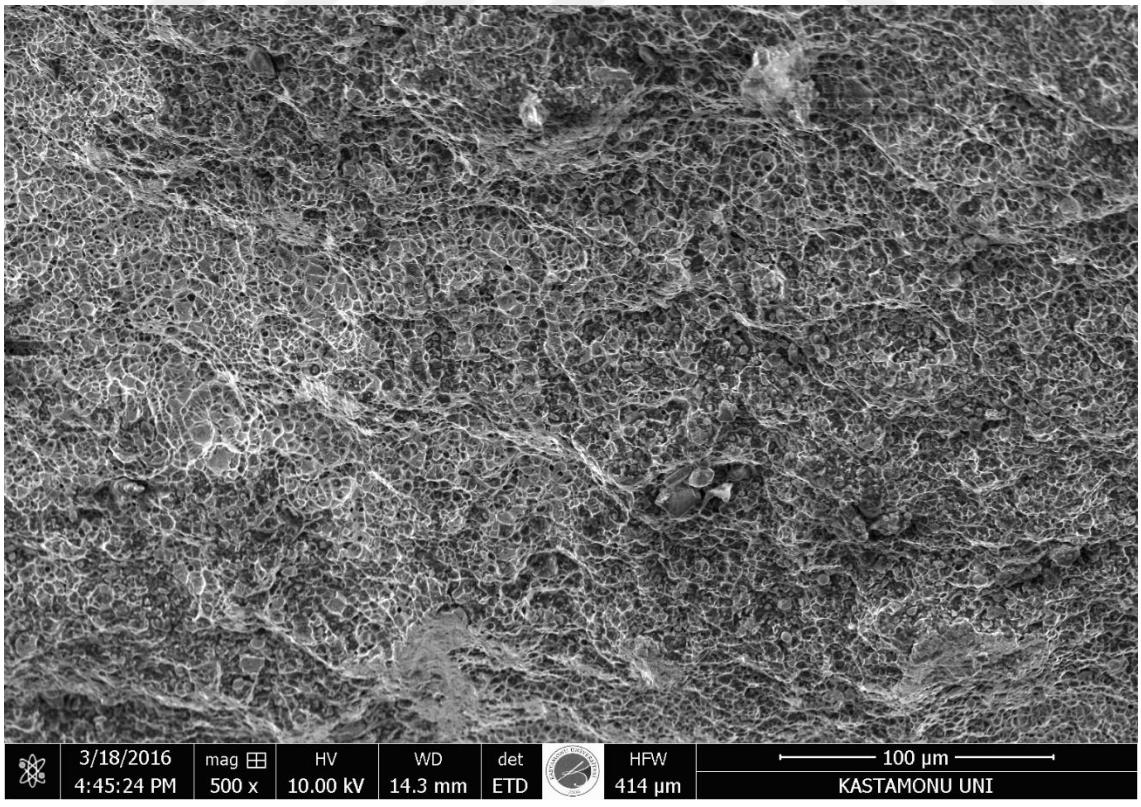
Resim 8.34. 4 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



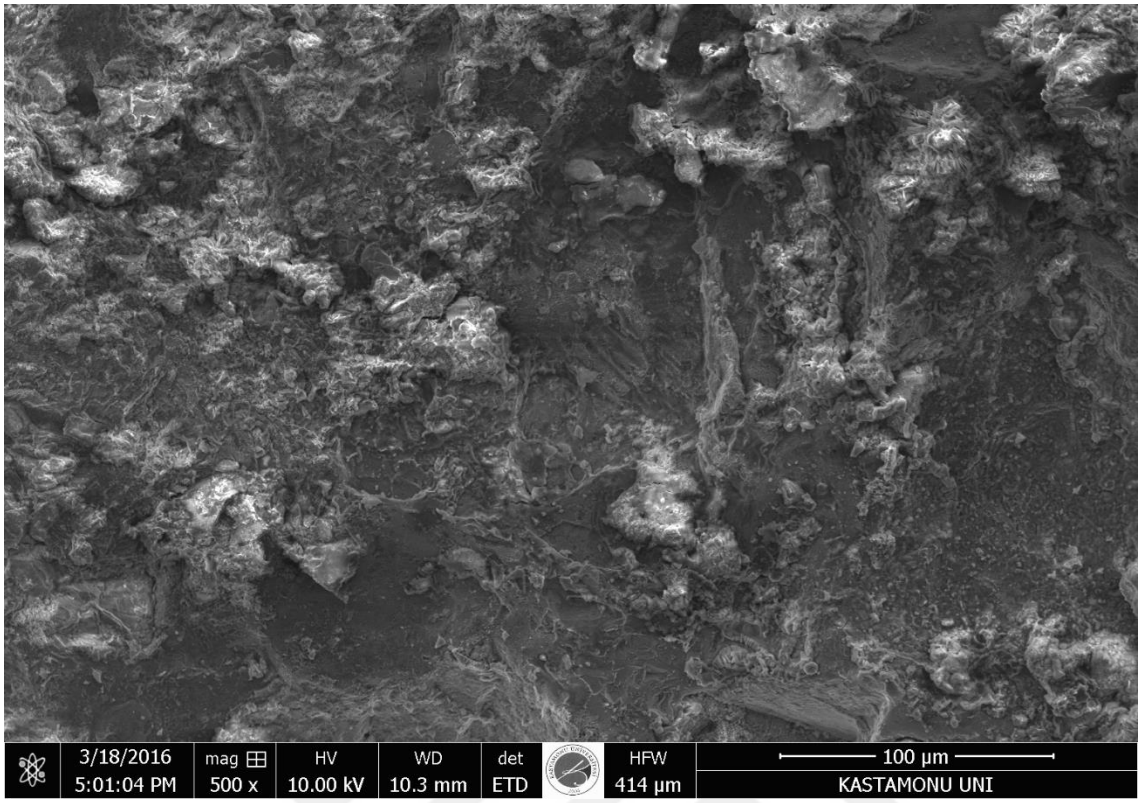
Resim 8.35. 5 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



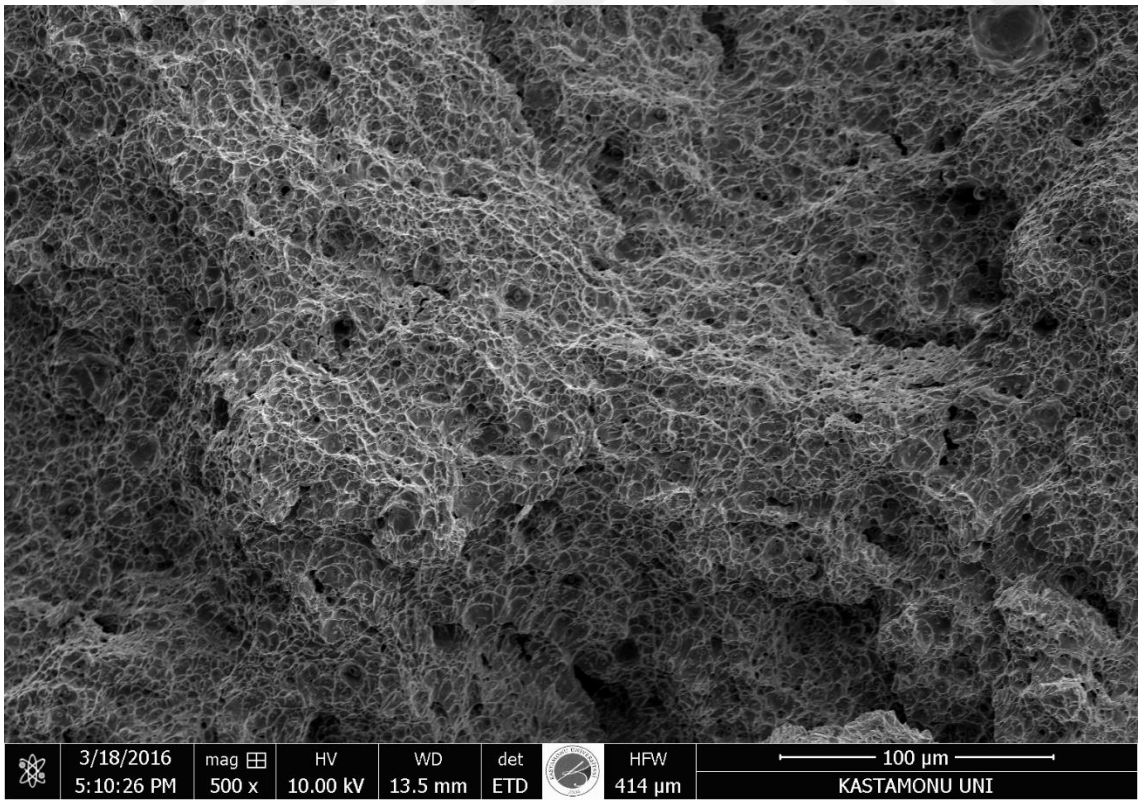
Resim 8.36. 6 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



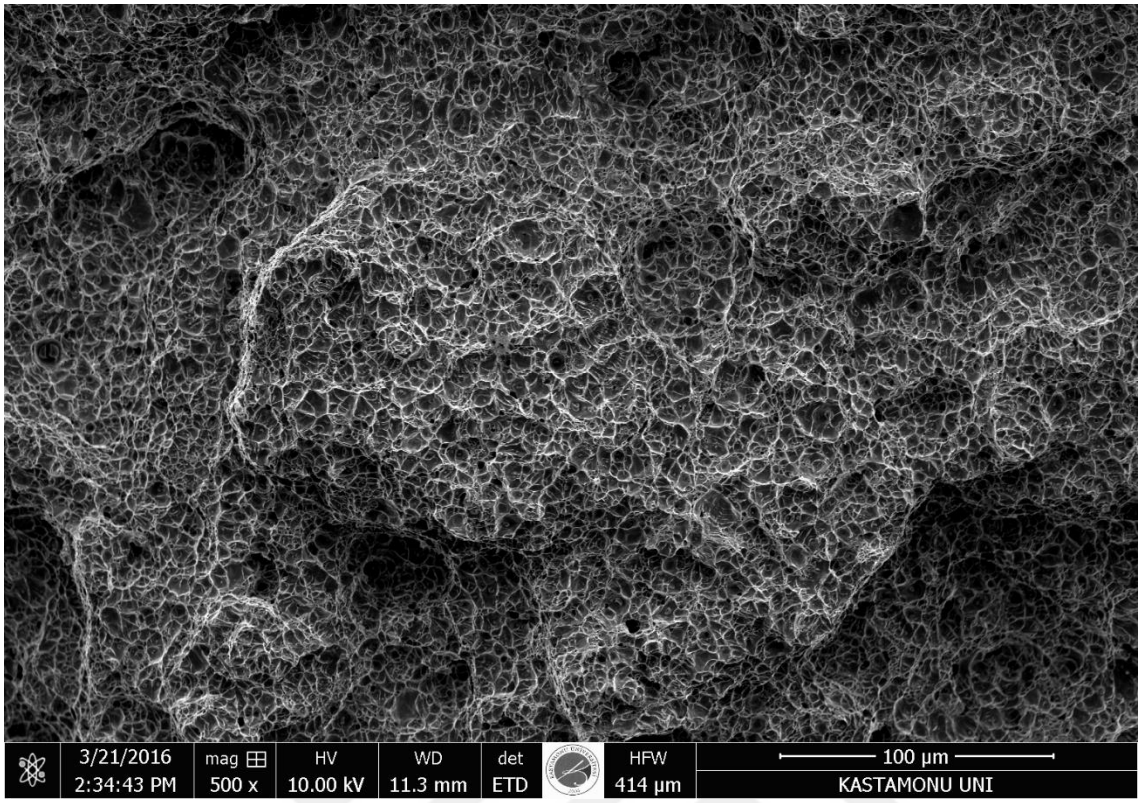
Resim 8.37. 7 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



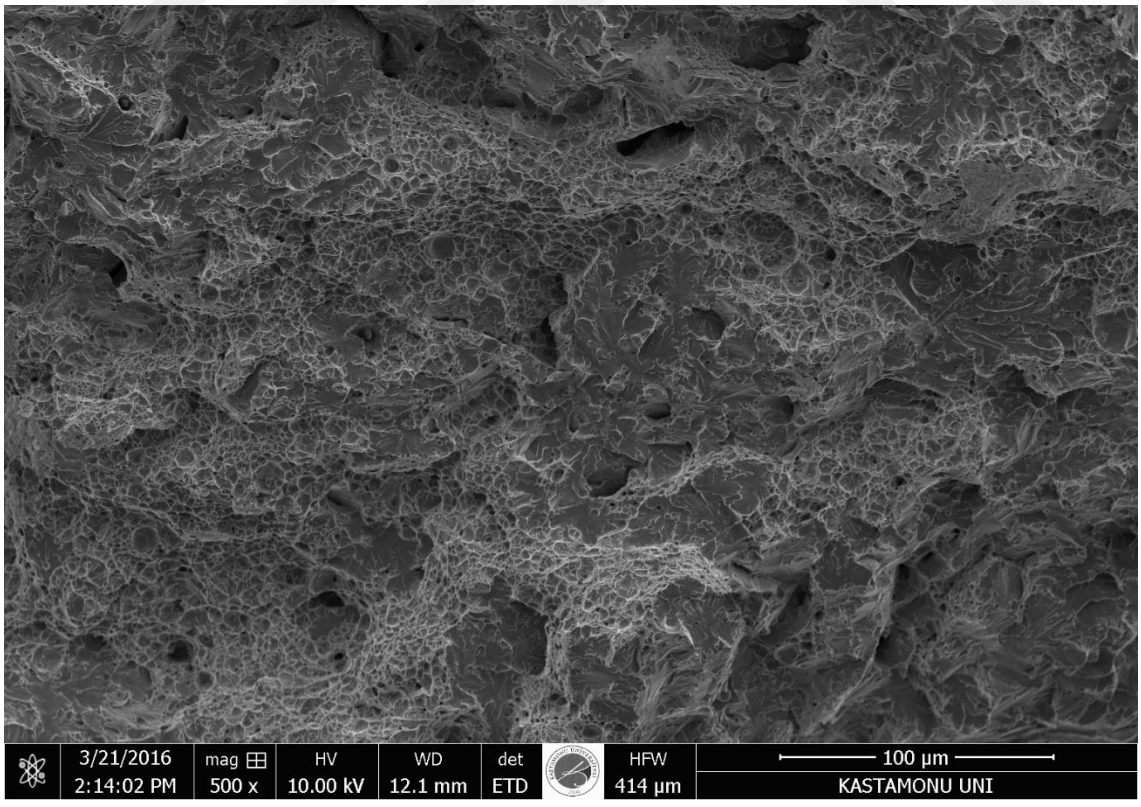
Resim 8.38. 8 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



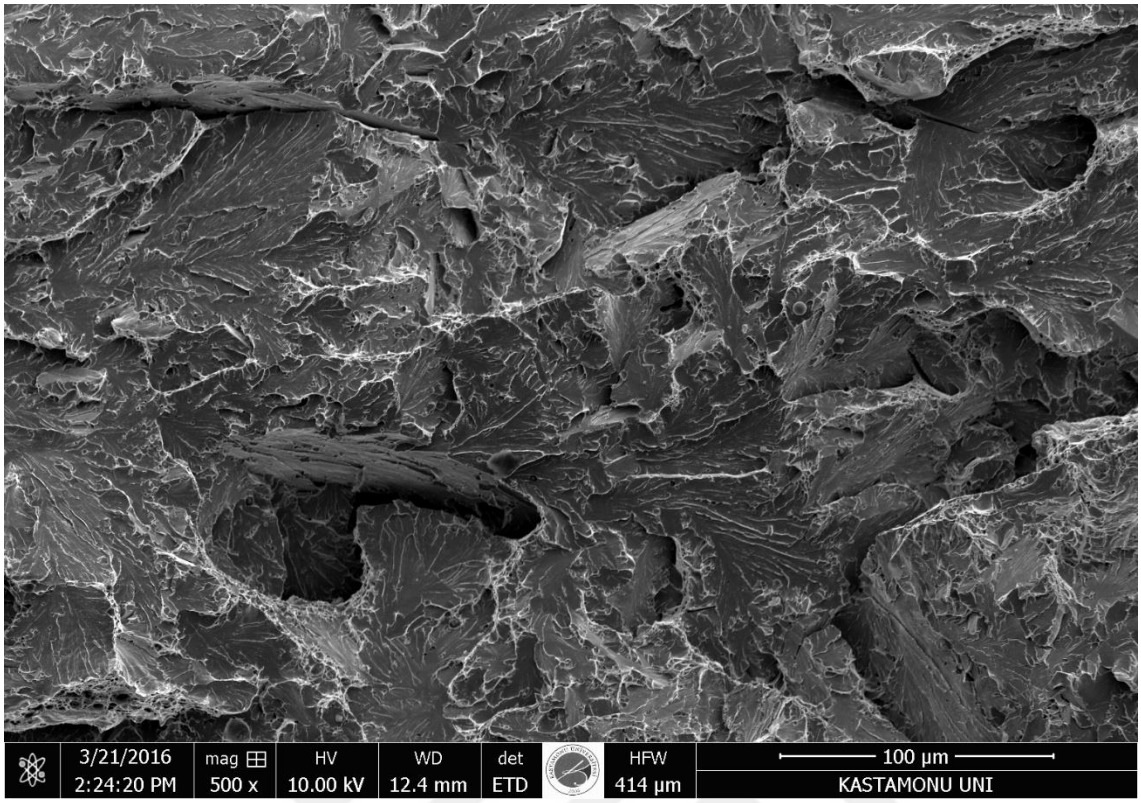
Resim 8.39. 9 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



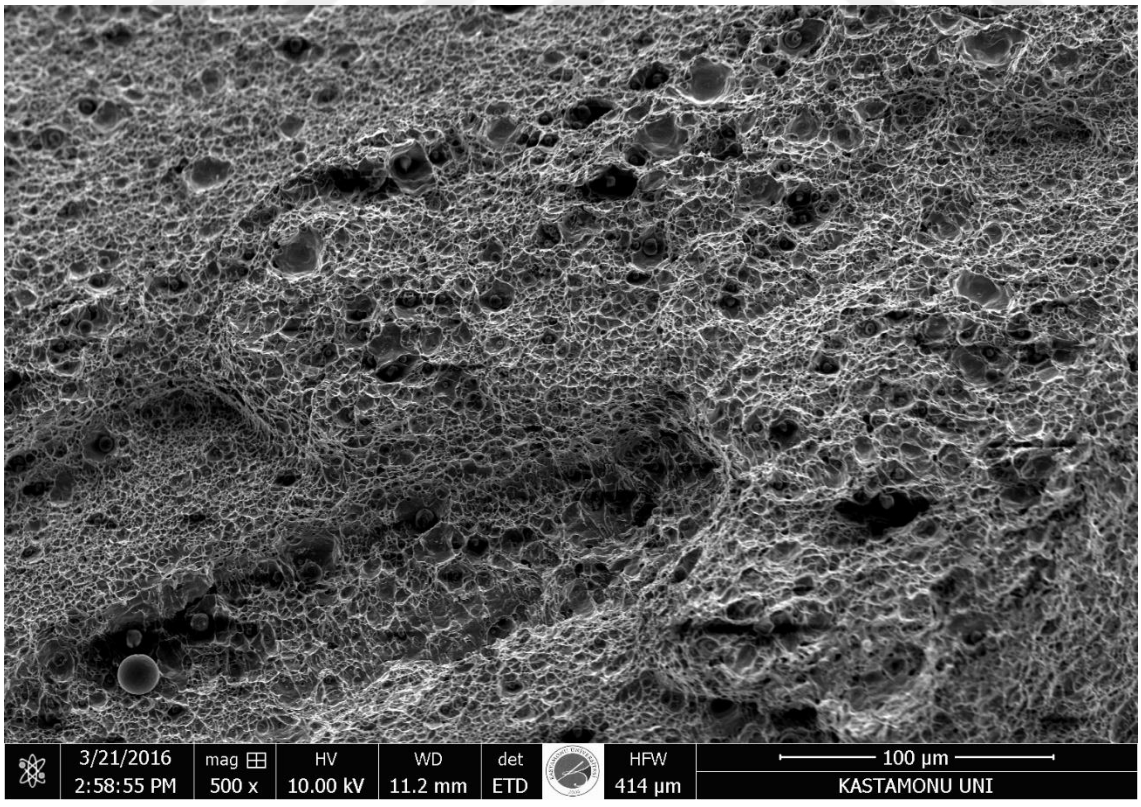
Resim 8.40. 10 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



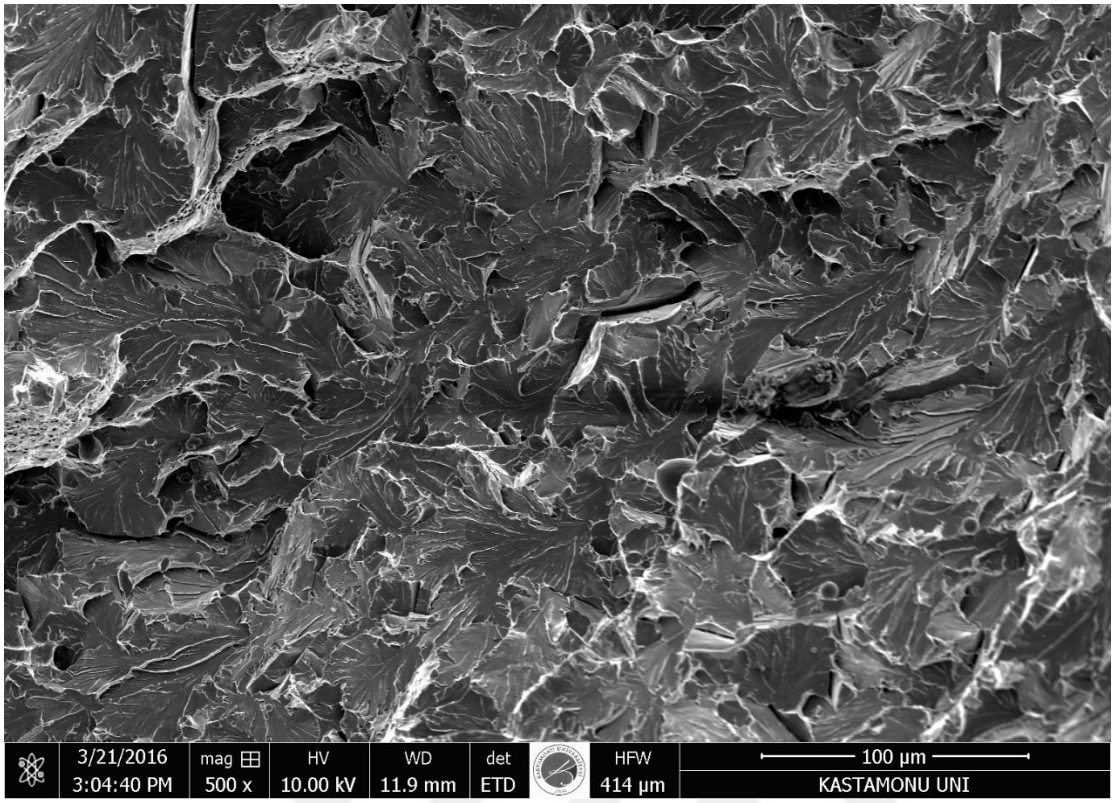
Resim 8.41. 11 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



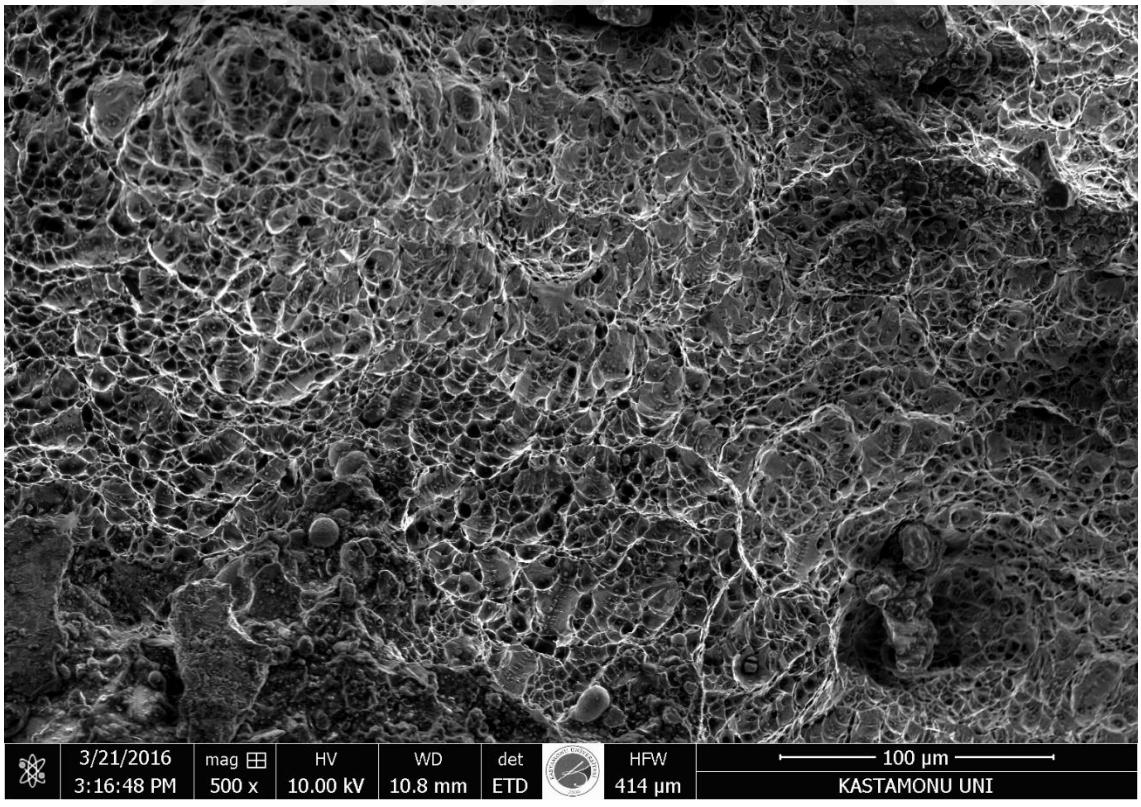
Resim 8.42. 12 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



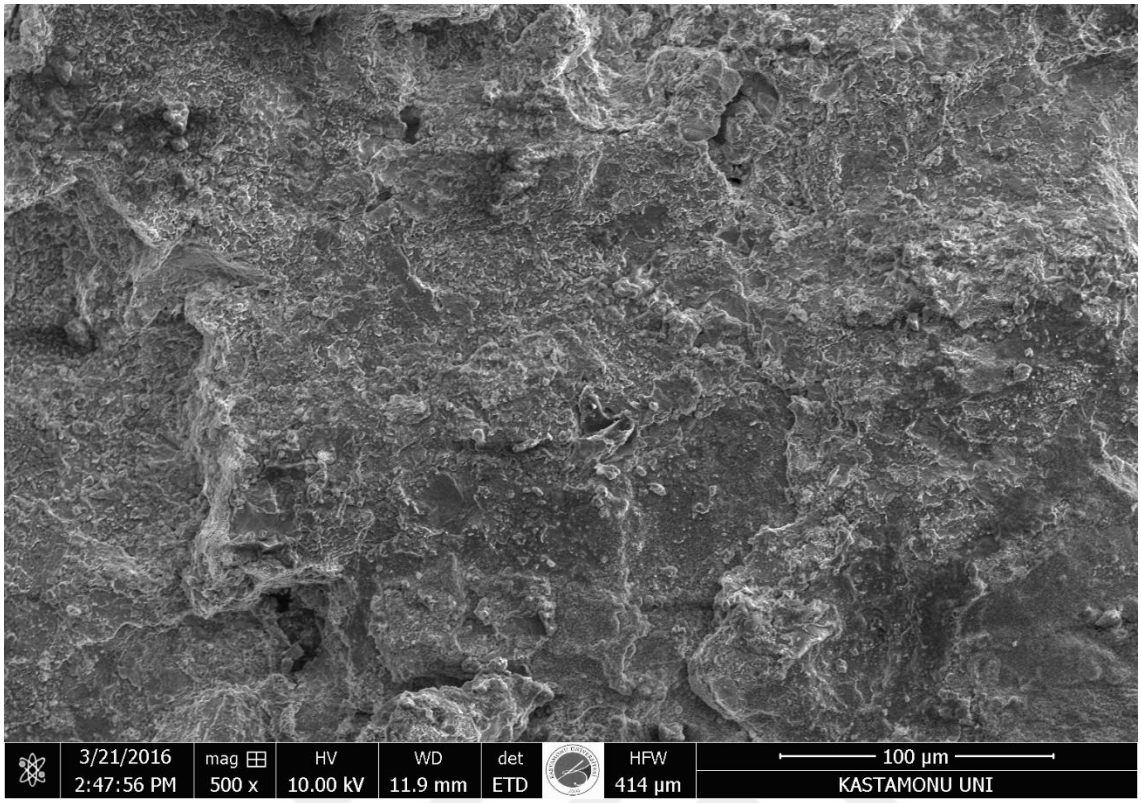
Resim 8.43. 13 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



Resim 8.44. 14 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



Resim 8.45. 15 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü



Resim 8.46. 16 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüsü

Kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde tanelerin sergilediği uzama ve yönlenmeden, kaynaklı birleştirmelerin genel olarak sünek bir davranış sergilediği ancak bazı bölgelerde (Resim 8.31, 8.34, 8.35, 8.36, 8.42 ve 8.44) oluşan klivaj kırılmaları nedeniyle gevrek kırılmaların olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kopması genel olarak kayma kırılması sonucu oluşmuştur. Kayma kırılması sonucu oluşan kırılmalar, SEM görüntülerinde lifli yapıları oluşturmaktadır. Ayrıca, kırılmalar plastik deformasyonun etkisi ile oluştuğundan sünek özellik göstermektedir. SEM incelemelerindeki eş eksenli peteksi görüntülerden, kırılmaların sünek bir davranış sergilediği anlaşılmaktadır. Yine kırılmalar tek parçalı olarak gerçekleştiği için bu durum yine sünek kopmayı işaret etmektedir [150]. Mikro ölçekte kırılma yüzeylerinde petek görünümü oluşmuştur. Literatürde [150]; dislokasyon hareketleri kalıntılarda ve tane sınırlarında sonlandığı için bu bölgelerde önce boşlukların oluştuğu, sonra bu boşlukların birleşerek genişlediği ve kırılma yüzeylerinin mat ve lifli yapıda oluştuğu belirtilmiştir. Bu durum bizim çalışmamızla benzerlik arz etmektedir. Boşluklar yeterince büyüdüğünde ise aralarında köprü oluşur ve petek görünümü meydana gelir. Bu yüzden görüntülerde lifli bir yapı ile beraber petek görünümünü de görmek mümkündür.

Yine deneylerde kullanılan API 5L X65 boru çeliğinin mikroyapısı az perlitli ferritik matriksten oluşmaktadır. Mikroyapının sahip olduğu tane büyüklüğü, perlit hacim oranı ve mikroalaşım elementi oranı, kırılma davranışı üzerine etki etmektedir. Ferrit hacim oranının artmasıyla kırılma mekaniği özellikleri iyileşmektedir. X65 tipi çelik gerek tane boyutunun küçüklüğü, gerekse ferrit hacim oranının yüksekliği açısından üstün özelliklere sahiptir. Tokluk, mukavemet ve kaynaklanabilirlik için en etkili yöntem ise tane boyutunun küçültülmesidir. İnce taneli yapının tokluğu yükseltmesi akma sınırının yükselmesiyle izah edilmektedir; tane büyüklüğünün düşmesiyle plastik deformasyon başlangıcı daha yüksek gerilimlere ötelenmektedir. Bu nedenle numunelerdeki kopmalarda deformasyon başlangıcı daha yüksek gerilimlere ötelenmiş ve kırılma mekaniği özellikleri iyileşmiştir [151]. İncelediğimiz X65 malzemenin sünek bir davranış sergilemesinden dolayı malzeme çatlak sonunda şekil değiştirmekte ve çatlak ucu kütleşmektedir. Böylece gerilim yığılma faktörü azalmakta ve çatlağın daha da ilerlemesi engellenmektedir. Böyle durumlarda numunenin daha fazla enerji absorbe ettiği ve ana çatlağın ilerleme hızının yavaşladığı Taş [152] tarafından da belirtilmiştir. Çalışmamız bu özellikleriyle literatürle benzer sonuçlar sergilemiştir.

8.7. Çentik – Darbe Testi

Ana malzeme ve kaynaklı birleştirilen malzemelerden elde edilen numunelere 0ºC'de çentik darbe testi uygulanmıştır. Ana malzemeye ait sonuçlar Çizelge 8.4'te verilmiştir.

Çizelge 8.4. Ana malzeme çentik – darbe test sonuçları

Bölge	Numune	Darbe Enerjisi 0ºC (Joule)
Ana malzeme	1	196
	2	228
	3	198
	4	216
	5	206
	Ortalama	209

Ana malzemeye 5 adet numune ile uygulanan çentik darbe testi sonuçları neticesinde esas metal ortalama darbe dayanım değeri 209 Joule olarak ölçülmüştür.

Taguchi metodu ile oluşturulan deney düzeneği kapsamında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelere ait çentik darbe test numuneleri kaynak metalinin darbe dayanımını ölçmek maksadıyla, çentik kaynak metali merkezini ortalayacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelere uygulanan testlerin sonuçları ise Çizelge 8.5'te verilmiştir.

Çizelge 8.5. Kaynaklı birleştirmelerin çentik – darbe test sonuçları

Deney No	Kaynak Yönü / Elektrod Türü / Akım Şiddeti Aralığı	Saat Pozisyonu	Darbe Enerjisi 0ºC (Joule)	Deney No	Kaynak Yönü / Elektrod Türü / Akım Şiddeti Aralığı	Saat Pozisyonu	Darbe Enerjisi 0ºC (Joule)
1	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 110 – 140 A	06.00 – 07.30	135	2	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 110 – 140 A	12.00 – 01.30	128
		07.30 – 09.00	128			01.30 – 03.00	129
		09.00 – 10.30	127			03.00 – 04.30	130
		10.30 – 12.00	122			04.30 – 06.00	134
		Ortalama	128			Ortalama	130
3	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 120 – 150 A	06.00 – 07.30	138	4	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 120 – 150 A	12.00 – 01.30	136
		07.30 – 09.00	136			01.30 – 03.00	137
		09.00 – 10.30	133			03.00 – 04.30	138
		10.30 – 12.00	128			04.30 – 06.00	140
		Ortalama	134			Ortalama	138
5	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 130 – 160 A	06.00 – 07.30	142	6	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 130 – 160 A	12.00 – 01.30	137
		07.30 – 09.00	141			01.30 – 03.00	138
		09.00 – 10.30	139			03.00 – 04.30	138
		10.30 – 12.00	133			04.30 – 06.00	143
		Ortalama	139			Ortalama	139
7	Aşağıdan yukarı ↑ / Selülozik / 140 – 170 A	06.00 – 07.30	148	8	Yukarıdan aşağı ↓ / Bazik / 140 – 170 A	12.00 – 01.30	146
		07.30 – 09.00	143			01.30 – 03.00	147
		09.00 – 10.30	141			03.00 – 04.30	147
		10.30 – 12.00	139			04.30 – 06.00	152
		Ortalama	143			Ortalama	148
9	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 150 – 180 A	06.00 – 07.30	154	10	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 150 – 180 A	12.00 – 01.30	143
		07.30 – 09.00	153			01.30 – 03.00	146
		09.00 – 10.30	148			03.00 – 04.30	147
		10.30 – 12.00	144			04.30 – 06.00	151
		Ortalama	150			Ortalama	147
11	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 160 – 190 A	06.00 – 07.30	159	12	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 160 – 190 A	12.00 – 01.30	147
		07.30 – 09.00	157			01.30 – 03.00	148
		09.00 – 10.30	153			03.00 – 04.30	148
		10.30 – 12.00	147			04.30 – 06.00	153
		Ortalama	154			Ortalama	149

Çizelge 8.5. (devam) Kaynaklı birleştirmelerin çentik – darbe test sonuçları

13	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 170 – 200 A	06.00 – 07.30	167	14	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 170 – 200 A	12.00 – 01.30	149
		07.30 – 09.00	161			01.30 – 03.00	150
		09.00 – 10.30	159			03.00 – 04.30	154
		10.30 – 12.00	159			04.30 – 06.00	159
		Ortalama	**161**			**Ortalama**	**153**
15	Aşağıdan yukarı ↑ / Bazik / 180 – 210 A	06.00 – 07.30	171	16	Yukarıdan aşağı ↓ / Selülozik / 180 – 210 A	12.00 – 01.30	158
		07.30 – 09.00	167			01.30 – 03.00	163
		09.00 – 10.30	167			03.00 – 04.30	163
		10.30 – 12.00	165			04.30 – 06.00	166
		Ortalama	**168**			**Ortalama**	**162**

Çizelge 8.5'te verilen kaynaklı birleştirmelerin çentik – darbe test sonuçları incelendiğinde; kaynak metalinden alınan çentik darbe numunelerinin darbe dayanımları için en yüksek dayanım 15 numaralı deneyde ortalama 168 Joule olarak tespit edilmiştir. Deneyler içerisinde en düşük darbe dayanımı ise 1 numaralı deneyden elde edilen 128 Joule darbe dayanımı değeridir.

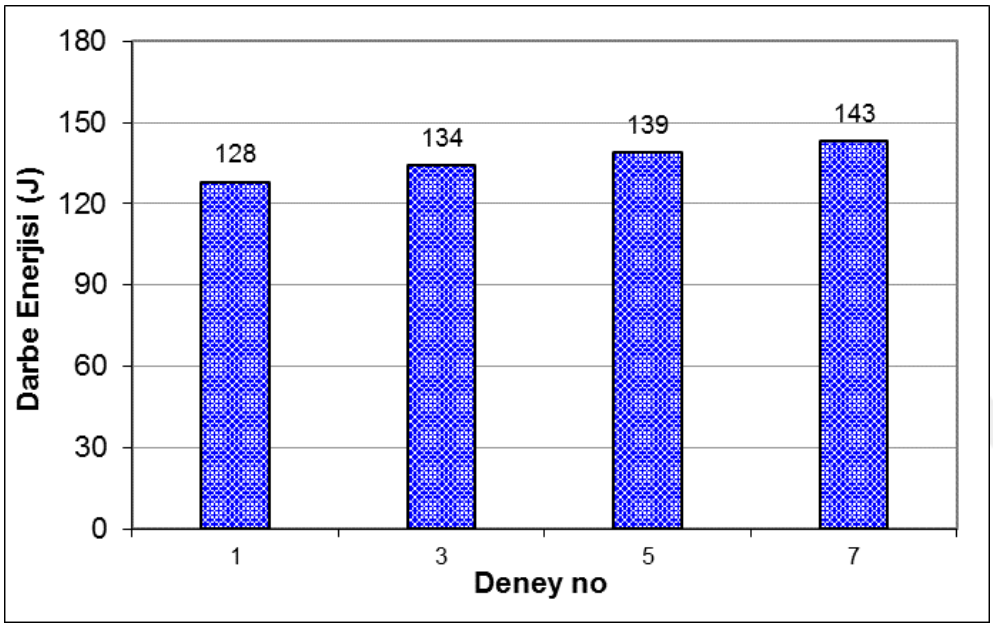
Her bir deneyde, boru kaynağının pozisyon etkileri düşünülerek, Şekil 7.2'de verilen bölgelerden alınan numunelerin çentik darbe test sonuçları birbiri içerisinde mukayese edildiğinde ise; darbe enerjisinin kaynak yönüne ve borunun pozisyonuna göre farklılıklar arz ettiği görülmektedir. Aşağıdan yukarı yapılan deneyler incelendiğinde en yüksek darbe enerjilerinin tavan pozisyonu olan 6:00 – 7:30 saat pozisyonundan elde edildiği, en düşük dayanımın ise alın kaynağı pozisyonu olan 10:30 – 12:00 saat pozisyonundan elde edildiği görülmektedir. Yine yukarıdan aşağı kaynak pozisyonunda alın kaynağı pozisyonu olan 12:00 – 01:30 saat pozisyonunda daha düşük darbe enerjileri ölçülürken, tavan pozisyonu olan 04:30 – 06:00 saat pozisyonunda daha yüksek darbe enerjileri ölçülmüştür. Bu duruma yine tüm incelemelerde etkilerini tespit ettiğimiz ısı girdisi sebep olmaktadır. Isı girdisinin etkisi ile taneler irileşmiş, sertlik düşmüş, malzemelerin darbeleri absorbe edebilme gücü olan darbe dayanımları artmıştır. Ayrıca yapılan incelemelerde sertlik ile darbe dayanımı arasında ters orantılı biri ilişki olduğu görülmüştür. Isı girdisinin etkisi ile sertliğin düştüğü deneylerde darbe dayanım değerlerinin artışı göze çarpmakta, sertliğin yüksek olduğu ölçümlerde ise tokluğun düşük değerler sergilediği görülmüştür.

Kaynak yönü ve elektrod türünün birleştirmelerin darbe dayanımlarına etkilerini daha iyi belirleyebilmek için daha önceki incelemelerde olduğu gibi tüm deneyler kendi içerisinde

gruplandırılarak ayrı incelemeler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu incelemeler aşağıdaki gibidir.

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 1, 3, 5 ve 7'den elde edilen ve kaynak metali merkezinden çentik açılarak kırılan numunelerin çentik darbe testi sonuçlarına ait grafikler Şekil 8.29'da verilmiştir.



Şekil 8.29. Aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü

Yukarıda Şekil 8.29'da verilen çentik – darbe deney sonuçları incelendiğinde, akım şiddeti değerinin artmasıyla birlikte tokluk değerlerinde artış görülmektedir. Deneylerdeki en düşük akım şiddeti aralığında (110 – 140 A) en düşük dayanım değeri 128 Joule olarak 1 numaralı deneyde ölçülürken, en yüksek darbe enerjisi 143 Joule ile 7 numaralı deneyde ölçülmüştür.

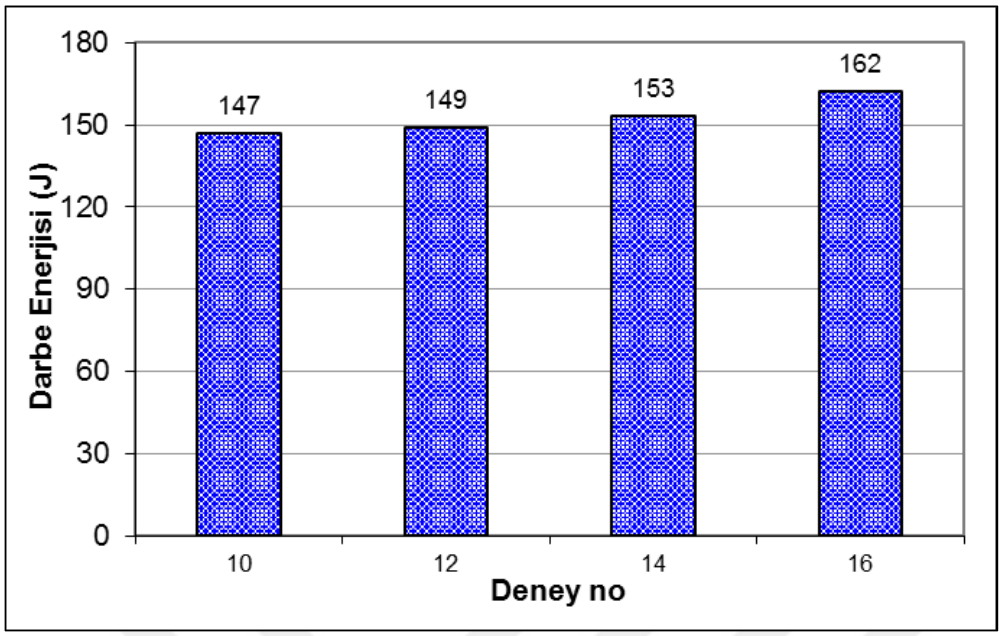
Saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde (Çizelge 8.5) ise grup içinde yer alan tüm deneylerde en yüksek tokluk değerinin tavan pozisyonu olan 6:00 – 7:30 saat pozisyonu bölgesinden alınan numunelerden ölçüldüğü görülmektedir. Alın kaynağı pozisyonu olan 10:00 – 12:00 saat pozisyonundan alınan numunelerin darbe dayanım değerlerinde ise bu durumun tam tersi olarak en düşük sonuçlar görülmektedir. Bu duruma

neden olarak yine ısı girdisinin ve dolayısıyla soğuma hızının etkileri söylenebilir. Isı girdisi ve soğuma hızı, mikroyapı (ITAB genişliği ve tane yapısı) ve mukavemet-yüzde uzama ve sertlik değerlerine etki ettiği gibi, tokluk davranışını da etkilemektedir. Isı girdisinin yoğun olduğu, tavan pozisyonu olarak bilinen 6:00 – 7:30 saat pozisyonundan alınan numuneden elde edilen tokluk sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlenirken, ısı girdisinin daha düşük olduğu, yatayda alın kaynağı pozisyonu olan 10:30 – 12:00 saat pozisyonunda daha düşük ısı girdisi ve daha hızlı soğuma nedeniyle taneler daha küçük yapıda kalmış, bu da tokluk değerlerinin diğer pozisyonlardan daha düşük değerler göstermesine neden olmuştur. Tüm deneylerde bu durum söz konusudur.

Akım şiddetinin değişken olduğu durum göz önüne alındığında ise akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yine yukarıda bahsedilen sebepler nedeniyledir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmakta, ısı girdisinin artışına doğru orantılı olarak da tokluk değerleri artış göstermektedir. Bariz bir dalgalanma olmasa da yukarıdaki sonuçlardan artan akım şiddeti değerleri ile birlikte tokluk değerlerinin arttığı net olarak görülmektedir. Yukarıdaki deney gruplandırmaları baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek tokluk değerlerinin daha yüksek ısı girdisine sahip olan 7 numaralı deneyde olduğu gözlemlenirken, en düşük ısı girdisi miktarının olduğu 1 numaralı deneyde ise en düşük tokluk değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Malzemenin tokluk değerlerinin yine mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda da, bu durum görülmüştür.

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 10, 12, 14 ve 16'dan elde edilen ve kaynak metali merkezinden çentik açılarak kırılan numunelerin çentik darbe testi sonuçları Şekil 8.30'da verilmiştir.



Şekil 8.30. Yukarıdan aşağı yönde selülozik elektrodla gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü

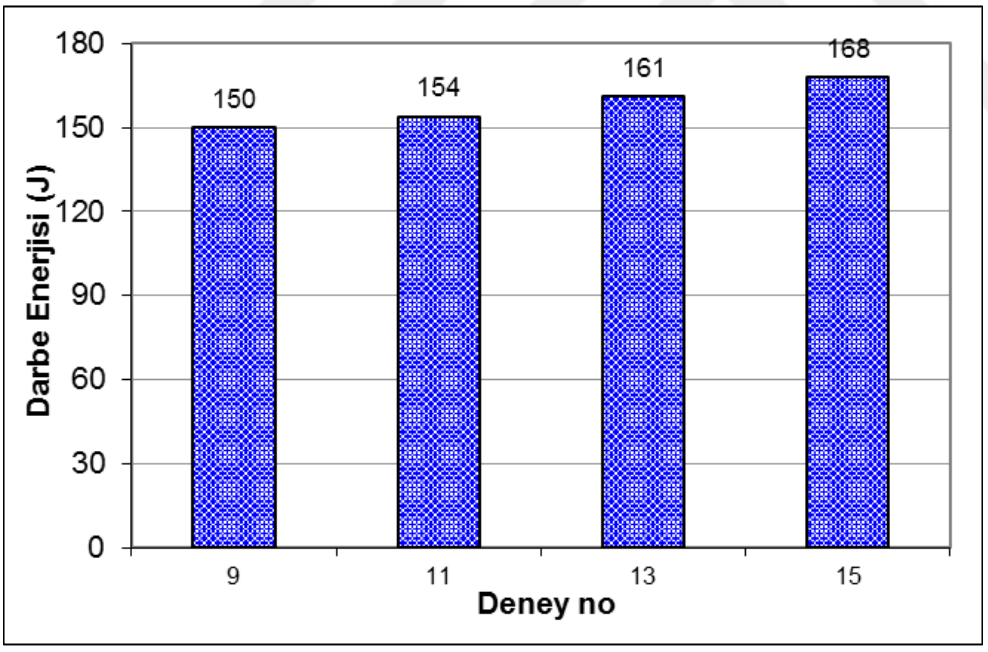
Yukarıdaki grafikte verilen çentik – darbe deney sonuçları incelendiğinde, aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerdeki gibi akım şiddeti değerinin artmasıyla birlikte tokluk değerlerinde artış görülmektedir. Deneylerdeki en düşük akım şiddeti aralığında (150 – 180 A) en düşük dayanım değeri 147 Joule olarak 10 numaralı deneyde ölçülürken, en yüksek darbe enerjisi 162 Joule ile 16 numaralı deneyde ölçülmüştür.

Saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde ise (Çizelge 8.5) grup içinde yer alan tüm deneylerde en yüksek tokluk değerinin tavan pozisyonu olan 04:30 – 06:00 saat pozisyonu bölgesinden alınan numunelerden ölçüldüğü görülmektedir. Alın kaynağı pozisyonu olan 12:00 – 01:30 saat pozisyonundan alınan numunelerin darbe dayanım değerlerinde ise bu durumun tam tersi olarak en düşük sonuçlar görülmektedir. Bu duruma neden olarak yine daha önceki tespitlerde olduğu gibi ısı girdisinin etkileri söylenebilir. Isı girdisi tokluk davranışını da etkilemiştir. Isı girdisinin yoğun olduğu, tavan pozisyonu olarak bilinen 4:30 – 6:00 saat pozisyonundan alınan numuneden elde edilen tokluk sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlenirken, ısı girdisinin daha düşük olduğu, yatayda alın kaynağı pozisyonu olan 12:00 – 13:30 saat pozisyonunda daha düşük ısı girdisi ve daha hızlı soğuma nedeniyle taneler daha küçük yapıda kalmış, bu da tokluk değerlerinin diğer pozisyonlardan daha düşük değerler göstermesine neden olmuştur. Tüm deneylerde bu durum yine söz konusudur.

Akım şiddetinin değişken olduğu durum göz önüne alındığında ise akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte aşağıdan yukarı yöndeki deneylerde olduğu gibi tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum ısı girdisi nedeniyledir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmakta, ısı girdisinin artışına doğru orantılı olarak da tokluk değerleri artış göstermektedir. Yukarıdaki deney gruplandırmaları baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek tokluk değerlerinin daha yüksek ısı girdisine sahip olan 16 numaralı deneyde olduğu gözlemlenirken, en düşük ısı girdisi miktarının olduğu 10 numaralı deneyde ise en düşük tokluk değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 7.7'de verilen parametreler dâhilinde, akım şiddeti miktarı tek değişken olarak aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile birleştirilen 9, 11, 13 ve 15 numaralı deneylerden elde edilen çentik – darbe testi sonuçları Şekil 8.31'de verilen grafikteki gibidir.



Şekil 8.31. Aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü

Şekil 8.31'deki grafikte verilen çentik – darbe deney sonuçları incelendiğinde, selülozik elektrodla yapılan deneylerdeki gibi akım şiddeti değerinin artmasıyla birlikte tokluk değerlerinde artış görülmektedir. Deneylerdeki en düşük akım şiddeti aralığında (150 – 180

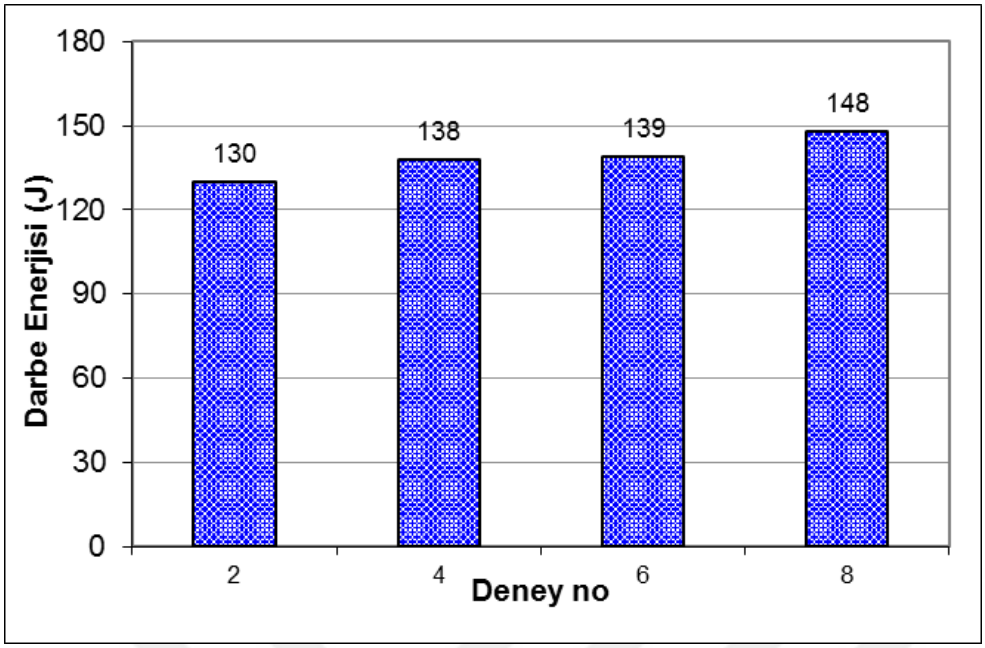
A) en düşük dayanım ortalama değeri 150 Joule olarak 11 numaralı deneyde ölçülürken, en yüksek darbe enerjisi 168 Joule ile 15 numaralı deneyde ölçülmüştür.

Saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde ise (Çizelge 8.5) grup içinde yer alan tüm deneylerde en yüksek tokluk değerinin tavan pozisyonu olan 6:00 – 7:30 saat pozisyonu bölgesinden alınan numunelerden ölçüldüğü görülmüştür. Alın kaynağı pozisyonu olan 10:30 – 12:00 saat pozisyonundan alınan numunelerin darbe dayanım değerlerinde ise bu durumun tam tersi olarak en düşük sonuçlar görülmüştür. Bu duruma neden olarak yine soğuma hızının etkileri söylenebilir. Soğuma hızı, mikroyapı (ITAB genişliği ve tane yapısı) ve mukavemet-yüzde uzama ve sertlik değerlerine etki ettiği gibi, tokluk davranışını da etkilemektedir. Soğuma hızının yavaş olduğu, tavan pozisyonu olarak bilinen 6:00 – 7:30 saat pozisyonundan alınan numuneden elde edilen tokluk sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlenirken, hızın daha düşük olduğu, yatayda alın kaynağı pozisyonu olan 10:30 – 12:00 saat pozisyonunda daha düşük ısı girdisi nedeniyle taneler daha küçük yapıda kalmış, bu da tokluk değerlerinin diğer pozisyonlardan daha düşük değerler göstermesine neden olmuştur. Tüm deneylerde bu durum söz konusudur.

Akım şiddetinin değişken olduğu durum göz önüne alındığında ise akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yine yukarıda bahsedilen sebepler nedeniyledir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmakta, ısı girdisinin artışına doğru orantılı olarak da tokluk değerleri artış göstermektedir. Bariz bir dalgalanma olmasa da yukarıdaki sonuçlardan artan akım şiddeti değerleri ile birlikte tokluk değerlerinin arttığı net olarak görülmektedir. Yukarıdaki deney gruplandırmaları baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek tokluk değerlerinin daha yüksek ısı girdisine sahip olan 15 numaralı deneyde olduğu gözlemlenirken, en düşük ısı girdisi miktarının olduğu 11 numaralı deneyde ise en düşük tokluk değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

<u>Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneyler</u>

Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen Deney 2, Deney 4, Deney 6 ve Deney 8’den elde edilen çentik – darbe test sonuçları sırasıyla aşağıdaki grafikte Şekil 8.32’de verilmiştir.



Şekil 8.32. Yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerin çentik – darbe testi sonuçlarının grafik görüntüsü

Yukarıdaki grafikte verilen çentik – darbe test sonuçları incelendiğinde, bazik elektrodla yapılan ve aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerdeki gibi yukarıdan aşağı yönde de akım şiddeti değerinin artmasıyla birlikte tokluk değerlerinde artış görülmüştür. Deneylerdeki en düşük akım şiddeti aralığında (110 – 140 A) en düşük dayanım değeri 130 Joule olarak 2 numaralı deneyde ölçülürken, en yüksek darbe enerjisi 148 Joule ile 8numaralı deneyde ölçülmüştür.

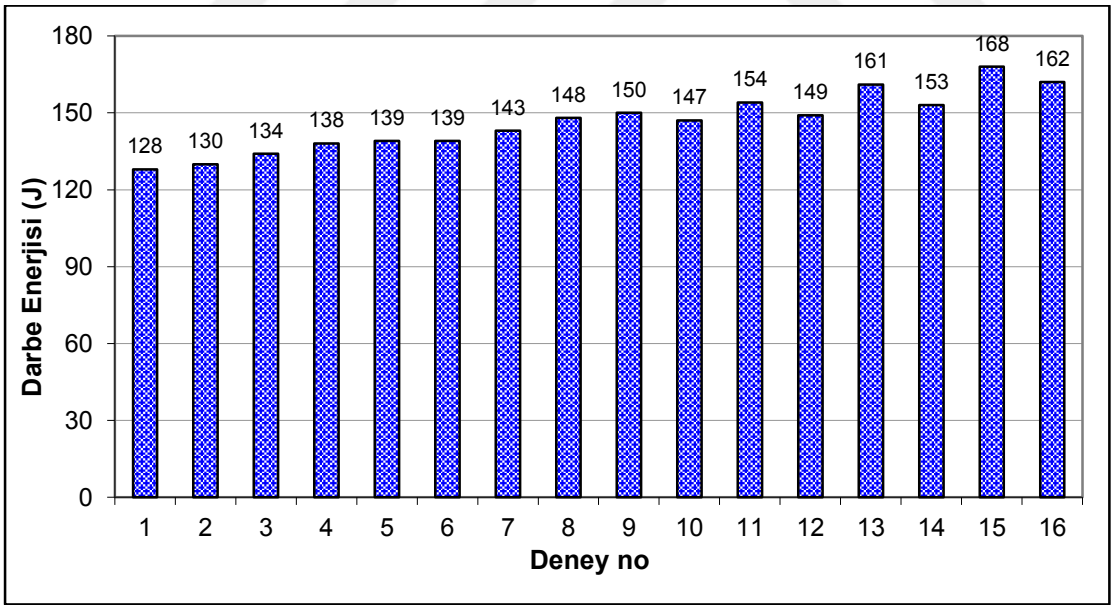
Saat pozisyonları baz alınarak yapılan incelemelerde ise (Çizelge 8.5) grup içinde yer alan tüm deneylerde en yüksek tokluk değerinin tavan pozisyonu olan 04:30 – 06:00 saat pozisyonu bölgesinden alınan numunelerden ölçüldüğü, alın kaynağı pozisyonu olan 12:00 – 01:30 saat pozisyonundan alınan numunelerin darbe dayanım değerlerinde ise bu durumun tam tersi olarak en düşük sonuçlar ölçüldüğü görülmüştür. Bu duruma neden olarak yine daha önceki tespitlerde olduğu gibi ısı girdisi ve soğuma hızının etkileri söylenebilir. Isı girdisinin yoğun, soğuma hızının ise daha uzun olduğu, tavan pozisyonu olarak bilinen 4:30 – 6:00 saat pozisyonundan alınan numuneden elde edilen tokluk sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlenirken, ısı girdisinin daha düşük, soğuma süresinin ise daha kısa olduğu, yatayda alın kaynağı pozisyonu olan 12:00 – 13:30 saat pozisyonunda daha düşük tokluk sonuçları elde edilmiştir. Yine düşük ısı girdisi ve daha

hızlı soğuma nedeniyle taneler daha küçük yapıda oluşmuştur. Bu da tokluk değerlerinin diğer pozisyonlardan daha düşük değerler göstermesine neden olmuştur.

Akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte aşağıdan yukarı yöndeki deneylerde olduğu gibi yukarıdan aşağı yönde gerçekleşen deneylerde tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yine ısı girdisi nedeniyledir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin artışıyla birlikte tokluk değerleri de artış göstermiştir. Yukarıda verilen çizelgedeki gruplandırmalar baz alınarak yapılan incelemelerde en yüksek tokluk değerlerinin daha yüksek ısı girdisine sahip olan 8 numaralı deneyde olduğu gözlemlenirken, en düşük ısı girdisi miktarının olduğu 2 numaralı deneyde ise en düşük tokluk değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Genel değerlendirme

Çentik – darbe test sonuçlarını genel olarak mukayese edebilmek için Şekil 8.33'te görülen çentik – darbe testi genel sonuçlar grafiği hazırlanmıştır.



Şekil 8.33. Tüm deneylere ait çentik – darbe test sonuçlarının grafik gösterimi

Yukarıdaki grafik incelendiğinde grup bazında yapılan incelemelerde en yüksek tokluk sonuçları, aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden (9, 11, 13 ve 15 numaralı) elde edilirken, en düşük tokluk sonuçları aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden (1, 3, 5 ve 7) elde edilmiştir. Deneyler baz

alınarak yapılan incelemelerde ise en yüksek darbe dayanımı 168 Joule'lük bir enerji absorblayan 15 numaralı deneyde görülürken, en düşük darbe dayanımı 128 Joule'lük bir enerjiyi absorblayan 1 numaralı deneyde ölçülmüştür.

Akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte deneylerde tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum ısı girdisi ve soğuma hızıyla ilişkilidir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin artışıyla birlikte tokluk değerleri de artış göstermiştir.

Kaynak yönü irdelendiğinde ise aşağıdan yukarı gerçekleştirilen deneylerde yine oluşan ısı girdisi ve buna bağlı olarak soğuma hızının etkisiyle daha yüksek tokluk değerleri görülmüştür.

Elektrod türlerini mukayese ettiğimizde ise kimyasal özelliklerinden dolayı bazik elektrodda darbe dayanımı daha yüksek değerler gösterirken, elektrod örtüsündeki maddeler nedeniyle yandığında daha fazla ısı girdisi oluşması ve soğuma süresinin artması selülozik elektrodun darbe dayanım değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Çentik – darbe testlerinden elde edilen darbe enerjisi sonuçları ile sertlik sonuçları birbirleri ile ilişkilendirildiğinde, sertlik ile tokluk arasında ters orantılı bir ilişki olduğu göze çarpmaktadır. Sertlik testlerinde yüksek kaynak metali sertliğinin ölçüldüğü deneylerde, çentik – darbe testleri için en düşük darbe enerjilerinin ölçüldüğü tespit edilmiştir. Tam tersi olarak yüksek darbe enerjilerinin ölçüldüğü deneylerde, sertlik numunelerinin kaynak metalinde düşük sertlik değerleri gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar çalışmamızda elde edilen sonuçları destekler niteliktedir [6, 7].

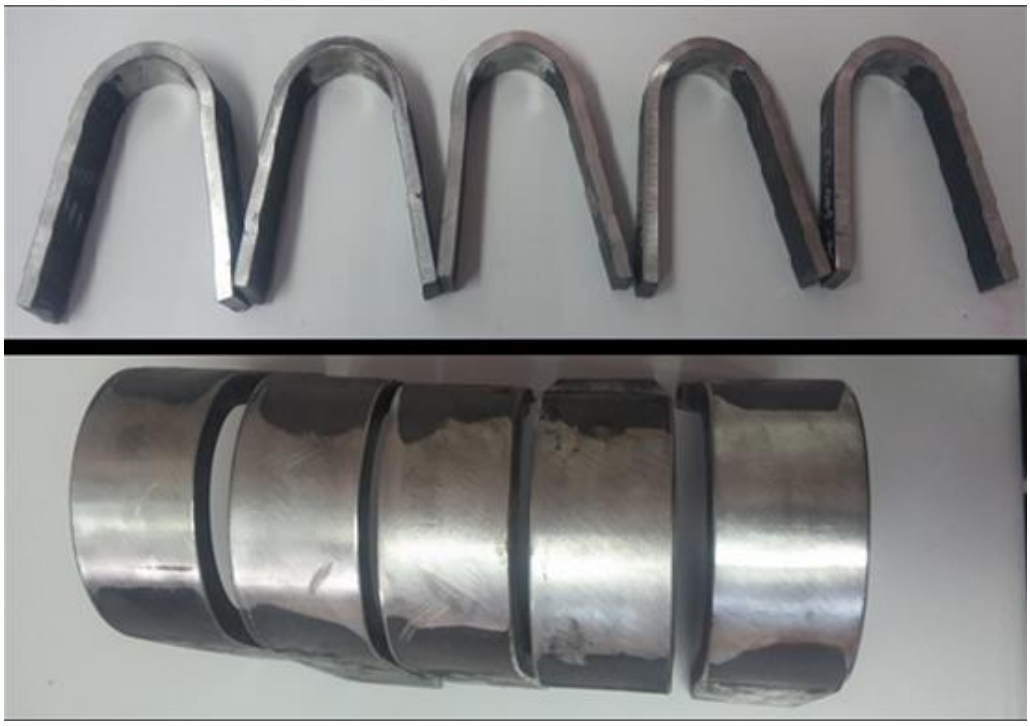
8.8. Eğme Testi

Eğme testleri; kaynaklı malzemelerde makro düzeyde bir hatanın oluşup oluşmadığını görmek için Çizelge 8.6'da verilen 118 mm mandrel çapı ve 146,6 mm kalıp mesafesinde kaynağın her iki yönüne (kök ve yüzey) uygulanmıştır. 180° açıda uygulanan eğme deneylerinde, malzemelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür. Eğme testi sonuçları birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığını

göstermektedir. Resim 8.47'de eğme deneyi uygulanmış bir deney grubuna ait numunelerin farklı açılardan görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 8.6. Eğme testi sonuçları

Deney No	Numune No	Mandrel Çapı (mm)	Kalıp Mesafesi (mm)	Kök Bükme		Yüzey Bükme	
				Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
1	1-5	118	146,6	180°	Hata yok	180°	Hata yok
2					Hata yok		Hata yok
3					Hata yok		Hata yok
4					Hata yok		Hata yok
5					Hata yok		Hata yok
6					Hata yok		Hata yok
7					Hata yok		Hata yok
8					Hata yok		Hata yok
9					Hata yok		Hata yok
10					Hata yok		Hata yok
11					Hata yok		Hata yok
12					Hata yok		Hata yok
13					Hata yok		Hata yok
14					Hata yok		Hata yok
15					Hata yok		Hata yok
16					Hata yok		Hata yok



Resim 8.47. Eğme testi sonrası numunelerin görüntüleri

Resim 8.47'deki eğme testi sonrası bir deney grubuna ait görüntüler incelendiğinde; 180º bükülerek iki yönlü (kep ve kök) olarak yapılan eğme testleri sonucunda birleştirilen numunelerin tümünün birleşim ara yüzeyinde gözle görülebilir herhangi bir ayrılma veya çatlama hatasının oluşmadığı göz muayenesi ile tespit edilmiştir. Eğme numunelerinde kaynak metali içerisinde bulunan mikro gözenekler ve inklüzyonlar çatlak oluşumuna neden olmamıştır. Bu durum, malzemelerin birleştirilmesinin uygun bir şekilde yapıldığını ve bu tür kaynaklı bağlantıların 180º eğilerek servis şartlarında kolaylıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Eğme deneyleri esnasında numunelerin iç yüzeylerinde basma, dış yüzeylerinde ise çekme gerilmeleri meydana gelmekte, dolayısıyla iç yüzeylerde genleşme, dış yüzeylerde ise az miktarda kesit daralması oluşmaktadır. Eğer, eğme testinde kaynaklı bağlantı her hangi bir hasara uğramadan eğilebiliyorsa, birleştirmelerin sağlıklı olduğunun göstergesi olarak yorumlanabilir.

9. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Deney ve model çalışmalarında iki farklı yöntem uygulanmıştır. İlk kısımda daha önceki aşamalarda da anlatıldığı üzere deneysel çalışmalar yapılmış ve deney şartları belirlenirken Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. İkinci kısımda ise deneysel çalışmada elde edilen verilerini değerlendirme ve optimizasyon çalışmaları için yine Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit edebilmek için API 1104 standardında ve literatürde yaygın olarak belirtilen mekanik test yöntemleri tercih edilmiştir.

Deneylerde kullanılan iş parçası, elektrod ve diğer ekipmanların (kaynak makinesi, test cihazları) bilgileri ile kaynak parametreleri daha önce Bölüm 7'de Materyal ve Metot kısmında verildiği için, bu bölümde söz konusu konulara yeniden değinilmemiş, detaylı olarak Deney Düzeneği ve Sonuçlar üzerinde durulmuştur.

9.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmadaki en önemli amaç, endüstriyel uygulamalara katkı sağlayarak, gerçek ve akılcı çözümler üretebilmektir. Bu amaç dikkate alınarak, faktör seçiminde günümüz boru yapım işlerinde kullanılan süreç parametreleri, işletme şartları ve kaynak yöntemleri tercih edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda; doğalgaz ve petrol taşımacılığında kullanılan boru malzemesi toprak kayması, göçük gibi dış kuvvetlerin sebep olduğu plastik deformasyona maruz kalabileceği için, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olan X65 malzemesi tercih edilmiştir. Kaynak işlemlerinde ise akım şiddeti değeri, elektrod türü (Selülozik ve Bazik) ve kaynak yönü (aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı) gibi parametreler dikkate alınmıştır. En uygun faktörlerin seçilerek, kaynaklı birleştirmeler için en uygun mekanik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Deneylerde 110-140, 120-150, 130-160, 140-170, 150-180, 160-190, 170-200 ve 180-210 A akım şiddeti değerleri kullanılmış, borular iki farklı yönde (aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönde) olmak üzere, iki farklı elektrod türü (selülozik ve bazik) ile birleştirilmiştir.

Belirlenen faktör ve seviyeler ile Taguchi L_{16} deney düzeneği kapsamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen faktör ve seviyeler Çizelge 9.1'de, Taguchi L_{16} deney düzeneği ise Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Deney faktörleri ve seviyeleri

Sembol	Kaynak Parametreleri	Seviyeler							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Akım Şiddeti Değerleri (A)	110–140	120–150	130-160	140-170	150-180	160-190	170–200	180–210
B	Kaynak Yönü	Aşağıdan yukarı ↑	Yukarıdan Aşağı ↓	-	-	-	-	-	-
C	Elektrod Türü	Selülozik	Bazik	-	-	-	-	-	-

Çizelge 9.2. Taguchi L_{16} deney düzeneği

Deney No	-A- Sıcak Paso Akım Şiddeti Aralığı (A)	-B- Kaynak Yönü	-C- Elektrod Türü
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	1
4	2	2	2
5	3	1	1
6	3	2	2
7	4	1	1
8	4	2	2
9	5	1	2
10	5	2	1
11	6	1	2
12	6	2	1
13	7	1	2
14	7	2	1
15	8	1	2
16	8	2	1

9.2. Ölçüm Sonuçları

Birleştirmelere yukarıda belirtilen deney düzeneklerine uygun olarak gerçekleştirilen kaynak işlemlerinden sonra uygulanan testler sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları ve

Taguchi optimizasyonundan elde edilen Sinyal / Gürültü (S/N) oranları Çizelge 9.3 ve 9.4'te verilmektedir.

Çizelge 9.3. Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak akma ve maksimum çekme mukavemeti için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları

Deney No	-A- Akım Şiddeti Aralığı (A)	-B- Kaynak Yönü	-C- Elektrod Türü	Akma Muk.		Maks. Çekme Muk.	
				Deney Sonucu (MPa)	S/N Oranları	Deney Sonucu (MPa)	S/N Oranları
1	110-140	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	598	55,5340	663	56,4303
2	110-140	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	479	53,606	528	54,4527
3	120-150	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	585	55,3431	669	56,5085
4	120-150	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	490	53,8039	537	54,5995
5	130-160	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	581	55,2835	674	56,5732
6	130-160	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	602	55,5919	664	56,4434
7	140-170	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	578	55,2386	662	56,4172
8	140-170	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	595	55,4903	659	56,3777
9	150-180	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	595	55,4903	680	56,6502
10	150-180	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	610	55,7066	659	56,3777
11	160-190	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	589	55,4023	667	56,4825
12	160-190	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	607	55,6638	656	56,3381
13	170-200	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	586	55,3580	666	56,4695
14	170-200	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	571	55,1327	655	56,3248
15	180-210	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	583	55,3134	662	56,4172
16	180-210	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	567	55,0717	651	56,2716

Çizelge 9.4. Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak kaynak metali sertliği ve darbe dayanımı için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları

Deney No	-A- Akım Şiddeti Aralığı (A)	-B- Kaynak Yönü	-C- Elektrod Türü	Kaynak Metali Sertliği		Darbe Mukavemeti	
				Deney Sonucu (H_V)	S/N Oranları	Deney Sonucu (Joule)	S/N Oranları
1	110-140	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	239	47,5680	128	42,1442
2	110-140	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	222	46,9271	130	42,2789
3	120-150	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	231	47,2722	134	42,5421
4	120-150	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	221	46,8878	138	42,7976
5	130-160	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	223	46,9661	139	42,8603
6	130-160	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	215	46,6488	139	42,8603
7	140-170	Aşa. Yuk. ↑	Selülozik	222	46,9271	143	43,1067
8	140-170	Yuk. Aşa. ↓	Bazik	215	46,6488	148	43,4052
9	150-180	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	219	46,8089	150	43,5218
10	150-180	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	220	46,8485	147	43,3463
11	160-190	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	216	46,6891	154	43,7504
12	160-190	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	218	46,7691	149	43,4637
13	170-200	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	217	46,7292	161	44,1365

Çizelge 9.4. (devam) Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak kaynak metali sertliği ve darbe dayanımı için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları

14	170-200	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	213	46,5676	153	43,6938
15	180-210	Aşa. Yuk. ↑	Bazik	213	46,5676	168	44,5062
16	180-210	Yuk. Aşa. ↓	Selülozik	205	46,2351	162	44,1903

10. DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU

Doğalgaz ve petrol boru hatlarının sahadaki kaynak işlemlerinde belirlenen kaynak parametrelerinin (akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türü), kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri (akma, maksimum çekme ve darbe dayanımı ile sertlik davranışı) üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada deney malzemesi olarak API 5L X65 malzeme kullanılmıştır.

Bahsedilen girdi parametreleri ile her bir deney sabit bir kaynak hızında Taguchi L_{16}deney düzeneğine göre toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir. Akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türünün girdi olarak değerlendirildiği bu çalışmada çıktı olarak; kaynaklı birleştirmelerin akma, maksimum çekme ve darbe dayanımları ile kaynak metalinde oluşan sertlik değeri değerlendirilmiştir.

10.1. Sonuçların Taguchi Metodu ile Analiz Edilmesi ve Değerlendirilmesi

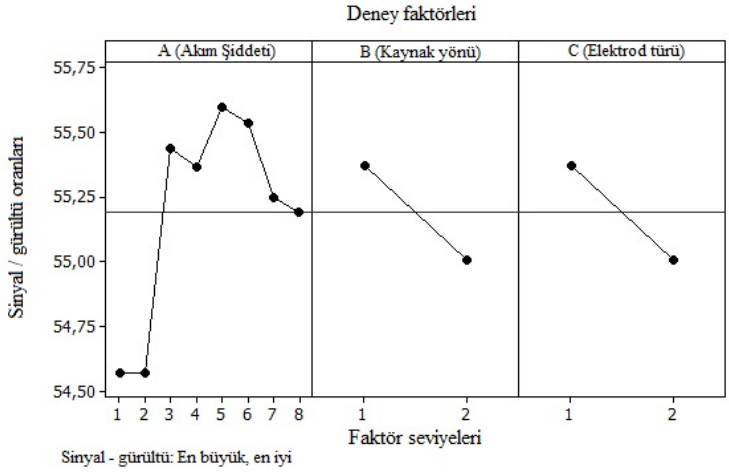
Boru hattı sistemleri; gaz, petrol ya da buhar gibi akışkan ürünlerin güvenli bir şekilde taşınması işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Doğalgaz ve petrol taşımacılığında kullanılan boru hatları; toprak kayması, göçük gibi dış kuvvetlerin sebep olduğu plastik deformasyona maruz kalabilir. Bu nedenle boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemlerinin, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [32-35]. Bu noktada malzemelerin akma mukavemetleri kalıcı izli şekil değişikliğini belirleyen önemli bir parametredir. Malzemelere akma dayanımın altında uygulanan yüklemeler elastik deformasyona neden oluyorken, akma dayanımın üzerindeki yüklemeler malzemelerde kalıcı şekil değişikliği olarak adlandırılan plastik deformasyona neden olmaktadır. Bu noktada kaynaklı birleştirmelerin akma mukavemetleri son derece önemli ve belirleyici rol oynamaktadır. Yine malzemelerin maksimum noktada taşıyabilecekleri yükü ifade eden maksimum çekme mukavemeti de birleştirmelerin taşıyabilecekleri maksimum yükü anlamamıza yardım eden önemli bir parametredir. Ani bir darbe anında, malzemenin darbeye karşı koyabilme ve darbeyi sönümleme özelliğini ifade eden darbe dayanımı, diğer adıyla tokluk yine boru hattı sistemlerinde önem arz eden son derece önemli bir parametredir. Kaynak metali sertliği ise kaynaklı birleştirmenin şekil değişikliğine karşı gösterdiği direnci ifade eden bir başka önemli parametredir.

Çizelge 9.2 ve 9.3'te belirtilen Taguchi L_{16} ortogonal düzeni kapsamında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işlemleri çerçevesinde deneylerin akma ve maksimum çekme mukavemetleri, çekme testleri ile darbe dayanımları çentik darbe testi ile sertlik değerleri ise makro sertlik testleri ile ölçülmüştür.

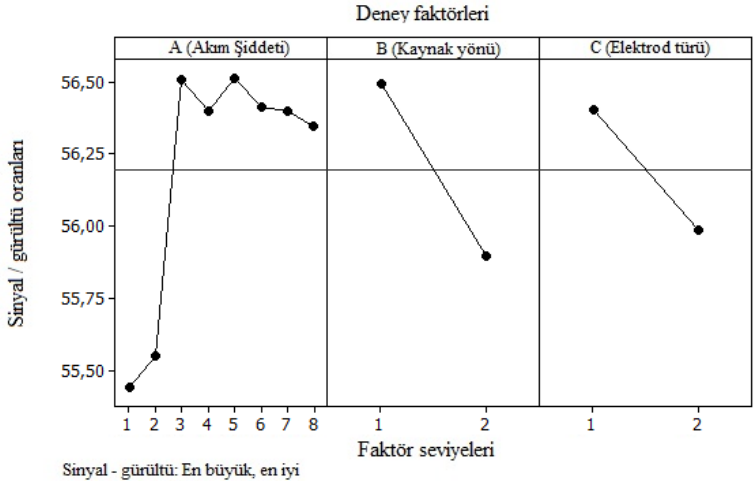
Daha sonra elde edilen deney sonuçlarının Taguchi metodu yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon işleminde, Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda sinyal/gürültü oranı fonksiyonu olarak da ifade edilen 3 farklı amaca uygun fonksiyon bulunmaktadır. Buna göre, amacın "en küçük en iyi", "en büyük en iyi" ve "nominal en iyi" olmasına göre kullanılan eşitliklerden "en büyük en iyi" (Eş. 5.13) kullanılarak S/N oranları hesaplanmıştır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{5.13}$$

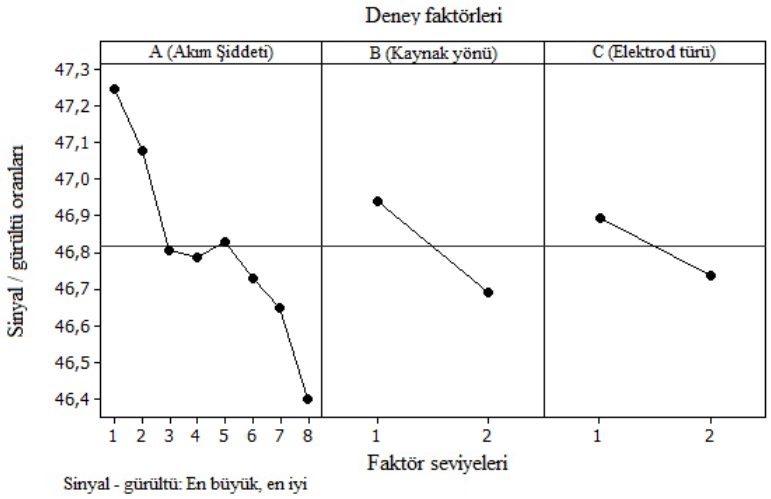
Eşitliklerde yi, performans yanıtını, i gözlem değerini, n bir denemedeki test sayısını ifade etmekte olup, deneysel sonuçlar neticesinde S/N oranlarına bağlı olarak optimum parametreler tahmin edilmiştir. Akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti, darbe dayanımı ve kaynak metali sertlik değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafiksel gösterimi sarasıyla Şekil 10.1 – 10.4'te verilmiştir.



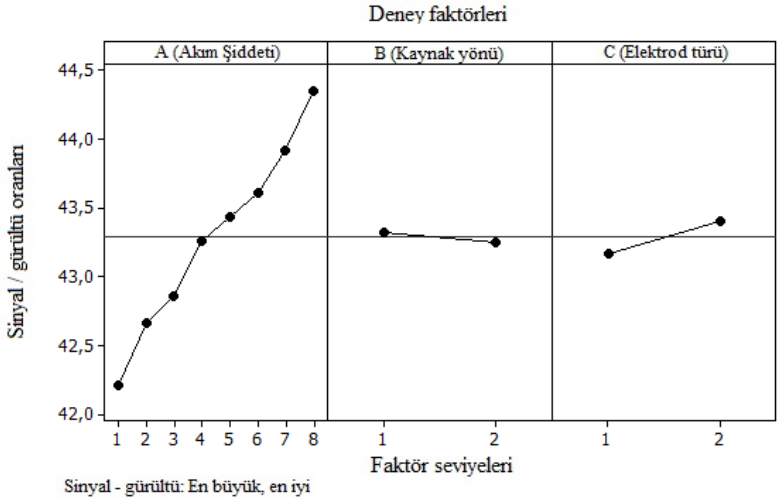
Şekil 10.1. Akma mukavemeti için S/N oranları ana etki grafiği



Şekil 10.2. Maksimum çekme mukavemeti için S/N oranları ana etki grafiği



Şekil 10.3. Kaynak metali sertlik değerleri için S/N oranları ana etki grafiği



Şekil 10.4. Kaynak metali darbe dayanım değerleri için S/N oranları ana etki grafiği

Akma mukavemeti için yapılan optimizasyonda Şekil 10.1'den yararlanılarak uygun kaynak parametreleri "A5B1C1" olarak bulunmuştur. Burada; A5, 150 – 190 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C1 ise, selülozik elektrodu ifade etmektedir.

Maksimum çekme mukavemeti için yapılan optimizasyonda ise; uygun kaynak parametreleri Şekil 10.2'de verilen sinyal/gürültü oranlarından yararlanılarak yine akma mukavemeti optimizasyonundaki gibi "A5B1C1" olarak bulunmuştur.

Yine kaynak metali sertlik değerleri için yapılan optimizasyonda Şekil 10.3'ten yararlanılarak uygun kaynak parametreleri "A1B1C1" olarak bulunmuştur. Burada A1, 110 – 140 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C1 ise, selülozik elektrodu ifade etmektedir.

Son olarak darbe dayanımları için yapılan optimizasyonda, Şekil 10.4'e bakılarak uygun kaynak parametreleri "A8B1C2" olarak bulunmuştur. Burada A8, 180 – 210 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C2 ise, bazik elektrodu ifade etmektedir.

10.2. Doğrulama Deneyleri ve Sonuçları

Taguchi metoduna göre, optimum sonuçları verecek parametrelerin tahmininden sonra, optimizasyonda son aşama olarak doğrulama deneyleri yapılmakta ve yapılan optimizasyonun doğruluğu kontrol edilmektedir. Önceden tespit ettiğimiz akma ve çekme mukavemeti için "A5B1C1", kaynak metali darbe dayanımı için "A8B1C2", kaynak metali sertlik değerleri için de "A1B1C1" parametrelerinde üç adet kontrol deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak sonuçların güvenirliği irdelenmiştir. Buna göre en iyi akma, maksimum çekme ve darbe mukavemeti ile kaynak metali sertlik değerlerinin elde edilmesinde, optimize edilmiş kaynak parametreleri sırasıyla, Çizelge 10.1 – 10.4'te verilmiştir.

Çizelge 10.1. Akma mukavemeti için doğrulama test sonuçları

	Başlangıç Kaynak Parametresi	Optimum Kaynak Parametreleri	
		Tahminsel	Deneysel
Seviye	A8B2C2	A5B1C1	A5B1C1
Akma mukavemeti (Mpa)	585	624.5	575
S/N ratio (dB)	55.3431	55.9618	55.1934
İyileştirme oranı 0.1497 dB			
Tahminsel hata 0.7684 dB			

Çizelge 10.2. Maksimum çekme mukavemeti için doğrulama test sonuçları

	Başlangıç Kaynak Parametresi	Optimum Kaynak Parametreleri	
		Tahminsel	Deneysel
Seviye	A8B2C2	A5B1C1	A5B1C1
Maksimum çekme mukavemeti (Mpa)	660	704.5	680
S/N ratio (dB)	56.3909	57.0209	56.6502
İyileştirme oranı: 0.2593 dB			
Tahminsel hata: 0.3707 dB			

Çizelge 10.3. Kaynak Metali Sertliği İçin Doğrulama Deneyleri

	Başlangıç Kaynak Parametresi	Optimum Kaynak Parametreleri	
		Tahminsel	Deneysel
Seviye	A5B2C2	A5B1C1	A5B1C1
Kaynak metali sertliği (HV)	210	235,75	225
S/N oranı (dB)	46.4444	47.4501	47.0437
İyileştirme oranı: 0.5993 dB			
Tahminsel hata: 0.4064 dB			

Çizelge 10.4. Kaynak metali darbe dayanımı için doğrulama test sonuçları

	Başlangıç Kaynak Parametresi	Optimum Kaynak Parametreleri	
		Tahminsel	Deneysel
Seviye	A4B2C1	A8B1C2	A8B1C2
Kaynak metali darbe enerjisi (Joule)	152	167.75	160
S/N oranı (dB)	43.6369	44.5008	44.0824
İyileştirme oranı: 0,4455 dB			
Tahminsel hata: 0.4184 dB			

Deneysel çalışmalarda elde edilen mekanik test değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki fark göz ardı edilebilecek seviyededir. Bu durumda Taguchi optimizasyonunun mekanik test değerleri tahmininde başarı ile uygulanabildiği görülmektedir. Taguchi

optimizasyonu ile kaynak işleminde parametre optimizasyonunun uygun bir şekilde yapılabileceği optimizasyon çalışması ile ispatlanmıştır.

Çizelge 10.1, 10,2 ve 10.3'te başlangıç kaynak parametre değerleri, tahminsel değerler ve doğrulama değerleri birbiriyle mukayese edildiğinde; optimizasyon işlemlerinde akma mukavemeti için %1,71, maksimum çekme mukavemeti için %3,03, kaynak metali sertliği için % 7,14 ve kaynak metali darbe dayanımı için % 5,26 iyileşme görülmüştür.

Daha önceki yapılan çalışmalarda; Moghaddam [127], doğalgaz ve petrol boru malzemesi olan API 5L X42 malzemenin, MIG – MAG kaynağı ile birleştirme işlemlerinde gerçekleştirdiği Taguchi optimizasyonu ile benzer sonuçlara ulaşmış, bu da tez çalışmamız ile örtüşen bir durum olmuştur.

API borularının kaynaklı birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyon işlemleri ve Minitab programının kullanımını gösteren ekran görüntüleri alınmış olup, söz konusu ekran görüntüleri Ekler bölümünde (Ek-6) verilmiş olup, Taguchi metodunun işlem basamaklarını aşama aşama göstermektedir.

11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

11.1. Sonuçlar

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, radyografik incelemeler ile makro ve mikroyapı analizlerinden elde edilen optik mikroskop ve SEM inceleme sonuçları, mekanik test sonuçları ve Taguchi optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar şeklinde üç bölümde değerlendirilmiştir. İlk olarak; deneysel çalışmalardan elde edilen birleştirmelerin radyografik görüntü sonuçları, makro ve mikroyapı analizlerinin optik mikroskop ve SEM inceleme sonuçları, sonraki aşamada ise mekanik test sonuçları ve en son olarak Taguchi optimizasyonundan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

API 5L X65 boruların kaynaklı birleştirme işlemlerinde; aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde iki farklı kaynak yönünde, selülozik ve bazik elektrod kullanılarak iki farklı elektrod türüyle birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Akım şiddeti değerleri ise boru kaynağında değişken değerlerin kullanılması nedeniyle sıcak pasolarda 110-140 A ile 180-210 A akım aralığı değerlerinde 10 A değerinde artışlar ile 8 farklı değerde gerçekleştirilmiştir. Kaynak şartlarının tasarımında Taguchi L16 deney düzeneği kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulaması Minitab V16.0.0 istatistik yazılımında gerçekleştirilmiştir. API 5L X65 borularının kaynaklı birleştirme işlemlerinde akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türünün tesir ettiği mikroyapı ve mekanik test sonuçları incelenmiştir. Optimizasyon aşamasında Taguchi metoduyla girdi parametreleri olan akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türünün, çıktı parametreleri olan akma, maksimum çekme ve darbe dayanımlarıyla, kaynak metali sertliğine olan etkileri analiz edilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçların, yapılan istatistiksel işlemler ve Taguchi metodunun bir arada değerlendirilmesi ile bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

Radyografi, makroyapı ve mikroyapı inceleme sonuçları

Radyografi testi

- ✓ Radyografik inceleme görüntüleri detaylı incelendiğinde 2 ve 4 numaralı deneyler haricinde genel olarak kaynaklı birleştirmelerin kusursuz bir şekilde gerçekleştirildiği, makro düzeyde herhangi bir hataya rastlanmadığı görülmektedir. 2 ve 4 numaralı deneyler bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda gerçekleşen deneyler olup, söz konusu deneylerin radyografik incelemesinde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Makroyapı incelemeleri

- ✓ Makroyapı fotoğrafları incelendiğinde yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile birleştirilen 2 ve 4 numaralı deneylerde yetersiz ergime sebebi ile birleşme eksikliği görülmekte olup, bazik elektrod ile yukarıdan aşağı yapılan birleştirmelerde en düşük akım şiddeti değerlerinde birleştirilen söz konusu deneylerde yetersiz ergime sebebiyle birleşme eksikliği görülmüştür. Bu durum 2 ve 4 numaralı deneylerde ısı girdisinin yeterli miktarda olmadığını, bu nedenle yeterli ergime ve birleşmenin sağlanamadığını göstermektedir. Radyografi testinden elde edilen görüntüler bu durumu destekler mahiyette olmuştur. Makroyapı incelemelerinde, 2 ve 4 numaralı deneyler haricindeki birleştirmelere bakıldığında; tüm birleştirmelerde tam nüfuziyetin sağlandığı gözlenmiş ve makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği v.b.) rastlanılmamıştır.

- ✓ Çalışmalarda uygulanan kaynak işlemi ve boru ağızlama işlemleri manuel yapıldığı için, makroyapı incelemelerinde, bazı numunelerde iç-dış kaynaklarda eksenel kaçıklık hatası olmuştur. Bu durum makro görüntülere yansımış ancak kaynak kalitesini etkileyecek bir veri tespit edilmediği için hata olarak değerlendirilmemiştir.

- ✓ Makroyapı incelemelerinde, maruz kaldığı ısı miktarına göre ITAB içerisinde yapısal farklılıklar oluşmuştur. Kaynak metali sınırında koyu renkte görülen ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha açık renkte olduğu görülmüştür (Resim 8.2 – 8.17).

- ✓ Makroyapı fotoğrafları incelendiğinde, akım şiddetinin tek değişken olduğu deney gruplarında akım şiddetinin yükselmesi ile birlikte, daha geniş bir nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin oluştuğu, ayrıca aşağıdan yukarı kaynak pozisyonlarında da yine daha geniş bir nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin oluştuğu görülmüştür. Isı girdisi miktarının yoğun olduğu birleştirmelerde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB'ların daha geniş olduğu yine makroyapı fotoğraflarında görülmüştür (Resim 8.2-8.17)

- ✓ Makroyapı incelemelerinde, kaynak metalinde ergime ve katılaşmanın etkisiyle asiküler ferrit oluşumunun artmasıyla birlikte tane yapısının inceldiği görülmüş, $\Delta t_{8/5}$ soğuma süresinin artmasıyla asiküler ferrit miktarı da artış göstermiştir. Isı girdisinin artması $\Delta t_{8/5}$ soğuma süresini arttırmış, aynı oranda yapıdaki asiküler ferrit oranı da artış göstermiştir. Bu nedenle kaynak metali tane yapısı ana malzeme ve ITAB tane yapılarından daha ince bir şekilde oluşmuştur.

Mikroyapı incelemeleri

- ✓ Ana malzeme mikroyapı fotoğrafına bakıldığında tane yapısının, tipik bir çelik malzeme tane yapısı olan eş eksenli yapıda olduğu görülmüş, yapıda bulunan Nb, Ti ve V gibi alaşım elementlerinin tane inceltici etkisi nedeniyle yapının ince tanelerden oluştuğu kanaatine varılmıştır.

- ✓ Birleştirmelerin mikroyapı görüntülerinde; I numara ile belirtilen bölgeler ITAB'da ince taneli bölgeleri, II numara ile belirtilen bölgeler iri taneli bölgeleri, III numara ile belirtilen bölgeler ise kaynak metali yapılarını teşkil etmiştir. I ve III numara ile gösterilen bölgelerde ince taneli bölge ve kaynak metali tanelerinin homojen dağılımlı tane yapısında oluştuğu görülmüştür. Kaynak işleminde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak oluşan asiküler ferrit tanelerinin yoğunluğu nedeniyle, kaynak metali içerisinde ince taneli yapılar oluşmuştur. ITAB'da iri taneli bölgede ise ısının etkisi ile ana metal ve kaynak metalinde oluşan yapılardan daha farklı yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. İri taneli bölgelerde tanelerin, ana metal yönünden kaynak metali yönüne doğru dendritik olarak uzadığı görülmüştür. Dendritik yapının hâkim olduğu iri taneli bölgede yer yer iğnemsi widmanstatten yapının oluştuğu da tespit edilmiştir. Yine kaynak metali içerisinde sütunsal ferrit tanelerinin yoğun olarak

bulunduğu görülmüştür. Tanelerin ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde oluştuğu görülürken, yüksek türbülansın etkisiyle tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağıldığı görülmüştür.

- ✓ Tüm mikroyapı görüntüleri genel olarak incelendiğinde; aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde selülozik ve bazik elektrodlarla gerçekleştirilen deneylerde; akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla, buna bağlı olarak iri taneli bölge genişliği de değişiklik göstermiştir. Grup incelemelerinde akım şiddetinin en küçük seçildiği deneylerde en düşük iri taneli bölge genişliği elde edilirken, akım şiddetinin arttırıldığı deneylerde iri taneli bölge daha geniş bir alanda oluşmuştur. En geniş iri taneli bölge genişliği ise akım şiddetinin en yüksek seçildiği deneylerde elde edilmiştir. İri taneli bölge genişliğinin artmasındaki belirleyici neden birleştirmelere uygulanılan akım şiddeti değeri olmuştur. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi artmış, ısı girdisinin artması ise soğuma süresini arttırarak iri taneli bölgenin daha geniş bir alanda oluşmasına neden olmuştur.

- ✓ Elektrod türlerinin verimliliğini yorumlamaya çalıştığımızda; selülozik elektrod ile gerçekleşen birleştirmelerin hem makro, hem de mikro görüntülerinde daha geniş iri taneli bölge genişlikleri dikkat çekmiştir. Bu durum selülozik elektrod ile yapılan birleştirmelerde daha yoğun ısı girdisi oluştuğunu ifade etmiştir. Radyografi ve makroyapı görüntüleri bu sonuçları desteklemiştir. Bu durum aynı akım şiddeti değerlerinde olsa da, selülozik elektrodda oluşan ısı girdisinin, bazik elektroda göre daha yoğun olduğunu ortaya koymuştur. Buradan yola çıkarak aynı parametrelerde gerçekleşen deneylerde selülozik elektrodda oluşan ITAB'ların daha geniş alanda oluştuğu söylenilebilmiştir.

- ✓ Kaynak yönünün etkileri irdelendiğinde ise; uygulanılan deneylerde aşağıdan yukarı yönde gerçekleşen deneylerde ısı girdisinin artışına bağlı olarak iri taneli bölge genişlikleri artmıştır. Yukarıdan aşağı yönde yapılan deneylerde ise daha dar iri taneli bölge genişlikleri elde edilmiştir.

- ✓ Aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde selülozik ve bazik elektrodlarla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen SEM görüntülerinde kaynak yönü ve elektrod türü sabit olup, tek değişken akım şiddeti değerleridir. Görüntüler detaylı

incelendiğinde akım şiddeti değerinin arttırılmasına ve neticesinde ısı girdisine bağlı olarak kaynak metalindeki tane yapısının irileştiği görülmüştür. Akım şiddeti değerlerinin en küçük seçildiği deneylerde ise en küçük taneli yapılar elde edilmiştir. Akım şiddeti değerinin arttırılmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisi de artmıştır. Isı girdisinin artması ise ITAB ve kaynak metali bölgelerinin daha yavaş soğumasına neden olacağı için, bu bölgelerde tane yapısı irileşmiştir.

Mekanik test sonuçları

Çekme testi

- ✓ Çekme testi sonuçları incelendiğinde; Deney 2 ve 4 haricindeki tüm deneylerde birleştirmelerin çekme mukavemetlerinde ana malzeme değerlerinin üzerinde sonuçlar görülmüştür. Deney 2 ve 4'te ise radyografik ve makroyapı incelemelerinde de tespit edildiği üzere yetersiz ergime ve birleşme eksikliği hatası görüldüğünden yeterli mukavemet değerlerini sağlayamadığı ve hatta ana malzemeden daha düşük mukavemet değerleri sergilediği görülmüştür.

- ✓ 2 ve 4 numaralı deneylerin haricindeki birleştirmeler ise; kaynak metalinin yaklaşık 20 mm ilerisinden ana malzemeden kopmuştur. Sertlik testlerinde en yüksek değerlerin ölçüldüğü kaynak bölgesi şekil değişimine karşı daha yüksek direnç gösterirken, kopmalar plastik deformasyonun daha kolay olduğu ve sertlik testlerinde daha az direnç gösteren bölge olan ana malzeme tarafında gerçekleşmiş, bu durum testlerin bütünlüğünü ve birbiriyle olan ilişkisini desteklemiştir.

- ✓ Çekme testlerinin tümü incelendiğinde; deneyler içerisinde en yüksek mukavemet değerinin 9 numaralı deneyden elde edildiği görülmüştür. Deney 9'da 680 MPa çekme mukavemeti ve %25 uzama değeri ile en yüksek mukavemet ve uzama değerleri görülmüştür. 2 ve 4 numaralı deneyleri bir kenarda tutup diğer deneyler değerlendirildiğinde; en düşük mukavemet değerleri 651 MPa maksimum çekme mukavemeti ve % 27 uzama ile 16 numaralı deneyde görülmüştür. Grup değerlendirmelerine bakıldığında ise en yüksek mukavemet değerleri bazik elektrod ile aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen Deney 9, 11, 13 ve 15'te görülmüştür. En

düşük mukavemet değerleri ise aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen 1, 3, 5 ve 7 numaralı deneylerden elde edilmiştir.

- ✓ Genel olarak bazik elektrod ile birleştirilen numunelerin mukavemet değerleri daha yüksek sonuçlar göstermiştir. Bu duruma bazik elektrodun sahip olduğu kimyasal kompozisyonun neden olduğu belirlenmiştir.

Sertlik testi

- ✓ Kaynak metali sertlik değerlerinin incelendiği grafikler genel olarak birbirine benzemekte olup, uygulanılan akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türüne göre sertlik değerleri farklılık göstermiştir. Tüm deneylerdeki sertlik grafiklerinde sertliğin en yüksek tayin edildiği bölge ITAB, en düşük tayin edildiği bölge ise esas metal bölgesi olmuştur. Kaynak metali bölgesi ise esas metal ve ITAB sertliklerinin arasında bir değerde olup, ITAB değerlerine daha yakın değerler göstermiştir.

- ✓ ITAB ve kaynak metalinde, esas metalden farklı sertlik değerleri tespit edilmiş olup, söz konusu değerlerin yüksek sıcaklıklarda uygulanılan kaynak işlemine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Isının söz konusu bölgelerde, malzemeye bir nevi ısıl işlem uygulayarak etkin olduğu grafiklerde görülmüştür. En yüksek sertlik değerlerine ITAB'da ulaşılmıştır. Kaynak esnasında en hızlı soğuyan bölgenin ITAB bölgesi olması bu duruma sebep olarak görülmüştür. Kaynak esnasında katılaşma ana malzeme sınırlarından başlayarak kaynak merkezine doğru gerçekleştiği için, ITAB'da soğuma daha önce ve hızlı bir şekilde gerçekleşmiş bu nedenle tüm deneylerde söz konusu bölgede en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. En son katılaşan bölge olduğundan yavaş soğuma nedeniyle kaynak metalinde ITAB'a göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

- ✓ Grafikler incelendiğinde, tane yapısı, mukavemet ve sertlik değerleri arasında bir ilişki kurulduğunda; normal şartlarda daha düşük sertlik değerleri sergilemesi gereken ITAB'daki iri taneli bölgelerde yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu durumun tane yapısı ile ilgisi olmayıp, tamamen soğuma hızıyla ilgisi olduğu belirlenmiştir. Grafiklerde ölçülen iri taneli bölgelerdeki yüksek sertliğe sebep olarak, iri taneli bölgelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalınması ve hızlı soğumanın gerçekleşmesi gösterilmiştir.

- ✓ Sertlik grafikleri incelendiğinde ana malzemelerdeki sertlik değerleri tüm deneylerde aynı değerlerde olup, yaklaşık 200 HV olarak gözlemlenmiştir. ITAB ve kaynak metalinde oluşan en yüksek sertlik değerlerinin aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile 110 – 140 A akım aralığında birleştirilen 1 numaralı deneyde (252 HV, ITAB – 236 HV, kaynak metali) oluştuğu görülmüştür. Tüm deneyler içerisinde en düşük sertlik değeri ise selülozik elektrod ile yukarıdan aşağı yönde 180 – 210 A akım aralığında birleştirilen 16 numaralı deneyden (215 HV, ITAB – 205 HV kaynak metali) elde edilmiştir.

- ✓ Akım şiddetinin yükseltilmesi ile aynı yönde gerçekleştirilen deneylerin sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Daha önceki incelemelerde belirtildiği gibi bu durum akım şiddeti miktarının artmasıyla malzemeye uygulanılan ısı girdisinin ve soğuma süresinin artması nedeniyle oluşmuştur.

- ✓ Selülozik elektrod ile bazik elektrod mukayese edildiğinde ise, genel olarak bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerde daha düşük sertlik değerleri tespit edilmiştir. Bazik elektrodun tokluğunun yüksek olması gereği, doğal olarak sertlik değerleri daha düşük seviyelerde oluşmuştur.

- ✓ Sertlik ölçümlerinde kaynak yönü kendi içerisinde irdelendiğinde ise yine ısı girdisi ve soğuma hızının etkisiyle aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerin sertlik değerleri daha düşük gözlemlenirken, yukarıdan aşağı yönde gerçekleştirilen deneylerin sertlik değerleri nispeten daha yüksek olarak ölçülmüştür.

- ✓ Sertlik ölçümleri diğer testler ve incelemeler ile birlikte değerlendirildiğinde testler ve incelemeler arasında bir bütünlük görülmüştür. Akım şiddeti değerinin yüksek olduğu deneylerde malzemeye uygulanılan ısı girdisi arttığından taneler daha iri taneli ve ITAB'lar daha geniş alanda oluşmuştur. Yine mikroyapı ve SEM incelemelerinde söz konusu deneylerden elde edilen görüntüler bu durumu desteklemiştir. Bu yüzden söz konusu iri tanelerin oluştuğu deneylerde, birleştirmelerin mukavemet değerlerinde düşüş görülürken, yüzde uzama değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Yine akım şiddetine bağlı olarak iri taneli yapıların oluştuğu deneylerde, daha ince taneli yapıların oluştuğu diğer deneylere göre daha düşük sertlik değeri görülmüştür. Sertlik ve mukavemetin doğru orantılı olduğu gerçekleştirilen çekme ve sertlik testlerinde de görülmüştür.

- ✓ Çok pasolu kaynak işleminde farklı pasoların sertlik sonuçları üzerine etkilerini görmek için yapılan incelemelerde; sonraki pasonun önceki pasolar üzerine ısıl işlem uygulama özelliği nedeniyle en yüksek sertlik sonuçları en hızlı soğumanın olduğu son pasoda (iç kaynak pasosu) tespit edilmiştir. İç kaynak pasosunda gerçekleşen kaynak işleminde ısının etkisiyle diğer pasoların sertlik değerlerinin etkilendiği görülürken, yüzeyden merkeze doğru soğuma nedeniyle dolgu pasolarının daha yavaş soğuduğu söylenilebilir. Bu nedenle farklı pasolardan alınan sertlik sonuçlarında en yüksek sonuçlar iç kaynak pasosundan elde edilirken, kapak paso çok az bir değer ile iç kaynak pasosunun sertlik değerinden düşük sonuçlar vermiş, en düşük sonuçlar ise atmosferle doğrudan teması olmayan ve kesit kalınlığın orta merkezini oluşturan çizgiden alınan dolgu pasolarında ölçülmüştür.

Kaynaklı kırılma (nick break) testi

- ✓ Kaynaklı kırılma (nick break) testi sonuçları incelendiğinde 2 ve 4 numaralı deneylerin kabul edilmediği görülmüştür. Buna sebep, söz konusu deneylerde birleşme eksikliği, yetersiz ergime veya nüfuziyet noksanlığı olarak adlandırılan hatanın görülmesidir. Daha önceki incelemelerde (radyografi testi, makroyapı incelemesi ve çekme testi) bu durum açıkça görülmüş ve ifade edilmiştir.

- ✓ Kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde tanelerin sergilediği uzama ve yönlenmeden, kaynaklı birleştirmelerin genel olarak sünek bir davranış sergilediği ancak bazı bölgelerde oluşan klivaj kırılmaları nedeniyle gevrek kırılmaların olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kopması genel olarak kayma kırılması sonucu oluşmuştur. Kayma kırılması sonucu oluşan kırılmalar, SEM görüntülerinde lifli yapıları oluşturmuştur. Ayrıca, kırılmalar plastik deformasyonun etkisi ile oluştuğundan sünek özellik göstermiştir. SEM incelemelerindeki eş eksenli peteksi görüntülerden, kırılmaların sünek bir davranış sergilediği anlaşılmıştır. Yine kırılmalar tek parçalı olarak gerçekleştiği için bu durum yine sünek kopmayı işaret etmiştir.

- ✓ Yine deneylerde kullanılan API 5L X65 boru çeliğinin mikroyapısı az perlitli ferritik matristen oluştuğu için, mikroyapının sahip olduğu tane büyüklüğü, perlit hacim oranı ve mikroalaşım elementi oranı, kırılma davranışı üzerine etki etmiştir. Ferrit hacim oranının artmasıyla kırılma mekaniği özellikleri iyileşmiştir.

Çentik – darbe testi

- ✓ Çentik – darbe testi sonuçları incelendiğinde kaynak metalindeki en yüksek tokluk sonuçları, aşağıdan yukarı yönde bazik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden (9, 11, 13 ve 15 numaralı) elde edilirken, en düşük tokluk sonuçları aşağıdan yukarı yönde selülozik elektrod ile gerçekleştirilen deneylerden (1, 3, 5 ve 7) elde edilmiştir. Deneyler baz alınarak yapılan incelemelerde ise en yüksek kaynak metali darbe dayanımı 168 Joule'lük bir enerji absorblayan 15 numaralı deneyde görülürken, en düşük darbe dayanımı 128 Joule'lük bir enerjiyi absorblayan 1 numaralı deneyde ölçülmüştür.

- ✓ Akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte deneylerde tokluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmış, ısı girdisinin ve soğuma süresinin artışıyla birlikte tokluk değerleri de artış göstermiştir.

- ✓ Kaynak yönü irdelendiğinde ise aşağıdan yukarı gerçekleştirilen deneylerde yine oluşan ısı girdisi ve buna bağlı olarak soğuma hızının etkisiyle daha yüksek kaynak metali tokluk değerleri görülmüştür.

- ✓ Elektrod türleri mukayese edildiğinde ise kimyasal özelliklerinden dolayı bazik elektrodda darbe dayanımı daha yüksek değerler gösterirken, elektrod örtüsündeki maddeler nedeniyle yandığında daha fazla ısı girdisi oluşması ve soğuma süresinin artması selülozik elektrodun darbe dayanım değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Eğme testi

- ✓ 180° açıda uygulanan eğme deneylerinde, malzemelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür. Eğme testi sonuçları birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığını göstermiştir.

- ✓ Eğme testi sonrası bir deney grubuna ait görüntüler incelendiğinde; 180º bükülerek iki yönlü (kep ve kök) olarak yapılan eğme testleri sonucunda birleştirilen numunelerin tümünün birleşim ara yüzeyinde gözle görülebilir herhangi bir ayrılma veya çatlama

hatasının oluşmadığı göz muayenesi ile tespit edilmiştir. Eğme numunelerinde kaynak metali içerisinde bulunan mikro gözenekler ve inklüzyonlar çatlak oluşumuna neden olmamıştır. Bu durum, malzemelerin birleştirilmesinin uygun bir şekilde yapıldığını ve bu tür kaynaklı bağlantıların 180º eğilerek servis şartlarında kolaylıkla kullanılabileceğini göstermiştir.

Genel değerlendirme

- ✓ Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte birleştirmelere uygulanılan ısı girdisi artmış, ısı girdisinin artması ise soğuma hızının artmasına neden olmuştur. Bu nedenle makro ve mikroyapı incelemelerinde daha geniş ITAB'lara sahip iri taneli yapılar görülürken, çekme testlerinde bu yapıların daha düşük mukavemet değerleri görülmüştür. Sertlik testlerinde söz konusu birleştirmelerin düşük değerler gösterdiği görülürken, çentik – darbe testinde bu durumla ters orantılı olarak darbe dayanım değerleri daha yüksek olmuştur.

- ✓ Benzer bir sonuç olarak aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen deneylerde yine daha geniş ITAB'lara sahip iri taneli yapılar görülmüş, bu durum mekanik testlerde düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sebep olurken, çentik – darbe testinde daha yüksek dayanım değerlerinin sergilenmesine neden olmuştur.

- ✓ Yine elektrod türleri mukayese edildiğinde elektrod örtüsündeki yanıcı maddeler nedeniyle selülozik elektrodda daha yüksek ısı girdisi oluşmuştur. Isı girdisi ve buna bağlı olarak oluşan soğuma hızı nedeniyle makro ve mikroyapılar ile mekanik test sonuçları değişiklik göstermiştir. Bazik elektrodda ise elektrodun kimyasal kompozisyonu nedeniyle daha mukavemetli ve tokluk değeri yüksek birleştirmeler elde edilirken, sertlik değerleri selülozik elektroda göre daha düşük sonuçlar sergilemiştir.

- ✓ Genel olarak sonuçlardan aşağıdan yukarı kaynak yönünde daha uygun birleştirmelerin oluştuğu görülmüştür. En yüksek mukavemet ve darbe dayanım değerleri aşağıdan yukarı kaynak yönünde ölçülmüştür.

- ✓ Yine aynı şekilde bazik elektrod ile daha yüksek mukavemet ve darbe dayanımları elde edilmiştir. Servis şartlarında kaynak hızını arttırması nedeniyle çok fazla tercih edilen selülozik elektrod ile yapılan deneylerde de birleştirmeler kendinden beklenen lokal özellikleri sergilemiştir. Her iki elektrod türünün kaynaklı birleştirmelerde sağlanması gereken mekanik özellikleri elde ettiği tespit edilmiştir.

Taguchi optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

- ✓ Akma mukavemeti için yapılan optimizasyonda uygun kaynak parametreleri "A5B1C1" olarak bulunmuştur. Burada; A5, 150 – 190 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C1 ise, selülozik elektrodu ifade etmektedir.

- ✓ Maksimum çekme mukavemeti için yapılan optimizasyonda; yine akma mukavemeti optimizasyonundaki gibi "A5B1C1" en uygun kaynak parametresi olarak bulunmuştur.

- ✓ Kaynak metali sertlik değerleri için yapılan optimizasyonda uygun kaynak parametreleri "A1B1C1" olarak bulunmuştur. Burada A1, 110 – 140 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C1 ise, selülozik elektrodu ifade etmektedir.

- ✓ Darbe dayanımları için yapılan optimizasyonda, uygun kaynak parametreleri "A8B1C2" olarak bulunmuştur. Burada A8, 180 – 210 Amper akım şiddeti aralığını, B1, aşağıdan yukarı kaynak yönünü, C2 ise, bazik elektrodu ifade etmektedir.

- ✓ Taguchi metoduna göre, optimum sonuçları verecek parametrelerin tahmininden sonra, optimizasyonda son aşama olarak doğrulama deneyleri yapılmış ve yapılan optimizasyonun doğruluğu kontrol edilmiştir. Önceden tespit ettiğimiz akma ve çekme mukavemeti için "A5B1C1", kaynak metali sertlik değerleri için "A1B1C1", kaynak metali darbe dayanımı için ise; "A8B1C2" parametrelerinde üç adet kontrol deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak sonuçların güvenirliği irdelenmiştir.

- ✓ Doğrulama testleri ve deneysel çalışmalardan elde edilen mekanik test değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki fark göz ardı edilebilecek seviyede olduğu

görülmüş, Taguchi optimizasyonunun mekanik test değerleri tahmininde başarı ile uygulanabildiği görülmüştür. Taguchi optimizasyonu ile kaynak işleminde parametre optimizasyonunun uygun bir şekilde yapılabileceği optimizasyon çalışması ile ispatlanmıştır.

- ✓ Başlangıç parametre değerleri, tahminsel değerler ve doğrulama değerleri birbiriyle mukayese edildiğinde; Taguchi metoduyla optimizasyon işlemlerinde akma mukavemeti için %1,71, maksimum çekme mukavemeti için %3,03, kaynak metali sertliği için %7,14 ve kaynak metali darbe dayanımı için % 5,26 iyileşme tespit edilmiştir.

11.2. Öneriler

- ✓ Bu çalışmada Taguchi metodu ile kaynak parametreleri optimize edilmiş olup, sonraki çalışmalara ışık tutması beklenmektedir. Bundan sonraki aşamalarda uygun girdi parametreleri seçilerek, çıktıların ANOVA ve regresyon denklemleri ile modellemesi yapılabileceği gibi, Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak matematiksel modelleme işlemleri de gerçekleştirilebilir.

- ✓ Çalışmamızda sahada servis şartlarında doğalgaz ve petrol borularının birleştirilmesi kapsamında yapılan parametre optimizasyon işlemi, boru fabrikalarındaki boruların üretimi esnasında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işlemleri için uygulanabilir. Böylece boru üretimi esnasında parametre seçimlerinden doğan hataların önüne geçilerek, zaman, enerji ve maliyet tasarrufu sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Güzel, M. Y. (2001). *Caspian Oils and Pipeline Issiues*, Master Thesis, Hacettepe University Institue of Social Sciences, Ankara, 8-9.

2. Petrogas. (1999). Dünya daha çok enerji istiyor. Petrogas, Ankara: Botaş Vakfı Yayın Organı, 10, 30-31.

3. İnternet: World Energy Outlook. International Energy Agency. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.iea.org%2Fnewsroom%2Fnews%2F2015%2Fnovember%2Fworld-energy-outlook-2015.html&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

4. İnternet: BP Energy Outlook 2035. BP. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fcontent%2Fdam%2Fbp%2Fpdf%2Fenergy-economics%2Fenergy-outlook-2015%2Fbp-energy-outlook-2035-booklet.pdf&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

5. İnternet: Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu (2016). TPAO. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.enerji.gov.tr%2FFile%2F%3Fpath%3DROOT%252F1%252FDocuments%252FSekt%25C3%25B6r%2520Raporu%252FTP_HAM_PETROLDOGAL_GAZ_SEKTOR_RAPORU__2015.pdf&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

6. Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., and Gülsün, M. (2016). Tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilen petrol ve doğalgaz borularının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19 (3), 275-282.

7. 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.

8. Şentürk, A. (2011). *Turkey's Pipeline Strategy As An Alternative To Eu's Energy Dependency*. Master Thesis, Fatih University, Ankara.

9. Görücü, M. Ş. (2013). *Orta Asya Ve Kafkasya'daki Petrol ve Doğal Gaz Boru Hatlarının Türkiye'nin Ulusal Güvenliğine Etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, T.C. Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

10. Ahmedov, O. (2008). *Türkiye – Azerbaycan Petrol Ve Doğalgaz Boru Hattı Projelerinin Ülke Ve Bölge Ekonomileri Açısından Önem*i. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çanakkale.

11. Tepealtı, F. (2009). *Boru Hatları Ulaşımı Ve Potansiyelinin Türkiye'nin Siyasi Coğrafyası'ndaki Etkileri Ve Önemi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

12. Aras, O.N. (2001). *Azerbaycan'ın Hazar Ekonomisi ve Stratejisi*, İstanbul: Der Yayınları.

13. Tekin, E. (2010). *Petrol Boru Hatlarının Türk Dış Politikasına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

14. İnternet: BP Statistical Review of World Energy. BP. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fen%2Fglobal%2Fcorporate%2Fenergy-economics%2Fstatistical-review-of-world-energy.html&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

15. Saatçioğlu, C., Küçükaksoy, İ. (2004). Türkiye ekonomisinin enerji yoğunluğu ve önemli enerji taşıma projelerinin ekonomiye etkisi, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11, 19-39.

16. Barysch, K. (2008). Avrupa enerji güvenliğinde Türkiye kilit ülke. *Kriter Dergisi*, 24, 42-50.

17. İnternet: Pala, C., (2003). 21. yüzyıl dünya enerji dengesinde petrol ve doğal gazın yeri ve önemi: Hazar boru hatlarının kesişme noktasında Türkiye, *Avrasya Dosyası*, 9(1). Web: http://www.21yyte.org/assets/uploads/files/005-37%20Cenk.pdf adresinden 10 Şubat 2017'de alınmıştır.

18. Gül, A., Gül, A.Y. (Editörler). (1995). *Avrasya Boru Hatları ve Türkiye*, İstanbul: Bağlam Yayınları, 15.

19. Aklin, K. (2006). *Küresel Petrol Stratejilerinin Jeopolitik Açıdan Dünya ve Türkiye Üzerindeki Etkinleri*, İstanbul: İstanbul Ticaret Odası.

20. İnternet: Oğurlu, Z., (2014). Enerji güvenliğinde Karadeniz bölgesinin jeopolitiği ve Kırım'ın önemi, BİLGESAM. Web: http://www.bilgesam.org/Images/Dokumanlar/0-382-2014122911guvenlik_kongresi_bildirileri-44.pdf, adresinden 10 Şubat 2017'de alınmıştır.

21. Nuray, E. (2004). BTC (Bakü – Tiflis - Ceyhan) *Ham Petrol Boru Hattının Siyasî Boyutu*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

22. Akpınar, E. Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) ham petrol boru hattı ve Türkiye jeopolitiğine etkileri. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 25, 231.

23. Oral, E., Karataş, Ç. Uluslararası ulaştırma koridorlarında Türkiye'nin stratejik rolü. *Sarem*, 9, 56.

24. İnternet: Gemici, H., (2008). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Farsiv.sabah.com.tr%2F2008%2F02%2F02%2Fgemici.html&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

25. Ada, H., Aksöz, S. Fındık, T., Cetinkaya, C., Bostan, B., and Candan, I. (2016). API 5L X65 çeliklerinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 31(1), 1-9.

26. Aksöz, S. Ada, H., Fındık, T., Cetinkaya, C., Bostan, B., and Candan, I. (2017). API 5L X65 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*. 4(1), 72-81.

27. Ada, H., Aksöz, S., and Özer, A. (2016, 11-13 July). *Investigation of metallurgical and mechanical properties of welded region of API 5L X80 steel merged by gas metal arc welding method*. 2nd International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Odessa, Ukrain.

28. Özer, A., Aksöz, S., Ada, H., and Candan, İ. (2016, 11-13 July). *Investigation of metallurgical and mechanical properties of welded region of API 5L X80 steel merged by electric arc welding method.* 2nd International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Odessa, Ukrain.

29. Ada, H., Aksöz, S., Özer, A., and Candan, İ. (2016, 1-3 September). *Investigation of metallurgical and mechanical properties of weld region of API 5l X80 steel joints by submerged arc welding method*. 3rd International Conference on Advanced Technologies & Sciences (ICAT16), Konya.

30. Bai, Y. (2001). *Pipelines and Risers*. Oxford, UK: Elsevier.

31. Baek, J. H., Kim, Y. P., Kim, K., Kim, C.M., Kim, W.S., and Seok, C. S. (2010). Effects of pre-strain on the mechanical properties of API 5L X65 Pipe. *Materials Science and Engineering* (A), 527, 1473-1479.

32. Baek, J., Kim, Y., Kim, W., Koo, J., and Seok, C. (2012). Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending, *Materials Science and Engineering* (A), 540, 70–82.

33. Cosham, A., Hopkins, P. (2004). The effect of dents in pipelines - guidance in the pipeline defect assessment manual. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 81,127- 139.

34. Kaba, S. (2009). *Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Muayenesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

35. Salma, A. (2011). *Tahribatsız Muayene Metotları Ve Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

36. Yıldız, M. (2000). *Doğalgaz Boru Hatlarının Kaynağı Ve Tahribatsız Muayenesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

37. API Specifications 5L. (2012). *Specifications for Line Pipe*. USA: American Petroleum Institute, 45th Edition.

38. Gürsel, A. (1999). *Petrol Borularının Kaynaklarında Kullanılan Radyografik Ve Ultrasonik Metotların Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-4.

39. Özaltun, H. (1999). *Boru Hatlarında Hasar Oluşumu Ve Hasarların Çeşitli Kaynak Teknikleri Kullanılarak Tamir Edilme Usulleri.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 154-160.

40. Güloğlu, H. (1997). *Tozaltı Kaynaklı Spiral Boru İmalinde Kaynak Parametrelerinin Boru Kalitesine Etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul, 1-5, 11-12.

41. Uysal, A. K. (2010). *Petrol Ve Doğalgaz Boruhattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı.* Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

42. Hillenbrand, H.G., Graf, M., Kalwa C. (2001). *Development and production of high strength pipeline steels*, Germany: Europipe.

43. Ateş, E. (2004). *Spiral kaynaklı mikroalaşımlı petrol ve doğalgaz boru hatlarının üretim prosesinin, malzeme özelliklerinin ve kaynak parametrelerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

44. Taş, Z. (2006). Nb-V Alaşımlı Boru Çeliklerinde Mikroyapı–Mekanik Özellikler İlişkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 152-160.

45. Alp, T. (2007). *The Resistance to Hydrogen Embrittlement of Thermomechanically Treated Microalloy Steel*. 2nd Int. Symposium and Exhibition on Natural Gas Operations, INGAS 07, İstanbul.

46. Kyriakides, S., Corona, E. (2007). *Mechanics of Offshore Pipelines*. Buckling and Collapse, Chapter 3: Pipe and Tube Manufacturing Process, USA: Elsevier.

47. Ponschab, G., Akın, Ü., Akgüllü, E., and Maktavlı, E. (1998). *Effect of linepipe quality parameters*. Pipeline Welding Symposium, İTÜ, İstanbul.

48. Bakkaloğlu, A. (2000). *Mikroalaşımlı çeliklerin haddelenmesi sırasında mikroyapı mekanik özellikler ilişkisi.* 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.

49. Bıyıklı, M., Çömeten Y.C., Erdem, G. (2001). *Erdemir'de yüksek mukavemetli mikroyapı alaşımlı boru malzemelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin belirlenmesi.* I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.

50. Kurttepeli, İ.B. (2001). *Hat borularının kaynağı*. TMMOB Kaynak Teknolojisi 3.Ulusal Kongresi, İstanbul.

51. Mahmutoğlu, M.Z., Çimenoğlu, H. (2003). %0,03 Nb ve %0,05 V'lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı Mekanik Özellik İlişkisi. *İTÜ Dergisi*, 2, 6: 68-72.

52. Bajic, N., Šijaki-Žeravi, V. (2003). *The analysis of change of structural and mechanical properties of welded joints of microalloyed Nb/V steel grade by changing the composition of filler material*. International Conferance on Welding, Belgrade.

53. Bajic, N., Šijaki-Žeravi, V., Rakin M., and Kovacevic, K. (2005). *Structure optimization of weld metal and HAZ in microalloyed high strength steel welded joints*. 7. Yugoslav Materials Researc Society Conference (YUCOMAT), Herceg Novi, 193–200.

54. Radovic, A., Bajic N., and Grabulov, V. (1996). Specific quality of the weld metal of welded joints of fine-grained microalloyed steels, *Zavarivanje*, 96, 61–72.

55. Tribe, A., Nelson, T.W. (2015). Study on the fracture toughness of friction stir welded API X80. *Engineering Fracture Mechanics*, 150, 58–69.

56. Hertzberg, R.W. (1996). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: J. Wiley & Sons.

57. Rodriguez-Ibabe, J.M. (1998). The role of microstructure in toughness behavior of microalloyed steels. *Material Science Forum*, 284, 6.

58. Hashemi, S. (2011). Strength - hardness statistical correllation in API X65 steel. *Material Science and Engineering A*, (528), 1648–1655.

59. Hashemi, S.H., Mohammadyani, D. (2012). Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, 8–15.

60. Rakhshkhorshid, M., Hashemi, S.H. (2013). Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*, 573, 37–44.

61. Shaban, M., Eghbali, B. (2010). Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel. *Materials Science and Engineering A*, 527, 4320–4325.

62. Jin, W., Jun, C, Zhen, Z., and Xue-yu, R. (2008). Dynamic recrystallization behavior of microalloyed forged steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 15, 78–81.

63. Rani, B.E.A. and Bharathi, B.J.B., (2012). Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview, *International Journal of Corrosion*, 1-16.

64. Migahed, M.A., Al-Sabagh, A.M., Khamis, E.A., and Zaki, E.G. (2015). Quantum chemical calculations, synthesis and corrosion inhibition efficiency of ethoxylated-[2-(2-{2-[2-(2-benzenesulfonylaminoethylamino)-ethylamino]-ethylamino}-ethylamino)-ethyl]-4-alkylbenzenesulfonamide on API X65 steel surface under H2S environment. *Journal of Molecular Liquids*, 212, 360–371.

65. Komizo, Y. (2008) Overview of recent welding technology relating to pipeline construction. *Transactions of JWRI*. 37, 5-7.

66. Hillenbrand, H.G., Heckmann, C.J. and Niedehoff, K.A. (2002). *X80 line pipe for large-diameter high strength pipelines.* X80 Pipeline Cost Workshop Conference Preprints, 1-10.

67. Peters, P.A., Frackmann, H.G., Christmann, H., and Wiesche, W. (1982). *The manifacture of spiral welded pipe with integrating quality assurance*. Metals Society Conference, Manufacture, fabrication and operation of pipelines, Glasgow, 148-162.

68. Şirin, K. (1997). *Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynaklı Boru Üretiminde Proses Parametrelerin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1-15.

69. Mannesmann, R. (1986). The Manufacture and Testing of Steel Pipe and Tubing, *Europipe,* 53 -67.

70. Şirin, K. (2004). *Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Spiral Boru Üretiminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi.* Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 9-97.

71. Candan, İ. (2004). *Çelik Boruların MIG-MAG Kaynağında Kaynak Pozisyonunun Nüfuziyet Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32, 41-43.

72. Walton C. (1995). Bohler pipeline welding with safe result & lower costs, *Pipeline&Gas*, 11, 70-76.

73. Karakaş, E. (1998). Quality and automation in welding of tubes orbital welding systems, *International Pipeline,* 18, 222-228.

74. Anık, S., Tülbenci, K., and Kaluç, E. (1991). *Örtülü Elektrod İle Elektrik Ark Kaynağı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, 22-23, 86-88.

75. Olgun, S. (1998). *Doğal Gaz ve Petrol Taşıyan Boruların Kaynağında Kaynak Hatalarının Tesbiti Ve Alınması Gereken Tedbirler*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-8, 9-17.

76. İGDAŞ. (2003). *İstanbul Doğalgaz Dağıtım Projesi Yapım İşleri*. İstanbul: Teknik Şartnamesi, 21-30, 33-34.

77. Oğuz, B. (1989). *Boru hattı kaynağı*. İstanbul: Oerlikon Yayını, 2-6 -10.

78. Eryürek, İ. B. (1998). *Gazaltı MIG-MAG Kaynağı*. İstanbul: As Kaynak Yayınları, 1.baskı, 1- 10.

79. Kaluç, E., Tülbentçi, K. (2002). Boru hatlarında otomatik MIG/MAG kaynak yönteminin kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 43, 11-16.

80. Tülbentçi, K. (1990). *MIG-MAG Ergiyen Elektrod İle Ark Kaynağı*. Gedik Eğitim Vakfı (GEV), 27-159.

81. Kennedy, I. J. (1993). *Oil and Gas Pipeline Fundementals*. Oklahomo: Pen Well Publishing Company, Second Edition, 199-200.

82. Çakıroğlu, R., (2011). *Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32–38.

83. Hicks, R.C. (1985). *Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler*. Çeviri Muluk, Z., Toktamış, Ö., Kurt, S. ve Karaağaoğlu, E. Ankara: Akademi Matbaası, 1-10.

84. Davim, J. P. (2003). A note the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 305-308.

85. Şeker, M. (2013). *Fren Balatalarının Üretim Şartları ve İçeriğinin Performansa Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Araştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

86. Ross, P.J., (1996). *Taguchi Tecniques For Quality Engineering*. New York: McGrow–Hill International Book Company, 1-73.

87. Peace, G.S. (1992). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*, Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 8.

88. Bayrak, Z. (1996). *Taguchi Yönteminin Kalite Kontrolüne Uygulanması*,. Yüksek Lisans Tezi Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

89. Phillip J. R. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw-Hill, New York.

90. Şanyılmaz, M., (2006). *Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirmeleri Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemiyle Bir Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

91. Şirvancı, M. (1997). *Kalite için deney tasarımı Taguchi yaklaşımı*. İstanbul: Literatür Yayınları.

92. Ünal, Y.A. (2001). *Şanzıman Giriş Mili İmalatındaki Proses Parametrelerine Taguchi Metodunun Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

93. Keleş, Ö., Taptık, Y. (1998). *Kalite Savaşı.* İstanbul: Kalder Yayınları, 23.

94. Taguchi, G., Chowdhury, S., and Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality engineering handbook*. John Willey & sons inc. New Jersey.

95. Anagün, A.S. (1997). *Kalite Kontrolunda İleri Teknikler Ders Notları,* Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

96. Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı-Taguchi Yaklaşımı*. İstanbul: Literatür Yayınları.

97. Koç, S. (2003). *Kritik Ünitelerin Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Tasarım Yöntemi İle Optimizasyonu.* Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

98. Hamzaçebi, C. ve Kutay, F. (2003). Taguchi metodu: Bir uygulama, *Teknoloji Dergisi*, 6(3-4), 7-17.

99. Moradpour, M.A., Hashemi, S.H., and Khalili, K. (2015). multi–objective optimization of welding parameters in submerged arc welding of API X65 steel plates. *Journal of Iron and Steel Research*, 22, 870-878.

100. Savur, M.K. (2007). *Statik ve Dinamik Yüklemeler Altındaki Yapıların Ardışık Taguchi Metodu İle Optimum Tasarımı İçin Fortran Programı Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.

101. Shanmugarajan, B., Shrivastava, R., Sathiya, P., and Buvanashekaran G. (2016). Optimal of laser welding parameters for welding of p92 material using taguchi based grey relation Analysis. *Defence Technology*, 12, 343-350.

102. Laksminarayanan, A.K., Balasuramanian, V. (2008). Process parameters optimization for friction stir Welding of RDE–40 aluminium alloy using Taguchi technique. *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 18, 548–554.

103. Gardiner, W.P., Gettinby, G. (1998). Taguchi Methods. *Experimental Design Techniques in Statistical Practice*, 289-321.

104. Tarng, YS., Yang, WH. (1998). Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, 549–54.

105. Kumar A., Shailesh P., and Sundarrajan S. (2008). Optimization of magnetic arc oscillation process parameters on mechanical properties of AA 5456 aluminum alloy weldments. *Material Design*, 29, 1904–13.

106. Shojaeefard, M.H., Khalkhali, A., and Akbari, M. (2013). Application of Taguchi optimization technique in determining aluminum to brass friction stir welding parameters. *Material Design* 52, 587–92.

107. Ghosh, N., Kumar, P., and Nandic, G. (2016). Parametric optimization of MIG welding on 316L austenitic stainless steel by grey-based taguchi method. *Procedia Technology*, 25, 1038–1048.

108. Nandagopal, K., Kailasanathan, C. (2016). Analysis of mechanical properties and optimization of gas tungsten Arc welding (GTAW) parameters on dissimilar metal titanium (6Al-4V) and aluminium 7075 by Taguchi and ANOVA techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 682, 503-516.

109. Huang, H.Y. (2010). Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Material Design*, 31, 2488–2495.

110. Khan, M.M.A., Romoli, L., Fiaschi, M., Dini, G., and Sarri, F. (2011). Experimental design approach to the process parameter optimization for laser welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap configuration. *Optics and Laser Technology* 43,158–172.

111. Bidi, L., Mattei, S., Cicala, E., Andrzejewski, H., Le Masson, P., and Schroeder, J. (2011). The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modelling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes. *Optics and Laser Technology,* 43, 537–545.

112. Ascari, A., Fortunato, A., Orazi, L., and Campana, G. (2012). The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy. *Optics and Laser Technology,* 44, 1485–1490.

113. Dongxia, Y., Xiaoyan, L, Dingyong, H. Zuoren, N., and Hui, H. (2012). Optimization of weld bead geometry in laser welding with filler wire process using Taguchi's approach. *Optics and Laser Technology,* 44, 2020–2025.

114. Moradi, M., Ghoreishi, M., Frostevarg, J., and Kaplan A.F.H. (2013). An investigation on stability of laser hybrid arc welding. *Optics and Laser Technology,* 51, 481–487.

115. Zhao, D., Wang, Y., Wang, X., Wang, X., Chen, F., and Liang, D. (2014). Process analysis and optimization for failure energy of spot welded titanium alloy. *Material Design,* 60, 479–489.

116. Casalino, G., Mortello, M., Leo, P., Benyounis, K.Y., and Olabi, A.G. (2014). Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy. *Mateial Design,* 61, 191–198.

117. Leo, P., Renna, G., Casalino, G., and Olabi, A.G. (2015). Effect of power distribution on the weld quality during hybrid laser welding of an Al-Mg alloy. *Optics and Laser Technology,* 73, 118–126.

118. Sapakal, S.V., Telsang, M.T. (2012). Parametric optimization of MIG welding using Taguchi design method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1, 28–30.

119. Chandresh, N.P., Chaudhary, S. (2013). Parametric optimization of weld strength of metal inert gas welding and tungsten inert gas welding by using analysis of variance and grey relational analysis. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology,* 1, 48–56.

120. Balasubramanian, M. (2016). Prediction of optimum weld pool geometry of PCTIG welded titanium alloy using statistical design. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 15-21.

121. Hargopal, G., Reddy, P.V.R.R., Reddy, C.M.G., and Subrahmanyam J.V. (2011). Parameter design for MIG welding of Al- 65032 alloy using Taguchi technique, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 70, 844–850.

122. Sathish R., Naveen B., Nijanthan P., Arun Vasantha Geethan K., and Vaddi Seshagiri R. (2012). Weldability and process parameter optimization of dissimilar pipe joints using GTAW, *International Journal of Engineering Research and Applications,* 2 (3), 2525–2530.

123. Aydın H., Bayram A., Esme U., Kazançoglu Y., ve Güven O. (2010). Application of grey relational analysis and Taguchi method for the parametric optimization of friction stir welding process. *Materiali in Tehnologije* 44(4), 205–211.

124. Singh P.K., Patel D., and Prasad S.B. (2016). Optimization of process parameters during vibratory welding technique using Taguchi's analysis. *Perspectives in Science*, 8, 399-402.

125. Javadi Y., Sadeghi S., and Najafabadi M.A. (2014). Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding. *Materials and Design*, 55, 27–34.

126. Srirangan A.K., Paulraj S. (2016). Multi-response optimization of process parameters for TIG welding of incoloy 800HT by Taguchi grey relational analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 811–817.

127. Moghaddam M.A., Golmezergi R., and Kolahan F. (2016). Multi-variable measurements and optimization of GMAW parameters for API-X42 steel alloy using a hybrid BPNN–PSO approach. *Measurement*, 92, 279–287.

128. Özden N. (1985). *Kaynağın ısıl işlemi*, İstanbul: Nurettin Uycan Cilt ve Basım Sanayii A.Ş., 1-22.

129. Keehan, E. (2004). *Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals*, PhD Thesis, University of Gothenburg Department of Experimental Physics, Gothenburg, 1-72.

130. Aucott, L.A., Wen, S.W., and Dong, H. (2015). The role of ti carbonitrideprecipitates on fusionzonestrength-toughness in submerged arc welded pipeline joints. *Materials Science and Engineering (A)*, 622, 194–203.

131. Yükler, A.İ. (1994). *Kaynak metali*. İstanbul: MÜTEF Matbaası, 2-60.

132. Beidokthi, B., Koukabi, A.H., and Dolati, A. (2009). Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded hsla pipeline steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1-9.

133. Hayat F.(2009). *Masif Ve Özlü Kaynak Telleri İle Birleştirilen Çift – Fazlı Çeliklerin Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri,* Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

134. İnternet:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.slideshare.net%2Fguest831c1e%2Fwelding-inspection-cswip&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

135. Bhadesia, H.K.D.H. and Svensson L.E. (1987). *Worked examples in the geometry of cristals*. Brookfield, USA: Institue of Metals, North American Publications Center, 1-89.

136. Bhadesia, H.K.D.H., and Svensson L.E. (1993). *Mathematical modelling of weld phenomena*. London: Institute of Materials, 110-173.

137. Svensson L.E. (1994). *Control of microstructures and properties in steel arc welding*. USA: Crc Press.

138. Eroğlu, M., Aksoy, M. (2002). *15Mo3 çeliğinin kaynağında enerji girişinin kaynak bölgesinin mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi*. Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi, Ankara, 38 – 45.

139. Ju, J.B., Kim, W., and Jang, J. (2012). Variations in DBTT and CTOD within weld heataffectedzone of API X65 pipeline steel. *Materials Science and Engineering,* 546, 258–262.

140. Shanmugam, S., Misra, R.D.K., Hartmann, J., and Jansto, S.G. (2006). Microstructure of high strengthniobiumcontaining pipeline steel. *Materials Science and Engineering,* 441, 215-229.

141. Easterling, K. (1992). *Introduction to the physicalmetallurgy of welding*. England: Butterworth-Heinemann.

142. Hashemi, S.H., Mohammadyani, D. (2012). Characterisation of weldment hardness impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* 8, 8-15.

143. Sulea, J., Gangulya, S., Coules, H., and Pirling, T. (2015). Application of local mechanical tensioning and laserprocessing to refine microstructure and modifyresidualstressstate of a multi-pass 304L austenitic steels welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 18, 141–150.

144. Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., and Romanoff, J. (2014). Influence of grain size distribution on the hall–petch relationship of welded structural steel. *Materials Science and Engineering,* 592, 28–39.

145. Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A. (2005). Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18 (3), 473-480.

146. Ünlü B.S., Kurgan N., ve Yılmaz S.S. (2008). Toz metal çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 50, 1-9.

147. Deniz A. (2012). *Çeliklerde Tane Boyutunun Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi,* Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 40.

148. Kara R. (2005). *Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

149. Krautkramer M. B. (2000). Nondestructive material testing with ultrasonics - introduction to the basic principles. *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics,* 5(9), 1435-4934.

150. İnternet:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fakgunalsaran.com%2Fdoc%2Fhasar-analizi-02-3721.pdf&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.

151. Hagedorn, K. E., Kaspar, R., and Kleine, R. (1990). Untersuchungen zum einfluss des gefügesauf bruchmechanische kennwerte. *Steel Research,* 61(10), 510-517.

152. Taş, Z. (2004). *Termomekanik İşlem Görmüş Mikroalaşımlı Çeliklerin Kırılma Mekaniği - Kırılma Tokluğu- Açısından İncelenmesi*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 107.

EKLER

EK-1. Çekme – basma test makinası kalibrasyon belgeleri



TÜRKAK
TÜRK AKREDİTASYON KURUMU
TURKISH ACCREDITATION AGENCY
tarafından akredite edilmiş
TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0002-K

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
Kalibrasyon Grup Başkanlığı-Ankara Kalibrasyon Müdürlüğü
100. Yıl Bul. Cevat Dündar Cd. No: 1 Ostim Yenimahalle/Ankara

AB-0002-K
16M02703
09.16

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi/Adresi *Customer/Address*	**EMEK BORU MAKİNA SAN.ve TİC.A.Ş.** ORGANİZE SAN.BÖLGESİ TÜRKMENİSTAN CAD.NO:2 SİNCAN/ANKARA
İstek Numarası *Order No.*	2013/2
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	Çekme-Basma Test Makinasi (ASTM-E4-07)
İmalatçı *Manufacturer*	İNSTRON
Tip *Type*	UTM HYD
Seri Numarası *Serial Number*	600KNJ7795
Kalibrasyon Tarihi *Date of Calibration*	22.09.2016
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of the Certificate*	4

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standardlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) ile Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) arasında karşılıklı tanınma anlaşması imzalanmıştır.
Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainities and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Kalibrasyonu Yapan** *Calibrated by*	**Laboratuvar Müdürü** *Head of the Calibration Laboratory*
	26.09.2016	Mürsel BAL	Fatih KÖSE

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
100. Yıl Bulvarı Cevat Dündar Cad. No: 1
Ostim Stadyumu Arkası Yenimahalle - ANKARA
Tel: 0 312 592 52 14 - Faks: 0 312 592 52 07

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6
Nilüfer - BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova
Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

EK-1. (devam) Çekme – basma test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

AB-0002-K
16M02703
09.16

Cihaz / *object*	: Çekme / Basma Test Makinası
Marka / *manufacturer*	: İNSTRON
Model / *type*	: UTM HYD
Seri No. / *serial no.*	: 600KNJ7795
Gösterge tipi / *type of indicator*	: Dijital
Ölçüm aralığı / *measurement interval*	: 60,0 kN - 600,0 kN
Çözünürlük / *resolution*	: 0,1 kN
Bölüntü değeri / *scale*	: --

Kalibrasyon Tarihi ve Cihazın Bulunduğu Yer / *date and place of calibration*

Kalibrasyonun Yeri / *place of calibration*	: LABARATUVAR
Kalibrasyon Tarihi / *date of calibration*	: 19.09.2016

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü / *calibration method and procedure*

Kalibrasyon standardı / *calibration standardı*	: ASTM E4-13
Kalibrasyon talimatı / *calibration procedure*	: T5.4.01.05.05

Ölçüm Şartları / *measurement conditions*

Ölçüm yapmadan önce, referans cihazlar en az yarım saat laboratuvar şartlarında kondisyonlanması için bekletilmiştir.
At least half an hour was given for reference instruments to reach temperal equilibrium.

Çevre Şartları / *enviromental conditions*

Ortam Sıcaklığı / *ambient temperature* : (23,1 - 22,9) °C

Kalibrasyon Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliği / *calibration results and measurement uncertainty*

Her bir adım için ölçüm sonuçları ve sapma değerleri Tablo 1'de, ölçüm belirsizliği Tablo 3'te, sınıf bilgileri ise Tablo 4'te verilmiştir. Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

For each increment, on table 1 calibration results and bias values, on table 3 uncertainty values, on table 4 classification info are given. Reported is the expanded uncertainty which results by multiplication with the coverage factor k=2. It has been evaluated according to GUM and EA-4/02. Generally, the value of the measuring quantity is found within the attributed interval with a probability of approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihazlar / *reference devices used in calibration*

#	Cihaz Adı *device name*	Üretici *manufacturer*	Tip / model *type / model*	Seri No. *serial no.*
1	Gösterge cihazı / indicator	HBM	DK 38	32507
2	Dij. Sıcaklık Ölçer / temperature meter	VERTH	Dijital	100605562
3	Kuvvet dönüştürücü / force transducer	HBM	STZ60	158
4	Kuvvet dönüştürücü / force transducer	GTM	0	20507

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı / *comments, remarks and statement of compliance*

Yapılan ölçümler neticesinde Çekme / Basma Test Makinası, ölçme belirsizliği dikkate alınmaksızın ASTM E4-13'e göre yapılan değerlendirmede izin verilebilen değerler tablosuna göre sınıflandırılmıştır. Kalibre edilen cihazın uygun aralıklarla kalibre edilmesinden kullanıcı sorumludur.
Material testing machine is classified according to ASTM E4-13 without reference to measurement uncertainty. Expiration and recalibration dates are up to customer.

EK-1. (devam) Çekme – basma test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

AB-0002-K
16M02703
09.16

Sayfa *(Page)* 3 / 4

Kalibrasyon Sonuçları */ calibration results*

Tablo 1 */ table 1* : Basma Plakalarına Ait Ölçüm Sonuçları */ measurement results for compression plates*

Ölçülen değişkenler / *measured parameters*		Üst plaka	Alt plaka
Yüzey sertliği / *surface hardness*	:	-- *HRC*	-- *HRC*
Yüzey pürüzlülüğü / *surface roughness*	:	-- *µm*	-- *µm*
Düzlemsellik sapması / *düzlemsellik sapması*	:	-- *mm*	-- *mm*
Sehim / *strain*	:	-- *mm*	-- *mm*

Kullanılan test yük hücresi / *tested load cell*		
Marka / *Manufacturer*	:	--
Model / *Type*	:	--
Seri no. / *serial no.*	:	--
Kapasite / *capacity*	:	--

Tablo 2 */ table 2* : Ölçüm Sonuçları */ measurement results*

Ölçme yönü ve kapasite / *measurement direction and capacity* Çekme / 600 kN							
Adım	Test cihazına ait ölçümler	Referans değerler	Referans cihaza ait ölçümler *measured values of reference device*				Referans cihaza ait ölçümlerin ortalaması
increment	*meas.values of test device*	*reference values*	1. seri / *1st run*	2. seri / *2nd run*	3. seri / *3rd run*	4. seri / *4th run*	*mean values of reference device*
%	*kN*	*mV/V*	*mV/V*	*mV/V*	*mV/V*	*mV/V*	*mV/V*
10,0	60,0	0,00024	0,24005	0,23989	0,24002	--	0,23999
20,0	120,0	0,00048	0,48045	0,48012	0,48008	--	0,48022
30,0	180,0	0,00072	0,72098	0,72076	0,72059	--	0,72078
40,0	240,0	0,00096	0,96234	0,96165	0,96134	--	0,96178
50,0	300,0	0,00120	1,20345	1,20287	1,20278	--	1,20303
60,0	360,0	0,00144	1,44453	1,44464	1,44453	--	1,44457
70,0	420,0	0,00168	1,68789	1,68632	1,68627	--	1,68683
80,0	480,0	0,00192	1,92781	1,92816	1,92826	--	1,92808
90,0	540,0	0,00216	2,17189	2,17174	2,17167	--	2,17177
100,0	600,0	0,00240	2,41496	2,41485	2,41476	--	2,41486

Tablo 3 */ table 3* **:** Belirsizlik Kriterleri ve Ölçüm Belirsizliği */ uncertainty criteria and measurement uncertainty*

Test cihazına ait ölçümler	Ref. cihaza ait ort. kuvvet değerleri	Bağıl doğruluk hatası	Bağıl tekrarlanabilirlik hatası	Bağıl çözünürlük	Bağıl tersinirlik hatası	Bağıl sıfır hatası	Genişletilmiş ölçüm belirsizliği
meas. values of test device	*avg. force values of ref. device*	*relative accuracy error*	*relative repeatability error*	*relative resolution*	*relative reversibility error*	*relative zero error*	*expanded measurement uncertainty*
kN	*kN*	%	%	%	%	%	*U [%] k=2*
0,0	--	--	--	--	--	0,00	--
60,0	60,0	0,00	0,07	0,17	--	--	0,17
120,0	120,0	0,00	0,08	0,08	--	--	0,17
180,0	180,0	0,00	0,05	0,06	--	--	0,17
240,0	240,1	-0,04	0,10	0,04	--	--	0,17
300,0	300,1	-0,03	0,06	0,03	--	--	0,17
360,0	360,2	-0,06	0,01	0,03	--	--	0,17
420,0	420,3	-0,07	0,10	0,02	--	--	0,17
480,0	480,2	-0,04	0,02	0,02	--	--	0,17
540,0	540,5	-0,09	0,01	0,02	--	--	0,17
600,0	600,7	-0,12	0,01	0,02	--	--	0,17

Tablo 4 */ table 4* : Sınıflandırma Kriterleri ve Cihazın Sınıfı */ classification criteria and class of the device*

Ölçüm Aralığı *measurement interval*	Doğruluk *accuracy*	Tekrarlanabilirlik *repeatability*	Çözünürlük *resolution*	Sıfıra dönüş *zero-return*	Tersinirlik *reversibility*	Sınıf *class*
(60 - 600) kN (120 - 600) kN	--	--	--	--	--	--

Uygunluk Beyanı */ declaration of conformity*

ASTM E4-13 dokümanına göre yukarıda belirtilen kriterler dikkate alındığında ilgili cihaz;
When uncertainty criteria are taken into account, according to ASTM E4-13, the device is;

Uygundur.
within tolerance.

34.01.R.001/12.04.2007-0

EK-1. (devam) Çekme – basma test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

AB-0002-K
16M02703
09.16

Sayfa *(Page)* 4 / 4

Kalibrasyon Sonuçları (devamı) */ calibration results (continued)*

Kullanılan test yük hücresi / *tested load cell*		
Marka / *Manufacturer*	:	--
Model / *Type*	:	--
Seri no. / *serial no.*	:	--
Kapasite / *capacity*	:	--

Tablo 5 */ table 5* : Ölçüm Sonuçları */ measurement results*

Ölçme yönü ve kapasite / *measurement direction and capacity* Çekme / 100 kN							
Adım *increment* %	Test cihazına ait ölçümler *meas.values of test device* kN	Referans değerler *reference values* mV/V	Referans cihaza ait ölçümler *measured values of reference device* 1. seri / *1st run* mV/V	2. seri / *2nd run* mV/V	3. seri / *3rd run* mV/V	4. seri / *4th run* mV/V	Referans cihaza ait ölçümlerin ortalaması *mean values of reference device* mV/V
10	10,00	-0,19987	-0,19923	-0,19934	-0,19934	--	-0,19930
20	20,00	-0,39975	-0,39790	-0,39841	-0,39887	--	-0,39839
30	30,00	-0,59964	-0,59834	-0,59805	-0,59806	--	-0,59815
40	40,00	-0,79955	-0,79643	-0,79765	-0,79783	--	-0,79730
50	50,00	-0,99947	-0,99721	-0,99732	-0,99678	--	-0,99710
60	60,00	-1,19939	-1,19687	-1,19698	-1,19712	--	-1,19699
70	70,00	-1,39931	-1,39843	-1,39867	-1,39856	--	-1,39855
80	80,00	-1,59924	-1,59926	-1,59945	-1,59943	--	-1,59938
90	90,00	-1,79916	-1,79990	-1,79956	-1,79903	--	-1,79950
100	100,00	-1,99909	-1,99867	-1,99932	-1,99956	--	-1,99918

Tablo 6 */ table 6* : Belirsizlik Kriterleri ve Ölçüm Belirsizliği */ uncertainty criteria and measurement uncertainty*

Test cihazına ait ölçümler *meas. values of test device* kN	Ref. cihaza ait ort. kuvvet değerleri *avg. force values of ref. device* kN	Bağıl doğruluk hatası *relative accuracy error* %	Bağıl tekrarlanabilirlik hatası *relative repeatability error* %	Bağıl çözünürlük *relative resolution* %	Bağıl tersinirlik hatası *relative reversibility error* %	Bağıl sıfır hatası *relative zero error* %	Genişletilmiş ölçüm belirsizliği *expanded measurement uncertainty U [%] k=2*
0,00	--	--	--	--	--	0,00	--
10,00	9,97	0,30	0,06	0,10	--	--	0,07
20,00	19,93	0,35	0,24	0,05	--	--	0,15
30,00	29,93	0,23	0,05	0,03	--	--	0,04
40,00	39,89	0,28	0,18	0,03	--	--	0,11
50,00	49,88	0,24	0,05	0,02	--	--	0,04
60,00	59,88	0,20	0,02	0,02	--	--	0,04
70,00	69,96	0,06	0,02	0,01	--	--	0,04
80,00	80,01	-0,01	0,01	0,01	--	--	0,04
90,00	90,02	-0,02	0,05	0,01	--	--	0,04
100,00	100,00	0,00	0,04	0,01	--	--	0,04

Tablo 7 */ table 7* : Sınıflandırma Kriterleri ve Cihazın Sınıfı */ classification criteria and class of the device*

Ölçüm Aralığı *measurement interval*	Doğruluk *accuracy*	Tekrarlanabilirlik *repeatability*	Çözünürlük *resolution*	Sıfıra dönüş *zero-return*	Tersinirlik *reversibility*	Sınıf *class*
(10 - 100) kN	0,5	0,5	0,5	0,5	--	0,5
(20 - 100) kN	0,5	0,5	0,5	0,5	--	0,5

Uygunluk Beyanı */ declaration of conformity*

TS EN ISO 7500-1 standardına göre yukarıda belirtilen kriterler dikkate alındığında ilgili cihaz; Toleranslar içindedir.
When uncertainty criteria are taken into account according to TS EN ISO 7500-1, the device is; within tolerance.

34.01.R.001/12.04.2007-0

EK-2. Çentik – darbe test makinası kalibrasyon belgeleri

TÜRKAK
TÜRK AKREDİTASYON KURUMU
TURKISH ACCREDITATION AGENCY
tarafından akredite edilmiş
TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0002-K

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
Kalibrasyon Grup Başkanlığı-Ankara Kalibrasyon Müdürlüğü
100. Yıl Bul. Cevat Dündar Cd. No: 1 Ostim Yenimahalle/Ankara

AB-0002-K
16M02708
09.16

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi/Adresi *Customer/Address*	**EMEK BORU MAKİNA SAN.ve TİC.A.Ş.** ORGANİZE SAN.BÖLGESİ TÜRKMENİSTAN CAD.NO:2 SİNCAN/ANKARA
İstek Numarası *Order No.*	2013/7
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	Çentik-Darbe Test Makinesi ASTM
İmalatçı *Manufacturer*	ZWİCK
Tip *Type*	RKP 450
Seri Numarası *Serial Number*	721678
Kalibrasyon Tarihi *Date of Calibration*	06.09.2016
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of the Certificate*	3

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standardlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) ile Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) arasında karşılıklı tanınma anlaşması imzalanmıştır.
Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainities and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Kalibrasyonu Yapan** *Calibrated by*	**Laboratuvar Müdürü** *Head of the Calibration Laboratory*
	26.09.2016	Mürsel BAL	Fatih KÖSE

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
100. Yıl Bulvarı Cevat Dündar Cad. No: 1
Ostim Stadyumu Arkası Yenimahalle - ANKARA
Tel: 0 312 592 52 14 - Faks: 0 312 592 52 07

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6
Nilüfer - BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova
Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

EK-2. (devam) Çentik – darbe test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

AB-0002-K
16M02708
09-16

Sayfa (Page) 2/3

Makine/Cihaz *(Object)*

Cihazın Sahibi	:	EMEK BORU
Makinenin/Cihazın Adı	:	Çentik Darbe Test Makinesi
Modeli	:	RKP 450
Seri Numarası	:	721678
Çalışma Sistemi	:	MEKANİK
Ölçme Sistemi	:	ANALOG / DİJİTAL
Bulunduğu yer	:	KALİTE KONTROL Lab.

Cihazın laboratuvara kabul t *(Date of receipt of the object)*

Kalibrasyonlar yerinde yapılmaktadır.

Prosedür *(Procedures)*

Kalibrasyon,ASTME 23-12C"Metalik Malzemeler-Charpy Vurma Deneyi: Deney Makinasının doğrulanması"standardına uygun olarak yapılmıştır.

Ölçüm Şartlar *(Measurement Conditions)*

Direkt Muayene Kapsamı:1.Makine gövdesi,2.Sarkaç,3.Makinanın ve sarkaçın durumu 4.Numune yerleştirme mesnet ve dayanakları, 5.Sarkaçın dinamik ağırlık merkezi,6.Gösterge tech. 7.Nominal çalışma enerjisi,8.Sarfedilen enerjinin gösterge sapması 9.Sürtünme kayıpları 9.Sürtünme kayıpları 10.Vurma hızı

Çevre Şartları *(Environmental Conditions)*

Ortam Sıcaklığı/ *Ambient temperature* Başlangıç sıcaklığı Bitiş sıcaklığı
23,0 °C 23,3 °C

Ölçüm Sonuçl *(Measurement Results)*

Müteakip sayfada/larda verilmiş */Gived in the next page.*

Ölçüm Belirsizliği *(Measurement Uncertainty)*

Ölçüm sonuçları ile birlikte verili */Gived in the next page.*
Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multipllied by the coverage factoe k=2,which for a normaldistribution corresponds to a coverage probabilityof approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Te *(Calibrasyon Equipment)*

Termometre	:	A12	Gösterge Cihazı DK 38	:	A01
Sertlik Ölçme Cihazı	:	A10	Yük Hücresi No1	:	A4B
			Kalibrasyon Seti	:	AÇS

Gekektiğinde Yorum

-Kalibrasyon süresi ASTM E23-12c de belirtilmiştir.
-Makinanın yerinin değiştirilmesi,gösterge ve ölçme techizatının yenilenmesi veya tamir edilmesi, makinada ve gösterge techizatında hata tesbit edilmesi hallerinde sertifika geçerliliğini kaybeder.
Kalibrasyonda dolaylı ölçüm(Numune kırımı) yapılmamıştır.

EK-2. (devam) Çentik – darbe test makinası kalibrasyon belgeleri

AB-0002-K
16M02708
09-16

TSE KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

Sayfa (Page) 3/3

1.Bölge Ölçüm Sonuçları *(Measurement Results)*

Ölçüm Kademesi: 450,00 J			**Dönüştürülmüş Değer**	
Nominal Çalışma Enerjisi	450,00	J	450,00	J
Potansiyel Çalışma Enerjisi **Ap**	450,77	J	450,77	J
Relatif Sapma **Ap** (±%1)	-0,17	%	-0,17	%
Belirtilen Sarkaç Boyu	-	mm	-	mm
Ölçülen Sarkaç Boyu	748,00	mm	748,00	mm
Sarkacın Dinamik Ağırlık Mer.	752,36	mm	752,36	mm
Salınım Süresi	1,74	s	1,74	s
Belirtilen Düşme Açısı	-	o	-	o
Ölçülen Düşme Açısı	150,00	o	150,00	o
Çekiç Kuvveti	323,06	N	323,06	N
Düşme Yüksekliği	1,40	m	1,40	m
Vurma Hızı (5-5,5m/s)	5,23	m/s	5,23	m/s

Gösterge Techizatı			**Dönüştürülmüş Değer**	
Skala Bölüntü Değeri	0,10	J	0,10	J
Çözünürlük	0,10	J	0,10	J

Sürtünme Kayıpları

Sürtünme Kaybı (E1)	0,0	J	0,00	J
Sürtünme Kaybı (E2)	0,0	J	0,00	J
Sürtünme Kaybı (E3)	0,0	J	0,00	J
Yardımcı İbre Sürtünme Kaybı	0,0	J	0,00	J
Hava Direnci Sürtünme Kaybı	0,0	J	0,00	J
Toplam Sürtünme Kayıbı	0,0	J	0,00	J
Toplam Sürt.Kayıbı (<0,5%)	0,0	%	0,0	%

Çekiç/Mesnet ve Dayanakların

Dayanaklar Arası Mesafe	(40+0,2mm)	40,10	mm
Arka Boşluk Açısı	(10°-12°)	11,20	0
Dayank Kavis Yarıçapı	(1-1.5mm)	1,20	mm
Toz Kanalı Ölçüleri		1*1	mm
Tipi Çekiç	(C veya U)	U	-
Çekiç Ağzı Açısı	(29°0-31°)	29,00	0
Çekiç Ucu Yarıçapı	(2-2,5mm)	2,50	mm
Çekiç Ağzı Kalınlığı	(10-18mm)	12,00	mm

Gösterge Sapmaları	Birim	A_N'in %80	A_N'in %60	A_N'in %50	A_N'in %30	A_N'in %20	A_N'in %10
Ölçülen Yükselme Açısı	°	45,0	60,0	75,0	90,0	120,0	135,0
Göstergede Okunan Sarfedilmiş Enerji A_S	J	381,0	330,0	270,0	210,0	90,0	38,0
Dönüştürülmüş Göster. Okunan Sarfedilmiş Enerji AS	J	381,0	330,0	270,0	210,0	90,0	38,0
Hesaplanan Sarfedilmiş Enerji A_V	J	380,1	330,1	271,8	209,3	88,5	38,4
Hesaplanan Artık Enerji	J	70,7	120,7	179,0	241,5	362,3	412,3
Gösterge Sapması	J	-0,94	0,05	1,81	-0,69	-1,49	0,45
Relatif Gösterge Sapması (Pot. En.Ap)	%	0,2	0,0	-0,4	0,2	0,3	-0,10
Relatif Gösterge Sapması (Sarf. En.Av)	%	0,2	0,0	-0,7	0,3	1,7	-1,17

Çentik Darbe (Vurma) Test Makinasının Ölçüm Belirsizliği:

Potansiyel Enerjinin ölçme Belirsizliği (Ap)	Kuvvetin Ölçme belirsiz.%	Düşme Açısı Ölçme belir.%	Pendil boy. Ölçme belil%	Ap'nin Sap.%	Ap'nin Sap.%
	0,06	-0,01	0,04	-	0,15

Sarkaçın Dinamik Ağırlık Merkezinin (lred) Ölçme Belirsizliği	Cetvelin Ölçme belirsizliği%	Zaman saatinin Ölçme belir.%	Pendil boyunun Sapması%	Toplam Ölçme belirsizliği%
	0,040	0,006	-	0,081

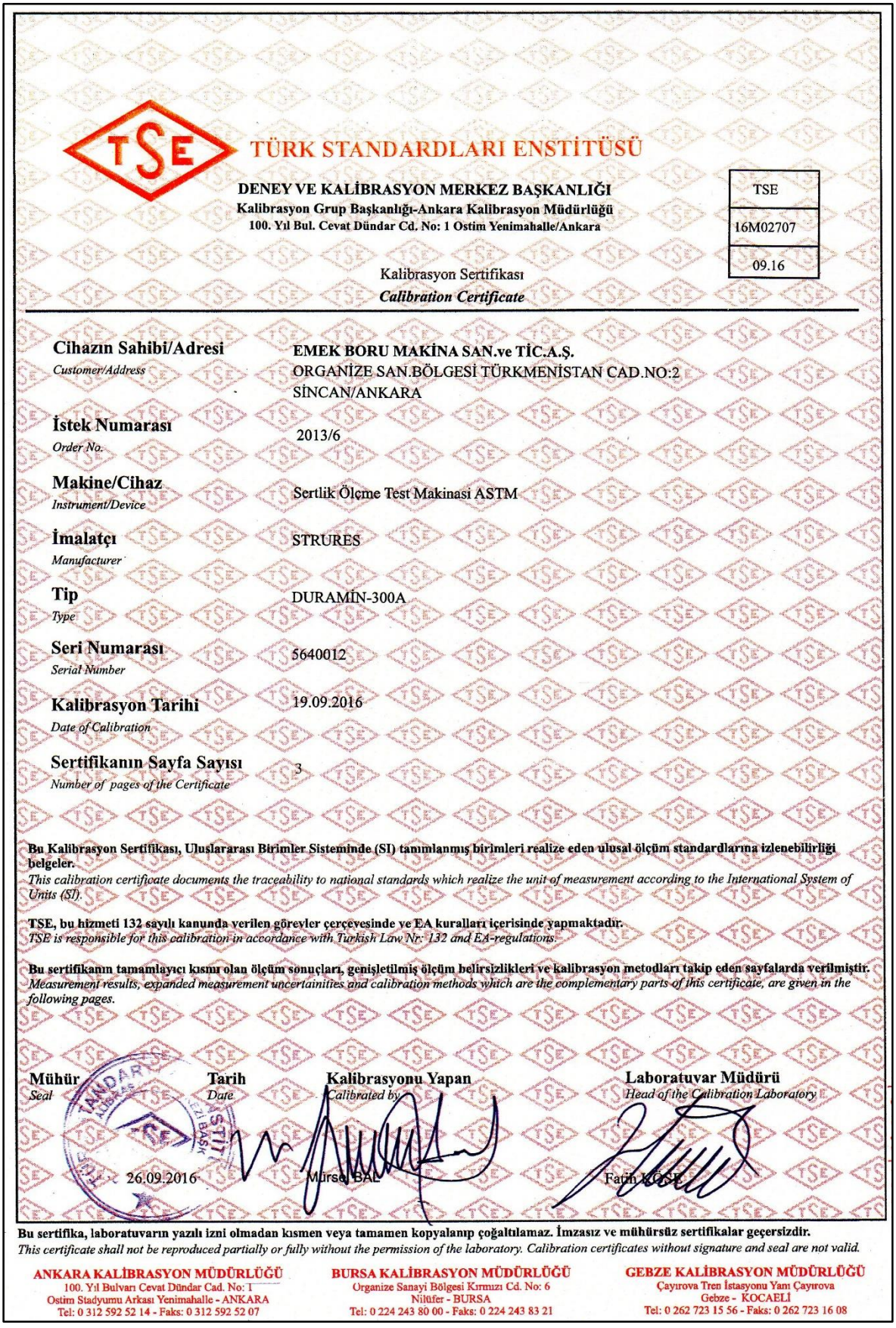
Gösterge Sapmalarının Ölçme Belirsizliği	Birim	A_N'in %80	A_N'in %60	A_N'in %50	A_N'in %30	A_N'in %20	A_N'in %10
Yükselme Açısı	°	45,0	60,0	75,0	90,0	120,0	135,0
Okunan Sarfedilmiş Enerji As	J	381,0	330,0	270,0	210,0	90,0	38,0
Dönüştürülmüş Göster. Okunan Sarfedilmiş Enerji AS	J	381,0	330,0	270,0	210,0	90,0	38,0
Hesaplanan Sarfedilmiş Enerji **Av**	J	380,1	330,1	271,8	209,3	88,5	38,4
Gösterge Sapması	%	-0,94	0,05	1,81	-0,69	-1,49	0,45
Ölçüm Belirsizliği	± %	0,29	0,23	0,20	0,18	0,17	0,22
Ölçüm Belirsizliğini içeren Toplam Sapma	± %	-0,65	0,29	2,02	-0,51	-1,32	0,66

1. Bölge Uygunluk Beyanı *(Statement of Compliance)*

Ölçme Sahası	Dönüştürülmüş Değe	Değerlendirmeye esas teşkil eden Standart	Sonuç
450 J	450,0 J	ASTM E23-12c	Uygun

-Darbe(Çentik) Test Makinasının ölçümleri sonucunda yapılan değerlendirmede ölçme belirsizliği dikkate alınmamıştır.

EK-3. Sertlik ölçme test makinası kalibrasyon belgeleri



TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
Kalibrasyon Grup Başkanlığı-Ankara Kalibrasyon Müdürlüğü
100. Yıl Bul. Cevat Dündar Cd. No: 1 Ostim Yenimahalle/Ankara

TSE
16M02707
09.16

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi/Adresi *Customer/Address*	**EMEK BORU MAKİNA SAN.ve TİC.A.Ş.** ORGANİZE SAN.BÖLGESİ TÜRKMENİSTAN CAD.NO:2 SİNCAN/ANKARA
İstek Numarası *Order No.*	2013/6
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	Sertlik Ölçme Test Makinası ASTM
İmalatçı *Manufacturer*	STRURES
Tip *Type*	DURAMİN-300A
Seri Numarası *Serial Number*	5640012
Kalibrasyon Tarihi *Date of Calibration*	19.09.2016
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of the Certificate*	3

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standardlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

TSE, bu hizmeti 132 sayılı kanunda verilen görevler çerçevesinde ve EA kuralları içerisinde yapmaktadır.
TSE is responsible for this calibration in accordance with Turkish Law Nr: 132 and EA-regulations.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainities and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Kalibrasyonu Yapan** *Calibrated by*	**Laboratuvar Müdürü** *Head of the Calibration Laboratory*
	26.09.2016	Mürsel BAL	Fatih KÖSE

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
100. Yıl Bulvarı Cevat Dündar Cad. No: 1
Ostim Stadyumu Arkası Yenimahalle - ANKARA
Tel: 0 312 592 52 14 - Faks: 0 312 592 52 07

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6
Nilüfer - BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova
Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

EK-3. (devam) Sertlik ölçme test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE DENEY VE KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

TSE
16M02707
09-16

Sayfa (Page) 2/3

Makine/Cihaz *(Object)*

Cihazın Sahibi	:	EMEK BORU
Makinenin/Cihazın Adı	:	Sertlik Ölçme Test Makinesi
Modeli	:	DURAMİN-A300
Seri Numarası	:	5640012
Çalışma Sistemi	:	Elektromekanik
Bulunduğu yer	:	KALİTE KONTROL Laboratuvarı

Cihazın laboratuvara kabul tarih *(Date of receipt of the object)*

Kalibrasyonlar yerinde yapılmaktadır.

Prosedür *(Procedures)*

Kalibrasyon,

Vickers için ASTM E92 "Vickers Sertlik deneyi-Deney Cihazının Doğrulanması"

Ölçüm Şartları *(Measurement Conditions)*

Muayenesi yapılan Sertlik Ölçme Test Makinasının dolaylı kalibrasyonu referans sertlik plakaları kullanılarak, dolaysız kalibrasyonu ise referans Yük Hücresi kullanılarak çalışma talimatlarına uygun olarak yapılır.

Çevre Şartları *(Environmental Conditions)*

	Başlangıç sıcaklığı	Bitiş sıcaklığı
Ortam Sıcaklığı/ *Ambient temperature*	22,0 °C	22,0 °C

Ölçüm Sonuçları *(Measurement Results)*

Müteakip sayfada/larda verilmiştir./*Gived in the next page.*

Ölçüm Belirsizliği *(Measurement Uncertainty)*

Ölçüm sonuçları ile birlikte verilmiştir./*Gived in the next page.*
Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multipllied by the coverage factoe k=2,which for a normaldistribution corresponds to a coverage probabilityof approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Techiz *(Calibrasyon Equipment)*

TSE Cihaz Kod	Tanım	Kalib.Tarihi	Marka	Seri no	İzlenebilirlik	Sertifika No
A02	Gösterge Cihazı	2013	HBM	23019	TSE	E1740
A12	Termometre	Şub.13	TÜTERM	2	TSE	13S3090

Gekektiğinde Yorun *(Remarks)*

-Kalibrasyon süresi,(ASTM E 92), de belirtilmiştir.
-Makinanın yerinin değiştirilmesi,gösterge ve ölçme techizatının yenilenmesi veya tamir edilmesi, makinada ve gösterge techizatında hata tesbit edilmesi hallerinde sertifika geçerliliğini kaybeder.

EK-3. (devam) Sertlik ölçme test makinası kalibrasyon belgeleri

TSE DENEY VE KALİBRASYON MERKEZİ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI
ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ

TSE
16M02707
09-16

Sayfa (Page) 3/3

Ölçüm Sonuçları *(Measurement Results)*

Büyüteç

Büyüteç No	Büyütme
-	-

Sertlik Ucu/Vickers

Sertlik Ucu No:	3882
Sertifika No:	-

Deney Döngüsü Ölçümü

Vickers	İstenen (s)	Ölçülen (s)
Esas Yük	2÷8	6
Bekleme Süresi	10÷15	10

Ölç. Uzunluk mm	1.Ölçüm mm	2.Ölçüm mm	Ortalama mm	Sapma mm	Ölçme Belirsiz. %
0,500	0,5000	0,5000	0,5000	0,0000	0,1222
1,000	1,0000	1,0001	1,0001	-0,0050	0,0619
1,500	1,5001	1,5000	1,5001	-0,0033	0,0413
2,000	2,0001	2,0000	2,0001	-0,0025	0,0310
3,000	3,0001	3,0000	3,0001	-0,0017	0,0206

Kuvvet Ölçümleri (Vickers)

Kuvvet N	1.Ölç mv/V	2.Ölç mv/V	3.Ölç mv/V	Ortalama mv/V	Sapma %	Tekrar %	Referans mv/V	Ölç.Bel %	Tolerans %	Tolerans durumu

Sertlik Ölçümleri (Vickers)

Ölç. Metod	Sertlik HV	Hesap S. HV	1. Ölçüm mm	2. Ölçüm mm	3. Ölçüm mm	4. Ölçüm mm	5. Ölçüm mm	Sapma %	Tekrar %	Ölç.Bel. %	Tolerans %	Tolerans durumu
HV 10,00	259	257,77	0,2686	0,2679	0,2685	0,2683	0,2678	-0,5	0,30	2,03	3	Uygun
	517	521,90	0,1886	0,1885	0,1880	0,1884	0,1890	0,9	0,53	2,04	3	Uygun
HV 5,00	257	261,73	0,1888	0,1884	0,1877	0,1880	0,1882	1,8	0,58	2,06	3	Uygun
	560	563,64	0,1280	0,1286	0,1280	0,1286	0,1281	0,7	0,47	2,07	3	Uygun

Uygunluk Beyanı

-Yapılan ölçümler neticesinde malzeme Test Makinası,ölçme belirsizliği dikkate alınmaksızın ASTM E 92'a göre yapılan değerlendirmede aşağıdaki metodlar için sapma sınırlarının içindedir.

After the result of measurements,the testing machine is in the range of deviation according to the EN ISO 6507-2 and ASTM E 92 standard.

Vickers: **HV 10** **HV5**

EK-4. Radyografi testlerini gerçekleştiren personelin sertifikası



ORTADOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ (ODTÜ)

MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY (METU)

KAYNAK VE TAHRİBATSIZ MUAYENE PERSONEL SERTİFİKALANDIRMA MERKEZİ (ODTÜ TM-PSM)

WELDING AND NDT PERSONNEL CERTIFICATION CENTER (METU-PCC)

SERTİFİKA CERTIFICATE

Merkezimizin TS EN ISO IEC17024 standardına uygunluğu akredite edilmiştir. Akreditasyon No: AB-0002-P

Accredited certifying body pursuant to TS EN ISO IEC 17024. Accreditation No: AB-0002-P

Aşağıda kimlik bilgileri bulunan kişi EN 473:2000 standardına uygun olarak belirtilen metot, seviye ve endüstriyel sektörlerde merkezimizce sertifikalandırılmıştır.

We hereby certify that the person identified is competent according to EN 473:2008 in the method, level and industrial sector mentioned below.

Tamer Küsen

Adı Soyadı / Name Surname

20.02.1976	Pazarcık	Emek Boru A.Ş.
Doğum Tarihi / Date of Birth	Doğum Yeri / Place of Birth	Çalıştığı Kurum / Employer

Radyografik Muayene Seviye 2 (RT2)

Tahribatsız Muayene Metodu ve Seviyesi /NDT Method and Level

6, 7	06.2016
Endüstri Sektörü* / Industrial Sector*	Geçerlilik Süresi / Expiry Date

0005-RT2

Sertifika No: / Certificate No:

TÜRKAK

Sertifika Sahibinin İmzası Signature of Certified Person	27.06.2011 Sertifikalandırma Tarihi Date of Certification	Sertifikalandırma Merkezi Başkanı Head of Certifying Body

* Açıklamalar için arka sayfaya bakınız / * Explanations overleaf

ODTÜ KAYNAK VE TAHRİBATSIZ MUAYENE PERSONEL SERTİFİKALANDIRMA MERKEZİ • DUMLUPINAR BULVARI, 06800 ANKARA
TEL: (312) 210 52 84 • FAKS: (312) 210 11 62 • http://www.wpdt.metu.edu.tr

EK-5. Radyografik test raporu

RADIOGRAPHIC INSPECTION CERTIFICATE
RADYOGRAFİK MUAYENE SERTİFİKASI

Date/ Tarih: 7 ARALIK 2015

Customer / Müşteri	:			Order No / Sipariş No	:
Dimensions / Boyutlar	:12.70 mm	Test Class / Test Sınıfı	:A sınıfı	Test Standard / Çekim Standartı	:EN 1435
Material / Malzeme	:X65M	IQI / IQN	:10 Fe 106 / :W 13	Test Arrangement / Çekim Tekniği	:Şekil 8
Focus / Odak	:0,4x0,4mm	Welding Process / Kaynak Yöntemi	:SAW	Exposure Time / Poz Süresi	:
Equipment / Ekipman	:MGC 41	Film Size / Film Boyutu	:10x48 cm / :	Acceptance Standard / Kabul Standartı	:ISO 5817 / Kabul Seviyesi C

Pipe No / Boru No	Film No / Film No	Welder No / Kaynakçı No	Dimensions / Boyutlar	Aa	Ab	Ad	Ba	Bb	C	D	E	F	H	Rating / Sonuç	Remarks / Açıklamalar
	Deney 1													Kabul	
	Deney 2									X				Red	
	Deney 3													Kabul	
	Deney 4									X				Red	
	Deney 5													Kabul	
	Deney 6													Kabul	
	Deney 7													Kabul	
	Deney 8													Kabul	
	Deney 9			X										Kabul	
	Deney 10													Kabul	
	Deney 11			X										Kabul	
	Deney 12													Kabul	
	Deney 13			X										Kabul	
	Deney 14			X			X							Kabul	
	Deney 15			X			X							Kabul	
	Deney 16			X										Kabul	

Aa	: Porosity / Gözenek	C	: Lack of Fusion / Yetersiz Erime
Ab	: Elongted Cavity / Gaz Kanalı	D	: Lack of Penetration / Kök Hatası
Ad	: Clustered Porosity / Toplu Gözenek	E	: Crack / Çatlak
Ba	: Slag / Curuf	F	: Undercut / Yanma Oluğu
Bb	: Slag Line / Sıralı Curuf	H	: Inclusion / Metalik Kalıntı

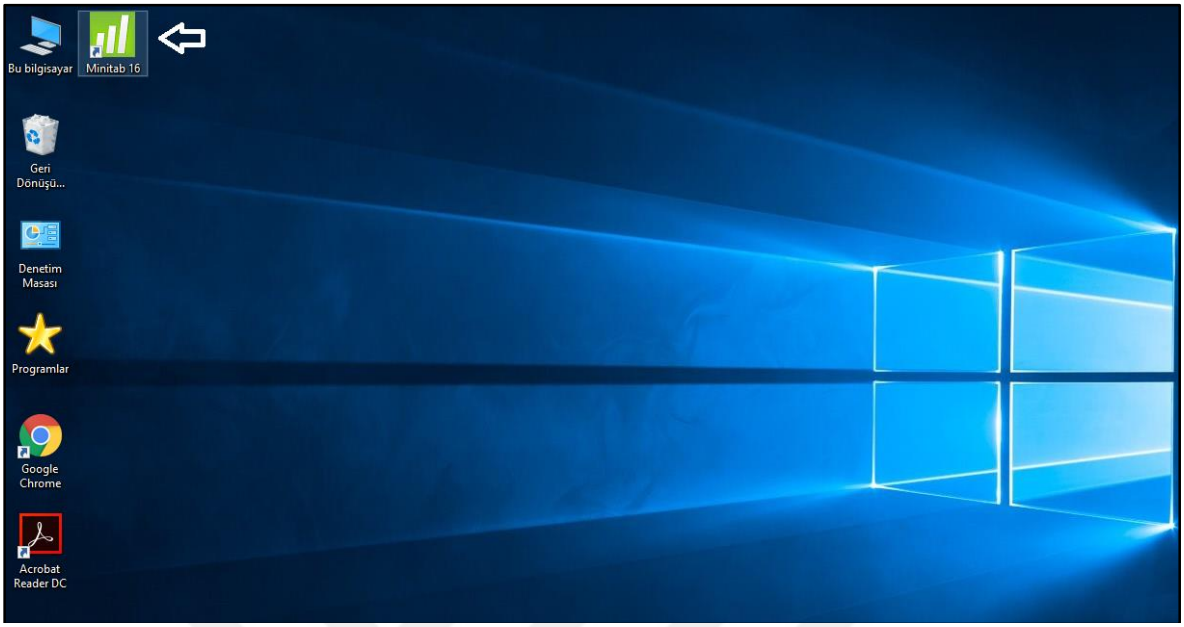
Inspector / Testi Yapan

Approval / Onaylayan

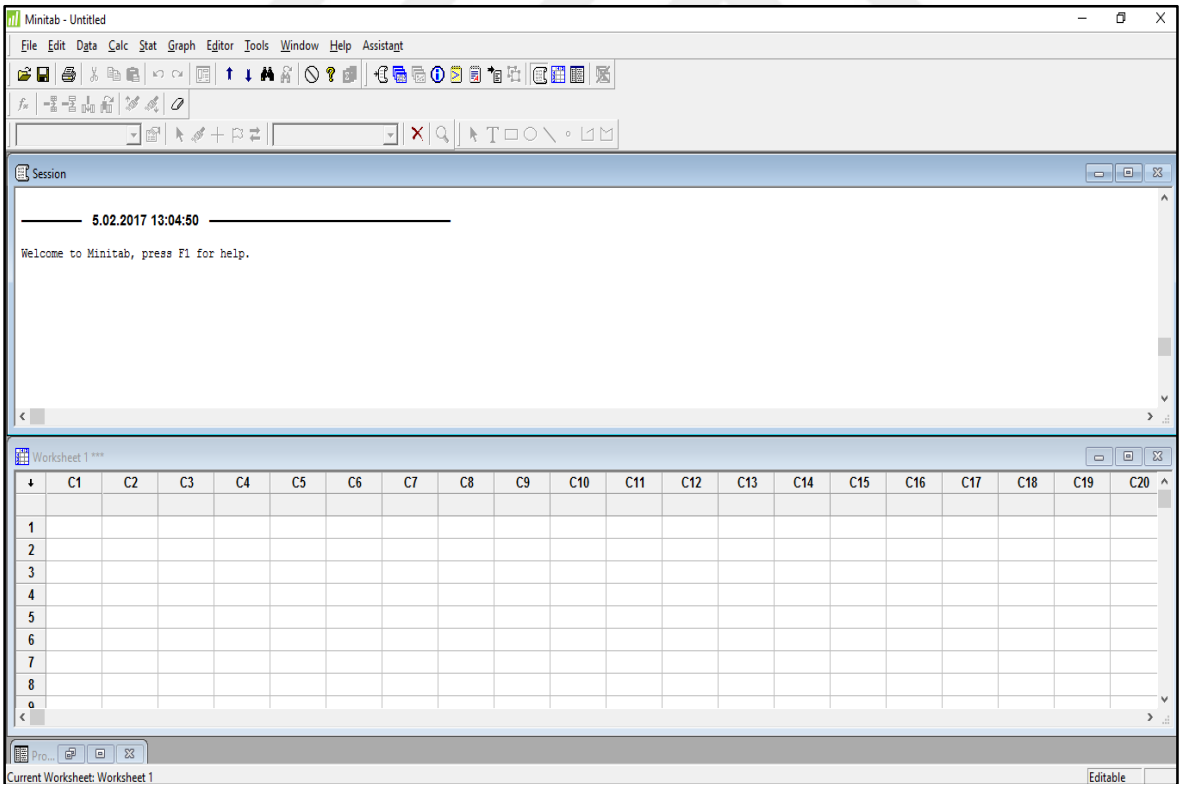
Tamer KÜSEN
RT, UT, MT, PT,
LEVEL II

Customer / Müşteri

EK-6. Minitab programından alınan ekran görüntüleri

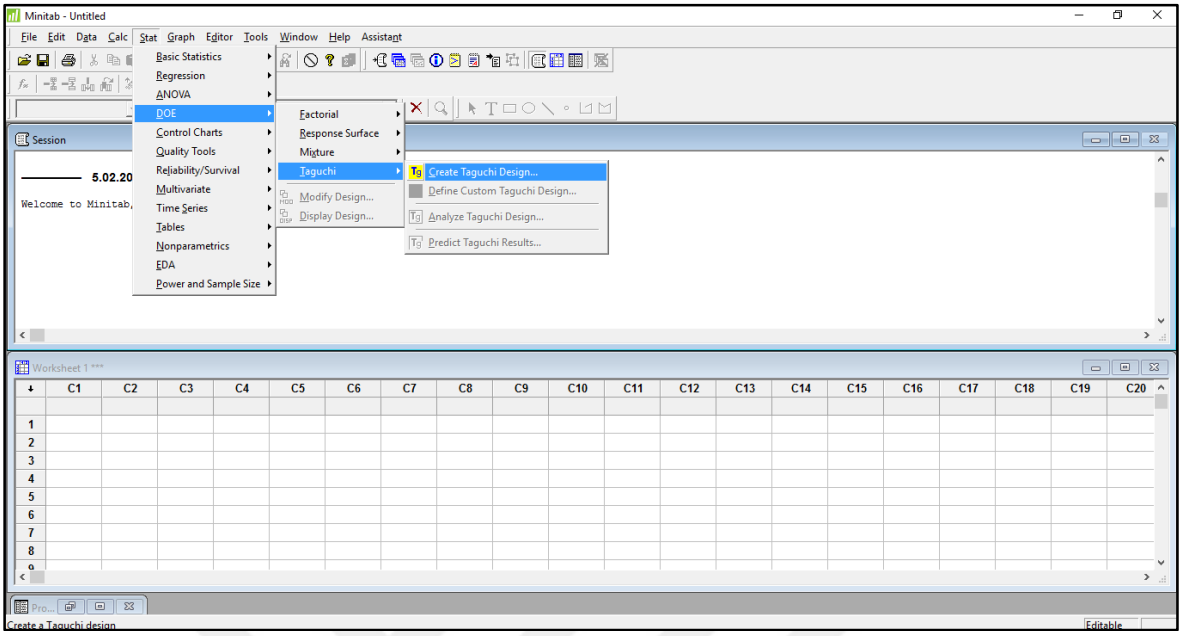


Resim 6.1. Minitab programının açılması

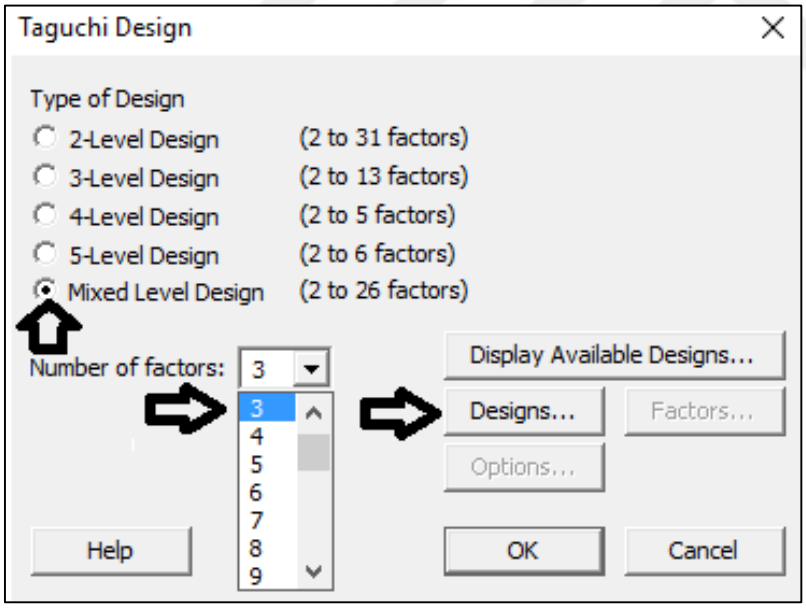


Resim 6.2. Minitab programı arayüzü

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri

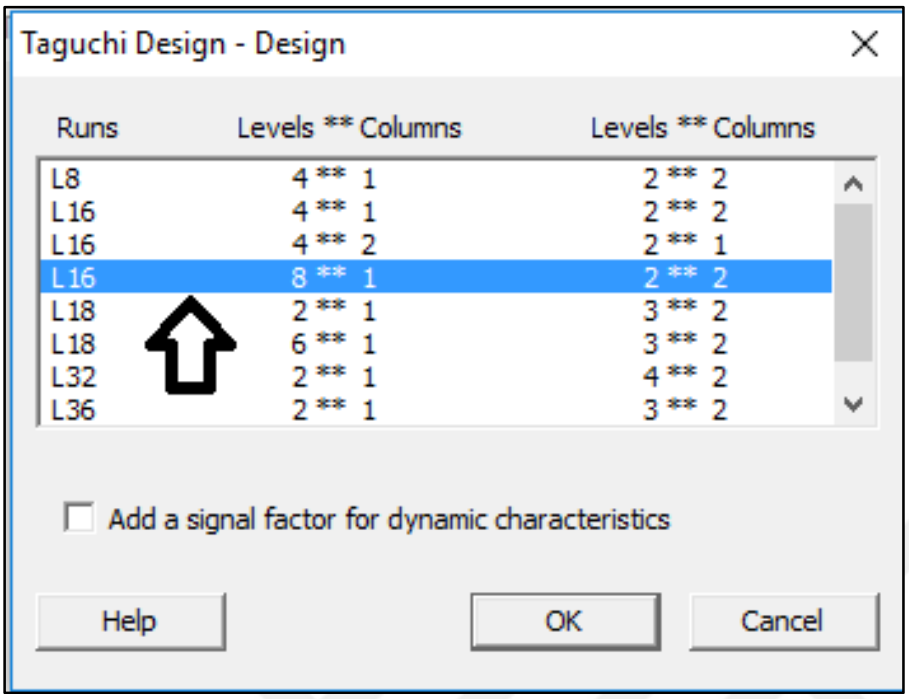


Resim 6.3. Taguchi deney düzeneğinin belirlenmesi için uygulanan adımlar

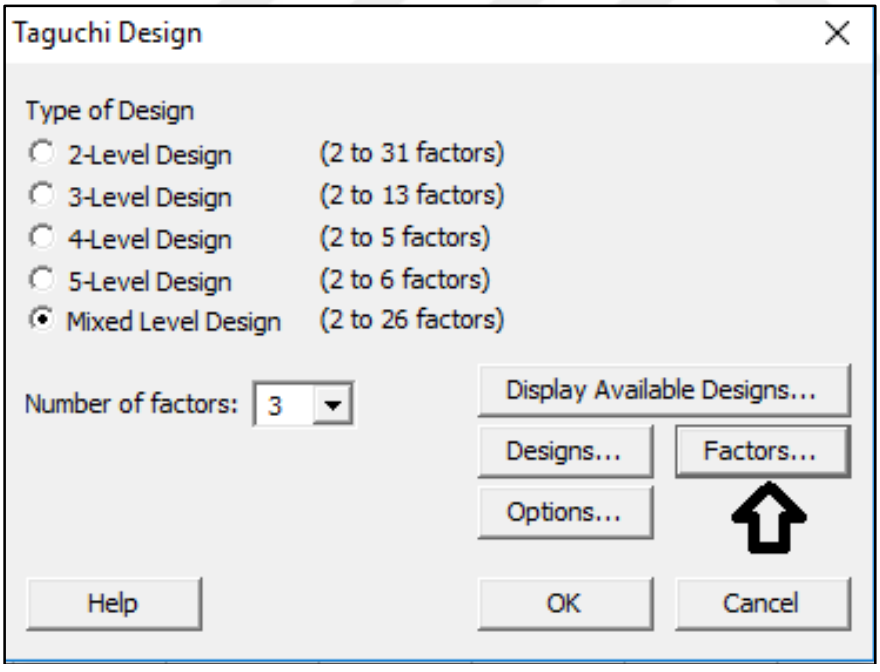


Resim 6.4. Taguchi deney düzeneği belirleme aşamaları

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri

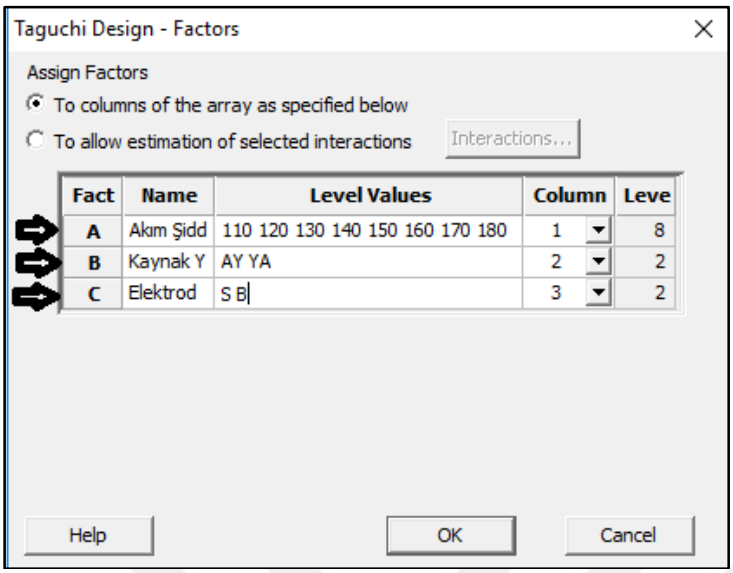


Resim 6.5. Taguchi deney düzeneği belirleme aşamaları

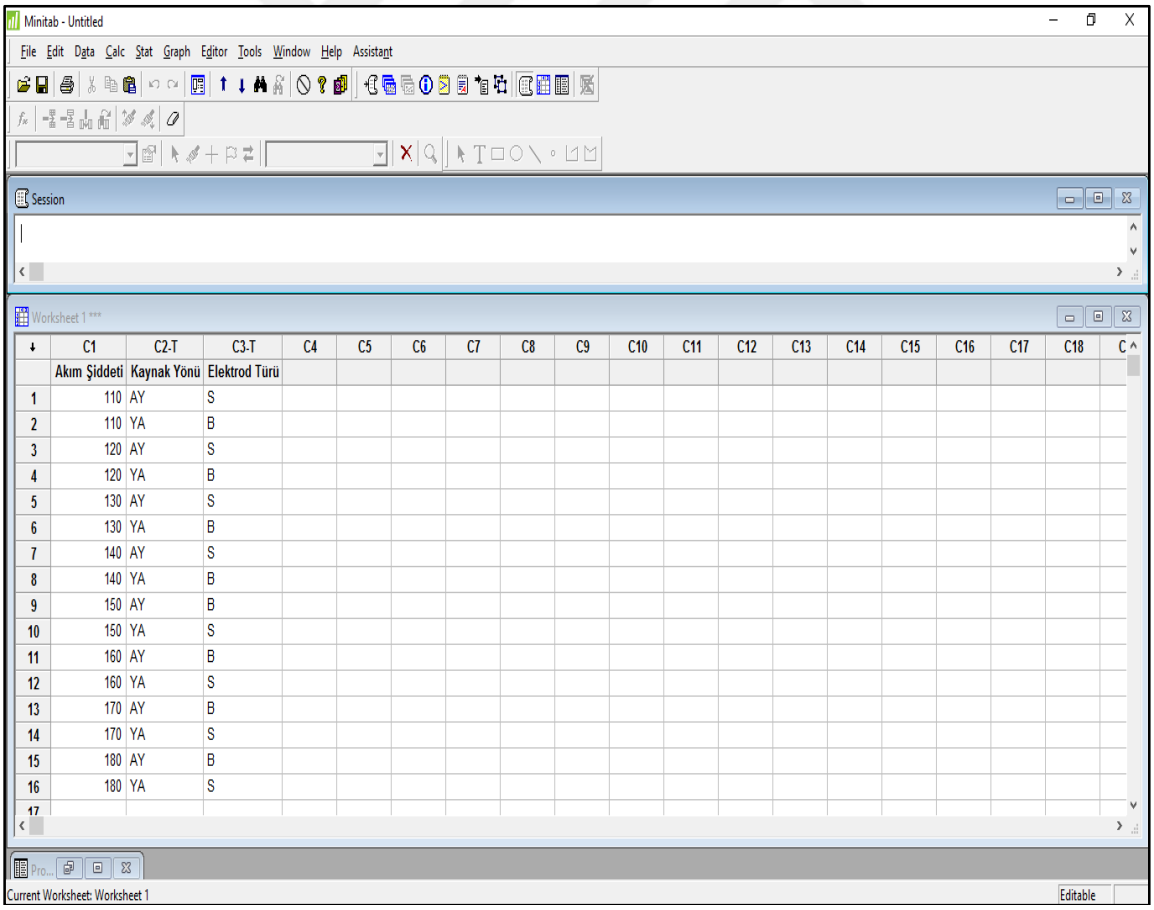


Resim 6.6. Taguchi deney düzeneği belirleme aşamaları

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri

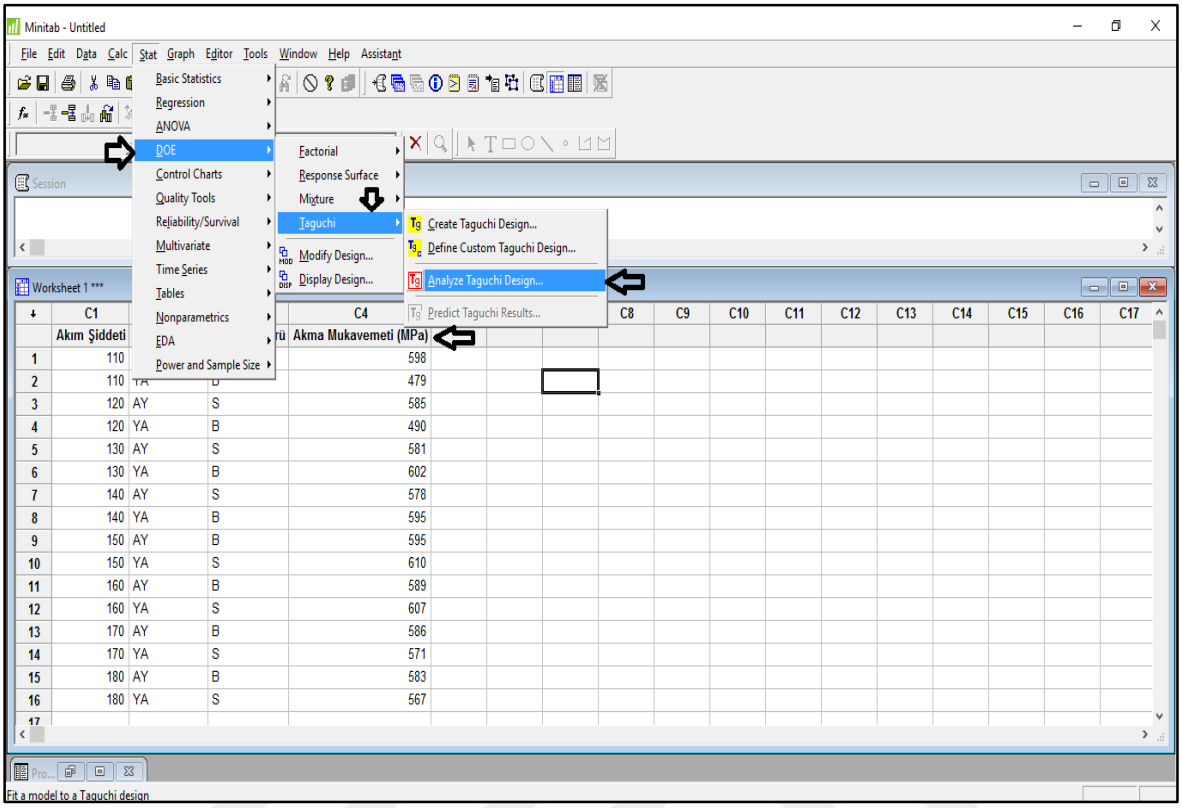


Resim 6.7. Taguchi deney düzeneği belirleme aşamaları

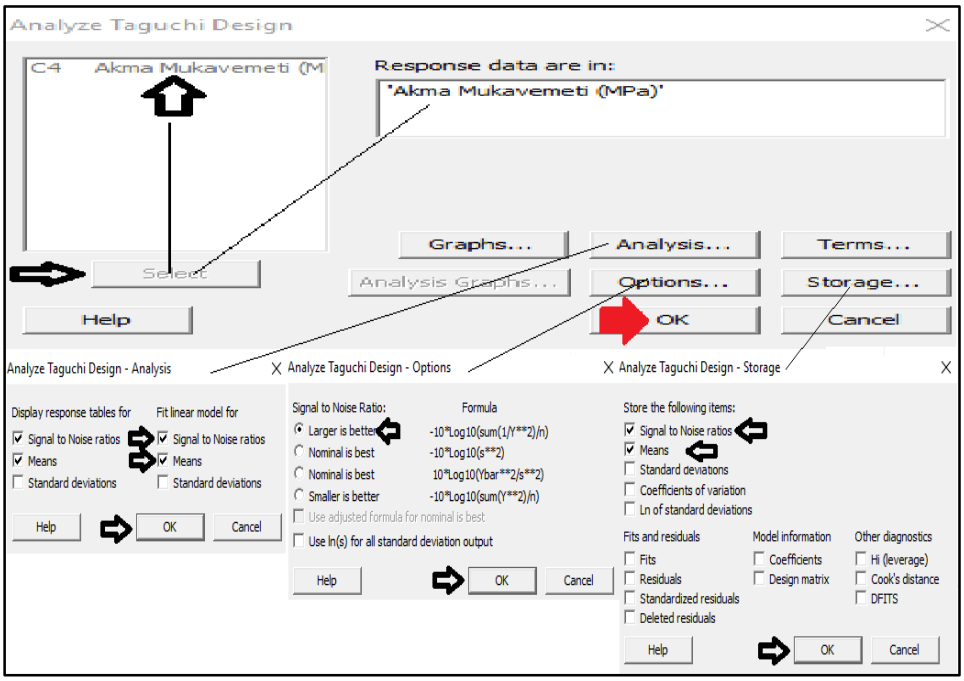


Resim 6.8. Taguchi deney düzeneği

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri

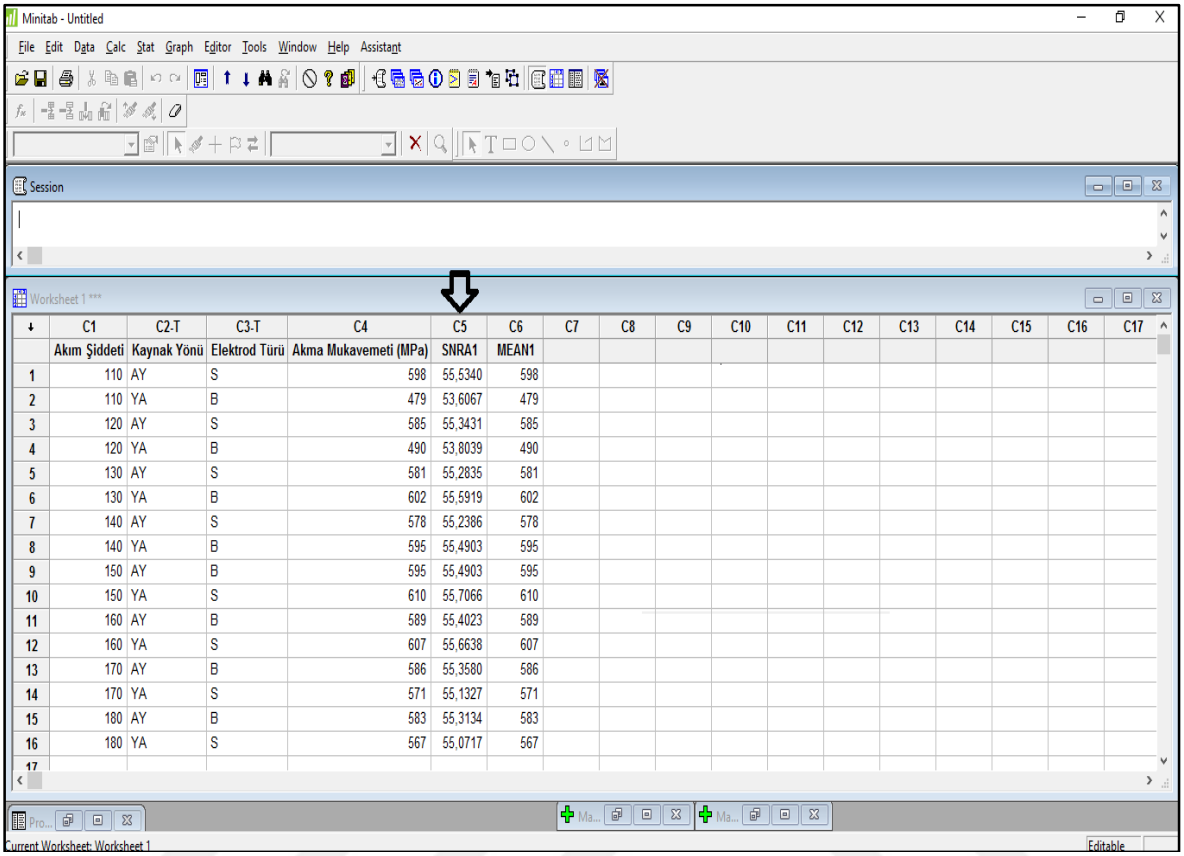


Resim 6.9. Çıktıların Taguchi metoduyla analizi



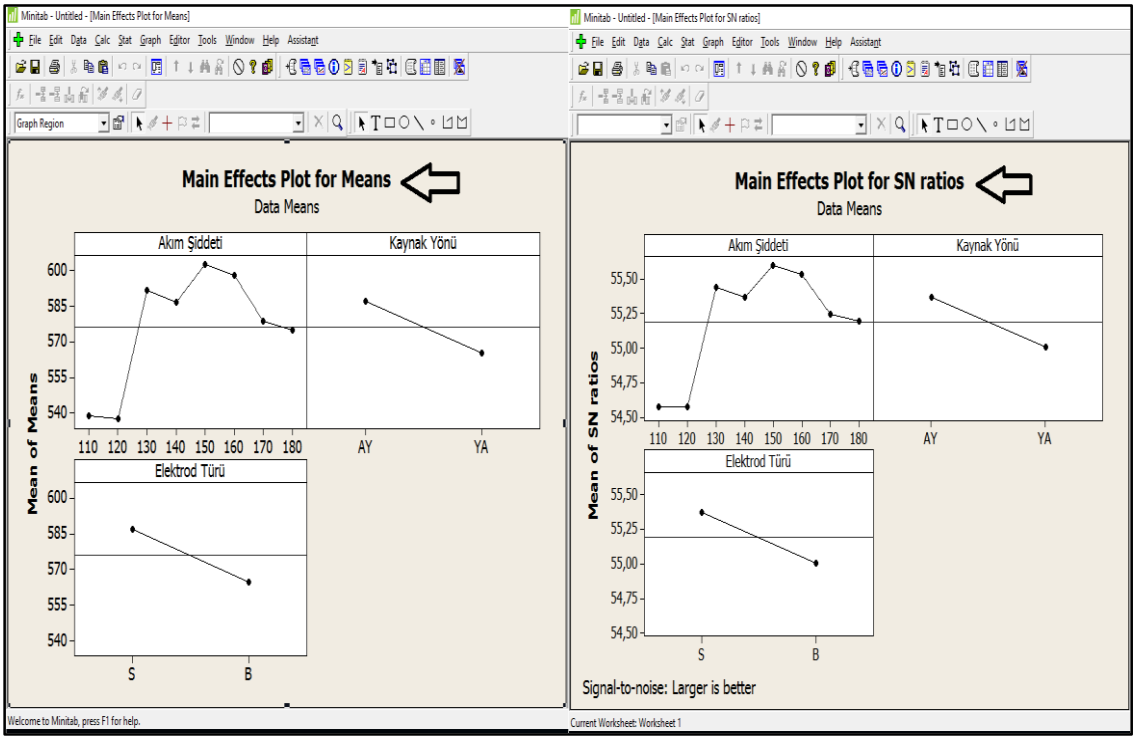
Resim 6.10. Çıktıların Taguchi metoduyla analizi

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri



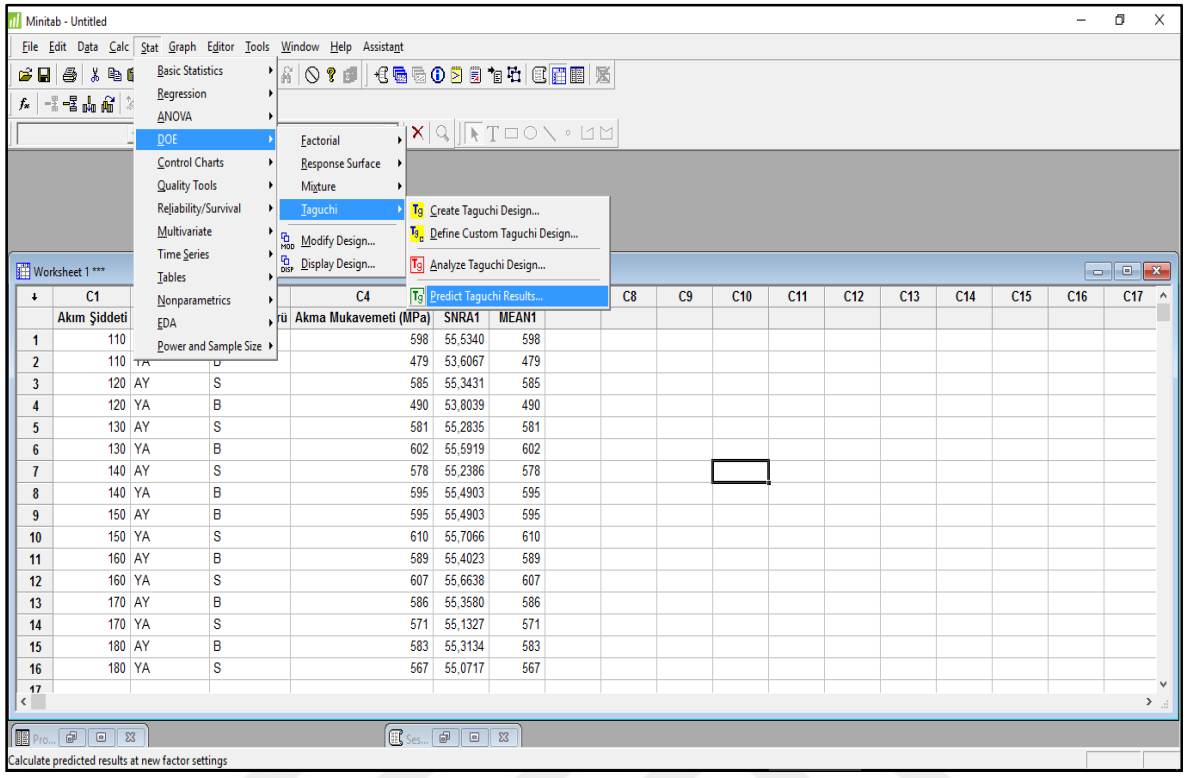
	C1	C2-T	C3-T	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
	Akım Şiddeti	Kaynak Yönü	Elektrod Türü	Akma Mukavemeti (MPa)	SNRA1	MEAN1											
1	110	AY	S	598	55,5340	598											
2	110	YA	B	479	53,6067	479											
3	120	AY	S	585	55,3431	585											
4	120	YA	B	490	53,8039	490											
5	130	AY	S	581	55,2835	581											
6	130	YA	B	602	55,5919	602											
7	140	AY	S	578	55,2386	578											
8	140	YA	B	595	55,4903	595											
9	150	AY	B	595	55,4903	595											
10	150	YA	S	610	55,7066	610											
11	160	AY	B	589	55,4023	589											
12	160	YA	S	607	55,6638	607											
13	170	AY	B	586	55,3580	586											
14	170	YA	S	571	55,1327	571											
15	180	AY	B	583	55,3134	583											
16	180	YA	S	567	55,0717	567											
17																	

Resim 6.11. Sinyal / gürültü oranlarının tayin edilmesi



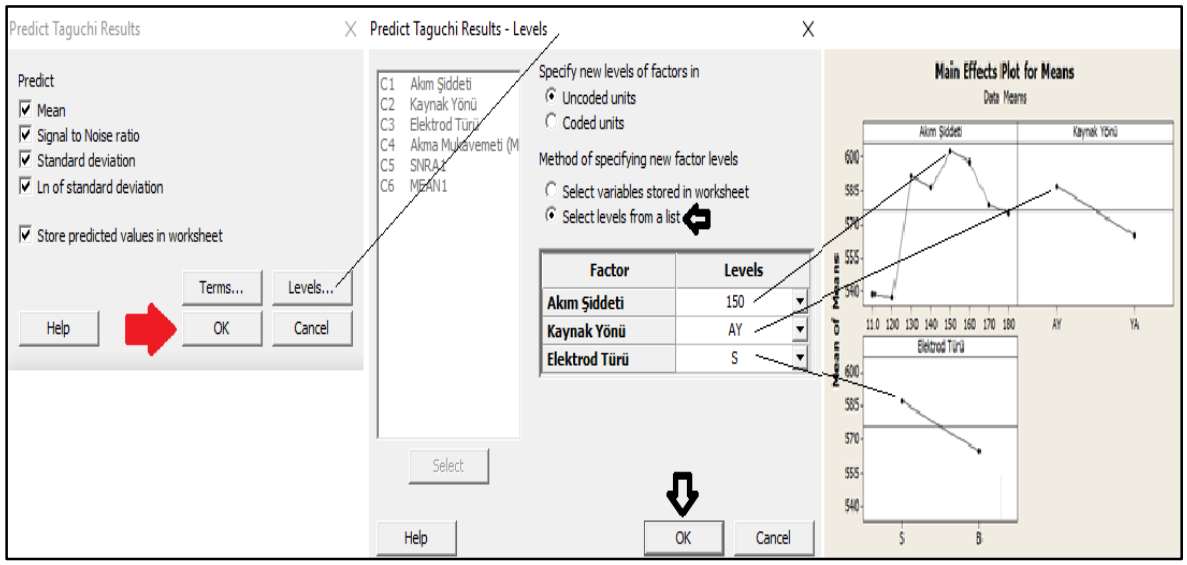
Resim 6. 12. Sinyal / gürültü oranları ve ana etki grafikleri

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri



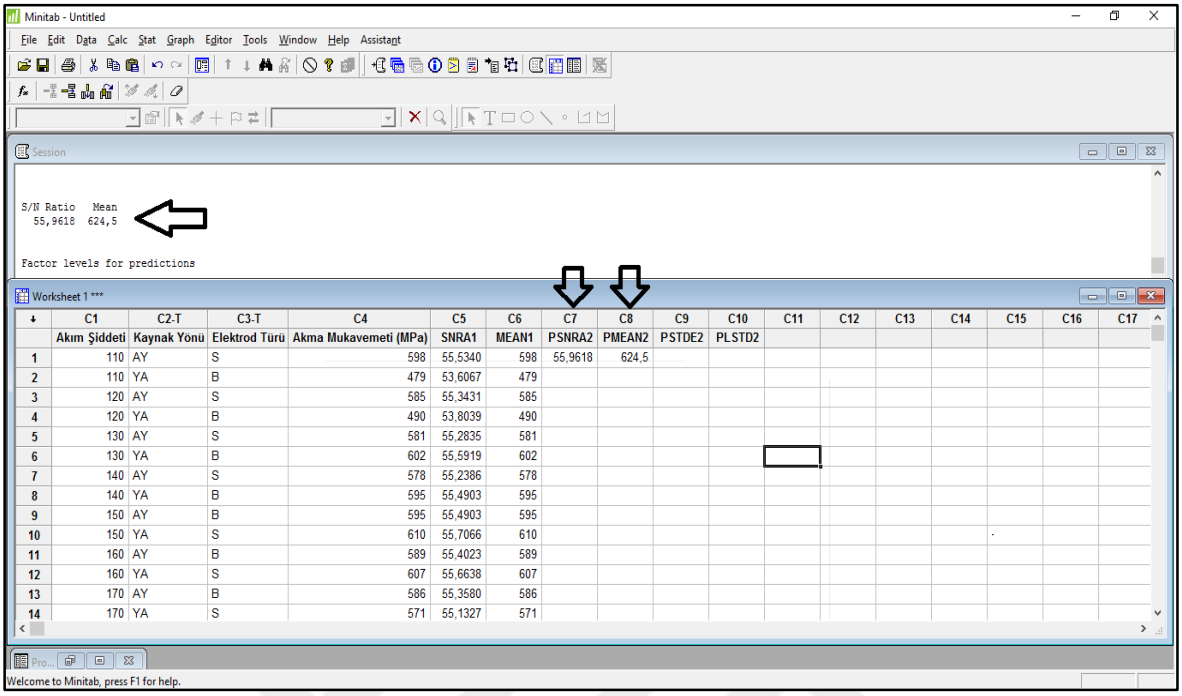
	C1	C2	C3	C4	SNRA1	MEAN1
	Akım Şiddeti			Akma Mukavemeti (MPa)		
1	110	YA	B	598	55,5340	598
2	110	YA	B	479	53,6067	479
3	120	AY	S	585	55,3431	585
4	120	YA	B	490	53,8039	490
5	130	AY	S	581	55,2835	581
6	130	YA	B	602	55,5919	602
7	140	AY	S	578	55,2386	578
8	140	YA	B	595	55,4903	595
9	150	AY	B	595	55,4903	595
10	150	YA	S	610	55,7066	610
11	160	AY	B	589	55,4023	589
12	160	YA	S	607	55,6638	607
13	170	AY	B	586	55,3580	586
14	170	YA	S	571	55,1327	571
15	180	AY	B	583	55,3134	583
16	180	YA	S	567	55,0717	567

Resim 6.13. Taguchi'nin tahminsel sonuçlarının hesaplanması



Resim 6.14. Taguchi'nin tahminsel sonuçlarının hesaplanması

EK-6. (devam) Minitab programından alınan ekran görüntüleri



	C1	C2-T	C3-T	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
	Akım Şiddeti	Kaynak Yönü	Elektrod Türü	Akma Mukavemeti (MPa)	SNRA1	MEAN1	PSNRA2	PMEAN2	PSTDE2	PLSTD2							
1	110	AY	S	598	55,5340	598	55,9618	624,5									
2	110	YA	B	479	53,6067	479											
3	120	AY	S	585	55,3431	585											
4	120	YA	B	490	53,8039	490											
5	130	AY	S	581	55,2835	581											
6	130	YA	B	602	55,5919	602											
7	140	AY	S	578	55,2386	578											
8	140	YA	B	595	55,4903	595											
9	150	AY	B	595	55,4903	595											
10	150	YA	S	610	55,7066	610											
11	160	AY	B	589	55,4023	589											
12	160	YA	S	607	55,6638	607											
13	170	AY	B	586	55,3580	586											
14	170	YA	S	571	55,1327	571											

Resim 6.15. Taguchi'nin tahminsel sonuçlarının hesaplanması

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ADA, Hakan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.01.1980, Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 354 38 35 -1042
Faks : 0 532 666 6474
e-mail : hakanada@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi /Teknik Eğitim Fakültesi	2003
Lise	Yenimahalle Mustafa Kemal Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2009	Boru Hatları İle Petrol Taşıma A.Ş (BOTAŞ)	Teknik Uzman
2009-2010	Ortaköy 80. Yıl Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Ankara/Mamak	Öğretmen
2010-2012	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sivrihisar MYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü	Öğretim Görevlisi
2012-2015	Gazi Üniversitesi Ostim MYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü	Öğretim Görevlisi
2015-Halen	Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Gülsün, M., (2016). Tozaltı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Petrol ve Doğalgaz Borularının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Politeknik Dergisi, 19(3), 275-282., Doi: 10.2339/2016.19.3 (Yayın No: 2877233)

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., (2016). API 5L X65 Çeliklerinin MAG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde, Kaynak İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlik Fakültesi Dergisi, 31(1), 1-9. (Kontrol No: 3076165)

2. Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., (2017). API 5L X65 Çeliklerinin Elektrik Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde, Kaynak İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 4(1), 72-81. (Kontrol No: 3425760)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. Aksöz, S., Bostan, B., Gökmeşe, H., Ada, H. (2016). Characterisation of NiTi - Ti Powders Fabricated by Mechanical Alloying Technique. 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16) (Tam metin bildiri) (Yayın No:2877242)

2. Ada, H., Aksöz, S., Özer, A., Candan, İ., (2016). Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Weld Region of API 5L X80 Steel Joints by Submerged Arc Welding Method. 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (Tam metin bildiri) (Yayın No:2877239)

3. Aksöz, S., Bostan, B., Gökmeşe, H., Ada, H., (2015). Fabrication and Characterization by Mechanical Alloying Technique of Prealloyed NiTi and Ni powders. 2nd International Multidisciplinary Eurasian Congress, Odessa, Ukrain (Tam metin bildiri) (Yayın No:2849016)

4. Ada, H., Aksöz, S., Özer, A., (2016). MAG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen API 5L X80 Çeliklerinin Kaynak Bölgesi Mekanik ve Metalurjik Özelliklerinin İncelenmesi. 2nd International Multidisciplinary Eurasian Congress, Odessa, Ukrain (Tam metin bildiri) (Yayın No:2849012)

5. Özer, A., Aksöz, S., Ada, H., Candan, İ., (2016). Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen API 5L X80 Çeliklerinin Kaynak Bölgesi Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. 2nd International Multidisciplinary Eurasian Congress, Odessa, Ukrain (Tam metin bildiri) (Yayın No:2849014)

6. Gençer M., Bostan, B., Aksöz, S., Ada, H., (2016). GGG 40 ve 50 Serisi Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemelerde Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi. Uluslararası Malzeme Bilimi Ve Teknolojisi Konferansı, Kapadokya, IMSTEC 2016, 25-29. (Tam metin bildiri) (Yayın No:2765549)

7. Gençer, M., Bostan, B., Ada, H., Aksöz, S., (2016). GGG 40 ve 50 Serisi Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemelerde Mikroyapının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri. Uluslararası Malzeme Bilimi Ve Teknolojisi Konferansı, Kapadokya, IMSTEC 2016, 100-103. (Tam metin bildiri) (Yayın No:2765482)

8. Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., (2012). Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen API X65 Boruların Birleştirilmesinde Kaynak Teli Kompozisyonunun Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi. ICWET Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı Ve Sergisi, 1(1) (Poster) (Yayın No:882375)

Projeler

1. Aurora 2014 – 2020 (AB Leonardo Da Vinci Ortaklık Projesi), Avrupa Birliği, Proje Yürütücüsü, 01/08/2013 - 31/07/2015

2. Türkiye'de Mesleki ve Teknik Eğitimin Kalitesinin Geliştirilmesi Projesi – I (METEK-I), Avrupa Birliği, YÖK Temsilcisi, Eylül 2012 – Mayıs 2014

Hobiler

Spor, sinema, tarih, kitap, gezi.



GAZİ GELECEKTİR...