T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ARK KAYNAK YÖNTEMLERİYLE BİRLEŞTİRİLEN YÜKSEK MUKAVEMETLİ API 5L X80 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Mesut BİÇEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Ağustos - 2019

T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Mesut BİÇEN tarafından yapılan "Farklı Ark Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yüksek Mukavemetli API 5L X80 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

	Ünvanı	Adı Soyadı
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi	Haluk KEJANLI (DANIŞMAN)
Üye:	Doç. Dr.	Erol KILIÇKAP
Üye:	Doç. Dr.	Uğur ÇALIGÜLÜ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 20/08/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

...../...../2019

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında katkılarını, desteklerini ve ilgisini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI' ya teşekkür ederim.

DESTEK

Bu çalışmada katkılarını, desteklerini ve ilgisini esirgemeyen Akçakoca / Düzce'de bulunan 'Ümran Çelik Boru A.Ş.' firmasına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **Sayfa**

TEŞEKKÜR ..... **I**
DESTEK ..... **II**
İÇİNDEKİLER ..... **III**
ÖZET ..... **V**
ABSTRACT ..... **VI**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **VII**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **VIII**
KISALTMALAR VE SİMGE LİSTESİ ..... **X**
1. GİRİŞ **1**
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **3**
3. MATERYAL VE METOD **5**
3.1 Çelik 5
3.1.1 Çeliklerin Temel Özellikleri 5
3.1.2 Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi 6
3.1.2.1 Karbon 7
3.1.2.2 Mangan 8
3.1.2.3 Silisyum 8
3.1.2.4 Sülfür 8
3.1.2.5 Fosfor 9
3.1.2.6 Krom 9
3.1.2.7 Nikel 9
3.1.2.8 Molibden 10
3.1.2.9 Vanadyum 10
3.1.2.10 Wolfram 10
3.1.2.11 Niobyum 10
3.1.2.12 Titanyum 10
3.1.2.13 Kobalt 10
3.1.2.14 Alüminyum 11
3.1.2.15 Bor 11
3.1.2.16 Bakır 11
3.1.2.17 Azot 11
3.1.3 Düşük ve Yüksek Mukavemetli Çelikler 11
3.1.5 Çeliklere Uygulanan Çeşitli Sıcak Haddeleme Çeşitleri 12
3.1.5.1 Konvansiyonel Sıcak Haddeleme 13
3.1.5.2 Normalize Haddeleme 14
3.1.5.3 Termomekanik Haddeleme 14
3.1.5.4 Termomekanik Haddeleme ve Hızlı Soğutma 15
3.1.6 TS EN 10025-2 Standardında Belirtilen Yapı Çelikleri 15
3.1.7 API Spec 5L Standardında X80M Yapı Çeliği 16
3.2 Kaynak 17
3.2.1 Elektrik Ark Kaynağı (E) 18
3.2.1.1 Elektrod Çeşitleri 19
- Selülozik Elektrodların Özellikleri 20
- Rutil Elektrodların Özellikleri 20
- Asidik Elektrodların Özellikleri 20
- Bazik Elektrodların Özellikleri 21

- Oksit Elektrodların Özellikleri 21
3.2.2 Metal Koruyucu Gaz Kaynağı (Gaz Altı Ark Kaynağı) (MIG/MAG) 21
3.2.2.1 Masif Tel Elektrodlar 22
3.2.2.2 Özlü Tel Elektrodlar (Gaz Korumalı Özlü Teller) 23
3.2.2.3 Koruyucu Gazlar 23
3.2.3 Toz Altı Ark Kaynağı 24
3.3 Kaynaklı İmalatta Tahribatlı Testler 27
3.3.1 Çekme Deneyi 27
3.3.2 Eğme Deneyi 28
3.3.3 Çentik Darbe Testi 29
3.3.4 Sertlik Testi 29
3.3.5 Kimyasal Analiz Testi 31
3.3.6 Makrografik Muayene 31
3.3.6.1 Kaynak Hataları 32

4. ARAŞTIRMA BULGULARI 33

4.1 Numune Hazırlığı 33
4.2 Elle Ark Kaynağı (SMAW) Test Sonuçları 36
4.2.1 Malzeme Çekme Testi 37
4.2.2 Kaynaklı Çekme Testi 38
4.2.3 Kaynaklı Bükme Testi 39
4.2.4 Çentik Darbe Testi 40
4.2.5 Sertlik Testi 41
4.2.6 Makrografik Muayene 43
4.3 Gaz Altı Ark Kaynağı (GMAW) Test Sonuçları 44
4.3.1 Malzeme Çekme Testi 44
4.3.2 Kaynaklı Çekme Testi 45
4.3.3 Kaynaklı Bükme Testi 46
4.3.4 Çentik Darbe Testi 46
4.3.5 Sertlik Testi 48
4.3.6 Makrografik Muayene 50
4.4 Toz Altı Ark Kaynağı (SAW) Test Sonuçları 51
4.4.1 Malzeme Çekme Testi 51
4.4.2 Kaynaklı Çekme Testi 52
4.4.3 Kaynaklı Bükme Testi 52
4.4.4 Çentik Darbe Testi 53
4.4.5 Sertlik Testi 54
4.4.6 Makrografik Muayene 55

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 57

5.1.1 Kaynaklı Çekme Testi Karşılaştırması 57
5.1.2 Çentik Darbe Testi Karşılaştırması 58
5.1.3 Sertlik Testi Karşılaştırması 59
5.2 Sonuçlar 61

6. KAYNAKLAR 63

ÖZET

FARKLI ARK KAYNAK YÖNTEMLERİYLE BİRLEŞTİRİLEN YÜKSEK MUKAVEMETLİ API 5L X80 ÇELİĞİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut BİÇEN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

Kaynak, malzemelerin ısı enerjisi veya basınç uygulaması altında, sürekli bir içyapı oluşturulması için gerçekleştirilen birleştirme işlemidir. Metal kaynağı; başlıca 'Ergitme Kaynağı' ve 'Katı Hal Kaynağı' olarak ikiye ayrılır. Bir yapı elemanının kaynağı için, yapı elemanının kaynak kabiliyeti önem arz etmektedir. Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler; malzeme, konstrüksiyon ve kaynak yöntemidir. Bu çalışmada; seçilen yüksek mukavemetli yapı çeliğinin çeşitli ergitme kaynağı yöntemi ile kaynak kabiliyeti test edilmiştir. Seçilen API 5L X80 yüksek mukavemetli düşük karbonlu yapı çeliği malzemesi; elle ark kaynağı, gaz altı kaynağı ve toz altı ark kaynağı yöntemleri ile birleştirilmiştir. Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin mukavemeti tahribatlı testler; akma mukavemeti, çekme mukavemeti, çentik darbe mukavemeti ve sertlik testi ile malzeme yapısı ise; makrografik muayene ile tespit edilmiştir. Elde edilen test sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, API 5L X80, Tahribatlı Testler, Makrografik Muayene

ABSTRACT

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH API 5L X80 STEEL COMBINED WITH DIFFERENT ARC WELDING METHODS

M. SC. THESIS

Mesut BİÇEN

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2019

Welding is the jointing process for the formation of a continuous internal structure under the application of heat energy or pressure of the materials. Metal welding; It is divided into two as 'Melting Welding' and 'Solid State Welding'. For the welding of a building element, the welding capability of the building element is important. Factors affecting welding ability; material, construction and welding method. In this study; The welding ability of selected high strength structural steel was tested by various melt welding methods. Selected API 5L X80 high strength low carbon structural steel material; manual arc welding, gas welding and submerged arc welding. The strength of the samples combined with different welding methods are destructive tests; yield strength, tensile strength, notch impact strength and hardness test with material structure; Macrographic examination. The test results were compared with each other.

Keywords: Weld, API 5L X80, Destructive Tests, Macrographic Inspection

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No **Sayfa**

Çizelge 3.1 Alaşımlı ve alaşımsız çelikler arasındaki sınır değerler 7
Çizelge 3.2 TS EN 10025-2 Yapı çeliklerin temel parça kimyasal analizi.....15
Çizelge 3.3 TS EN 10025-2 Yapı çeliklerin mukavemet değerleri 16
Çizelge 3.4 API 5L çeliklerin gösterimi 16
Çizelge 3.5 API 5L, API 5L X80 çeliğin ürün kimyasal analizi 17
Çizelge 3.6 API 5L, API 5L X80 çeliğin ürün mukavemet değeri.....17
Çizelge 3.7 ASTM E8/8M'e göre Şerit Tip Numune Ölçüleri.....27
Çizelge 3.8 Sertlik testi test kuvvetleri 30
Çizelge 3.9 Karbon Eşdeğerine Göre Ön Tavlama Sıcaklığı 31
Çizelge 3.10 Kaynak Yöntemine Bağlı Oluşan Kaynak Hataları.....32
Çizelge 4.4 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (SMAW) 37
Çizelge 4.5 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları 39
Çizelge 4.7 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları.....40
Çizelge 4.8 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları 42
Çizelge 4.9 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (GMAW).....44
Çizelge 4.10 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları.....45
Çizelge 4.11 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı bükme test sonuçları.....46
Çizelge 4.12 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları 47
Çizelge 4.13 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları.....49
Çizelge 4.14 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (SAW).....51
Çizelge 4.15 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları.....52
Çizelge 4.16 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı bükme test sonuçları.....53
Çizelge 4.17 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları 53
Çizelge 4.18 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları.....54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No **Sayfa**

Şekil 3.1 Çelik çeşitleri 6
Şekil 3.2 LSS, HSS ve UHSS çeliklerin mukavemet ve % uzama ilişkisi 12
Şekil 3.3 Çeliklere uygulanan çeşitli sıcak haddeleme profilleri 13
Şekil 3.4 Konvansiyonel sıcak haddelenmiş slab 14
Şekil 3.5 Termomekanik haddeleme 14
Şekil 3.6 Kaynak yöntemleri 18
Şekil 3.7 Örtülü elektrod ile ark kaynağında kaynak bölgesi 19
Şekil 3.8 Farklı türdeki elektrodların damlacık geçişleri 19
Şekil 3.9 MIG/MAG kaynak donanımının şematik gösterimi 22
Şekil 3.10 Çeşitli koruyucu gazların kaynak dikişine etkisi 24
Şekil 3.11 Toz altı kaynak yönteminin şeması 25
Şekil 3.12 Toz altı kaynağında ark banyosu 25
Şekil 3.13 Toz altı ark kaynağında akım şiddetinin dikiş formun etkisi 26
Şekil 3.14 Toz altı ark kaynağında gerilimin (voltaj) dikiş formun etkisi 26
Şekil 3.15 Toz altı ark kaynağında kaynak hızının dikiş formun etkisi 26
Şekil 3.16 Toz altı ark kaynağında kaynak teli çapının dikiş formun etkisi 27
Şekil 3.17 ASTM E8/8M'e göre Şerit Tip Numune Ölçüleri 27
Şekil 3.18 Eğme Testi Mekanizması 28
Şekil 3.19 Çentik darbe testi düzeneği 29
Şekil 3.20 Sertlik testinin prensibi 29
Şekil 3.22 Bir kaynak bağlantısının çeşitli kısımları 32
Şekil 4.1 API 5L X80 Malzeme görüntüsü 33
Şekil 4.2 Numune işleme görüntüleri 34
Şekil 4.3 SMAW görüntüsü 37
Şekil 4.4 Çekme testi sonrası numune görüntüsü 37
Şekil 4.5 API 5L X80 Malzeme Çekme Test Analizi (SMAW) 38
Şekil 4.6 SMAW Kaynaklı çekme test numuneleri 38
Şekil 4.7 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi 39
Şekil 4.8 SMAW Çentik darbe test numuneleri 41
Şekil 4.9 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi 41
Şekil 4.10 Sertlik test noktaları (SMAW) 41
Şekil 4.11 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi 42
Şekil 4.12 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –V 43

Şekil 4.13 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X 43
Şekil 4.14 Gerçekleşen GMAW görüntüsü 44
Şekil 4.15 API 5L X80 malzeme çekme test analizi (GMAW).....44
Şekil 4.16 GMAW Kaynaklı çekme test numuneleri 45
Şekil 4.17 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi 46
Şekil 4.18 GMAW Çentik darbe test numuneleri.....47
Şekil 4.19 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi.....48
Şekil 4.20 Sertlik test noktaları (GMAW).....48
Şekil 4.21 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi 49
Şekil 4.22 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri -V 50
Şekil 4.23 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X 50
Şekil 4.24 Gerçekleşen SAW Görüntüsü.....51
Şekil 4.25 API 5L X80 malzeme çekme test analizi (SAW).....51
Şekil 4.26 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi.....52
Şekil 4.27 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi 54
Şekil 4.28 Sertlik test noktaları (SAW) 55
Şekil 4.29 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi.....55
Şekil 4.30 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X.....56
Şekil 5.1 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde akma mukavemeti analizi.....57
Şekil 5.2 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde çekme mukavemeti analizi.....57
Şekil 5.3 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde malzeme-çentik darbe analizi.....58
Şekil 5.4 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde kaynak-çentik darbe analizi.....58
Şekil 5.5 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde ITAB -çentik darbe analizi.....59
Şekil 5.6 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde malzeme-sertlik analizi 59
Şekil 5.7 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde ITAB-sertlik analizi.....60
Şekil 5.8 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde kaynak-sertlik analizi 60

KISALTMALAR VE SİMGE LİSTESİ

API	: Amerika Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute)
BM	: Malzeme Metali (Base Metal)
CE_{pcm}	: Karbon Eşdeğeri
CE_{IIW}	: Karbon Eşdeğeri
DWTT	: Ağırlıklı Düşmede Yırtılma Testi (Drop Weight Tear Test)
GMAW	: Gaz Altı Ark Kaynağı (Gas Metal Arc Welding)
HIC	: Hidrojen Kaynaklı Çatlama (Hydrogen Induced Cracking)
HSS	: Yüksek Mukavemet Çelikleri (High Strength Steel)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge (Isıdan Etkilenen Bölge)
LSS	: Düşük Mukavemet Çelikleri (Low Strength Steel)
MAG	: Metal Aktif Gaz (Metal Active Gas)
MIG	: Metal İnter Gaz (Metal Inert Gas)
NO-PWHT	: Ön Isıtma Yok (No Pre-Weld Heat Treatment)
NO-PWHT-V	: Ön Isıtma Yok (No Pre-Weld Heat Treatment)
NO-PWHT-X	: Ön Isıtma Yok (No Pre-Weld Heat Treatment)
PWHT	: Ön Isıtma Var (Pre-Weld Heat Treatment)
PWHT-V	: Ön Isıtma Var (Pre-Weld Heat Treatment)
PWHT-X	: Ön Isıtma Var (Pre-Weld Heat Treatment)
R_t	: Akma Dayanımı
R_m	: Çekme Dayanımı
SAW	: Toz Altı Ark Kaynağı (Submerged Arc Welding)
SMAW	: Elektrik Ark Kaynağı (Shielded Metal Arc Welding)
SWC	: Kademeli Çatlama (Stepwise Cracking)
TANAP	: Trans Anadolu Doğalgaz Boru Hattı
TS	: Türk Standart
UHSS/AHSS	: Ultra Yüksek Mukavemet Çelikleri (Advanced High Strength Steel)
V-notch	: V-Çentik
WM	: Kaynak Metali (Weld Metal)
%A	: %Uzama

1. GİRİŞ

Günümüz imalat ve montaj yöntemleri arasında kaynak önemli bir rol oynamaktadır. Kaynak yöntemi özellikle basınçlı kap, boru imalat ve montajında başta olmak üzere, bu imalatların ek parçalarında da (vana, dirsek gibi) kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına bakıldığında ise kaynak yöntemi hem en çok kullanılan yöntem hem de güvenliği önemli bir rol taşımaktadır.

Bir kaynaklı birleştirme teknik anlamda çoğunlukla; malzeme dayanımı, tokluğu, yüksek ve çok düşük sıcaklıklara karşı direnci, aşınmaya karşı direnci, basınç, buhar, gaz veya sızdırmaz gibi çok özel şartlar aranmaktadır.

Çok sayıda ana malzeme (demir esaslı metaller, demir dışı metaller) ve bunlardan üretilen kalınlığı değişen yarı mamuller (levha/boru/profil) ve çeşitli enerji üreticiler, kaynak dolgu malzemeler (kaynak telleri ve tozları, kaynak elektrodları, koruyucu gazlar vs.) dikkate alındığında günümüzde çok sayıda kaynak yöntemi uygulanabilmektedir. Bu kaynak yöntemlerinin en sık kullanılanları; toz altı ark kaynağı, elle ark kaynağı, koruyucu gaz kaynağı (gaz altı kaynağı) yöntemleri, direnç kaynağı, lazer ışın kaynağı ve elektron ışın kaynağı gibi sıralanabilir.

Kaynaklanabilirlik, malzeme yapısındaki elementlerle direkt ilgilidir. Malzeme yapısında kaynak, özellikle karbon elementi başta olmak üzere mangan, krom, molibden, vanadyum, nikel ve bakır ile direkt etkilidir. Bu elementlerin kombinasyonları hem malzeme kalitesini belirlerken hem de kaynaklanabilirliği hakkında etkin rol oynar. API standardında ve Türk Standartlarında (TS) karbon eşdeğeri olarak belirtilen "CE_{IIW}" veya "CE_{pcm}" bir malzemenin kaynaklanabilirliği hakkında bilgi verir.

Çelikler; kimyasal bileşimine göre, mukavemet değerlerine göre, ısıl işlem durumlarına göre ve kullanım özelliklerine göre ayrılır. Kimyasal bileşimine göre çelikler; alaşımsız, düşük alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılabilir.

Düşük alaşımlı çelikler içerisinde toplam %5'den fazla alaşım elementi bulundurmamaktadır.

Yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılma amacı, basınçlı kaplarda yüksek basınca dayanıklı olmasıdır. Çünkü basınçlı kaplarda basınç dayanımı çelik mukavemetinin akma mukavemeti ile doğru orantılıdır. Tasarımlar ve projelerde genellikle basınçlı kap çapı içinden geçen gaz veya akışkanın debisine göre seçilirken, et kalınlığı ve çelik mukavemeti içinden geçen akışkan veya gazın montajdan sonraki hat basıncına göre seçilir.

Günümüz proje tasarımlarında, basınçlı kap tasarımları yüksek basınç altında ise, çelik mukavemeti düşük seçilir ise et kalınlığı yüksek seçilmesi gerekir. Et kalınlığın yüksek olması montajda kaynak işleminde fazla işçilik, fazla kaynak yığılması olması durumunda kaynakta hata bırakma riski artar, kaynak bölgesinde yüksek ısı girdisi sebebiyle ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) sertleşme gerçekleşir. Bu sebeple oluşturulan tasarımlar optimize edilerek çelik kalitesi ve et kalınlığı seçilir.

Türkiye çelik üreticileri, üretimlerinde X65M çelik kalitesinde seri imalat yapabilirken, günümüz ihtiyaçları arasında olduğunu gördüğümüz X70M çelik kalitesi üretimi yapılamamaktadır. En son Türkiye'de gerçekleştirilen TANAP projesinde X70M çelik kalitesi kullanılmış ve tüm hammadde yurtdışından temin edilmiştir. İncelemelerde tedarik edilen çoğu hammaddenin aynı zamanda X80 çelik kalitesi mukavemet değerlerini de sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu durumda yüksek lisans çalışmamda, X80 çelik kalitesinin ülkemizde yakın zamanda önemli bir yer edineceği, bu sebeple kaynaklanabilirliği ile ilgili çeşitli kaynak yöntemleri ile irdeleme ve kıyaslama yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaynak, imalat yöntemleri arasında çok önemli bir konumdadır. Bu nedenle kaynak işlemi üzerinde birçok çalışmalar ve testler gerçekleştirilmiş ve halen gerçekleştirilmektedir.

Kaynak yönteminde tahribatlı testler ve tahribatsız testler günümüzde birçok sektörde yer almaktadır. Genellikle imalat kontrolleri ürün üzerinde tahribatsız testler gerçekleştirilirken, imalattan alınan örnek numuneler üzerinde ise tahribatlı testler gerçekleştirilmektedir.

Yüksek mukavemetli çeliklerin malzeme yapısında yapılan çalışmalar devam ederken, kaynak sonrası oluşan yapı değişiklikleri ve gerekli görülmesi halinde ısıl işlem ile malzeme yapısındaki martenzit ve perlit yapı, ince taneli yapıya dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

X80 çelik kalitesinde yapılan birçok test sonucunda; kimyasal analizde C, %0.03-%0.07; Mn, %1.60-%1,95; Nb, %0.06-0.12; Cr+Ni+Mo+Cu, %0.50-%0.90 aralığında olduğu, mekanik testlerde akma mukavemeti 560MPa-700MPa; çekme mukavemeti 620MPa-800MPa; akma/çekme oranı 0.82-0.96; çentik darbe testi 100J-600J aralığında olduğu tespiti gerçekleşmiştir. Kaynaklanabilirlik karbon eşdeğerine bağlı olarak yorumlanabilir. Yapılan çalışmada akma ve çekme mukavemet değerleri karbon eşdeğeri ile doğru orantı olduğu fakat çentik darbe ile ters orantılı olduğu tespiti gerçekleşmiştir (Qiao ve ark. 2017).

Kaynak işlemi sırasında sıcaklık 1000°C' nin üzerine çıktığı ve hava şartlarında soğutulduğunda kaynak bölgesinin hızlı soğutmaya maruz kalmaktadır. Bu sebeple yüksek mukavemetli çeliklerde oluşan karbürler sertleşmeye maruz kalabilmektedir.

Kaynak işleminde sonra yavaş soğutma gerçekleştirerek, malzeme içyapısındaki martenzit ve perlit yapıların azalması planlanmaktadır. X80 çelik kalitesindeki malzeme için 550°C-650°C aralığında yavaş soğutma ile malzeme yapısı yükseldiği ve akma, çekme mukavemetinin en yüksek olduğu bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir (Nakata ve ark. 2013).

Kaynaklı yapıların tasarımı ele alınırken kaynak yöntemi, kaynak geometrisi ve malzeme türü göz önüne alınarak optimizasyon yapılarak bu sürecin devam edilmesi gereklidir. En uygun kaynak yöntemi, malzeme seçimi ve kaynak geometrisi belirlenirken her yöntem için ayrı ayrı değerlendirme yapılıp kaliteli ürün seçimi için uygunluğu değerlendirilmelidir (Taşçı 2008).

API 5L X80 çeliğinin termo-fiziksel özellikleri, kaynaklı birleştirmelerde sıcaklık alanını belirlemek için bunları hesaplama modellerinde kullanmak amacıyla deneysel olarak ölçülmüştür. Malzemenin ısıl genleşme özelliği, ısıl yayılma, ısıl iletkenlik değerleri sıcaklıkla etkisi değerlendirilmiştir (Antonino ve ark. 2014).

API 5L X80 çeliğin kaynak sonrası soğutma sıcaklıklarının çekme testi, çentik darbe testi ve mikro yapı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu vesile ile 350°C, 500°C, 600°C derecelerde soğutma gerçekleştirilmiştir. Yüksek mukavemetli derecelerde yüksek derecelerde soğutmada çekme ve çentik darbe testlerinde yükselme, mikro yapılarda martenzit yapının azaldığı tespit edilmiştir (Zhao ve ark. 2016).

Boru hattı çeliklerin yorulma dayanımının değerlendirmesi ve bileşenlerin dikkate alınması gereklidir. Kaynaklanan bir boru ile zamanla yorulma ve dolayısıyla istenmeyen çatlaklar oluşabilir. Zamanla oluşan yorulma dayanımını ölçmek için HIC testi ile HIC ve SWC bölgeleri tespit edilmiştir (Mansor ve ark. 2014).

Yüksek mukavemetli çeliklerden X80 yapı çeliği, hızlı soğuma etkisine maruz kaldığında kırılma tokluğu üzerine etkisi araştırılmıştır. Çentik darbe testi ve ağırlıkla düşmede yırtılma testi (DWTT) kesme alanına etkisi yüksek olup, yüksek çelik kalitesindeki yapı çeliklerin kesme alanı gevrekleştiği martenzit yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir (Zhao ve ark. 2016).

API 5L X70 ve X80 çeliklerin kaynak sonrası normalizasyon ile kaynak metali (WM), ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB), ana metal (BM) üzerinde yapılan çentik darbe testi ve mikro yapı inceleme ile yapılan araştırmada normalize edilmiş bir kaynak işleminde çentik darbe test değerlerinin yükseldiği ve mikro yapıda bulunan martenzit yapının azaldığı gözlemlenmiştir (Tang ve ark. 2018).

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Çelik

Çelik; demir ve karbon alaşımından oluşur. Karbon elementi dışında farklı oranlarda alaşım elementleri çelik içerisinde bulunur. Genellikle karbon oranı %2'den az olup içerisinde diğer elementleri de içeren malzemeler çelik olarak adlandırılır. Çelik içerisinde bulunan karbon dışındaki her elementler, çeliğe farklı özellik kazandırır. Her elementin çeliğin özelliğine göre üretimi sırasında belirli bir karşım formülü ile üretilmektedir. Çeliğe farklı özelliklerin kazandırılması element ihtivasına ek olarak ısıl işlem (tavlama, sertleştirme, ıslah) ile de sağlanabilmektedir.

Çelik; demir cevherinden veya hurdadan geri dönüşüm ile iki şekilde üretilmektedir Sıvı çelik üretildikten sonra döküm ile ingot olarak veya sürekli döküm yöntemi ile kütük veya blum olarak şekillendirilir (GSI 2004).

3.1.1 Çeliklerin Temel Özellikleri

- Çeliklere genellikle ısıl işlem uygulanabilmektedir.

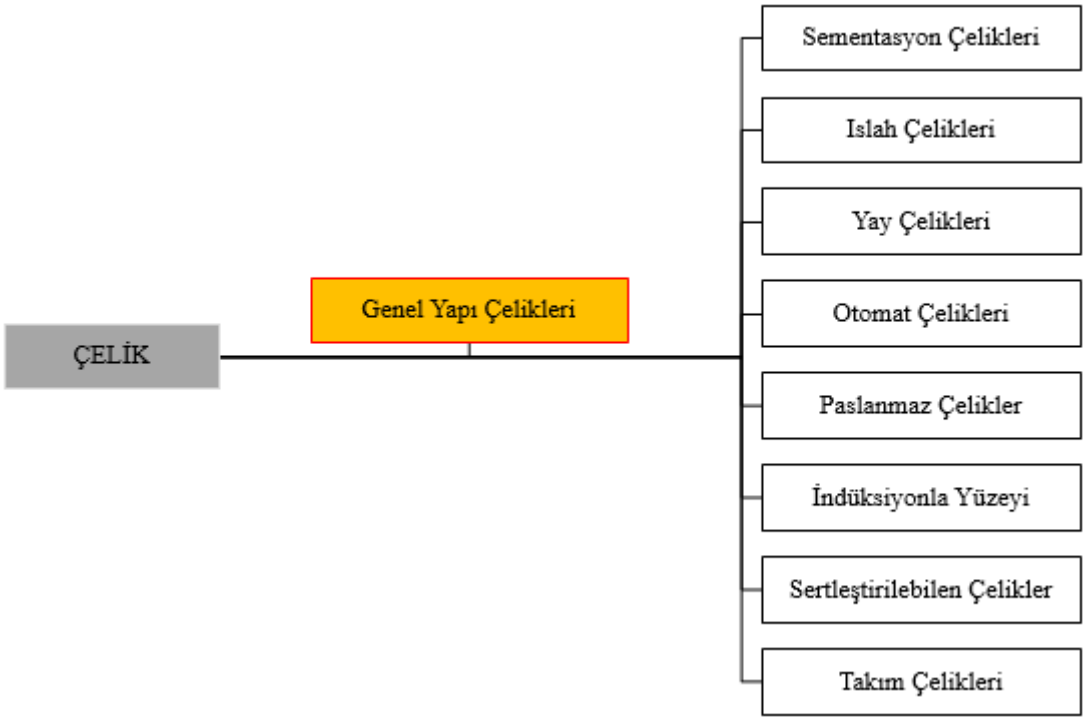
- Kimyasal elementlerle alaşımlandırmaya ek olarak ısıl işlem uygulanarak istenen mekanik özellik, sertlik, tokluk, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanım kazandırılabilir.

- Çelikler, yapısında bulunan kimyasal elementleri ve mukavemetine uygun şekilde ısıl işleme tabi tutulursa süneklik kazanır (dövme, pres, hadde), ayrıca soğuk olarak da şekillendirilebilir (hadde, pres, bükme).

- Sünekliği sayesinde talaş kaldırma özellikleri yüksektir, istenilen yüzey kalitesi elde edilebilir.

- İçerdiği elementlere bağlı olarak kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptir.

- Çelikler, yüksek ısılara dayanıklılığı ve istenilen yüzey kalitesine getirilebilme özelliği nedeniyle boyama (epoksi gibi) ve plastik (polietilen gibi) ile kaplanmaya uygundur (GSI 2004).



Şekil 3.1 Çelik çeşitleri

3.1.2 Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi

Karbonlu çeliklere bazı istenen özellikler kazandırmak için, malzeme içerisine belirli oranda alaşım elementi katarak üretilen çeliklere alaşımlı çelikler denir.

Alaşım elementleri, çeliğin metalürjik yapısında etkin rol oynamaktadır. Her alaşım elementi ayrı ayrı düşünüldüğünde, malzeme içerisinde avantajının yanı sıra dezavantajları da olabilmektedir. Alaşım elementleri arasındaki etkileşimlerde malzeme içerisinde avantaj ve dezavantajları olabilir. Bu sebeple malzeme üreticileri, üretiminde alaşım elementlerinin oranını analizini çok iyi yaparak, hem istenen kimyasal ve mukavemeti sağlamak hem de kaynaklanabilirliğine etkisi göz önünde bulundurarak gerçekleştirirler.

Alaşımlı çelikler, alaşım elementleri toplamı % 5’ den az ise düşük alaşımlı çelik, alaşım elemanlarının toplamı % 5’ den fazla ise yüksek alaşımlı çelik olarak adlandırılır. Düşük alaşımlı çeliklerin en önemli özelliği, sertleşme kabiliyetleri daha yüksektir. Çekme ve akma mukavemeti, sertlik, elastiklik modülü gibi özellikleri ile sıcaklığa karşı dayanımı yükselirken, genellikle tokluk ve kopma uzaması gibi

değerlerde düşebilmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde istenilen malzeme özelliklerinin yetersiz olması durumunda, yüksek alaşımlı çelikler kullanılabilir. Bu tür çelikler, normal sıcaklıklarda mekanik mukavemet değerinin artırılabilmesinin yanında, özellikle korozyona, yüksek sıcaklıktaki sertliğe dayanımı gibi özelliklerin elde edilmesini amaçlamaktadır (GSI 2004).

Alaşımlı ve alaşımsız çelikler arasındaki sınır değerler Çizelge 3.1'de tanımlanmıştır (TS EN 10020).

Çizelge 3.1 Alaşımlı ve alaşımsız çelikler arasındaki sınır değerler

Element	Alt Sınır (% Ağırlık)
Alüminyum	0,30
Bakır	0,40
Bor	0,0008
Bizmut	0,10
Kobalt	0,30
Krom	0,30
Kurşun	0,40
Mangan	1,65
Molibden	0,08
Niyobyum	0,06
Nikel	0,30
Silisyum	0,60
Titanyum	0,05
Vanadyum	0,10

3.1.2.1 Karbon

Karbon (C); çeliğin temel alaşım elementidir. Malzemenin kaynaklanabilirlik özelliği ile ilgili en önemli elementtir. Karbon miktarı artması, malzemenin sertlik ve mukavemet değerleri ciddi ölçüde artmaktadır (GSI 2004).

Malzeme içerisinde %0,22'ye kadar olan karbon elementi, kaynaklanabilir olduğu anlamı taşıyabilmektedir. Bir malzemenin kaynaklanabilir olması ise ön ısıtma gerektirmeden kaynak işlemi yapılabilir anlamı taşımaktadır. Daha yüksek karbon miktarı kaynakta sertlik değerinin yükselmesine ve hidrojen çatlağına sebebiyet vermektedir. Bu hatanın oluşmasına engel olmak için kaynak işlemi yavaş soğutma ve bu da malzeme içerisindeki mikro yapının martenzitik yapının azalmasına sebep olur. Bu sebeple, kırılgan ve çatlak hassasiyetlerinin azalması için ön ısıtma yapılması

gerekmektedir. Karbon oranı %0,5’ in üzerinde olan çelikler ergitme kaynak yöntemine uygun değildir (GSI 2004).

3.1.2.2 Mangan

Mangan (Mn); çeliğe mukavemet ve tokluk özellikleri iyileştirmesi gibi önemli etkenleri mevcuttur. Çeliğin içerisinde bulunan sülfür ile MnS olarak bağlanarak yeterli tokluk sağlamaktadır. Çeliğin yeterli tokluk sağlayabilmesi için içerisinde en az %0,2 oranında mangan bulundurması gerekmektedir. Genel yapı çeliklerinden özellikle ince taneli yapı çeliklerinde yüksek oranda mangan bulunmaktadır. Bu tür çeliklerde yaklaşık %1,0 ilâ %1,6 arasında değişiklik gösterebilmektedir. Karbon oranı ile birlikte mangan kaynaklanabilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tür çeliklerin kaynağında yaklaşık 20 mm et kalınlığından itibaren ön ısıtma uygulanmaktadır (GSI 2004).

3.1.2.3 Silisyum

Silisyum (Si); sertleşmeye, aşınmaya ve elastikiyeti yükseltmesine karşın yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Silisyum elementi oranı arttıkça çeliğin tane büyüklüğü artar. Silisyum oranı yaklaşık %0,1 ilâ %0,8 olarak tavsiye edilirken, bu orandaki çeliklerde segregasyon (ayrışma) hatası oluşma riski en aza indirgenmektedir. Silisyum oranı yaklaşık %0,8’den fazla olan çeliklerde sertleşme buna bağlı olarak gevrekleşme görünür ve kaynaklabilirliği iyi olmamaktadır (GSI 2004).

3.1.2.4 Sülfür

Sülfür (S); düşük sıcaklıklarda çözünebilir ve çoğu zaman çözünemez olarak kabul edilmektedir. Demir ve oksijenle birlikte erime sıcaklığı düşük ötektik bir faz oluşturur. Bu oluşum yüksek sıcaklık aralığında (950°C üzerinde) sıcak çatlak oluşumuna ve yaklaşık 800°C civarında gevrek kırılmaya sebep olmaktadır. Bu sebeple sülfür çelikte istenmez (tavsiye edilen en fazla sülfür element oranı %0,03) ve kaynak tekniği açısından çeliğin kaynaklanabilirliğini önemli şekilde sınırlandırmaktadır.

Kaynaklanabilir bir çelik elde etmek için, sülfürün mangan tarafından bağlanması ve yüksek sıcaklıklarda MnS elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu bileşik, haddelenmiş çelik kesitlerinde veya kırılma yüzeylerinde çökeltiler şeklinde

görünmektedir. Haddelenmiş mamullerin kalınlık yönünde yüklenmesi halinde, bu çökeltiler kırılmaya sebep olabilmektedir (GSI 2004).

3.1.2.5 Fosfor

Fosfor (P); oda sıcaklığında çelik içerisinde düşük miktarda çözünmekte ve yüksek miktarda Fe_3P şeklinde çözelti oluşturmaktadır. Fosfor, sülfür gibi segregasyon oluşunda etkin rol oynamaktadır ve çeliğin merkezinde yoğunlaşmaktadır. Fosfor genel anlamda, çeliğin tokluğunu düşürmektedir. Çeliğin talaş kaldırma özelliği ve hava şartlarına direnci fosforun olumlu etkileri olarak değerlendirilmektedir. Bir çeliğin kaynaklanabilirliği açısından fosfor olumsuz etki ettiği değerlendirilebilir. Bu nedenle, yaklaşık %0,05'den fazla içeren çeliklerde kaynaklanabilirlik kötü olduğu değerlendirilmektedir. Yapı çeliklerinde genel olarak %0,02 ilâ %0,035 oranları arasında fosfor içermektedir (GSI 2004).

3.1.2.6 Krom

Krom (Cr); çelik içerisindeki en önemli özelliği korozyona karşı direnci artırmaktadır. Isı dönüşüm etkilerinden çok az etkilenerek, sertlik değerinde artış miktarı da az miktarda artışa sebebiyet verir. %25'e yakın malzemeye ilave edilirse, malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşturur ve çeliklerin paslanmaya karşı direncini arttırır. Çekme ve akma mukavemeti, sertlik, yüksek sıcaklıkta dayanımı arttırmasının yanı sıra malzeme uzaması, soğuk şekillendirme özelliği, tokluk değerlerinde azalmasına sebebiyet vermektedir (GSI 2004).

3.1.2.7 Nikel

Nikel (Ni); çeliklerde malzeme çekme ve akma mukavemetini, sertlik, tokluk değerlerini artırmasının yanı sıra yüksek sıcaklığa dayanımını, korozyon direncini ve yorulma direncini arttırmaktadır. Malzeme uzama ve kaynaklanabilirlik özelliklerini düşürmektedir (GSI 2004).

Nikel, çeliklerde tane yapısında tane inceltme etkisine sahiptir. Genellikle nikel elementi tek başına metale eklenmesi yerine, Ni-Cr alaşımı, Ni-Mo veya Ni-Cr-Mo alaşımları olarak eklenmesi yaygınlaşmıştır.

3.1.2.8 Molibden

Molibden (Mo); çeliklerin tokluk değerini arttırmasının yanı sıra yüksek sıcaklığa dayanımını, korozyon direncini ve yorulma dayanımını arttırmaktadır. Bu özelliklerinin yanında malzeme çekme ve akma dayanımını, sertlik değerini de arttırmaktadır. Malzemenin uzama değerini düşürmektedir. Aynı zamanda akma ve çekme dayanımını artırır, korozyon direncini arttırır (GSI 2004).

3.1.2.9 Vanadyum

Vanadyum (V); çeliklerde yüksek sıcaklığa dayanımını artırmasının yanında malzeme içerisinde tane inceltme özelliği kazandırmaktadır (GSI 2004).

3.1.2.10 Wolfram

Wolfram (W); çeliğin mukavemetinin arttırılmasını sağlayan bir alaşım elementidir. Genel olarak; takım çeliklerinde ve ıslah çeliklerinde, alaşım elementi olarak kullanılır. Yüksek sıcaklıklarında, çeliğin menevişlenip sertliğini korumasını sağladığından, sıcağa karşı dayanımlı çeliklerin üretiminde kullanılır (GSI 2004).

3.1.2.11 Niobyum

Niobyum (Nb); çeliklerin malzeme yapısındaki tanelerin inceltmesine olumlu etki sağlamaktadır. Malzeme akma mukavemetini arttırmasının yanında sertliğinin de artmasına neden olmaktadır (GSI 2004).

3.1.2.12 Titanyum

Titanyum (Ti); çeliklerin malzeme yapısındaki tanelerin inceltmesine olumlu etki yanında çeliklerin sertliğinin artmasına sebebiyet vermektedir. Yüksek sıcaklıklara dayanımlı çeliklerde, sertlik ve mukavemet arttırmaktadır (GSI 2004, Kükürtcü 2014).

3.1.2.13 Kobalt

Kobalt (Co); yüksek sıcaklıklardaki çalışmalarda tane irileşmesini yavaşlattığından dolayı, daha çok hız çelikleri ve sıcağa karşı dayanımlı çeliklerde kullanılmaktadır (GSI 2004).

3.1.2.14 Alüminyum

Alüminyum (Al); çeliklerde malzeme çekme, akma dayanımlarını ve sertliği arttırıcı özelliğinin yanı sıra uzama, soğuk şekillendirme, kaynaklanabilirlik özelliklerini düşürmektedir (GSI 2004).

3.1.2.15 Bor

Bor (B); Düşük karbonlu çeliklerin sertliğini etkin bir şekilde artırmaktadır. Genel olarak çeliklere %0.0005 – %0.0030 oranında katılmaktadır. (GSI 2004).

3.1.2.16 Bakır

Bakır (Cu); çeliklerde malzeme çekme, akma dayanımlarını ve sertliği arttırıcı özelliğinin yanı sıra uzama değerini, soğuk şekillendirme ve kaynaklanabilirlik özelliklerini düşürmektedir (GSI 2004).

3.1.2.17 Azot

Azot (N); çelik içerisinde sınırlı ölçüde çözünmektedir. Düşük sıcaklıkta uzun bir zaman çerçevesinde (yaklaşık 50 yıl) nitrür çökelmesi meydana gelir. Yüksek miktarda gevrekleşmeye sebebiyet veren çökelme, doğal yaşlanma olarak da tanımlanmaktadır. Bu gevrekleşme bir tavlama işlemi ile giderilebilmektedir. Bir çeliğin yaşlanma eğilimi; %10 oranında soğuk deformasyon gerçekleştirilmiş ve 250°C' de yarım saat tavlanmış çentik darbe numuneleri ile test edilmektedir (GSI 2004).

3.1.3 Düşük ve Yüksek Mukavemetli Çelikler

Düşük Mukavemetli Çelikler (LSS); çekme dayanımları 270 MPa' dan düşüktür.

Yüksek Mukavemet Çelikler (HSS); çekme dayanımları 270-700 MPa' dır.

Ultra Yüksek Mukavemet Çelikler (UHSS); çekme dayanımı 700 MPa'dan yüksektir.

1. LSS (Low Strength Steel) Düşük mukavemetli çelikler; genellikle alaşımsız ve orta karbonlu çeliklerdir.

2. HSS (High Strength Steel) Yüksek mukavemetli çelikler; genellikle karbon-

mangan alaşımı ile, fırında sertleştirilebilen, düşük alaşımlı çeliklerdir (IISI 2005).

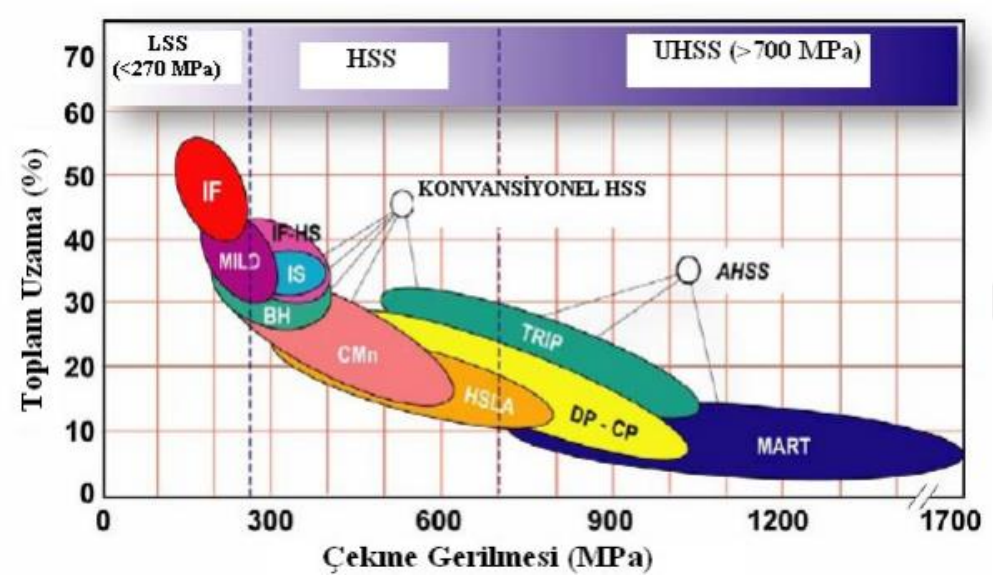
3. AHSS (Advanced High Strength Steel) Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler; aşağıdaki belirtilmiştir:

a) TRIP (Transformation-Induced Plasticity) çelikler; mikro yapılarında birincil faz olarak ferrit içerisinde gömülmüş en az %5 oranında östenit yapı tutulur.

b) Dual faz (DP) ve kompleks faz (CP) çelikler

c) Martensitik çelikler

Şekil 3.2'de LSS, HSS ve AHSS/UHSS çeliklerin mukavemet ve % uzama oranları gösterilmiştir (IISI 2005).

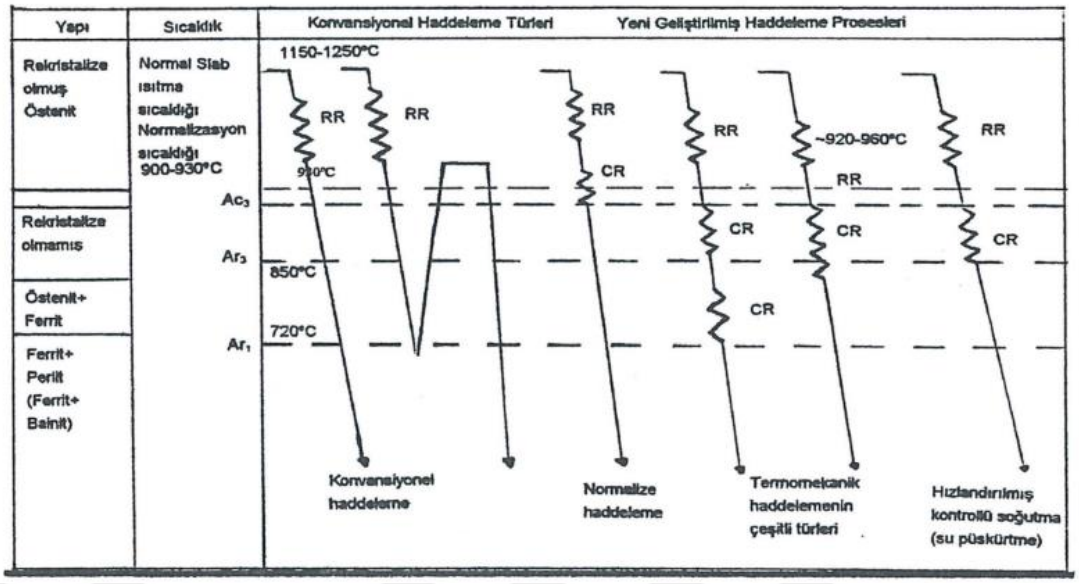


Şekil 3.2 LSS, HSS ve UHSS çeliklerin mukavemet ve % uzama ilişkisi

3.1.5 Çeliklere Uygulanan Çeşitli Sıcak Haddeleme Çeşitleri

Malzeme içyapılarının incelenmesi uygulamalarında, bazı sıcak haddeleme yöntemleri aşağıda belirtilmektedir.

- Konvansiyonel Sıcak Haddeleme
- Normalize Haddeleme
- Termomekanik Haddeleme
- Termomekanik Haddeleme ve Hızlı Soğutma



Şekil 3.3 Çeliklere uygulanan çeşitli sıcak haddeleme profilleri

3.1.5.1 Konvansiyonel Sıcak Haddeleme

Konvansiyonel sıcak haddelemede amaç, ürünü sadece nihai boyutlarına ulaştırmaktır.

Deformasyon işlemi yalnızca östenit fazında başlar ve tamamlanır. Haddeleme işleminin yüksek sıcaklıkta uygulanmasının sebebi; hadde merdanelerindeki gerilmeyi mümkün olduğunca düşürmek ve malzemenin deformasyon direncini düşürerek deformasyon oranını arttırabilmektir.

İşlem sonunda oldukça kaba ve düzensiz boyutta taneler elde edilmektedir. Böyle bir yapı sonuncunda ise oluşan mekanik özellikler düzensizdir ve çok fazla kararlı değillerdir.

Konvansiyonel sıcak haddeleme sonucunda oluşan kaba ferritik ve perlitik yapının inceltilmesi için haddeleme işleminden sonra normalizasyon ısıl işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem tanelerin incelmesine müsaade eder; örneğin çelik içindeki Nb, V, Ti ve Al gibi elementlerin oluşturdukları çökeltiler tane sınırlarının hareketini bloke ederler ve böylece başta dayanım ve süneklik olmak üzere çentik darbe tokluğu gibi özellikler de iyileştirilir.



Şekil 3.4 Konvansiyonel sıcak haddelenmiş slab

3.1.5.2 Normalize Haddeleme

Son haddeleme işleminin normalize tavlama sıcaklıklarında (850°C-900°C) yapılmasıyla normalize edilmiş duruma benzer bir ferritik ve perlitik mikro yapı elde edilir. Normalize haddeleme terimi, eğer deforme olmuş östenit son deformasyon sıcaklık kademesinde yeniden kristalleşmiş olursa kullanılır. Bir başka deyimle son deformasyon sıcaklığında östenitin tamamının yeniden kristalleştiği haddeleme prosesidir. Böylece ince taneli östenit, dönüşümden sonra ince taneli ferrit-perlit mikro yapısı oluşmasına neden olur. Bu şekilde üretilmiş malzemenin özellikleri, normalizasyon işleminden sonraki malzeme özelliklerine eşdeğerdir.

3.1.5.3 Termomekanik Haddeleme

Son deformasyon işlemi östenitin re-kristalize olmadığı sıcaklık aralığında yapıldığında bu prosese termomekanik haddeleme denilmektedir. Malzemenin mekanik özelliklerini ve tane boyutunu belirlemektedir. Termomekanik haddelenmiş olan yassı ürünler ferritik ve perlitik, ferritik ve beynitik yapılara sahip olabilmektedir. Prosesin koşulları ve mikro alaşım elementlerinin varlığı yapının olağanüstü ince olmasına neden olmaktadır. Yalnız başına ısıl işlem ile başarılamayan dayanç ve tokluğun uygun kombinasyonu elde edilmektedir.



Şekil 3.5 Termomekanik haddeleme

3.1.5.4 Termomekanik Haddeleme ve Hızlı Soğutma

Hızlandırılmış kontrollü soğutma son hadde pasosunun hemen ardından malzemeye su verilerek yapılmaktadır. Bu işlem, dönüşüm ürünü olarak beynitin de oluşmasını sağlar ve böylece yapı daha da incelmektedir. Hızlandırılmış kontrollü soğutma herhangi ek işlem gerektirmeksizin ve tokluğa zarar vermeksizin akma ve çekme dayancını artırmaktadır. Bunların yanı sıra, bu etki alaşım elementlerinin kullanımını azaltmak için de kullanılabilmektedir.

Bu yöntem ile elde edilen malzeme özelliklerine tek başına bir ısıl işlem ile ulaşılamamaktadır.

3.1.6 TS EN 10025-2 Standardında Belirtilen Yapı Çelikleri

Yapı çeliklerin alaşım kimyasal bileşimleri ve mukavemet değerleri TS EN 10025-2 standardında belirtilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 TS EN 10025-2 Yapı çeliklerin temel parça kimyasal analizi

Kısa gösteriliş		Anma mamul kalınlığı (mm) için C (% en çok)			Si	Mn	P	S	N	Cu
EN 10027-1 ve CR 10260	EN 10027-2	≤ 16	> 16 - 40	≥40	% En çok	% En çok	% En çok	% En çok	% En çok	% En çok
S235JR	10.038	0,19	0,19	0,23	-	1,5	0,045	0,045	0,014	0,6
S235J0	10.114	0,19	0,19	0,19	-	1,5	0,040	0,040	0,014	0,6
S235J2	10.117	0,19	0,19	0,19	-	1,5	0,035	0,035	-	0,6
S275JR	10.044	0,24	0,24	0,25	-	1,6	0,045	0,045	0,014	0,6
S275J0	10.143	0,21	0,21	0,21	-	1,6	0,040	0,040	0,014	0,6
S275J2	10.145	0,21	0,21	0,21	-	1,6	0,035	0,035	-	0,6
S355JR	10.045	0,27	0,27	0,27	0,6	1,7	0,045	0,045	0,014	0,6
S355J0	10.553	0,23	0,23	0,24	0,6	1,7	0,040	0,040	0,014	0,6
S355J2	10.577	0,23	0,23	0,24	0,6	1,7	0,035	0,035	-	0,6
S355K2	10.596	0,23	0,23	0,24	0,6	1,7	0,035	0,035	-	0,6
S450J0	10.590	0,23	0,23	0,24	0,6	1,8	0,040	0,040	0,027	0,6

Çizelge 3.3 TS EN 10025-2 Yapı çeliklerin mukavemet değerleri

Kısa gösteriliş		Asgarî akma dayanımı Rt (MPa) Anma kalınlığı (mm)			Çekme dayanımı R_m (MPa) Anma kalınlığı (mm)	
EN 10027-1 ve CR 10260	EN 10027-2	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	< 3	≥ 3 ≤ 100
S235JR	10.038	235	225	215	360 – 510	360 – 510
S235J0	10.114	235	225	215	360 – 510	360 – 510
S235J2	10.117	235	225	215	360 – 510	360 – 510
S275JR	10.044	275	265	255	430 – 580	410 – 560
S275J0	10.143	275	265	255	430 – 580	410 – 560
S275J2	10.145	275	265	255	430 – 580	410 – 560
S355JR	10.045	355	345	335	510 – 680	470 – 630
S355J0	10.553	355	345	335	510 – 680	470 – 630
S355J2	10.577	355	345	335	510 – 680	470 – 630
S355K2	10.596	355	345	335	510 – 680	470 – 630
S450J0	10.590	450	430	410	-	550 – 720

TS EN 10025-2 standardında belirtilen mukavemet değerlerine göre belirtilen yüksek mukavemetli yapı çelikleridir. Standartta belirtilen çeliklerin kısa gösterimlerinde; örneğin S235J0 için; "S" yapı çeliği olduğu "235" akma mukavemeti, "J0" 0°C'de çentik darbe testinde istenilen 21 joule değerini karşıladığı anlamı taşımaktadır.

3.1.7 API 5L Standardında X80 Yapı Çeliği

API (American Petroleum Institute) doğalgaz boru üretimi için hazırladığı ve ülkemizde de dâhil olmak üzere uluslararası geçerli standardı API 5L standardında çelik kaliteleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Aşağıda belirtilen çelik kaliteleri mukavemet değerleri düşükten yükseğe doğru sıralanmıştır.

Çizelge 3.4 API 5L çeliklerin gösterimi

L175	L210	L245	L290	L320	L390	L415	L450	L485	**L555**	L625
A25	A	B	X42	X46	X56	X60	X65	X70	**X80**	X90

Günümüzde en çok kullanılan çelikler "Grade B ile X70" arası çeliklerdir. X70 üzeri çelik üretimleri için çeşitli çalışmalar ve denemeler yapılmaya devam edilmektedir. Şuan X80 çelik kalitesi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Türkiye'de hali hazırda X70 üretimi seri üretim olarak olmasa da tek üretim çıkarılması başarılmıştır. X80 üretimi şuanda ülkemizde üretimi gerçekleşmemektedir.

Malzemelerin mukavemet değerleri artması, içinde bulunan kimyasalların sayesinde gerçekleşmektedir. Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklanabilirliği, nitekim düşük mukavemetli çeliklere göre daha zordur. Bu sebeple ekstra maliyetle yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağında ısı girdisinin düşürülmesi için daha düşük kaynak parametreleri ile çalışmak, kaynak işleminden önce ön ısıtma yapmak veya kaynak işleminden sonra yavaş soğutma yapmak bazı önlemler arasında yer almaktadır.

Çizelge 3.5 API 5L, API 5L X80 çeliğin ürün kimyasal analizi

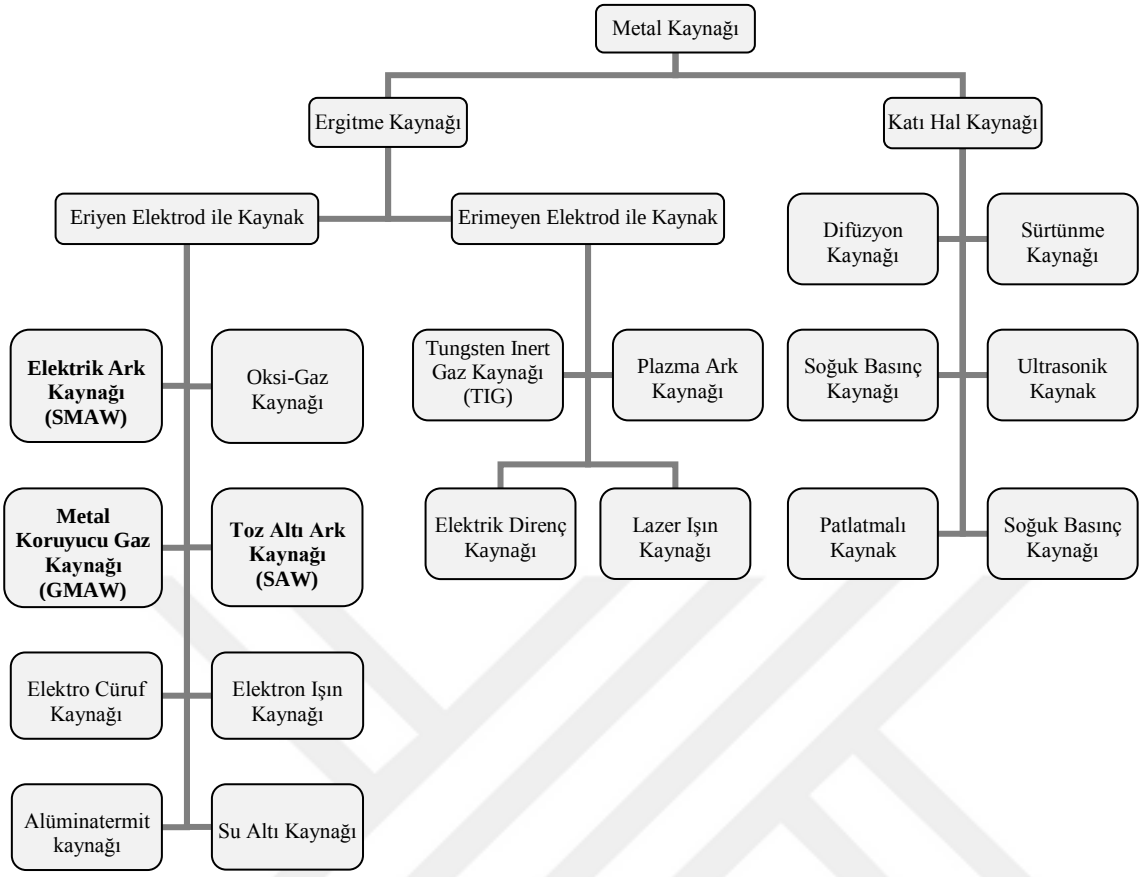
Çelik kalitesi	Ürün Analizi									Karbon Eşdeğeri	
	% en çok									% en çok	
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Diğer	CE_{IIW}	CE_{Pcm}
L555M / X80M	0.12	0.45	1,85	0.025	0.015	a	a	a	b	0.43	0.25
a: Nb + V + Ti ≤ 0.15 %.											
b: Cu ≤ 0.50 %; Ni ≤ 1.00 %; Cr ≤ 0.50 % ve Mo ≤ 0.50 %.											

Çizelge 3.6 API 5L, API 5L X80 çeliğin ürün mukavemet değeri

Çelik Kalitesi	Dikişsiz ve Dikişli (kaynaklı) borular				
	Akma Mukavemeti		Çekme Mukavemeti		Oran
	$R_{t0.5}$ (MPa)		R_m (MPa)		$R_{t0.5}/R_m$
	En az	En çok	En az	En çok	En çok
L555M / X80M	555	705	625	825	0.93

3.2 Kaynak

Malzemelerin, ısı enerjisi ve/veya basınç uygulaması altında, kararlı bir içyapıya sahip olması adına gerçekleştirilen şekil birleştirilmesi işlemine denir. Erime sıcaklığı, ana malzemelerinkiyle eşdeğer seviyede olan bir dolgu malzemesi ilave edilebilir. Kaynak sonucunda kaynak dikişi oluşur.

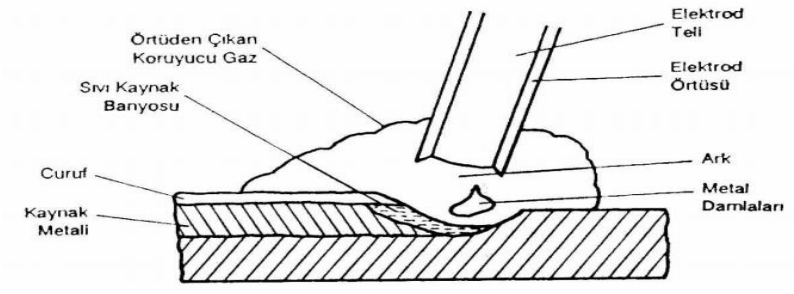


Şekil 3.6 Kaynak yöntemleri

3.2.1 Elektrik Ark Kaynağı (SMAW)

Kaynak işleminde ısı enerjisinin elektrod ile malzeme arasında oluşan elektrik arkı ile sağlanmış bir ark kaynağıdır.

Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı arasında; kaynak arkı, ergiyen elektrod ile malzeme arasında yanar ve ergiyen elektrod ile iş parçası kaynak metalini oluşturur. Kaynak sırasında, elektrod örtüsü yanarak ergir, kısmen iyonize ve buharlaşma ile açığa çıkan gaz kaynak ark bölgesini korur. Kaynak metalinin soğuması sonucu meydana gelen cüruf kaynak dikişinin üstünü örterek kaynak metalini korur (Benli 2004).



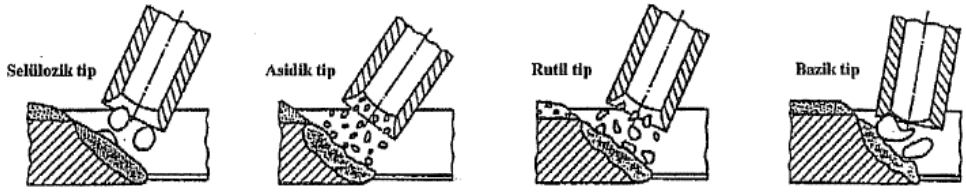
Şekil 3.7 Örtülü elektrod ile ark kaynağında kaynak bölgesi

3.2.1.1 Elektrod Çeşitleri

Elektrod üretimi, büyük ölçüde alaşımsız birleştirme kaynağı elektrodları oluşturmaktadır. Elektrodların örtüsü görevlerinden bazıları; kaynak metaline tokluk, mukavemet kazandırır, değişik akım türlerine uygun davranması beklenir, dikişin görünüşü ve cürufun ayrılışı, damlacık geçişleri elektrodların türlerine göre farklılık gösterir. Farklı türlerdeki elektrodların damlacık geçişleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir (GSI 2004).

Temelde en çok kullanılan elektrod türleri;

- Selülozik elektrodlar
- Asidik elektrodlar
- Rutil elektrodlar
- Bazik elektrodlar
- Oksit elektrodlar



Şekil 3.8 Farklı türdeki elektrodların damlacık geçişleri

Çubuk elektrodlardaki örtünün görevi;

- Kaynak tutuşturma işlevini kolaylaştırılması
- Ark aralığının iletkenliğinin iyileştirilmesi (iyonizasyon)
- Ergimiş haldeki kaynak metalini havanın zararlı etkilerinden koruması
- Kaynak banyosunun malzeme içyapısı yönden etkilenmesi (GSI 2004).

- Selülozik Elektrodların Özellikleri

- Bu tip çubuk elektrodlar, hava sızdırmaz kutularda ambalajlanmaktadır. Elektrod örtüsünde kontrollü bir nem kalması (%5'e kadar) gerekmektedir.
- Çok pasolu ark kaynağı yönteminde, kaynak pasolar arası sıcaklık kontrol altında tutularak, aşırı soğuma olmadan kaynak işlemi tamamlanmalıdır.
- Kaynak işlemi öncesi, kaynak ağzı özenle hazırlanmalıdır.
- Güçlü ark oluşumu nedeniyle, aşağıdan yukarıya kaynak pozisyonu dâhil, diğer her pozisyonlarda kaynak işlemine uygundur.
- Yüksek nüfuziyet istenilen uygulamalarda kullanılmaktadır.
- Kaynağı sıçrantılı olup aşırı kaynak duman çıkartmaktadır.
- Açık havada, gemi inşa sanayisinde ve petrol boru hatlarında kullanılmaktadır. Özellikle tahribatsız muayene kontrolü istenen kaynaklarda, yüksek derecede tercih edilmektedir (Oğuz 1989, Weman 2003).

- Rutil Elektrodların Özellikleri

- Kaynak yüzeyi düzgün ve cüruf kolay uzaklaştırılabilir
- Kolay kaynak işlemleri sağlar
- Her kaynak pozisyonunda rahatlıkla kullanılabilir
- Kararlı ark ve sıçrantı azdır
- Çok yüksek mukavemetli malzemelere uygulanmaz (S275JR malzemelere kadar uygulanır)
- Rutubete karşı dayanıklı değildir
- AC ve DC (+) kaynak makinelerinde kullanılabilir (Özakın 2010).

- Asidik Elektrodların Özellikleri

- Pratikte bu elektrod tipi fazla yaygın olarak kullanılmaz.
- Bu elektrod tipi, dar açılı köşe dikişlerinin kaynağında, cürufun kaynak metalinden kolay ayrışması nedeniyle tavsiye edilir.
- Cürufun alt yüzeyi bal peteği biçiminde, gözenekli ve birçok parçaya dağılmış biçimdedir.
- Doğru akımda DC (-) kutuplamada ve alternatif akımda AC kaynaklanabilir.
- Her pozisyonda kullanılabilirler (Anık ve ark. 1991, GSI 2004).

- Bazik Elektrodların Özellikleri

- Malzeme transferleri, iri damlacık halinde gerçekleşir.
- Genelde doğru akımda DC (+) kutuplama ile bağlanarak kaynak yapılır iken bazı türleri alternatif akımda AC kutuplamada da kullanılabilir.
- Karbon oranı %0,22'yi aşan malzemelerde veya sertliğe sebep olabilecek alaşım elementi olması halinde malzemeye 150-250°C ön ısıtma uygulanmaktadır.
- Bütün kaynak pozisyonlarında rahatlıkla kullanılabilir.
- Büyük et kalınlıkları (20 mm'den fazla) daha az sayıda pasolarla doldurulabilir. Bu sebeple günümüzde en yaygın kullanılan elektrod tipleridir.
- Düşük hidrojen oranı nedeniyle diğer tüm çubuk elektrod tiplerine göre daha az çatlama eğilimine sahiptir.
- Bazik elektrodlar, eksi sıcaklıklarda dâhi en yüksek tokluk değerine sahip kaynak metali elde edilmesini sağlamaktadır.
- Kaynak işleminden önce bazik elektrodlar nemden arındırılması gerekir. Bu sebeple genellikle fırınlama (kurutma) 400^0C-500^0C işlemi gerektirir (Oğuz 1989, Weman 2003, GSI 2004, Asarkaya 2006).

- Oksit Elektrodların Özellikleri

- Düz görünüşlü kaynak dikişleri oluşturur.
- Yalnızca düşük karbonlu ve alaşımsız çeliklerin kaynağında kullanılır.
- Hem doğru akımda DC(+) hem de alternatif akımda AC çalışır.
- Kalın örtülüdür.
- Nüfuziyetleri azdır (Ay 2017).

3.2.2 Metal Koruyucu Gaz Kaynağı (Gaz Altı Ark Kaynağı) (GMAW)

Metal koruyucu gaz kaynağında, sürekli kaynak teli ile oluşan ark ile kaynak işlemi gerçekleşir. MIG/MAG kaynak donanımının şematik gösterimi Şekil 3.9'da belirtilmiştir (MEGEP 2005). Kaynak dikişinin boyutu, ark gerilimi, ark oluşum miktarı kaynak yapılan metalin özelliklerine bağlıdır.

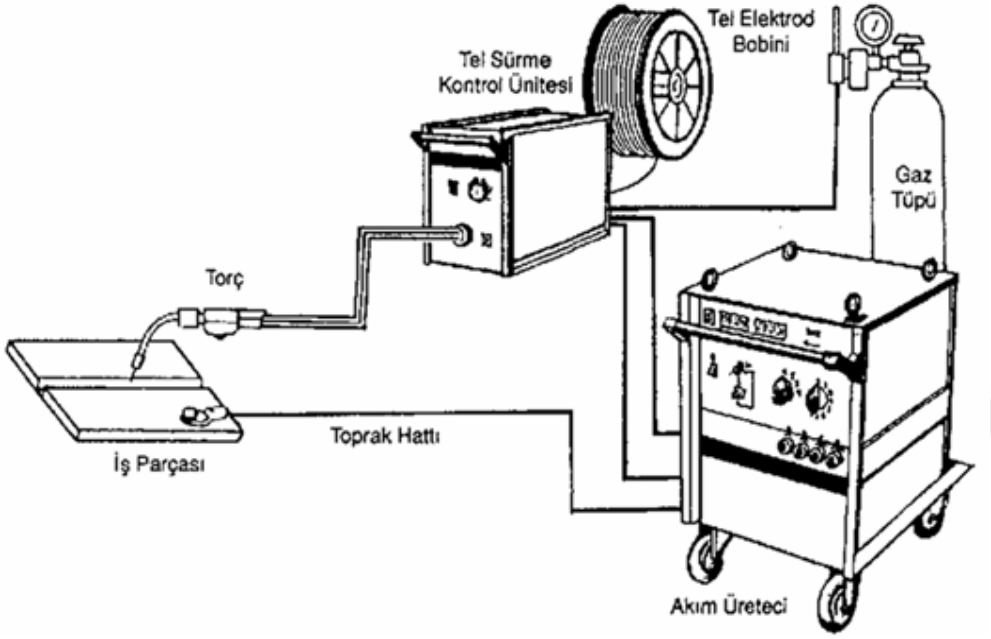
Metal koruyucu gaz kaynağının avantajları;

- Yüksek ergime verimi ve derin nüfuziyet

- Yüksek kaynak hızlarına sahip olması
- Sıçrama ve yanma çok az olması olarak sıralanabilir.

Metal koruyucu gaz kaynağının dezavantajları;

- Kaynak sarf malzemelerinde kaynak teli ve ek olarak koruyucu gazların maliyete etkimesi,
- Kaynak arkının yüksek ultraviyole ışınına sahip olmasından dolayı insan gözü üzerindeki zararlı etkileri olması olarak sıralanabilir (Quimby ve Ulrich 1999, Nadzam 2000, Pellerin ve ark. 2005).



Şekil 3.9 MIG/MAG kaynak donanımının şematik gösterimi

3.2.2.1 Masif Tel Elektrodlar

Alaşımsız çelikler ve ince taneli yapı çeliklerinin kaynağında tel elektrodlar kullanılır. Metal koruyucu gaz kaynağında kullanılan tel elektrodlar çoğunlukla makaralara sarılmış haldedirler.

Kullanılan tel elektrod çapları;

- 0,6 mm çapındaki teller ucuz hobi cihazlarıyla kullanılır
- 0,9 mm çapındaki teller çoğunlukla otomobil imalatında kullanılır
- 1,6 ila 3,2 mm çapları, kaplama kaynağında kullanılan özlü tellerde yaygındır, masif tellerde nadiren kullanılır.

3.2.2.2 Özlü Tel Elektrodlar (Gaz Korumalı Özlü Teller)

Özlü tel elektrodlar, metal boru şekilli bir çeper ve toz formunda bir dolgudan meydana gelmektedir. Dolgu mineral veya metalik malzemelerden ibarettir.

Dolgu malzemeleri ve koruyucu gaz birlikte arkın sıçrantı oluşumu, paso profili, kaynak dikiş yüzeyi, cürufun kaynak metali üzerinden uzaklaştırılması ve kaynak metalinin mekanik özellikleri üzerinde etkilere sahiptir.

Özlü tel elektrod tipleri aşağıdaki gibidir.

- Rutil özlü tel elektrod
- Bazik özlü tel elektrod
- Metal tozlu özlü tel elektrod

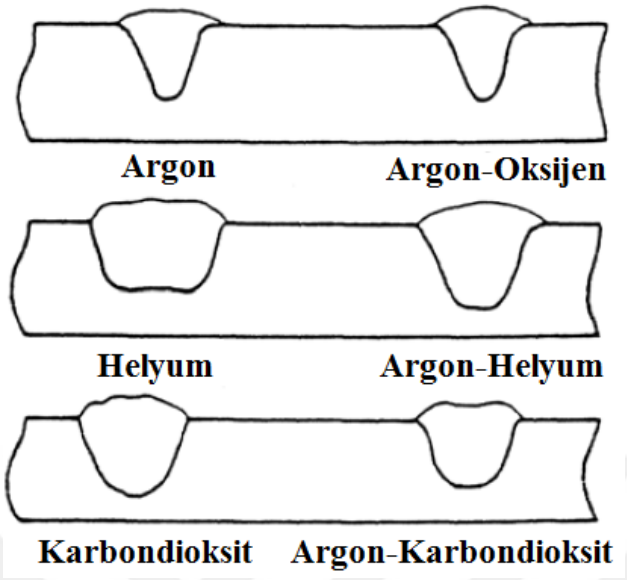
3.2.2.3 Koruyucu Gazlar

Metal koruyucu gaz altı ark kaynağı yönteminde, kaynak sarf malzemesi olarak çeşitli koruyucu gazlar kullanılmakta ve her gazın özelliği bakımından ergime gücü, kaynak dikişi ve kaynak nüfuziyet birbirlerinden farklıdır. MIG kaynağında soy gaz kullanılmaktadır (helyum, argon veya karışım gazları). MAG kaynağında ise aktif gaz (CO_2 veya karışım gazları) kullanılır. Koruyucu gazların; kaynak yapıldığı sırada oluşturduğu sıçrantı miktarı, kaynak hızı, kaynak metalinin arktaki metal transfer biçimine ve kaynak metalinin mekanik dayanımına etkisi söz konusudur (Nadzam 2000, Pellerin 2005, ESAB 2016).

Metallerin, özellikle çeliklerin kaynağında saf karbondioksit (%100 CO_2) ile Ar-CO_2 ve Ar-O_2 karışım gazları kullanılır. Koruyucu gaz olarak karbondioksitin kullanılması, aynı akım şiddeti için derin nüfuziyet, yüksek ergime gücü, geniş ve dışbükey kaynak dikişi elde edilmektedir. Diğer gazlara göre karbondioksitin ucuz koruyucu gaz olmasına rağmen, en yüksek sıçrantı kaybı ve en fazla duman oluşturma özelliği taşımaktadır. Karbondioksit gazı ile gerçekleşen bir metal koruyucu gaz kaynağında ısı girdisi yüksek olmakta ve dolayısıyla aynı akım şiddeti için yüksek kaynak hızlar ile kaynak yapmak mümkün olabilmektedir (Pellerin 2005).

Argon (Ar) ve argon-oksijen (Ar-O_2) karışım gazları, kaynak sırasında karbondioksit gazına göre ters özellikleri göstermektedir. Bu gazlar ile gerçekleşen gaz altı ark kaynağında; düşük ergime gücü, az nüfuziyet, dar ve az kaynak dikişi elde

edilmektedir. Argon-oksijen karışımı gazlar; az kaynak dumanı ve az sıçrantı oluşturan kaynak işlemi özelliğini taşımaktadır (Tülbentçi 1990).

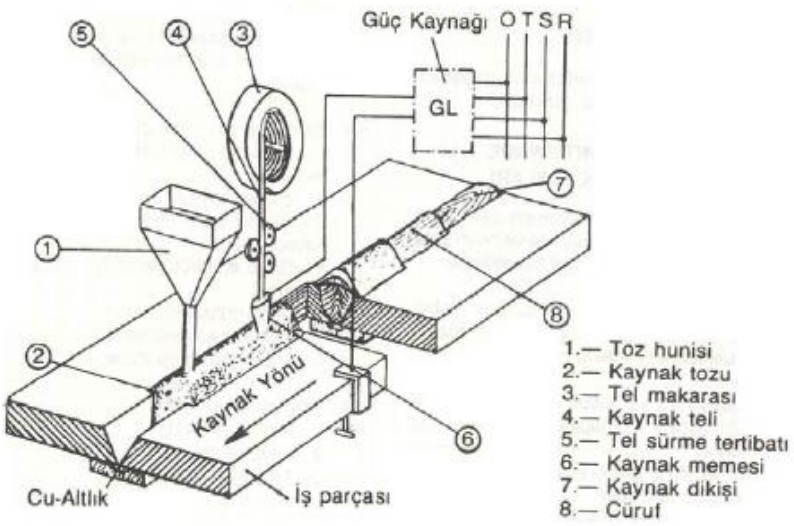


Şekil 3.10 Çeşitli koruyucu gazların kaynak dikişine etkisi

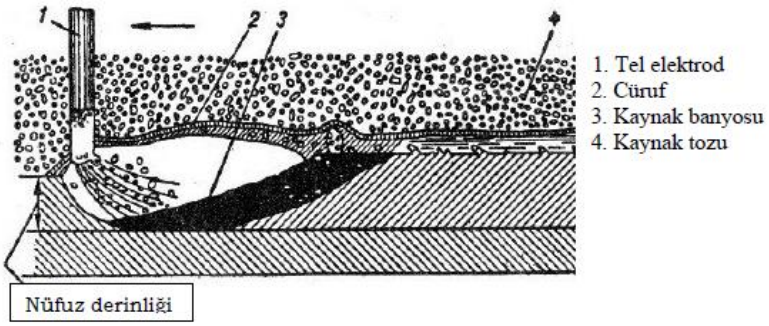
3.2.3 Toz Altı Ark Kaynağı (SAW)

Toz altı ark kaynağı yönteminde, kaynak telinin eriyik halde üzerinde kaynak tozu ile birlikte oluşan kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kaynak telinin belirli gerilim altında ana metal üzerine eriyik oluşturarak, kaynak metalinin direkt hava şartlarından etkilenmemesi ve alaşımlandırılması için kullanılan kaynak tozunun kaynak metali üzerinde oluşturduğu cüruf ile ark kaynak yöntemlerinden otomatize veya yarı otomatize olarak kullanılır.

Toz altı kaynağında; makaradan sürülen kaynak teli ile birlikte toz yığınının içine girmekte, ark ana metale temasıyla yüksek gerilim ile birlikte kaynak banyosunu oluşturur ve aynı zamanda ana metali, kaynak telini ve çevresindeki kaynak tozun bir kısmını ergitmektedir (Şekil 3.11). Ergiyen kaynak tozunun oluşturduğu kaynak gazları, gaz basınçları sebebiyle kaynak arkının çevresinde boşluk oluşturmaktadır. Kaynak teli bu boşlukta ergir ve damlacıklar şeklinde kaynak metaline nüfuz etmektedir. Kaynak tozunun ergiyen bölümü, kaynak arkı ilerledikçe, kaynak yapılmış kaynak banyosu katılaşarak, cüruf oluşturmaktadır (Şekil 3.12). Ergimeyen kaynak tozları, toz emici hortum ile emilerek toz haznesine doldurulmaktadır (Külahlı 1988, Weman 2003, MEGEP 2006).



Şekil 3.11 Toz altı kaynak yönteminin şeması



Şekil 3.12 Toz altı kaynağında ark banyosu

Toz altı kaynak yönteminde kaynak parametreleri uygun seçildiğinde hatasız ve güzel bir görüntü kaynak dikişleri elde edilebilir. Bunun yanında, bu yöntemin avantajları ve dezavantajları aşağıdakiler gibi sıralanabilir (Eyres 2001, Weman 2003).

Avantajları;

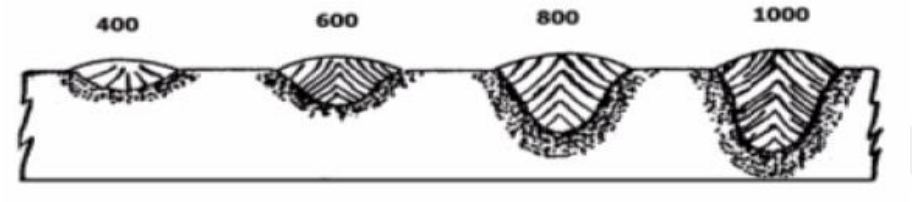
- Kaynak arkı, kaynak tozu tarafından örtüldüğünden ark ışınlarından korunmak için maske kullanmaya gerek yoktur.
- Yüksek ergime gücü (200 ile 1200 Amper arasında) ve yüksek kaynak hızı, derin nüfuziyet, 14 mm'ye kadar kaynak ağzı açmadan 2 pasoda kaynak yapılabilir.
- Yüksek ark stabilitesi sağlar, özel koruyucu donanımlara gerek duyulmaz.

- Isının çok azı ana metal tarafından absorbe edildiği için büyük enerji tasarrufu sağlar, sıçrama kaybı olmadığı ve yüksek akım yoğunluğundan çalışılabilmesinden dolayı elektrod ekonomisi sağlar.
- Emniyetli ve düzgün kaynak dikiş görüntüsü elde edilir ve boya yüzeyi açısından problem teşkil etmez, kaynak dikişinin kalitesine kaynakçının diğer yöntemlere göre etkisi daha azdır.

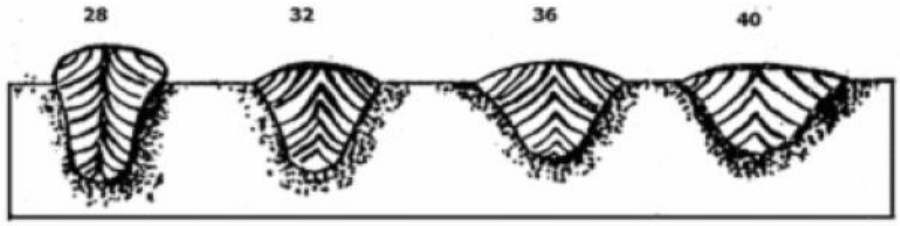
Dezavantajları;

- Yatırım maliyeti yüksektir.
- Yüksek ergime gücü sebebiyle ince plakaların kaynağı için uygun değildir.
- Kaynak pozisyonları sınırlıdır, sadece yatay pozisyonda iyi sonuç alınabilmektedir.

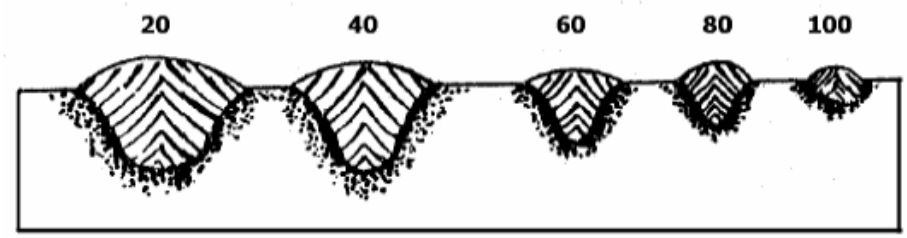
Toz altı ark kaynağında; akım, voltaj, kaynak hızının ve kaynak tel çapının kaynak dikişine etkisi Şekil 3.13, 3.14, 3.15, 3.16'da belirtilmiştir (Anık 1991).



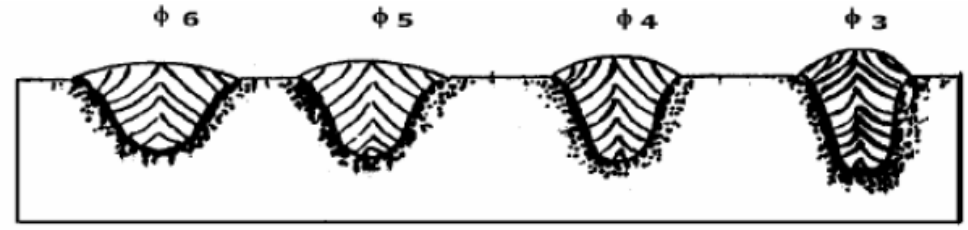
Şekil 3.13 Toz altı ark kaynağında akım şiddetinin dikiş formun etkisi



Şekil 3.14 Toz altı ark kaynağında gerilimin (voltaj) dikiş formun etkisi



Şekil 3.15 Toz altı ark kaynağında kaynak hızının dikiş formun etkisi



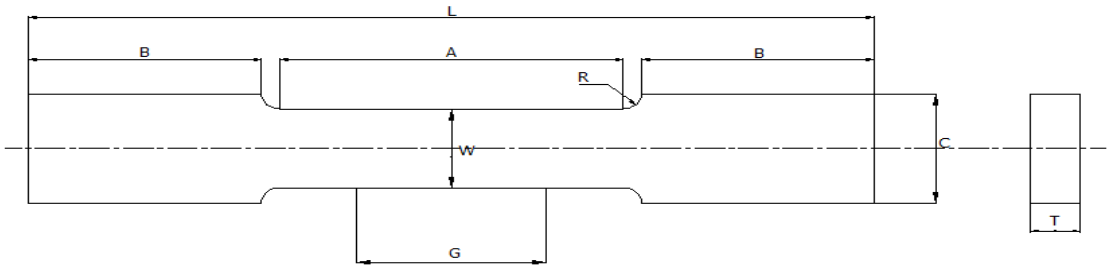
Şekil 3.16 Toz altı ark kaynağında kaynak teli çapının dikiş formun etkisi

3.3 Kaynaklı İmalatta Tahribatlı Testler

Malzemelerin sertlik, gevreklik ve mukavemet özelliklerini belirlemek için mekanik testler ile tayin edilebilir. Tahribatlı testler ile malzeme çelik kalitesi ve kaynaklı malzemelerin testler ile kaynak mukavemetinin belirlenmesi için birçok testler uygulanabilmektedir.

3.3.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mukavemeti hakkında bilgi almak ve malzemelerin özelliklerinin sınıflandırmak amacı ile yapılır. Çekme testi ile malzemenin; çekme ve akma dayanımı, kopma uzaması ve elastikiyeti hakkında değer verir.



Şekil 3.17 ASTM E8/8M'e göre Şerit Tip Numune Ölçüleri

Çekme numunesinin ASTM E8/8M standardına göre standart ölçüleri Şekil 3.17 ve Çizelge 3.7' de tanımlanmıştır (ASTM E8/8M).

Çizelge 3.7 ASTM E8/8M'e göre Şerit Tip Numune Ölçüleri

İlk ölçü uzunluğu, G	Daraltılmış Kesit Genişliği, W	Kavis yarıçapı, R en az	Toplam Uzunluk, L en az	Daraltılmış Kesit Uzunluğu, A en az	Kavrama Boyu, B en az	Kavrama Genişliği, C yaklaşık
50,0 ±0,10 mm	40 +3/-6 mm	13 mm	200 mm	60 mm	50 mm	50 mm

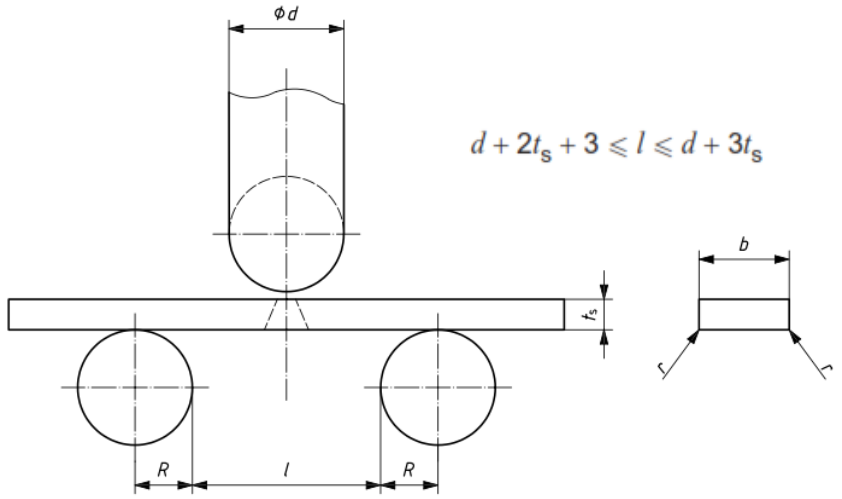
Akma dayanımı (R_t); malzemelerin genelde %0,5'lik plastik uzamaya karşılık gelen gerilme dayanımı olarak tanımlanmaktadır (API 5L).

Çekme dayanımı (R_m); bir numunenin en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme çekme test grafiğindeki en yüksek gerilme değeri olmakla birlikte, ayrıca bu değer maksimum yükün ilk kesit alanına oranı ile hesaplanabilmektedir (ASM International 2001).

Yüzde uzama (%A); çekme numunesinin, belirlenen iki noktadan ilk boyunun, kopma sonrasında aynı iki noktanın tekrar ölçümüne oranı olarak hesaplanmaktadır (ASM International 2001).

3.3.2 Eğme Deneyi

İki mandrel üzerine yerleştirilmiş test numunesinin kaynak dikişine dik olarak standardın öngördüğü çapta bir mandrel ile kuvvet uygulayarak eğmesi ile kaynak bağlantısının şekil değiştirme kabiliyeti test edilmektedir (MEGEP 2007).

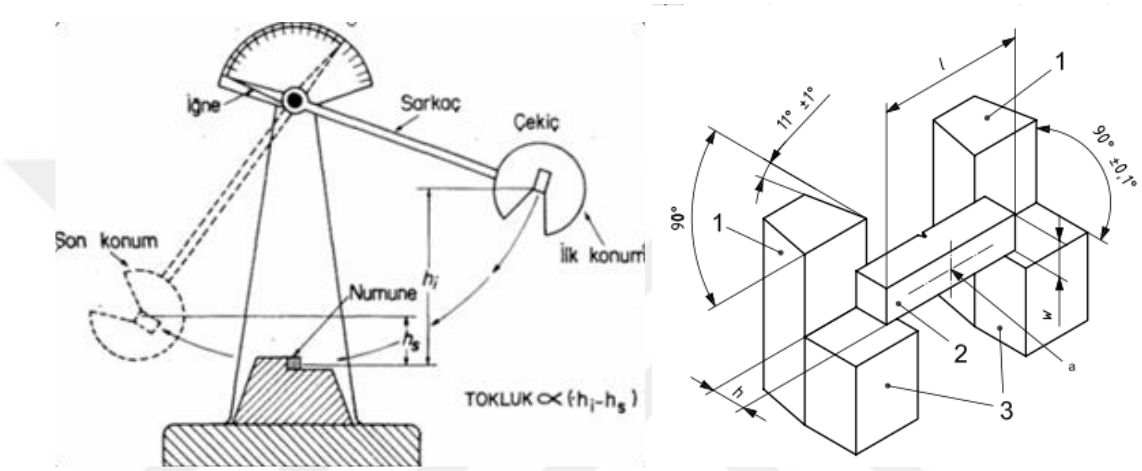


Şekil 3.18 Eğme Testi Mekanizması

Bu test, bir kök (root) ve bir yüz (face) eğmeden ya da iki yan (side) eğmeden meydana gelir. Yüz (face) eğmede plakanın iç yüzeyi (iç kaynak), kök (root) eğmede ise plakanın dış yüzeyi (dış kaynak) mandrel ile temas halinde olur ve yan (side) eğmede ise kenarlardan bir konveks hale getirilir. Eğme testinde hata eğme bölgesindeki çatlağın görünüşüne bağlıdır. Çatlağın büyüklüğü ilgili standartlarda tanımlanmıştır.

3.3.3 Çentik Darbe Testi

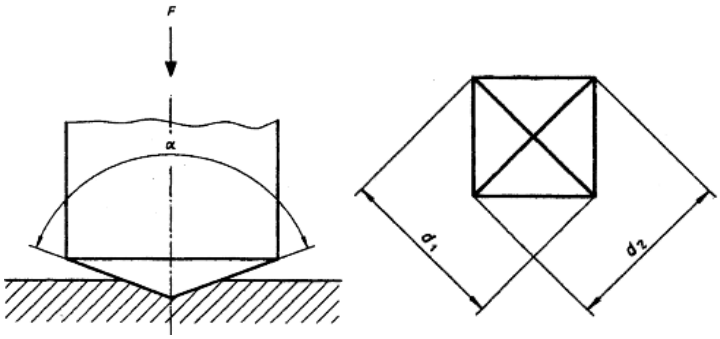
Çentik darbe testinde malzemenin absorbe ettiği enerji joule olarak tespit edilir. Çentik darbe test düzeneği Şekil 3.19'da gösterilmiştir (TS EN ISO 148-1). Belirli bir yükseklikten bırakılan belirli bir ağırlık ile numunenin kırılması esnasında sönümlediği enerji ile ağırlığın ikinci yüksekliği ile ilk yüksekliği arasında farktır. Genel olarak enerjinin korunumu kanunu ile hesaplanan bir test metodudur. Bu test ile malzemenin sünekliği hakkında bilgi sahibi olunur.



Şekil 3.19 Çentik darbe testi düzeneği

3.3.4 Sertlik Testi

Elmastan, kare tabanlı, karşılıklı yüzeyleri arasındaki açı belirtilmiş, dik piramit biçiminde bir basma ucunun tepe noktası deney parçasının yüzeyine bastırılır ve deney kuvvetinin (F) kaldırılmasından sonra ortaya çıkan izin köşegen uzunluğu ölçülür (Şekil 3.20).

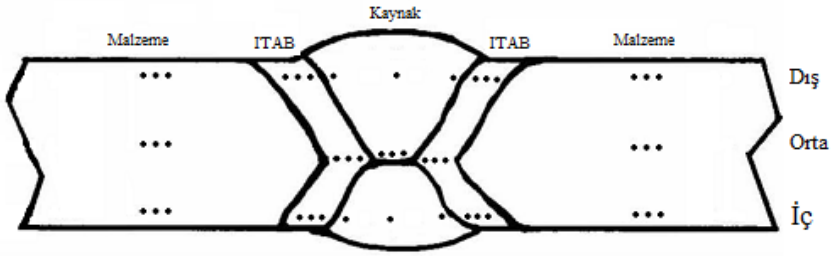


Şekil 3.20 Sertlik testinin prensibi

Numune kaynak dikişine enine yönde alınmalıdır. Numune soğuk kesme metodu ile kesilmeli ve en az 400 grid zımpara ile parlatılmalıdır. Parlatmanın ardından kaynak dikişini ve ısıdan etkilenen bölgeyi tam olarak belirleyebilmek için %2 nital çözeltisi ya da başka bir dağlayıcı ile numune yüzeyi dağlanmalıdır.

Kaynaklı malzemelerde numune genişliği maksimum kaynak genişliğinin en az 3 katı olmalıdır.

Hazırlıklar, ısınma veya soğuk şekillendirme nedeniyle malzeme yüzeyinde oluşabilecek sertlindeki değişiklikler en az olacak şekilde olmalıdır. İz derinliğinin az veya fazla olacağı durumlar göz önünde bulundurulduğunda, sağlıklı bir test sonucu için bu detay özellikle çok önemlidir.



Şekil 3.21 Alınan sertlik test numunesi ve sertlik değeri ölçüm noktaları

Boru üzerinden alınan sertlik test numuneleri kaynak dikişini ve ITAB bölgesini de kapsayacak şekilde kaynağa dik olarak alınmalıdır. Hem iç hem dıştan yapılan kaynaklarda her iki kaynak bölgesinden ayrı ayrı ölçümler alınmalıdır (Şekil 3.21). Sertlik testinde uygulanan kuvvetler Çizelge 3.8'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.8 Sertlik testi test kuvvetleri

Sertlik deneyi [a]		Düşük-kuvvet sertlik deneyi		Mikrosertlik deneyi	
Sertlik sembolü	Deney kuvveti anma değeri *F* N	Sertlik sembolü	Deney kuvveti anma değeri *F* N	Sertlik sembolü	Deney kuvveti anma değeri *F* N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807
a 980,7 N'den büyük anma deney kuvvetleri uygulanabilir.					

3.3.5 Kimyasal Analiz Testi

Optik emisyon spektrometre yöntemi ile malzeme içerisinde bulunan elementlerin kütlece yüzdeleri belirlenir. Malzeme içerisinde bulunan elementlerin yüzdelerine göre elementin çelik kalitesi ve sünekliği, gevrekliği hakkında ilgi sahibi olunur.

Karbon eşdeğeri (CE_{pcm} ve CE_{IIW}); malzemelerin kaynaklanabilirliği hakkında bilgi verir (Çizelge 3.9).

- Karbon (%C) bileşimi ≤ 0.12 ise karbon eşdeğeri Ito-Bessyo formülüne göre hesaplanır ve CE_{pcm} sembolüyle gösterilir.

$$CE(Pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

- Karbon (%C) bileşimi > 0.12 ise karbon eşdeğeri Uluslararası Kaynak Enstitüsüne (IIW) ait formül ile hesaplanır ve CEIIW sembolüyle gösterilir (Ertürk ve ark. 2017).

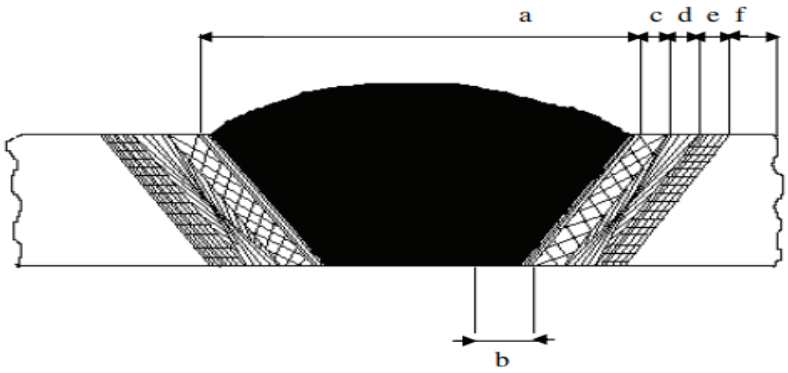
$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

Çizelge 3.9 Karbon Eşdeğerine Göre Ön Tavlama Sıcaklığı

%Karbon Eşdeğeri (Ceş)	Ön tavlama sıcaklığı (^{0}C)
0,45'e kadar	Gerek Yok
0,45 – 0,60 arası	100 - 200
0,60'dan yukarı	200 - 300

3.3.6 Makrografik Muayene

Kaynak işlemi sonrası oluşan yapının incelenmesi sonucu yapılan muayene işlemidir. Makrografik muayene ile oluşan makro yapının ve tane bölgeleri görüntülenmektedir. a-b; kaynak metali, c; iri taneli geçiş bölgesi, d; ince taneli bölgesi, e; kısmen dönüşen bölge, f; ana metal olarak Şekil 3.22'de gösterilmiştir (Bulut 2008).



Şekil 3.22 Bir kaynak bağlantısının çeşitli kısımları

Kaynaklı birleştirme sonucu oluşan yapının makrografik muayenesi, düzgün bir kaynak yapısı ve tam nüfuziyet sağlanması amaçlanmaktadır. Makrografik muayene incelemesinde çatlaklar kabul edilmez. Östenitik çeliklerdeki kaynaklı birleştirmelerde sıcak çatlaklar, az ve seyrek olması şartı ile kabul edilebilir (Türk Loydu 2015).

3.3.6.1 Kaynak Hataları

Kaynak yöntemlerine göre oluşabilen tipik kaynak hataları türleri Çizelge 3.10' da gösterilmiştir (Türker 2005).

Çizelge 3.10 Kaynak Yöntemine Bağlı Oluşan Kaynak Hataları

Kaynak Yöntemi	Porozite	Curuf İnkluzyonu	Yetersiz Ergime	Yetersiz Nüfuziyet	Yanma Oluğu	Katmer	Çatlak
Plazma Ark	X		X	X			X
Örtülü Elektrod	X	X	X	X	X	X	X
TIG	X		X	X			X
MIG/MAG	X	X	X	X	X	X	X
Özlü Tel	X	X	X	X	X	X	X
Toz Altı	X	X	X	X	X	X	X
Elektro Cüruf	X	X	X	X	X	X	X
Lazer	X		X				X
Elektron ışını	X		X	X			X
Oksi-gaz	X		X	X			X
Sürtünme			X				
Ultrasonik			X				
Punta			X				X
Dikiş			X				X

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Günümüzde basınçlı kap ve boru üretimleri gibi birçok sektörde gerçekleşen kaynaklı imalatta her geçen gün artan talepler ve yüksek basınca dayanıklı imalatlar için çalışmalar ve projelendirmeler yapılmaktadır.

Yüksek basınca dayanıklı imalatlar kaynaklanacak ürünlerin malzemeleri ve bu malzemelerin kalitesi ile doğrudan bağlantılıdır.

Yapılan bu çalışmada günümüzde sıkça kullanılan yapı çeliklerinden ileri zamanlarda çelik imalatçıların üretimlerine konu olacak ve şuanda gelişmekte olan yüksek mukavemetli çeliklerden olan API 5L X80 malzemenin kaynaklanabilirliği, kaynak işleminden önce ön ısıtma olması veya ön ısıtma olmaması durumu ve farklı kaynak yöntemleri ile yapılan kaynakların tahribatlı test sonuçlarını, bu test sonuçlarının karşılaştırılmalı sonuçlarının analizi çalışılmıştır.

Bu çalışmada, uygulanan kaynak yöntemleri şu şekildedir.

1. Elle Ark Kaynağı (SMAW)
2. Gaz Altı Ark Kaynağı (GMAW)
3. Toz Altı Ark Kaynağı (SAW)

4.1 Numune Hazırlığı

API 5L X80 malzeme; Ümran Çelik Boru San. A.Ş. firması tarafından Fransa'dan ithal edilmiştir. 80x160 cm boyutlarında iki adet plakadan 32 adet 40x20 cm numune elde edilmiştir. Numune ait işleme aşamaları ve hazırlanmış numune görüntüleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).



Şekil 4.1 API 5L X80 Malzeme görüntüsü



a) Numune Kesme



b) Numune Frezeleme (Çekme ve Bükme Testi)





c) Numune Kanal Açma (Çekme Testi)





d) Taşlama İşlemi (Çentik Darbe Testi)

Şekil 4.2 Numune işleme görüntüleri

4.2 Kaynak Sarf Malzemeler

Kaynak işlemleri esnasında kullanılan kaynak sarf malzemeler tanımlanmıştır.

4.2.1 Elle Ark Kaynağı

Elle ark kaynağı yönteminde sarf malzeme; AWS A5.5 standardında tanımlanan E9018-G H4 bazik kaynak elektrodu kullanılmıştır.

4.2.2 Gaz Altı Ark Kaynağı

Gaz altı ark kaynağı yönteminde sarf malzeme; AWS A5.29 standardında tanımlanan E91T1-GM-H4 1,2 mm çaplı rutil bazlı kaynak teli ve M21 kodlu %80 Ar + %20 CO_2 karışım gazı kullanılmıştır.

4.2.3 Toz Altı Ark Kaynağı

Toz altı ark kaynağı yönteminde kullanılan sarf malzeme; AWS A5.23 standardında tanımlanan EA4 S3Mo 4,0 mm çaplı kaynak teli ve AWS A5.23 standardında tanımlanan F9TA2-EA4-A4 S3Mo kaynak tozu kullanılmıştır.

4.3 Kaynak Parametreleri

Kaynak işlemi esnasında kullanılan kaynak parametreleri tanımlanmıştır.

4.3.1 Elle Ark Kaynağı

Elle ark kaynağı yönteminde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 Elle ark kaynağı kaynak parametreleri

Paso No	Yöntem	Sarf Malzeme		Akım		Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)
		Sınıfı	Elektrod Çapı	Kutup	Amper (A)		
1	SMAW	E 9018-G	3.25	DC(+)	80 ± 8,0	36 ± 2,5	10.0 ± 1,0
2	SMAW	E 9018-G	3.25	DC(+)	80 ± 8,0	36 ± 2,5	10.0 ± 1,0
3	SMAW	E 9018-G	4.00	DC(+)	100 ± 10,0	34 ± 2,4	9.0 ± 0,9
4	SMAW	E 9018-G	4.00	DC(+)	150 ± 15,0	26 ± 1,8	9.0 ± 0,9
5	SMAW	E 9018-G	4.00	DC(+)	150 ± 15,0	26 ± 1,8	9.8 ± 1,0
6	SMAW	E 9018-G	4.00	DC(+)	150 ± 15,0	26 ± 1,8	12.0 ± 1,2
7	SMAW	E 9018-G	3.25	DC(+)	150 ± 15,0	26 ± 1,8	12.5 ± 1,2

4.3.2 Gaz Altı Ark Kaynağı

Gaz altı ark kaynağı yönteminde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 4.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2 Gaz altı ark kaynağı kaynak parametreleri

Paso No	Yöntem	Sarf Malzeme		Akım		Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)
		Sınıfı	Elektrod Çapı	Kutup	Amper (A)		
1	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
2	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
3	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
4	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
5	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
6	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
7	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
8	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
9	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
10	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
11	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5
12	GMAW	E91T1-K2M	1,2	DC(+)	200 ± 20,0	24 ± 1,7	25,2 ± 2,5

4.3.3 Toz Altı Ark Kaynağı

Toz altı ark kaynağı yönteminde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 4.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Toz altı ark kaynağı kaynak parametreleri

Paso No	Yöntem	Sarf Malzeme		Akım		Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)
		Sınıfı	Elektrod Çapı	Kutup	Amper (A)		
1	SAW	S3Mo	4,0	DC(+)	950 ± 95	31 ± 3,1	121 ± 12,1
2	SAW	S3Mo	4,0	AC	720 ± 72	31 ± 3,1	121 ± 12,1
3	SAW	S3Mo	4,0	DC(+)	950 ± 95	31 ± 3,1	121 ± 12,1
4	SAW	S3Mo	4,0	AC	700 ± 70	31 ± 3,1	121 ± 12,1

4.4 Elle Ark Kaynağı (SMAW) Test Sonuçları

Elle ark kaynağı ile API 5L X80 çelik kalitesindeki malzemenin kaynaklandığı parçalar üzerinde (Şekil 4.3) yapılan test sonuçları analiz edilmiştir.



Şekil 4.3 SMAW görüntüsü

4.4.1 Malzeme Çekme Testi

Malzemeye uygulanan ön ısıtma ve ön ısıtma yapılmadan, TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerde, malzeme çekme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir.

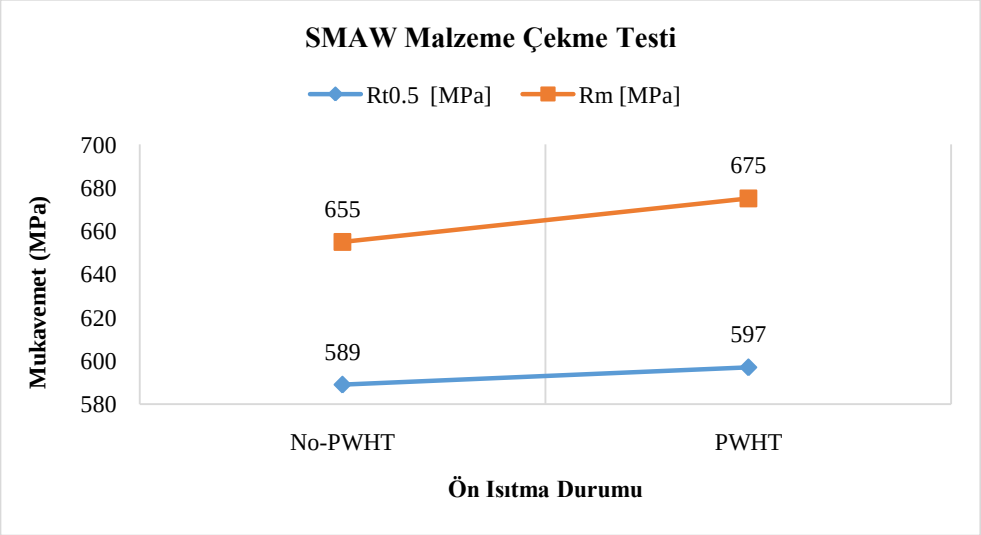


Şekil 4.4 Çekme testi sonrası numune görüntüsü

Ön ısıtmanın malzeme çekme testinde akma ve çekme mukavemeti üzerinde bir miktar artış sağladığı görülmektedir (Çizelge 4.4 ve Şekil 4.5).

Çizelge 4.4 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (SMAW)

Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ [MPa]	R_m [MPa]	%A	$R_{t0.5}/ R_m$
Yok	589	655	25	0,90
Var	597	675	29	0,88



Şekil 4.5 API 5L X80 Malzeme Çekme Test Analizi (SMAW)

4.4.2 Kaynaklı Çekme Testi

Elle ark kaynağı (SMAW) ile API 5L X80 malzeme üzerinde TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen (Şekil 4.6) kaynaklı çekme test sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir.

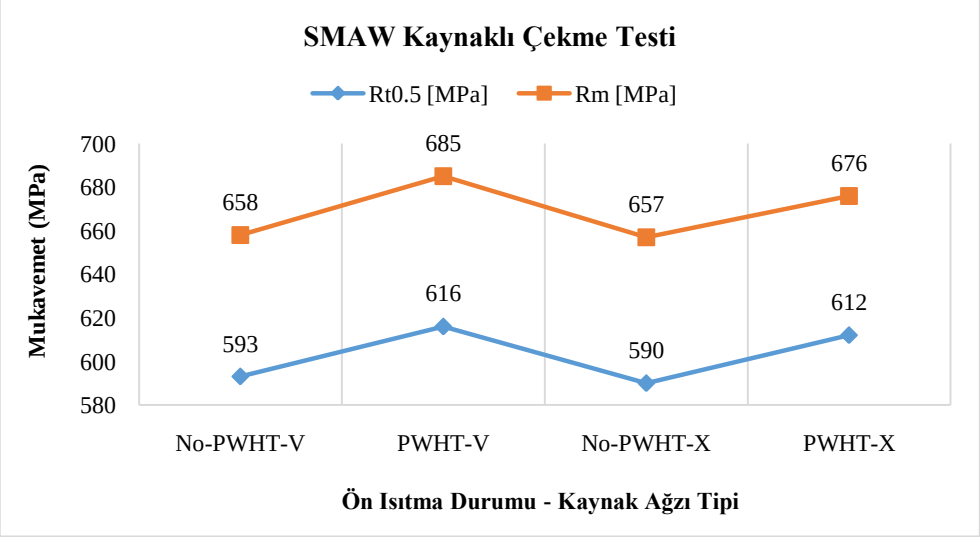


Şekil 4.6 SMAW Kaynaklı çekme test numuneleri

Çizelge 4.5 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ (MPa)		R_m (MPa)		Kopma Yeri
		Sonuç	Ortalama	Sonuç	Ortalama	
V	Yok	592	593	653	658	ITAB
		594		663		ITAB
	Var	618	616	680	685	Malzeme
		613		689		Malzeme
X	Yok	595	590	660	657	Kaynak
		585		653		Kaynak
	Var	607	612	667	676	Malzeme
		617		685		Malzeme

Ön ısıtmanın kaynaklı çekme testinde akma ve çekme mukavemeti üzerinde belirgin bir artış olduğu görünmüştür. Bunun nedeni; meydana gelen temperleme etkisine bağlı olarak kaynaklı numunelerdeki gerilmelerin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.7 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi

4.4.3 Kaynaklı Bükme Testi

Elle ark kaynağı (SMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 5173 standardına göre gerçekleştirilen kaynaklı bükme testinin test sonuçları Çizelge 4.6' de verilmiştir. Bükme testi test sonuçları uygun olmasının anlamı, kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmadığını göstermektedir. Ön ısıtmanın ve farklı kaynak ağızlarının bükme test sonuçlarını değiştirmediği görülmektedir.

Çizelge 4.6 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı bükme test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	İç Kaynak Bükme	Dış Kaynak Bükme
V	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
X	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun

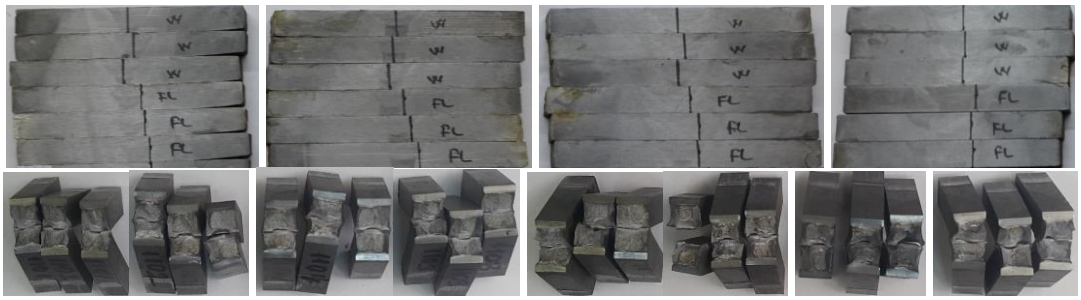
4.4.4 Çentik Darbe Testi

Elle ark kaynağı (SMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 148-1 standardına göre gerçekleştirilen -20°C'de çentik darbe testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.7' de verilmiştir.

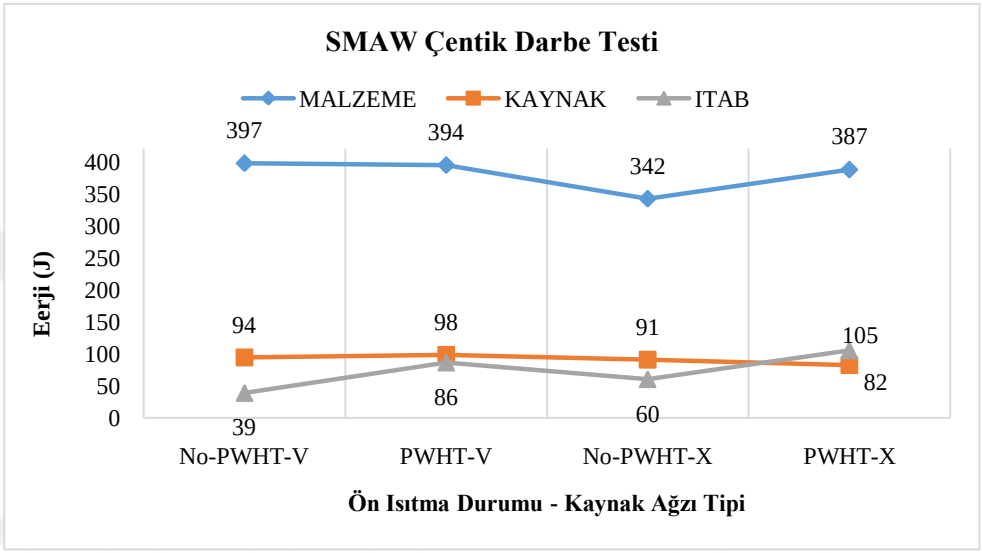
Çizelge 4.7 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	Bölge	1. Sonuç (J)	2. Sonuç (J)	3. Sonuç (J)	Ortalama (J)
V	Yok	Malzeme	381	405	405	397
		Kaynak	99	93	90	94
		ITAB	54	39	24	39
	Var	Malzeme	408	411	363	394
		Kaynak	114	117	63	98
		ITAB	66	93	99	86
X	Yok	Malzeme	360	336	330	342
		Kaynak	92	90	90	91
		ITAB	57	51	72	60
	Var	Malzeme	393	369	400	387
		Kaynak	73	87	87	82
		ITAB	90	126	99	105

Ön ısıtmanın, çentik darbe testinde kaynak ve ITAB bölgelerinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmektedir. V kaynak ağzı açılmış kaynaklı numunelerin çentik darbe test sonuçları, X kaynak ağzı açılmış numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



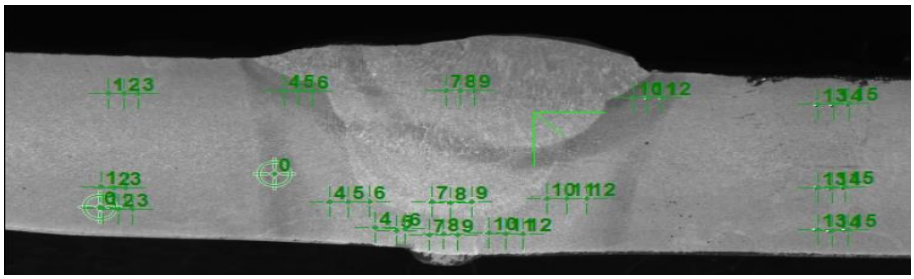
Şekil 4.8 SMAW Çentik darbe test numuneleri



Şekil 4.9 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi

4.4.5 Sertlik Testi

Elle ark kaynağı (SMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN 6507-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerden Şekil 4.10'da verilen sertlik noktalarında, sertlik testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.8' de verilmiştir.



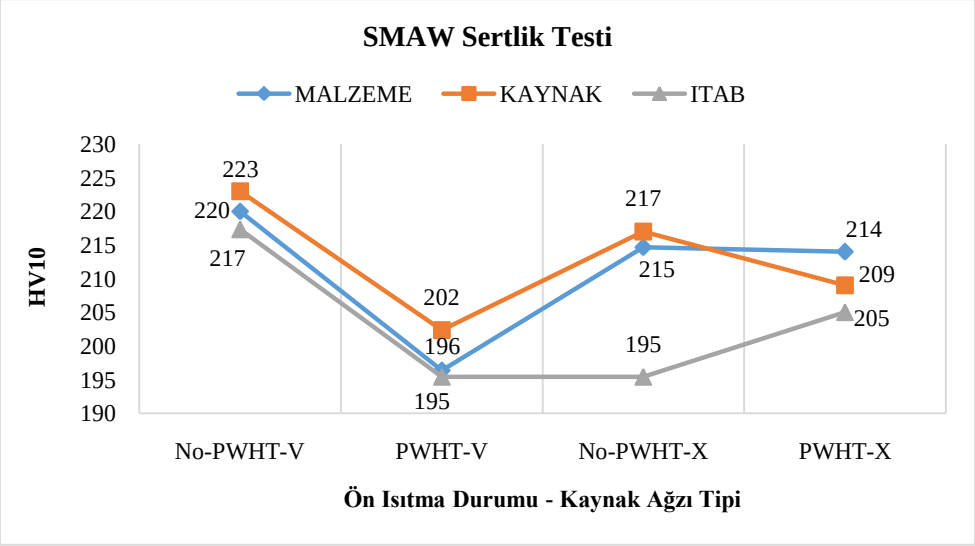
Şekil 4.10 Sertlik test noktaları (SMAW)

Ön ısıtmanın sertlik testinde kaynak, ITAB ve malzeme bölgelerinde belirgin bir azalma olduğu görünmüştür. Bu durumun temperleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.8 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları

Test Noktaları	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Yöntem	Ön Isıtma Yok-V			Ön Isıtma Var -V			Ön Isıtma Yok -X			Ön Isıtma Var -X		
Malzeme	236	218	218	201	203	191	221	206	206	209	219	222
ITAB	242	215	206	185	206	189	206	203	198	187	205	193
ITAB	228	213	205	191	213	189	213	187	201	205	216	210
ITAB	233	206	206	198	206	194	218	216	201	206	221	216
Kaynak	242	209	218	206	203	198	192	243	216	219	206	202
Kaynak	227	213	215	206	206	205	210	205	209	207	221	221
Kaynak	230	213	218	202	205	203	215	205	206	212	236	224
ITAB	235	215	210	193	205	189	224	180	201	202	219	219
ITAB	233	216	206	193	205	188	222	205	199	209	225	215
ITAB	221	216	206	191	201	181	221	199	196	216	218	207
Malzeme	219	210	219	196	201	186	221	215	219	209	206	219

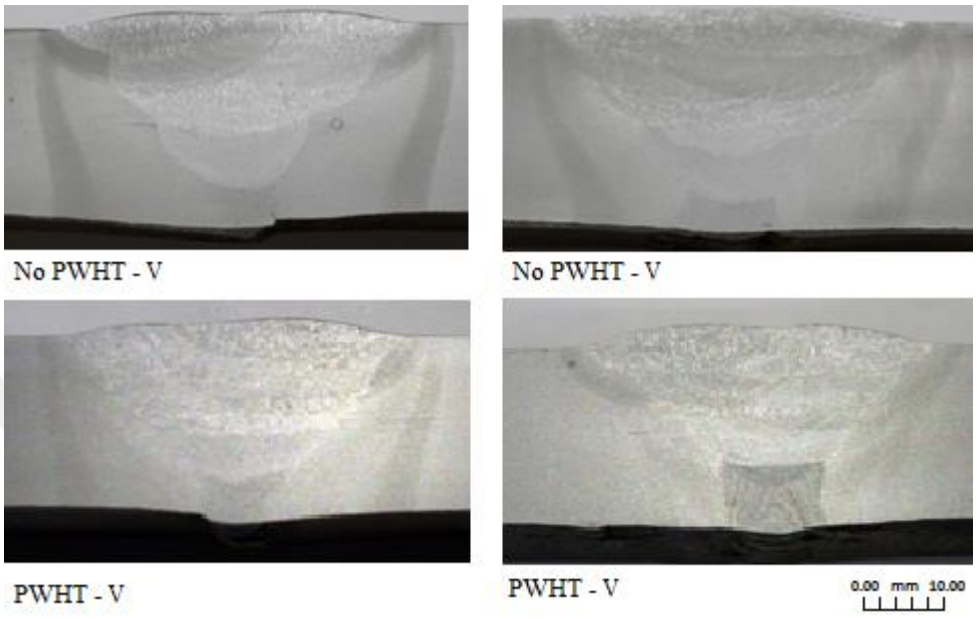
Ön ısıtmanın sertlik testinde kaynak, ITAB ve malzeme bölgelerinde belirgin bir azalma olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.11).



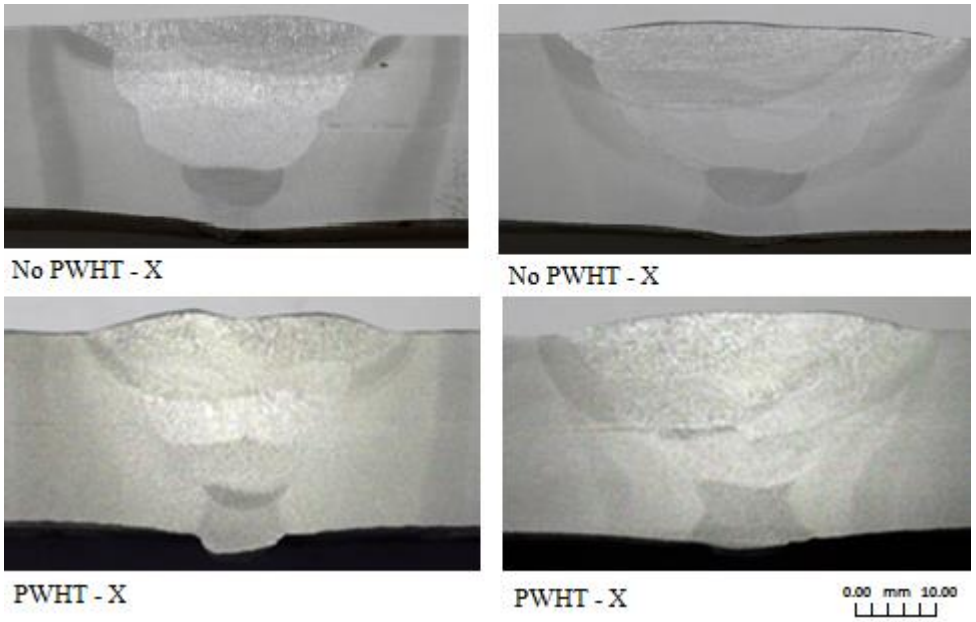
Şekil 4.11 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi

4.4.6 Makrografik Muayene

Elle ark kaynağı (SMAW) ile API 5L X80 malzemede TS EN ISO 17639 standardına göre gerçekleştirilen testlerden makrografik muayene görüntüleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.12 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –V



Şekil 4.13 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X

4.5 Gaz Altı Ark Kaynağı (GMAW) Test Sonuçları

Gaz altı ark kaynağı ile API 5L X80 çelik kalitesindeki malzemenin kaynaklandığı parçalar üzerinde (Şekil 4.14) yapılan test sonuçları analiz edilmiştir.



Şekil 4.14 Gerçekleşen GMAW görüntüsü

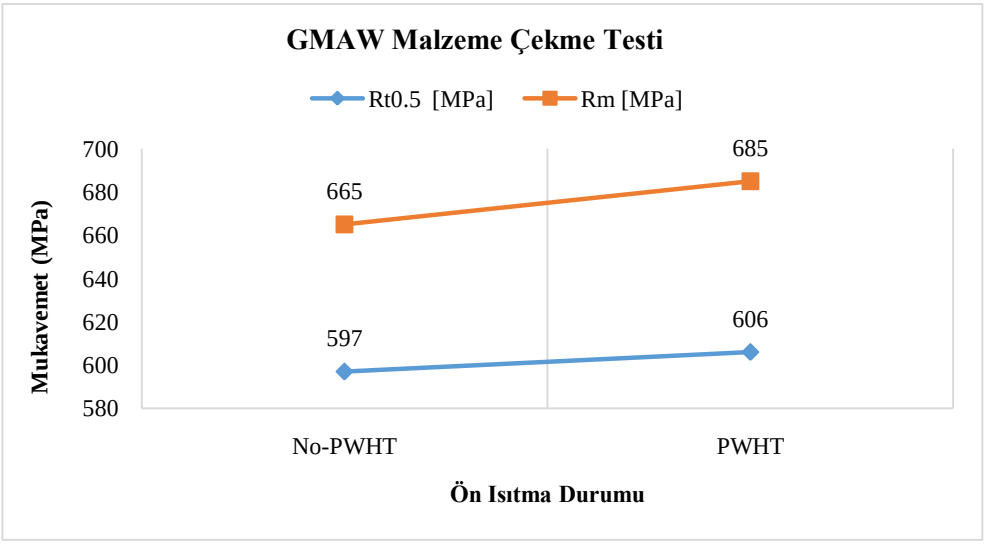
4.5.1 Malzeme Çekme Testi

Malzemeye uygulanan ön ısıtma ve ön ısıtma yapılmadan, TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerde, malzeme çekme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.9 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (GMAW)

Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ [MPa]	R_m [MPa]	%A	$R_{t0.5}/ R_m$
Yok	597	665	29	0,90
Var	606	685	26	0,88

Ön ısıtmanın; malzeme çekme testinde akma ve çekme mukavemeti üzerinde bir miktar artış sağladığı görülmektedir (Çizelge 4.9 ve Şekil 4.15).



Şekil 4.15 API 5L X80 malzeme çekme test analizi (GMAW)

4.5.2 Kaynaklı Çekme Testi

Gaz altı ark kaynağı (GMAW) ile API 5L X80 malzeme üzerinde TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen kaynaklı çekme test sonuçları Çizelge 4.10' da verilmiştir (Şekil 4.16).

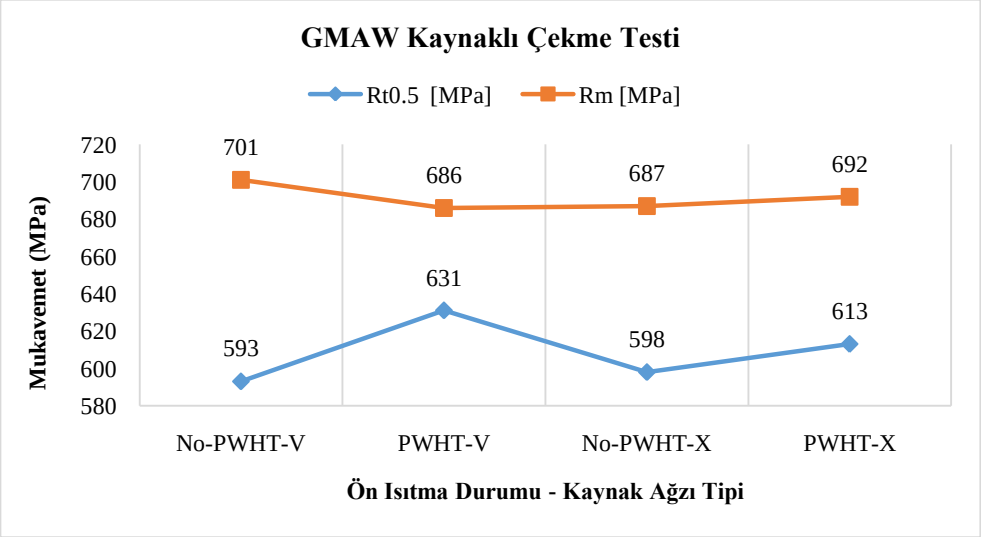
Çizelge 4.10 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ (MPa)		R_m (MPa)		Kopma Yeri
		Sonuç	Ortalama	Sonuç	Ortalama	
V	Yok	594	593	690	701	Malzeme
		591		711		Malzeme
	Var	636	631	686	686	Malzeme
		625		685		Malzeme
X	Yok	594	598	692	687	Malzeme
		601		681		Malzeme
	Var	613	613	694	692	Malzeme
		612		689		Malzeme

Ön ısıtmanın; kaynaklı çekme testinde akma ve çekme mukavemeti üzerinde belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumun ön ısıtma etkisinde kaynak yapılan numunelerin ince taneli yapı oluşmasının etkili olduğu ve tane sınırlarının kopmaya karşı daha dirençli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.16 GMAW Kaynaklı çekme test numuneleri



Şekil 4.17 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi

4.5.3 Kaynaklı Bükme Testi

Gaz altı ark kaynağı (GMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 5173 standardına göre gerçekleştirilen kaynaklı bükme testinin test sonuçları Çizelge 4.11' de verilmiştir. Uygun olan test sonuçları, bükme testi sonucunda kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmadığı anlamı taşımaktadır. Ön ısıtmanın bükme test sonuçlarını değiştirmediği görülmektedir.

Çizelge 4.11 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı bükme test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	İç Kaynak Bükme	Dış Kaynak Bükme
V	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
X	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun

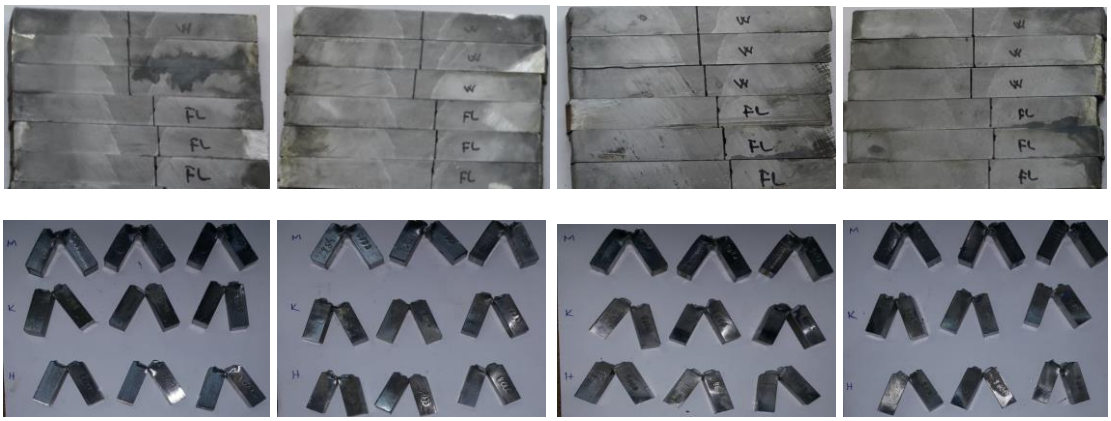
4.5.4 Çentik Darbe Testi

Gaz altı ark kaynağı (GMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 148-1 standardına göre gerçekleştirilen -20°C'de çentik darbe testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.12' de verilmiştir.

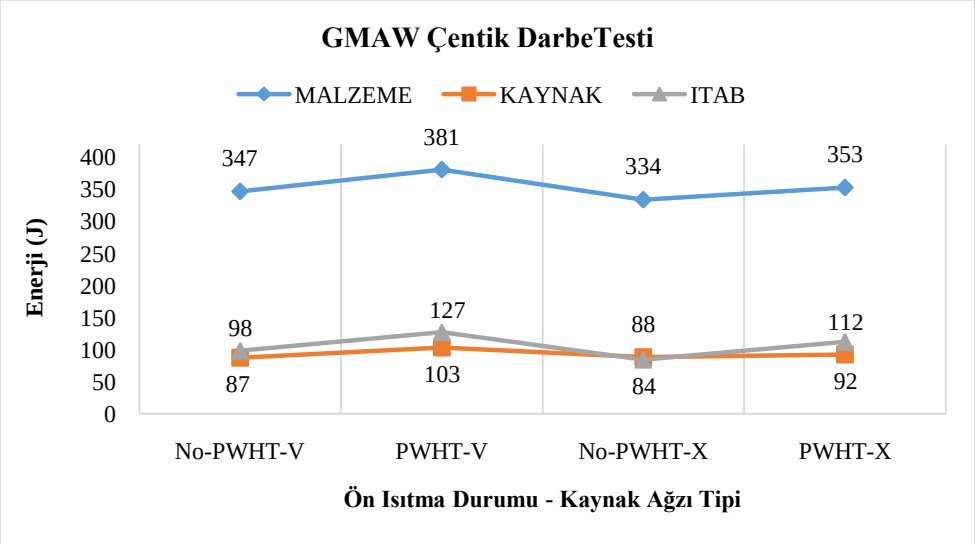
Çizelge 4.12 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	Bölge	1. Sonuç (J)	2. Sonuç (J)	3. Sonuç (J)	Ortalama (J)
V	Yok	Malzeme	333	345	363	347
		Kaynak	87	84	90	87
		ITAB	117	96	81	98
	Var	Malzeme	377	390	375	381
		Kaynak	108	96	105	103
		ITAB	123	123	135	127
X	Yok	Malzeme	342	327	333	334
		Kaynak	87	93	84	88
		ITAB	81	87	84	84
	Var	Malzeme	357	345	357	353
		Kaynak	96	93	87	92
		ITAB	84	123	129	112

Ön ısıtmanın; çentik darbe testinde kaynak ve ITAB bölgelerinde belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu malzeme oda sıcaklığındaki bir sıcaklıkta problemsiz bir olarak kaynak edilebilir.



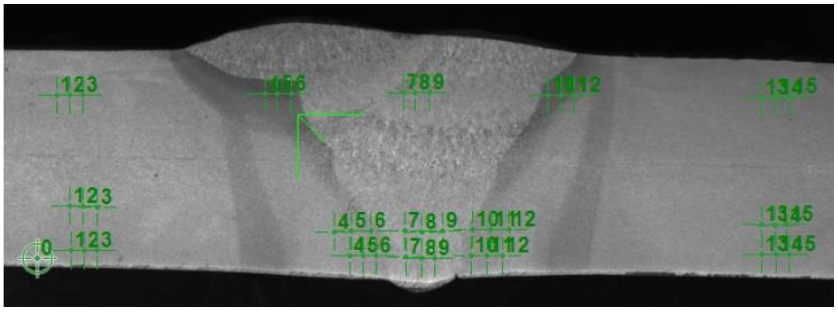
Şekil 4.18 GMAW Çentik darbe test numuneleri



Şekil 4.19 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi

4.5.5 Sertlik Testi

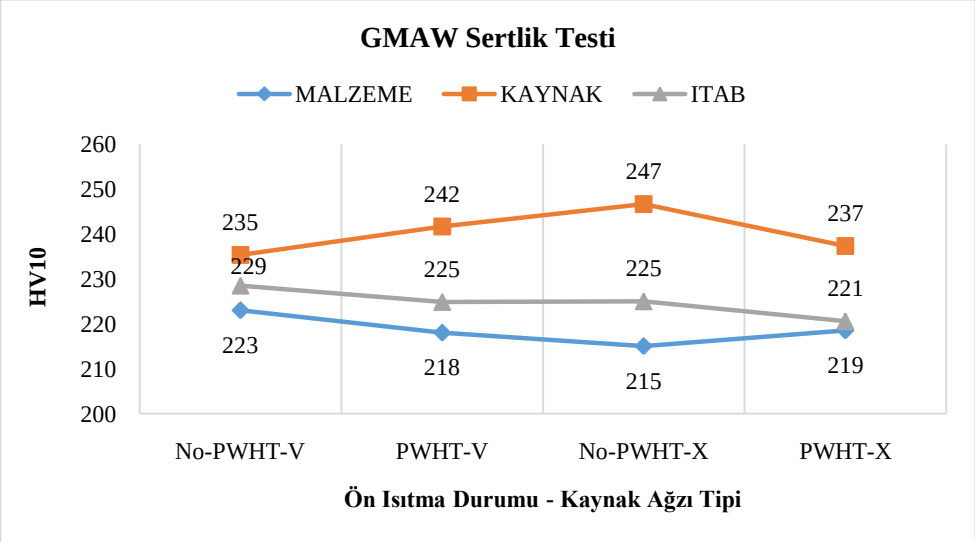
Gaz altı ark kaynağı (GMAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN 6507-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerden Şekil 4.20'de verilen sertlik noktalarında, sertlik testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.13'de verilmiştir. Ön ısıtmanın; sertlik testinde kaynak, ITAB ve malzeme bölgelerinde belirgin bir azalma olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni yapılan ısıl işleme bağlı olarak meydana gelen temperleme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.20 Sertlik test noktaları (GMAW)

Çizelge 4.13 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları

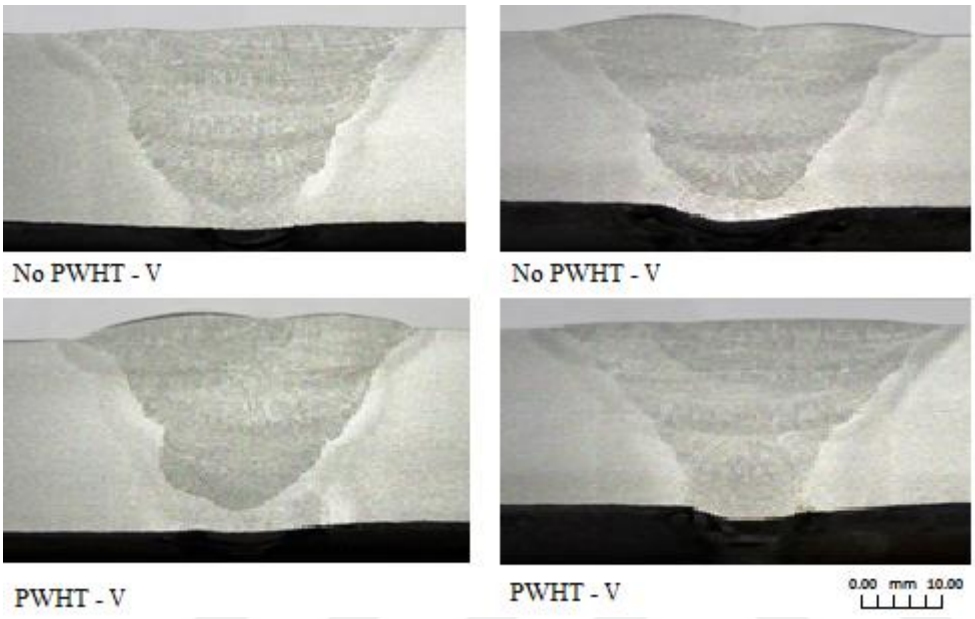
Test Noktaları	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Yöntem	Ön Isıtma Yok-V			Ön Isıtma Var -V			Ön Isıtma Yok -X			Ön Isıtma Var -X		
Malzeme	228	221	221	206	224	236	206	203	209	213	216	218
ITAB	240	221	221	228	212	221	227	206	243	210	218	212
ITAB	245	228	228	228	205	243	227	221	236	202	225	221
ITAB	245	215	224	253	254	245	254	251	233	251	201	228
Kaynak	249	236	221	254	245	226	254	243	243	256	240	216
Kaynak	247	236	227	251	245	254	254	240	236	260	242	251
Kaynak	242	233	225	228	245	243	256	242	243	264	227	212
ITAB	242	218	221	206	247	226	247	206	210	256	224	209
ITAB	236	230	225	201	233	221	228	206	218	237	206	206
ITAB	225	225	224	199	216	210	218	201	218	228	206	230
Malzeme	225	224	219	206	215	221	236	221	215	219	227	218



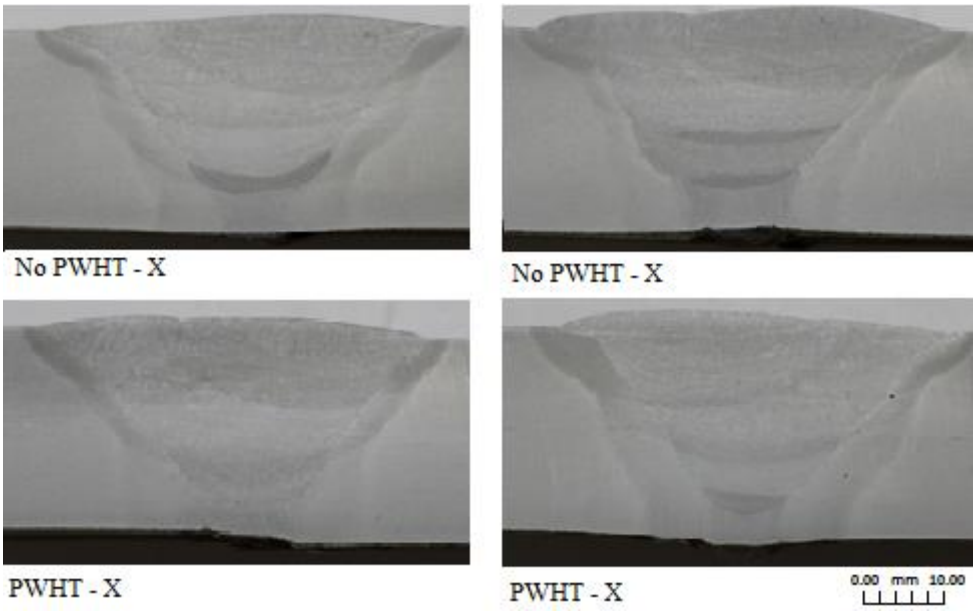
Şekil 4.21 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi

4.5.6 Makrografik Muayene

Gaz altı ark kaynağı (GMAW) ile yapılan API 5L X80 malzeme üzerinden TS EN ISO 17639 standardına göre gerçekleştirilen testlerden makrografik muayene görüntüleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.22 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri -V



Şekil 4.23 API 5L X80 GMAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X

4.6 Toz Altı Ark Kaynağı (SAW) Test Sonuçları

Toz altı ark kaynağı ile API 5L X80 çelik kalitesindeki malzemenin kaynaklandığı parçalar üzerinde (Şekil 4.24) yapılan test sonuçları analiz edilmiştir.



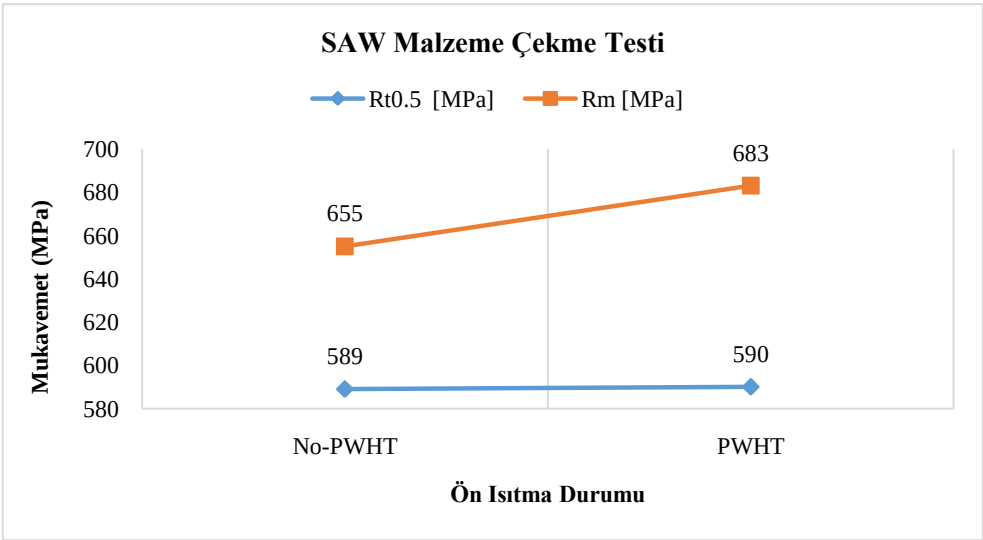
Şekil 4.24 Gerçekleşen SAW Görüntüsü

4.6.1 Malzeme Çekme Testi

Malzemeye uygulanan ön ısıtma ve ön ısıtma yapılmadan TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerde malzeme çekme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ön ısıtmanın malzeme çekme testinde akma ve çekme mukavemeti üzerinde bir miktar artış sağladığı görülmektedir (Çizelge 4.14 ve Şekil 4.25).

Çizelge 4.14 API 5L X80 malzeme çekme test sonuçları (SAW)

Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ [MPa]	R_m [MPa]	%A	$R_{t0.5}/ R_m$
Yok	589	655	29	0,90
Var	590	683	30	0,86



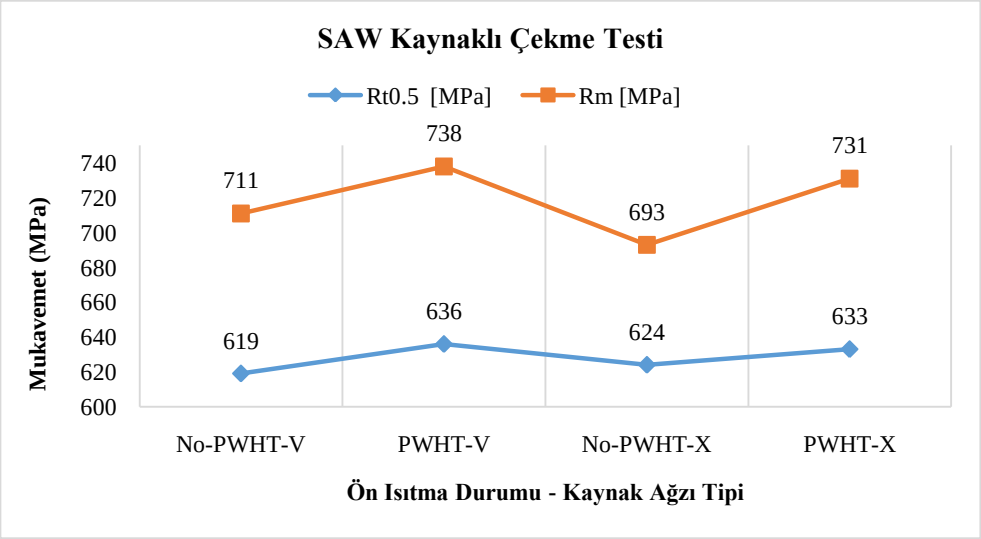
Şekil 4.25 API 5L X80 malzeme çekme test analizi (SAW)

4.6.2 Kaynaklı Çekme Testi

Toz altı ark kaynağı (SAW) ile API 5L X80 malzeme üzerinde TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilen kaynaklı çekme test sonuçları Çizelge 4.15' de verilmiştir (Şekil 4.26). Ön ısıtmanın kaynaklı çekme testinde akma ve çekme mukavemetinde belirgin artış olduğu görünmüştür. Çünkü açılan kaynak ağızları sayesinde nüfuziyet arttığı için çekme test mukavemeti de artmıştır.

Çizelge 4.15 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	$R_{t0.5}$ (MPa)		R_m (MPa)		Kopma Yeri
		Sonuç	Ortalama	Sonuç	Ortalama	
V	Yok	612	619	712	711	Malzeme
		625		709		Malzeme
	Var	637	636	738	738	Malzeme
		635		737		Malzeme
X	Yok	620	624	696	693	Malzeme
		628		690		Malzeme
	Var	631	633	728	731	Malzeme
		635		733		Malzeme



Şekil 4.26 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi kaynaklı çekme test analizi

4.6.3 Kaynaklı Bükme Testi

Toz altı ark kaynağı (SAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 5173 standardına göre gerçekleştirilen kaynaklı bükme testinin test sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir. Uygun olan test sonuçları, bükme testi sonucunda kaynak

bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmadığı anlamı taşımaktadır. Ön ısıtmanın kaynaklı bükme testinde değişmediği görülmüştür.

Çizelge 4.16 API 5L X80 SMAW kaynak yöntemi kaynaklı bükme test sonuçları

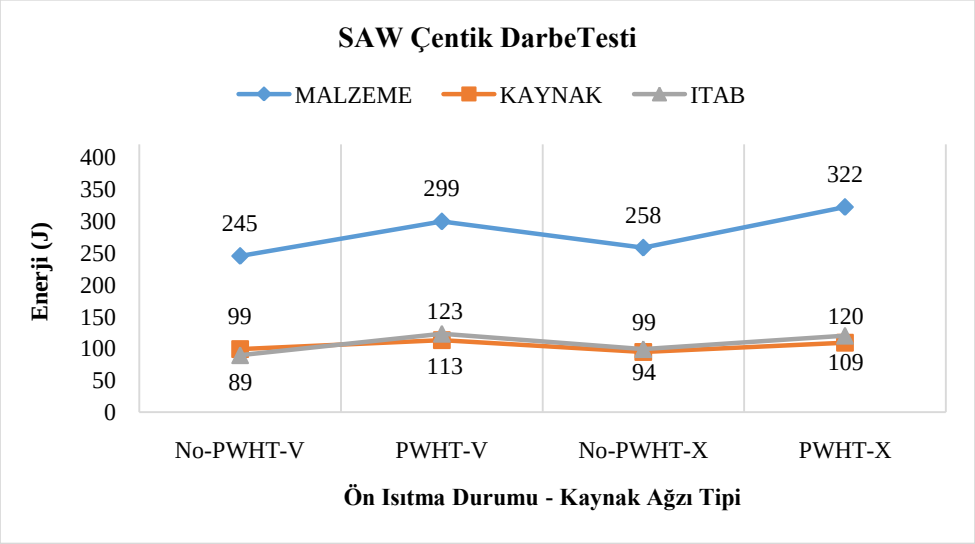
Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	İç Kaynak Bükme	Dış Kaynak Bükme
V	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
X	Yok	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun
	Var	Uygun	Uygun
		Uygun	Uygun

4.6.4 Çentik Darbe Testi

Toz altı ark kaynağı (SAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 148-1 standardına göre gerçekleştirilen -20ºC'de çentik darbe testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.17' de verilmiştir. Ön ısıtmanın çentik darbe testinde kaynak ve ITAB bölgelerinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi çentik darbe test sonuçları

Kaynak Ağzı	Ön Isıtma	Bölge	1. Sonuç (J)	2. Sonuç (J)	3. Sonuç (J)	Ortalama (J)
V	Yok	Malzeme	333	345	363	347
		Kaynak	87	84	90	87
		ITAB	117	96	81	98
	Var	Malzeme	377	390	375	381
		Kaynak	108	96	105	103
		ITAB	123	123	135	127
X	Yok	Malzeme	342	327	333	334
		Kaynak	87	93	84	88
		ITAB	81	87	84	84
	Var	Malzeme	357	345	357	353
		Kaynak	96	93	87	92
		ITAB	84	123	129	112



Şekil 4.27 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi çentik darbe test analizi

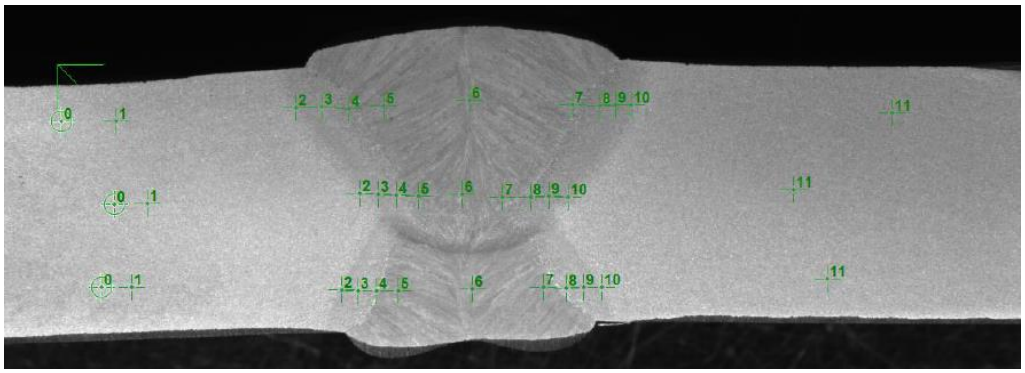
4.6.5 Sertlik Testi

Toz altı ark kaynağı (SAW) ile yapılan API 5L X80 malzemede TS EN ISO 6507-1 standardına göre gerçekleştirilen testlerden Şekil 4.28'de verilen sertlik noktalarında, sertlik testinin kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve malzeme bölgesindeki test sonuçları Çizelge 4.18' de verilmiştir.

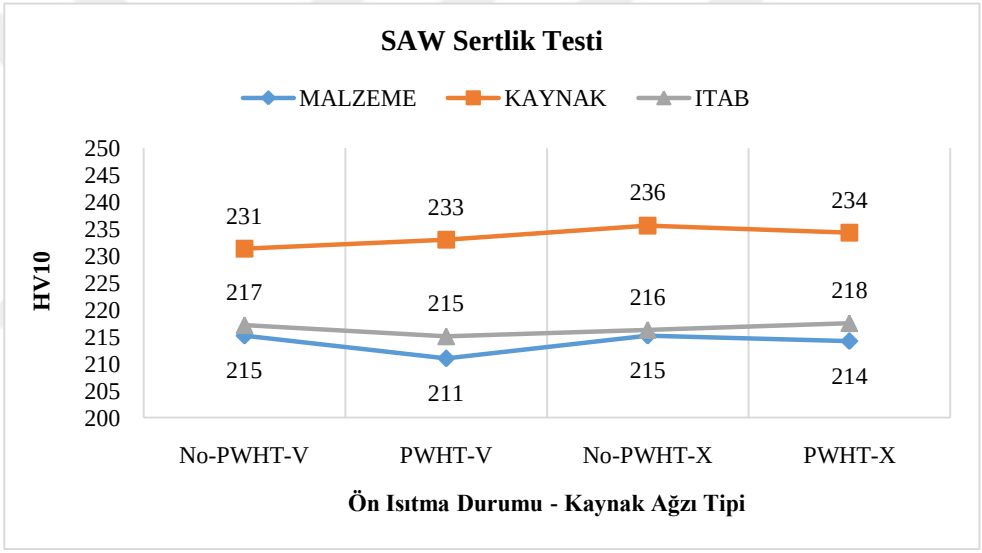
Çizelge 4.18 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi sertlik test sonuçları

Test Noktaları	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Yöntem	Ön Isıtma Yok-V			Ön Isıtma Var -V			Ön Isıtma Yok - X			Ön Isıtma Var -X		
Malzeme	212	218	216	215	212	207	215	210	216	212	215	210
ITAB	216	209	212	203	209	203	218	212	202	210	216	218
ITAB	221	216	215	209	212	221	216	218	210	216	215	219
ITAB	219	222	221	222	221	225	221	224	218	221	219	224
Kaynak	225	236	233	232	222	245	235	236	236	232	233	238
Kaynak	236	240	240	232	245	247	238	240	243	242	245	243
Kaynak	233	235	232	230	232	242	233	230	243	236	240	236
ITAB	224	228	222	221	224	222	219	221	224	222	224	219
ITAB	215	221	216	215	218	215	212	219	221	216	219	215
ITAB	205	215	212	209	210	212	215	216	207	215	212	215
Malzeme	216	219	210	215	207	210	218	213	219	216	219	213

Ön ısıtmanın sertlik testinde kaynak, ITAB ve malzeme bölgelerinde belirgin bir azalmaya neden olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.29).



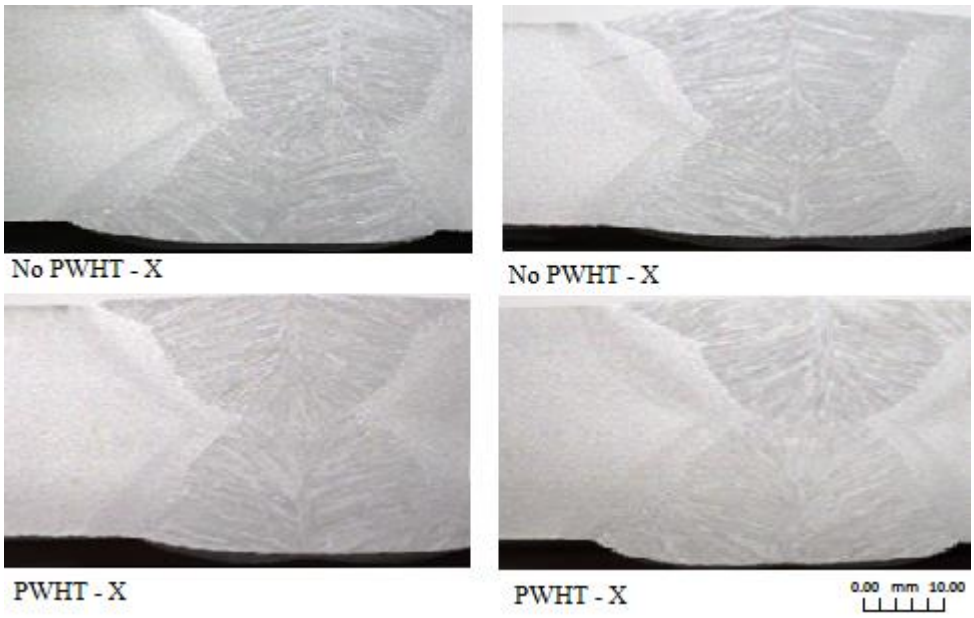
Şekil 4.28 Sertlik test noktaları (SAW)



Şekil 4.29 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi sertlik testi analizi

4.6.6 Makrografik Muayene

Toz altı ark kaynağı (SAW) ile API 5L X80 malzemede TS EN ISO 17639 standardına göre gerçekleştirilen testlerden makrografik muayene görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir.

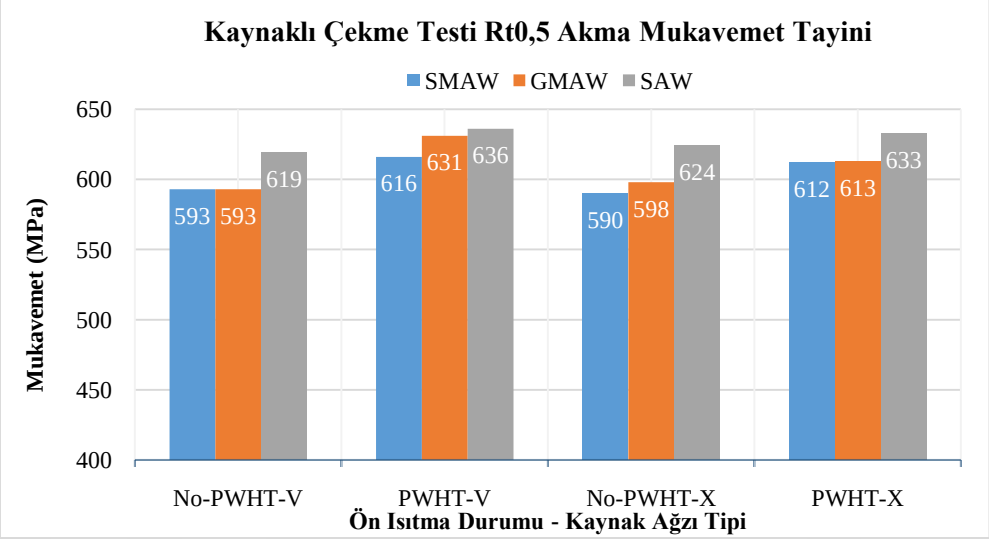


Şekil 4.30 API 5L X80 SAW kaynak yöntemi makrografik görüntüleri –X

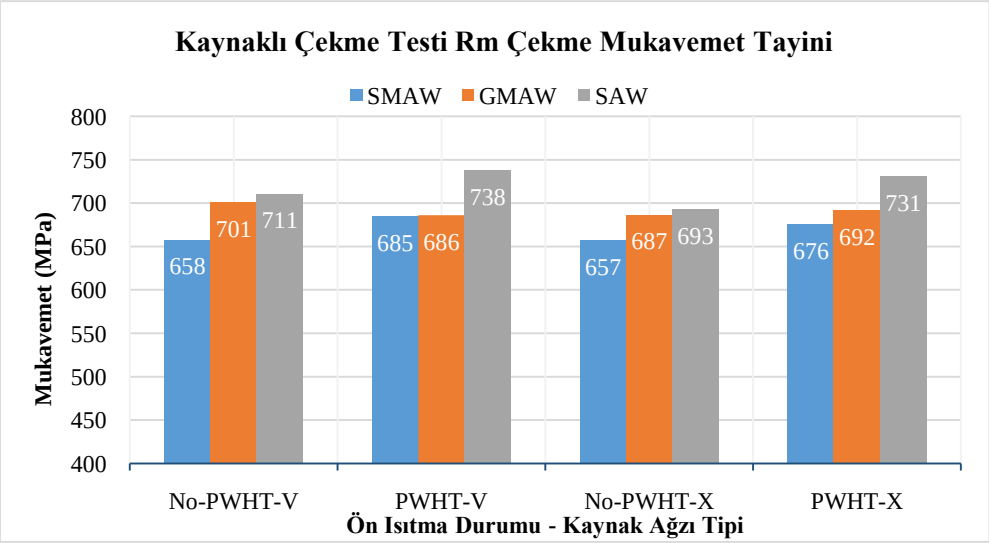
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1.1 Kaynaklı Çekme Testi Karşılaştırması

Tüm kaynak yöntemlerinde; ön ısıtma yapılması durumunda akma ve çekme mukavemetinde yükselme olduğu gözlemlenmiştir. SMAW ve GMAW yöntemlerinde ortalama aynı değerler elde edilirken, SAW yönteminde daha yüksek değerler elde edilmiştir. (Şekil 5.1, 5.2)



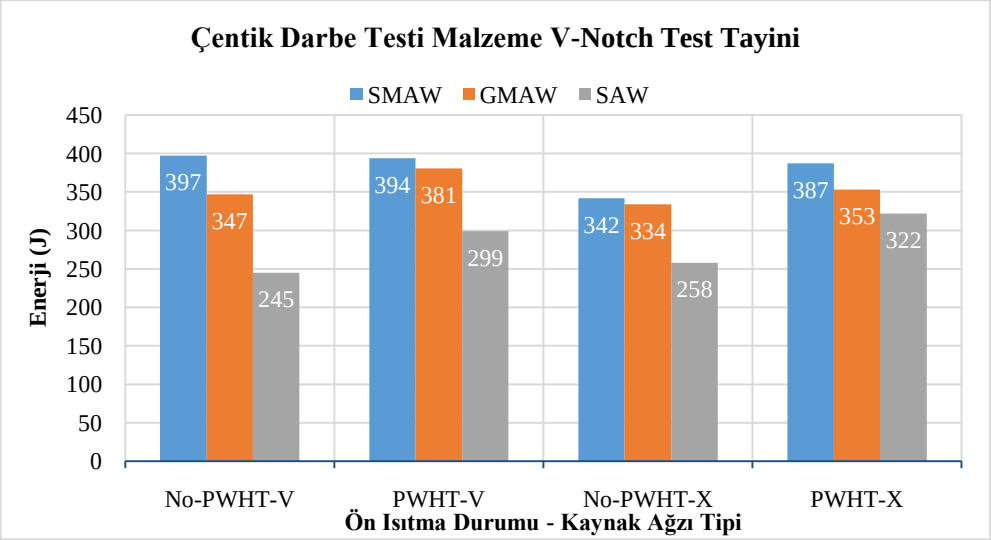
Şekil 5.1 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde akma mukavemeti analizi



Şekil 5.2 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde çekme mukavemeti analizi

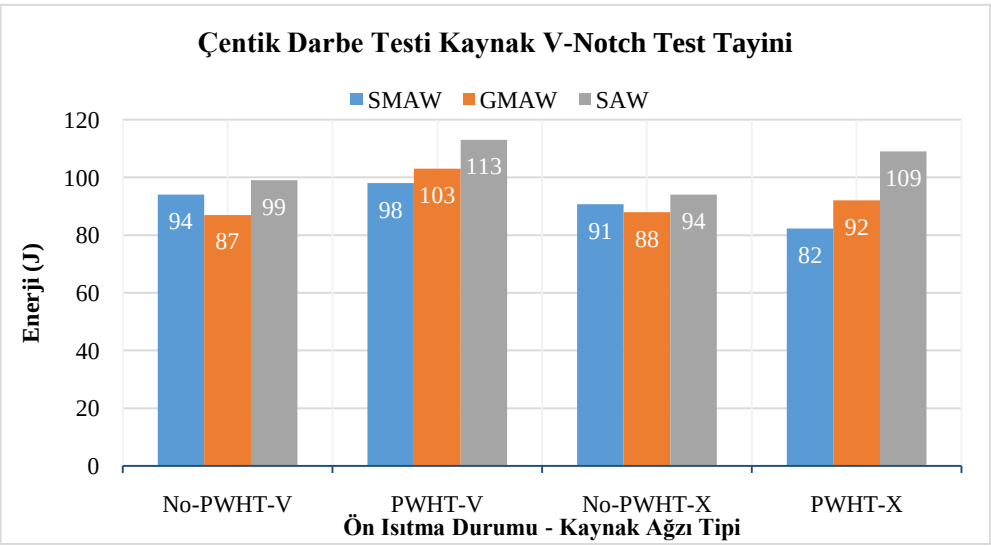
5.1.2 Çentik Darbe Testi Karşılaştırması

Tüm kaynak yöntemlerinde; ön ısıtma yapılması durumunda kaynak ve ısıdan etkilenmiş (ITAB) bölgelerinde çentik darbe değerlerinde yükselme gözlemlenmiştir.



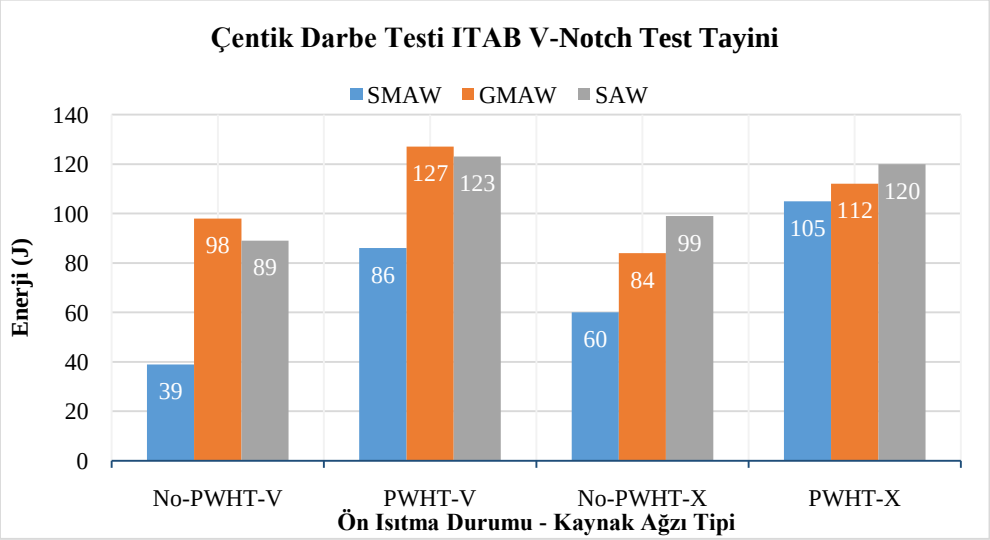
Şekil 5.3 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde malzeme-çentik darbe analizi

Ana malzeme bölgesinde; SMAW yöntemiyle birleştirilen numunelerin çentik darbe test sonuçları, diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.4 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde kaynak-çentik darbe analizi

Kaynak bölgesinde; SAW yöntemiyle birleştirilen numunelerin çentik darbe test sonuçları, diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

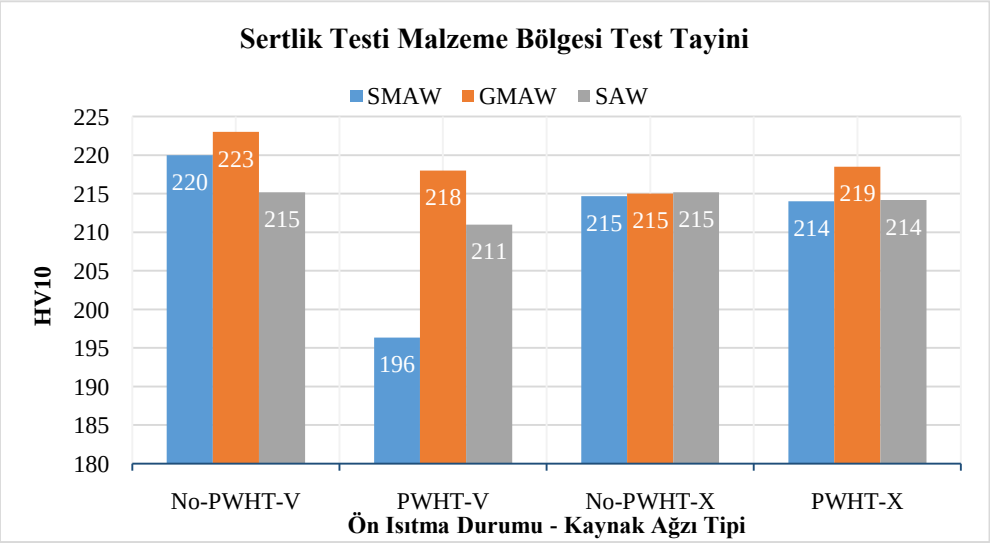


Şekil 5.5 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde ITAB -çentik darbe analizi

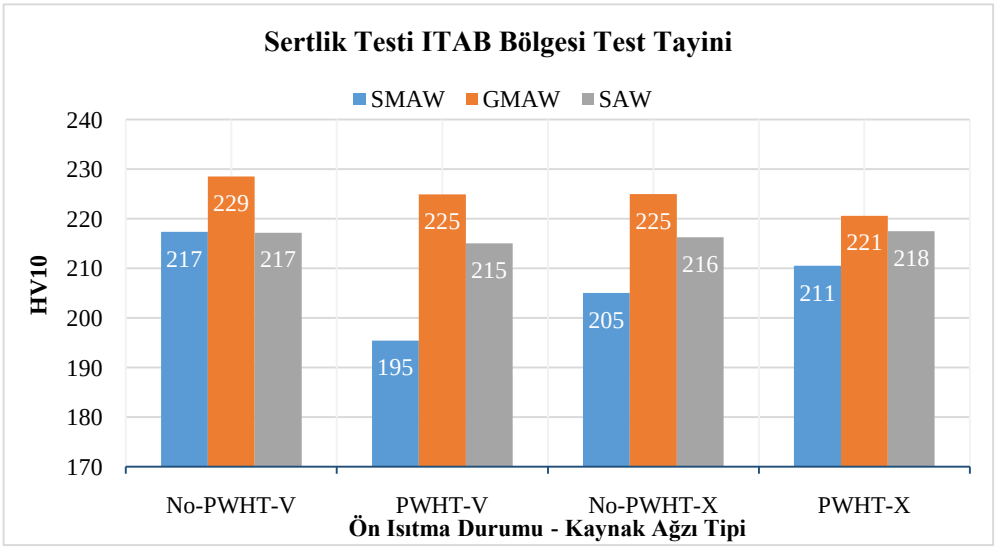
ITAB bölgesinde; SAW yöntemiyle birleştirilen numunelerin çentik darbe test sonuçları, diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

5.1.3 Sertlik Testi Karşılaştırması

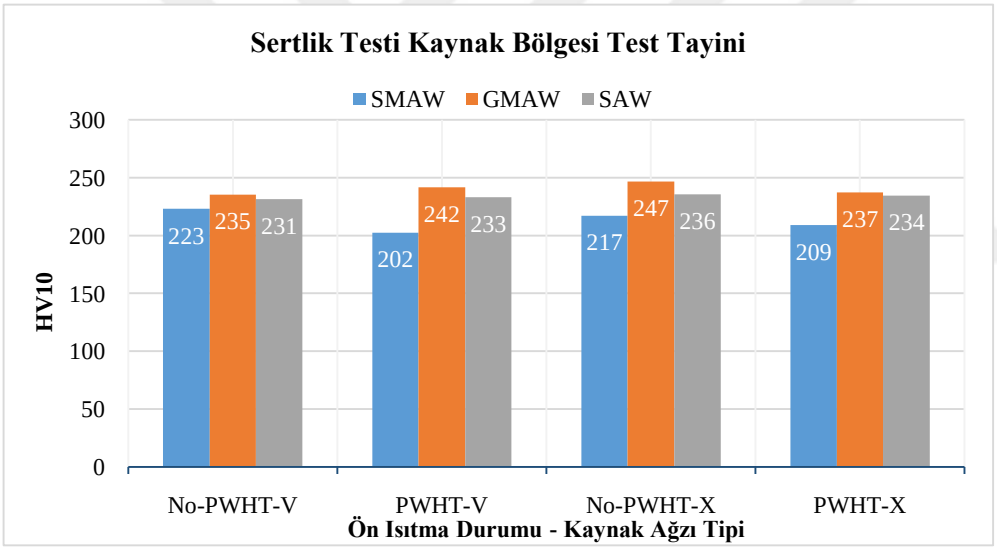
Tüm kaynak yöntemlerinde; ön ısıtma yapılması durumunda malzeme, kaynak ve ısıdan etkilenmiş (ITAB) bölgelerinde sertlik değerlerinde nispeten düşme gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin; malzemede herhangi bir intermetalik fazın oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde malzeme-sertlik analizi



Şekil 5.7 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde ITAB-sertlik analizi



Şekil 5.8 SMAW, GMAW, SAW yöntemlerinde kaynak-sertlik analizi

Ana malzeme bölgesinde; GMAW yöntemiyle birleştirilen numunelerin sertlik test sonuçları, diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun kaynak ve ITAB bölgelerinde aynı olduğu görülmektedir.

5.2 Sonuçlar

API 5L X80 yüksek mukavemetli düşük alaşımlı yapı çeliği; GMAW, SMAW ve SAW yöntemleriyle tam nüfuzuyet sağlanarak başarılı bir şekilde kaynak edilmiştir.

- Malzeme çekme testi; ön ısıtmanın; akma mukavemeti üzerinde yaklaşık olarak 10 MPa artışa ve çekme mukavemeti üzerinde ise 20 MPa artışa etki ettiği görülmüştür.
- Kaynak çekme testi;
  - SAW yönteminde, diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha yüksek akma ve çekme mukavemet sonuçları elde edilmiştir. Ön ısıtma yapılıp V kaynak ağzı açılan numunelerde, en yüksek akma mukavemeti 636 MPa ve çekme mukavemeti 738 MPa değerleri elde edilmiştir.
  - SMAW yönteminde, V kaynak ağzı açılan ön ısıtma yapılmayan numunelerde kopma ITAB bölgesinde, ön ısıtma yapılan numunelerde ise kopmanın malzemede gerçekleştiği belirlenmiştir. X kaynak ağzı açılan ön ısıtmanın yapılmadığı numunelerde kopmanın kaynak bölgesinde, ön ısıtma yapılan numunelerde ise kopma malzeme bölgesinde meydana gelmiştir.
  - GMAW yönteminde, hem V hem de X kaynak ağzı açılan, ön ısıtma yapılan ve yapılmayan numunelerin tümünde kopma, malzeme bölgesinde meydana gelmiştir.
- Kaynaklı bükme testi;
  - Uygulanan tüm kaynak yöntemlerinde kaynak ağzı şekli ve ön ısıtmanın, bükme test sonuçlarına herhangi bir etkisi gözlemlenmemiş, iç ve dış bükme alanlarında mikro çatlaklara rastlanmamıştır.
- Çentik darbe testi;
  - Ön ısıtma uygulanıp SAW yöntemiyle birleştirilen V kaynak ağızlı numunelerde en yüksek enerji değerleri elde edilmiş; kaynak bölgesinde 113 Joule, ITAB bölgesinde 123 Joule olarak tespit edilmiştir.
  - SMAW yönteminde çentik darbe testi enerji değerleri; hem ITAB hem de kaynak bölgesinden çentiklenen numunelerde belirgin olarak daha diğer kaynak yöntemlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

  - GMAW yönteminde X ve V kaynak yöntemleri için kaynak ve ITAB bölgesinde gerçekleştirilen çentik darbe testlerinde SAW yöntemine yakın değerler elde edilmiştir. En yüksek darbe enerjisi ITAB bölgesinde 127 Joule olarak tespit edilmiştir.

- Sertlik testi;
  - SAW yönteminde; en yüksek sertlik değeri, ITAB bölgesi için ön ısıtma yapılıp X kaynak ağzı açılan numunelerde 218 HV10 ve kaynak bölgesi için ön ısıtma yapılmayıp X kaynak ağzı açılan numunelerde 236 HV10 değeri elde edilmiştir.
  - SMAW yönteminde; kaynak, ITAB ve malzeme bölgelerinin sertlik analizinde, diğer kaynak yöntemlerine nazaran en düşük sertlik sonuçları elde edilmiştir. Ön ısıtma yapılıp V kaynak ağzı açılan numunelerde, ITAB bölgesinde en düşük sertlik 195 HV10, kaynak bölgesinde ise 202 HV10 değerleri elde edilmiştir.
  - GMAW yönteminde, diğer kaynak yöntemlerine göre en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Ön ısıtma yapılmayıp V kaynak ağzı açılan numunelerde 229 HV10 ve ön ısıtma yapılmayıp X kaynak ağzı açılan numunelerde 247 HV10 değerleri elde edilmiştir.
- Makrografik muayenede; farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numuneler incelendiğinde, kaynak bölgelerinde tam nüfuziyet sağlandığı, kaynak ağzı şekli ve ön ısıtma durumunun kaynağın kalitesine belirgin bir etkisi gözlemlenmediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; API 5L X80 yüksek mukavemetli düşük alaşımlı yapı çeliğinin birleştirme işleminde uygulanan en uygun kaynak yöntemi SAW (toz altı ark kaynak) olup, diğer yöntemlere göre kaynak kalitesini belirleyen mekanik test değerleri bu birleştirme yönteminde elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

ANIK Selahaddin, Tülbentçi Kutsal, Kaluç Erdinç. 1991. Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı. Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, Gedik Eğitim Vakfı.

ANTONİNO Tiago de Sousa, Guimarães Pablo Batista, Alécio Roberto de Araújo, Yadava Yogendra Prasad, Ferreira Ricardo Artur Sanguinetti. 2014. Measurements of the Thermophysical Properties of the API 5L X80. Brazil

API 5L Standart. 2018. Line Pipe. American Petroleum Institute, ABD

ASARKAYA Muharrem. 2006. Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi. Sakarya

ASM International. 2001. Metals Handbook. Ohio

ASTM E8/8M. 2016. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, ABD

AY İrfan. 2017. Kaynak Elektrotları. İmalat Yöntemleri I. Balıkesir Üniversitesi.

BENLİ Serkan. 2004. Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi. İzmir

BULUT Erkan Bahadır. 2008. Bakır (Cu) ve Çelik (St-37) Plakalarının TIG (Tungsten Inert Gas) Kaynağı Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği. İzmir

ERTÜRK İbrahim, Durukan Tuncay, Şentürk Berk. 2017. X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı. Ankara

ESAB. 2016. Welding Filler Metal Handbook. Swedish

EYRES D J. 2001. Ship Construction, 5th edition, Steel. University of Plymouth,

GSI (Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH). 2004. ODTÜ Kaynak Teknolojileri Merkezi Uluslararası Kaynak Mühendisliği Ders Notları. Ankara

IISI. International Iron & Steel Institute Committee on Automotive Applications. 2005. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines. Belgium

KÜKÜRTCÜ Gökhan Emre. 2014. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi. Sakarya

KÜLAHLI Emin. 1988. Toz Altı Kaynak Yöntemi. Kaynak Bilimi. Oerlikon, İstanbul

MANSOR N I I, S Abdullah, A K Ariffin J Syarif. 2014. A review of the fatigue failure mechanism of metallic materials under a corroded environment. Malaysia

MEGEP. 2005. Temel Kaynak 2. TC Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara

MEGEP. 2006. Metal Teknolojisi, Toz Altı Kaynağı. TC Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara

MEGEP. 2007. Metal Teknolojisi, Tahribatlı Muayene, TC Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara

NADZAM Jeff. 2000. Gas Metal Arc Welding Guidlines. Lincoln Elelctric

NAKATA Hiroshi, Kami Chikara, Matsuo Nobuyuki. 2013. API X80 Grade Electric Resistance Welded Pipe with Excellent Low Temperature Toughness. JFE Technical Report No18. Japan

OĞUZ Burhan. 1989. Malzeme Bilgisine Giriş. Oerlikon yayını.

ÖZAKIN Nuri. 2010. AH ve DH Kalite Gemi Saclarının Değişik Kaynak Yöntemleri ve Kaynak Pozisyonlarındaki Mekanik Özelliklerinin ve Mikro Yapılarının İrdelenmesi. Zonguldak

PELLERİN N, Zielinska S, Pelerin S, Valensi F, Musiol K, Izarra C, Briand F and Richard F 2005. Experimental investigations of the arc MIG-MAG welding. American Institute of Physics, ABD

TANG Jiankai, Liu Zheng, Shi Shouwen, Chen Xu. 2018. Evaluation of fracture toughness in different regions of weld joints using unloading compliance and normalization method. China

TAŞÇI Mürsel. 2008. Kaynaklı Çelik Yapıların Tasarımı ve Tasarımın Kaliteye Etkisi. Ankara

TS EN 10025-2, Türk Standardı. 2006. Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 2: Alaşımsız Yapı Çeliklerinin Genel Teknik Teslim Şartları. Ankara

TS EN 10020, Türk Standardı. 2003. Çelik tiplerinin tarifi ve sınıflandırılması. Ankara

TS EN ISO 148-1, Türk Standardı. 2017. Metalik malzemeler-Charpy vurma deneyi- Bölüm 1: Deney metodu. Ankara

TS EN ISO 17639, Türk Standardı. 2014. Metalik malzemelerdeki kaynaklarda tahribatlı muayene- Kaynakların makroskopik ve mikroskopik muayenesi. Ankara

TS EN ISO 5173, Türk Standardı. 2010. Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler- Eğme deneyleri. Ankara

TS EN ISO 6507-1, Türk Standardı. 2018. Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu. Ankara

TS EN ISO 6892-1, Türk Standardı. 2016. Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu. Ankara

TÜLBENTÇİ Kutsal. 1990. MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gaz altı Kaynağı. Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü. 1990

TÜRK LOYDU. 2015. Kısım 3 – Kaynak Kuralları. İstanbul

TÜRKER Adnan. 2005. Kaynak Hataları. Marmara Üniversitesi. İstanbul

ZHAO J, Hua W, Wang X, Kang J, Cao Y, Yuan G, Di H, Misra R D K. 2016. A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling. China

QIAO Gui-ying, Chen Xiao-wei, Zhang Zhi-en, Han Xiu-lin, Wang Xu, Liao Bo, and Xiao Fu-ren. 2017. Mechanical Properties of High-Nb X80 Steel Weld Pipes for the Second West-to-East Gas Transmission Pipeline Project. Advances in Materials Science and Engineering. China

QUIMBY BY B. J. ve Ulrich G. D. Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding. Department of Chemical Engineering, University of New Hampshire. Durham, Britain

WEMAN K Author. 2003. Welding Process Handbook. Woodhead. Cambridge

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler ve Eğitim



Adı Soyadı	Mesut BİÇEN Makine ve Kaynak Mühendisi
Doğum Tarihi	02.12.1989
Doğum Yeri	Silvan/Diyarbakır
Adres	Selahattin Eyyubi mah. 325. Sok. Bayar 1. Apt. K:7 N:13 Bağlar/Diyarbakır
Telefon	+90 (544) 529 72 31
Mail	mesutbicen@gmail.com

Eğitim

İlköğretim	1995-2000	Kazım Karabekir İlköğretim Okulu (Diyarbakır)
Lise	2003-2007	Nevzat Ayaz Anadolu Lisesi (Diyarbakır)
Lisans	2008-2012	Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2016-Devam	Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü

Stajlar

Atölye	2010	Türkiye Elektromekanik Sanayi Anonim Şirketi (Diyarbakır)
Organizasyon	2011	Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü ve Makine İkmal Başmühendisliği (Diyarbakır)

Projeler

Yıl İçi	2012	Tek Silindirli Dizel Motorunda; Farklı Yakıt Kullanımının Performans Değerlendirilmesi
Bitirme	2012	Soğutucu Akışkan (R134a) Kullanarak, Güneş Enerjili Rankine Çevrim İle Elektrik Enerjisi Eldesi

Ödüller

Lisans	2012	Lisans Bölüm Birincisi

Sertifikalar

ODTÜ	2014	Uluslararası Kaynak Mühendisliği Kursu
TSE	2013	Ultrasonik Muayene - Seviye 1
Sector Cert	2019	Radyografik Muayene - Seviye 2

Mesleki İlgi Alanları

Kaynak, Kaynaklanabilirlik, Tahribatlı ve Tahribatsız Testler, Basınçlı Kaplar

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Mesut BİÇEN
ÖĞRENCİ NO	16818007
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018 - 2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	Makina Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	Farklı Ark Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yüksek Mukavemetli API 5l X80 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma SınavıSonrası
SAYFA SAYISI	79
BENZERLİK ORANI	% 12
RAPORLAMA TARİHİ	21/08/2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam yetmiş dokuz sayfalık kısmına ilişkin, 21/08/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 12 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Mesut BİÇEN — 21/08/2019

Dr.Öğr. Üyesi Haluk KEJANLI **Tez Danışmanı**	Dr.Öğr.Üyesi Mesut HÜSEYİNOĞLU **Anabilim Dalı Başkanı V.** (21/08/2019)

Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.