




Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of API 5L X70M Steels Welded by Flux Cored Arc Welding Method as Orbital

 Cemil ÇETİNKAYA¹  Hakan ADA^{2,*}  Murat SEZGİN³ 
¹Gazi University, Faculty of Technology, Dept. of Metallurgical and Materials Eng., 06500, ANKARA

²Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Mechanical Eng., 37150, KASTAMONU

³Gazi University, Institute of Science, Dept. of Metallurgical Education, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 25/09/2020

Revision: 22/11/2020

Accepted: 22/11/2020

Highlights

- Welding
- Microstructure
- Mechanical properties

Keywords

Orbital

API 5L

Flux cored arc welding

In this study; a practice has been conducted to examine the performance of orbital flux cored arc welding (FCAW) method, which is a new method. Steel pipes of API 5L X70M quality produced for oil and natural gas pipelines were used in the experiments. Experiments were carried out under industrial field conditions in order to reach realistic results. The test samples were joined by orbital gas metal arc welding (GMAW) method using flux cored wire and the joining samples were examined in detail and the metallurgical and mechanical properties of the weld zone were analyzed.

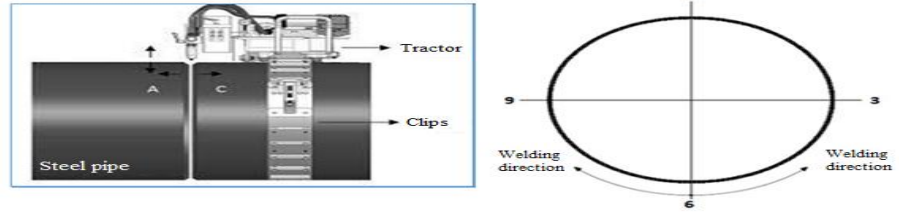


Figure A. Overview of orbital welding system basic working principle and welding direction

Purpose: Gas welding methods; it is a semi-automatic method that is used extensively in industrial applications due to its wire feeding speed and uninterrupted welding ability, and it is important in the transition to automation process in welding processes. Mechanized gas metal arc welding (orbital GMAW) has been recently used in welded joining of natural gas and petroleum pipelines under construction site conditions, and its use is becoming more and more widespread day by day. In addition, the use of orbital MAG welding (FCAW) made with cored wire has been increasing in recent years due to the ability to add desired alloy elements to the filler metal in order to obtain the mechanical properties expected from welded construction at the desired rate.

Theory and Methods: In the orbital welding system, there are equipment such as tractor, control center, wire feeder, power source, control panel, work panel and clamp. The application of the orbital welding system is faster than electric arc welding, because it is a method where the skill and properties of the welder do not affect the welding process with high welding quality and filling rates, and its usage area is increasing. With this method, low and high alloy steels and stainless steels can be welded. Especially the consumables used affect the structure, properties and duration of the welding. Welding is done by means of a manual control panel accompanied by an operator. In addition to welding in any position, the torch can be adjusted at the desired distance.

Results: The results have shown that depending on the welding position and speed, ITAB was observed to occur in a narrow area in some regions (1. and 4.), while it was observed to occur in a larger area in some regions (2. and 3.). It has been observed that the data obtained from the mechanical measurements are suitable for the measurements required by the standards.

Conclusion: As a result of the examinations; it has been observed that API 5L X70M pipes can be joining with FCAW by orbital method as desired, and the welding process exhibits the expected local properties well. No welding defects such as cracks, tears, pores, slag residues were encountered in macro and micro examinations. These results have shown that welded joining operations are safe and sufficient.



API 5L X70M Çeliklerinin Özlü Telle Ark Kaynak Yöntemiyle Orbital Birleştirilmesinde Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Cemil ÇETİNKAYA¹ Hakan ADA^{2,*} Murat SEZGİN³

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 37150, KASTAMONU

³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada; yeni bir yöntem olan orbital özlü telle ark kaynak yönteminin performansının incelenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Deneylerde petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X70M kalitesindeki çelik borular kullanılmıştır. Gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için deneyler saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak birleştirilmiş ve birleştirme numuneleri ayrıntılı incelenerek kaynak bölgesinin metalurjik ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde; API 5L X70M borularının özlü tel ile ark kaynağının orbital yöntemle istenilen şekilde birleştirilebildiği, kaynak işleminin kendinden beklenen lokal özellikleri iyi bir şekilde sergilediği görülmüştür. Yapılan makro ve mikro incelemelerde çatlak, yırtılma, gözenek, cüruf kalıntısı gibi kaynak hatalarıyla karşılaşmamıştır. Bu da kaynaklı birleştirme işlemlerinin emniyetli ve yeterli olduğunu göstermiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 25/09/2020

Düzeltilme: 22/11/2020

Kabul: 22/11/2020

Anahtar Kelimeler

Orbital,

API 5L,

Özlü telle ark kaynağı

Keywords

Orbital,

API 5L,

Flux cored arc welding

Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of API 5L X70M Steels Welded by Flux Cored Arc Welding Method as Orbital

Abstract

In this study; a study has been conducted to examine the performance of orbital flux cored arc welding (FCAW) method, which is a new method. Steel pipes of API 5L X70M quality produced for oil and natural gas pipelines were used in the experiments. Experiments were carried out under construction site conditions in order to reach realistic results. The test samples were joined by orbital gas metal arc welding (GMAW) method using flux cored wire and the joining samples were examined in detail and the metallurgical and mechanical properties of the weld zone were analyzed. As a result of the examinations; it has been observed that API 5L X70M pipes can be joining with FCAW by orbital method as desired, and the welding process exhibits the expected local properties well. No welding defects such as cracks, tears, pores, slag residues were encountered in macro and micro examinations. These results have shown that welded joining operations are safe and sufficient.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğalgaz ve petrol gibi akışkanlar, büyük çaplı ve yüksek basınca dayanıklı borularla şehirlere iletilir ve oradan da kullanıcılara dağıtılır. Bu iletim ve dağıtım işlemlerinde yüksek basınca karşı sergilediği üstün mekanik özellikler ve üretim kolaylığı nedeniyle genellikle çelik borular tercih edilir. Doğalgaz ve petrol iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan borular yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (YMDA) çeliklerden üretilirler. YMDA çelikleri; düşük alaşımlı olmasına rağmen, kontrollü haddeleme, termomekanik işlemler ve tane inceltici alaşım elementlerinin içyapı içerisine takviye edilmesi neticesinde yüksek mukavemet sergileyen özel çelik gruplarından biridir [1-8].

Doğalgaz ve petrol boruları ASTM ya da API 5L standardına uygun olarak üretilmektedir[9-11]. Bu çalışmada kullanılan X70M çeliklerinin kimyasal ve mekanik şartnameleri de API 5L standardına göre belirlenmiştir [11]. X70M çelikleri doğalgaz ve petrol iletim hatlarında yoğunlukla kullanılan YMDA çelik

serilerindedir [4,6]. Bu çelikler API 5L standardında X taksonomisinde değerlendirilmektedir. API 5L standardında X sınıfında değerlendirilen bu malzemelerin temel özelliği asiküler ferrit ve perlit yapının kontrollü termomekanik haddeleme ile üretilmesi neticesinde sahip olduğu ince taneli yapıdır. İnce taneli yapının elde edilmesinde X grubu çeliklerin üretilmesinde ana mikroalaşım elementi olarak kullanılan niyobyum ve niyobyumun vanadyum ve titanyum ile kombinasyonları (Nb/V, Nb/Ti, Nb/V/Ti) ince tane yapısının oluşmasında önemli bir etki oluşturmaktadır [4]. Bu alaşım elementleri, kontrollü termomekanik haddeleme esnasında tanelerin irileşmesine izin veremeyerek, malzemelerin akma/çekme mukavemeti ve tokluğuna önemli katkılar sağlamaktadır. Yüksek mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra, düşük maliyetli olmaları ve kolay elde edilebilmeleri nedeniyle yoğunlukla tercih edilmektedir [6,7,9].

Doğalgaz boru hatları için üretilen borular genellikle tozaltı kaynak yöntemi ile üretilmektedir. Boruların sahada birleştirme işlemleri ise çoğunlukla örtülü elektrotla (bazik, selülozik) elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Son zamanlarda, yapım işi imalat sürecini hızlandırarak, enerji, maliyet ve zamandan tasarruf etmek için sahada yapılan birleştirme işlemlerinde gazaltı kaynak yöntemleri de denenmektedir. Örtülü elektrotla ark kaynağı manuel bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercih edilmesine ve kaynakçının maharetine bağlıdır [6]. Aynı zamanda manuel kaynak işlemleri kaynak güvenilirliğini sağlamak için yavaş hızlarda yürütülmektedir. 3600 mm çapındaki bir borunun manuel kaynak işlemi yaklaşık 1 gün sürebilmektedir. Güvenli bir şekilde boru hattı yapım işlerini hızlandırmak ve zaman, enerji ve ekonomiden tasarruf etmek için son yıllarda saha kaynak işlemlerinde yarı mekanize yöntemler denenmektedir. Bu yöntemler genellikle gazaltı kaynak yönteminin mekanize edilmiş türevleridir. Gazaltı kaynak yöntemleri; tel besleme hızı ve kesintisiz kaynak yapabilme özelliği nedeniyle sanayi uygulamalarında yoğun olarak kullanılan yarı otomatik bir yöntem olup, kaynak işlemlerinde otomasyon sürecine geçiş noktasında önemli bir yer tutmaktadır. Mekanize (Orbital MIG-MAG) gazaltı kaynağı doğalgaz ve petrol boru hatlarının kaynaklı birleştirme işlemlerinde şantiye şartlarında son zamanlarda denenmekte olup, kullanımı her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca kaynaklı konstrüksiyondan beklenen mekanik özelliklerin istenilen oranda elde edilebilmesi için dolgu metaline arzu edilen alaşım elemanlarının ilave edilebilmesi özelliği nedeniyle özlü telle gerçekleştirilen orbital MAG kaynağının (FCAW) kullanımı da son yıllarda giderek artış göstermektedir [12].

Gelişmekte olan teknolojiler ile birlikte kaynak yöntemlerinde de birçok değişim ve yenilikler de kaçınılmaz olmuştur. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında örtülü elektrot ile ark kaynak yöntemine alternatif olarak orbital-kaynak sistemi ile çalışmalar başlamıştır. Orbital- kaynak sistemine MIG, MAG ve TIG kaynak yöntemleri uyarlanarak kullanılmaktadır [13-15]. Boru kaynaklarında yüksek kaynak metali yağma oranı ve verimlilik ile kendini ön plana çıkartan orbital kaynak sistemi ile yatay ekseninde iki borunun ağzlanması ve traktör ismi verilen torcun hareketini sağlayan elaman ile boru etrafına sabitlenen kelepçe üzerinde boru çevresini istenen hızda götürerek kaynak yapma imkânı sağlamaktadır [13-15]. Orbital kaynak sisteminde traktör, kontrol merkezi, tel sürme ünitesi, güç kaynağı, kontrol paneli, iş paneli ve kelepçe gibi donanımlar bulunmaktadır. Orbital kaynak sistemi uygulama olarak elektrik ark kaynağına göre daha hızlı, yüksek kaynak kalitesi ve dolgu oranları ile kaynakçının maharet ve özelliklerinin kaynak işlemini etkilemediği bir yöntem olması nedeniyle hızla gelişmekte ve kullanım alanı artmaktadır. Bu yöntemle düşük ve yüksek alaşımlı çelikler ile paslanmaz çelikler kaynaklanabilir. Özellikle kullanılan sarf malzemeleri kaynağın yapısı, özellikleri ve süresine etki etmektedir. Kaynak bir operatör refakatinde manuel kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilerek yapılmaktadır. Her pozisyonda kaynak yapmanın yanında istenilen mesafede torç ayarlanabilmektedir [13-15].

Bu çalışmada; yeni bir yöntem olan orbital MAG kaynak yönteminin performansının incelenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Deneylerde petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X70M kalitesindeki çelik borular kullanılmıştır. Gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için deneyler saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak (FCAW) birleştirilmiş ve birleştirme numuneleri ayrıntılı incelenerek kaynak bölgesinin metalurjik ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, API 5L X70M kalitesindeki çelik borular orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme sonucunda metalurjik incelemeler ve mekanik test sonuçlarına bakılarak kaynak işleminin etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada 1422,4 mm çapında (56 inç) boyuna dikişli borular; gerçek şantiye şartlarında gerekli donanımlar sağlanarak kaynaklı birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Kök pasonun önemi birçok literatür çalışmasında detaylı olarak anlatılmış [12, 16,17] olup, kök paso ve sıcak paso kaynaklarının özel bir işlem olması ve genellikle boru hatlarında karşılaşılan kaynak hatalarının yoğunlukla kök ve sıcak pasoda meydana gelmesi nedeniyle kaynak güvenilirliği düşünülerek, kök ve sıcak paso kaynak işlemleri manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Kök pasonun haricinde gerçekleştirilen tüm kaynak paso işlemleri otomatik orbital MAG kaynak yöntemiyle özlü tel kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.1. Materyal (Material)

Deneylerde doğalgaz boru iletim hatlarında kullanılmak üzere üretilen 1422,4 mm (56 inç) çapında, 19,45 mm kesit kalınlığında, API 5L X70M kalitesinde tozaltı ark kaynak yöntemiyle üretilen boyuna dikişli çelik borular kullanılmıştır. X70M malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kök paso kaynak işleminde AWS 5.1 standardında E6010 kodlu selülozik elektrot kullanılmış olup, bu elektrodun kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Sıcak paso için kullanılan AWS 5.5 standardında E9018-G-H4R kodlu bazik elektrotun kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Dolgu ve kapak paso kaynak işlemlerinde orbital-MAG kaynağı ile 1,2 mm çapında AWS 5.36 standardında E91T1-M21A6-K2 kodlu rutil özlü tel elektrod kullanılmıştır. Bu özlü tel elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri ise Tablo 4’te verilmiştir. Koruyucu gaz atmosferi ise ENISO 14175-M21-ArC 20 kodlu %80 Ar - %20 CO₂ atmosferinden oluşan karışım gaz olarak belirlenmiştir. Çalışma basıncı ise 80 CFH olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. API 5L X70M çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	0,0768	0,148	1,797	0,0067	0,001	0,0262	0,0921	0,0139
	Sn	As	Ga	Sb	B	N	Nb+Ti+V	
	0,0002	0,0037	0,0017	0,0049	0,0007	0,0053	0,0523	
	Cu	Al	Ti	V	Nb	Pb	Fe	CEŞ
	0,0803	0,0363	0,016	0,031	0,071	0,0025	97,5847	0,40
Mekanik Özellikler	Akma Mukavemeti. (MPa)		Çekme Mukavemeti. (MPa)		Uzama (%) (min.)		Darbe Enerjisi (-10 °C) (Joule)	
	585		620		31		346	

Tablo 2. E6010 kodlu selülozik elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr	
	0,129	0,188	0,451	0,008	0,008	0,024	
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb	
	0,043	0,013	0,054	0,013	0,006	0,001	
Mekanik Özellikler	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)		Darbe Enerjisi (-30 °C) (J)
	506		568		23		50

Tablo 3. AWS 5.5: E9018-G-H4R kodlu bazik elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

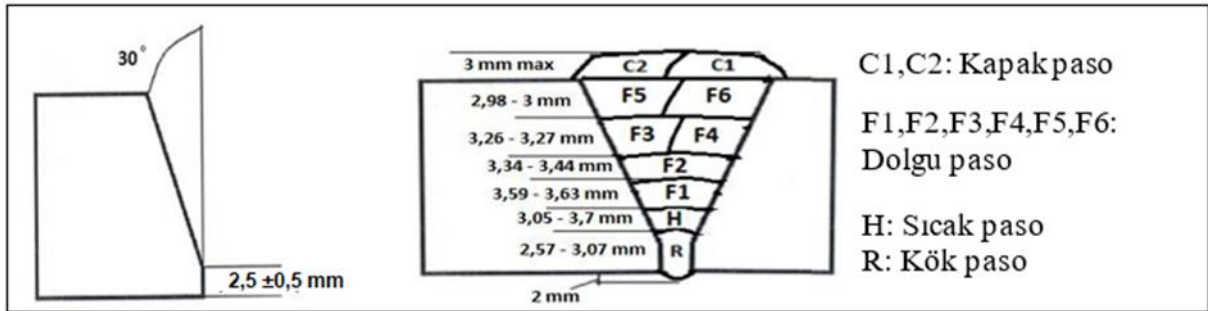
Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0,05	0,4	1,2	0,011	0,006	0,1
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb
	1,0	0,39	0,001	0,01	0,02	0,01
Mekanik Özellikler	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)	Darbe Enerjisi (-40 °C) (J)
	647		715		20	92

Tablo 4. AWS 5.36: E91T1-M21A6-K2-H4 kodlu 1.2mm selülozik özlü telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

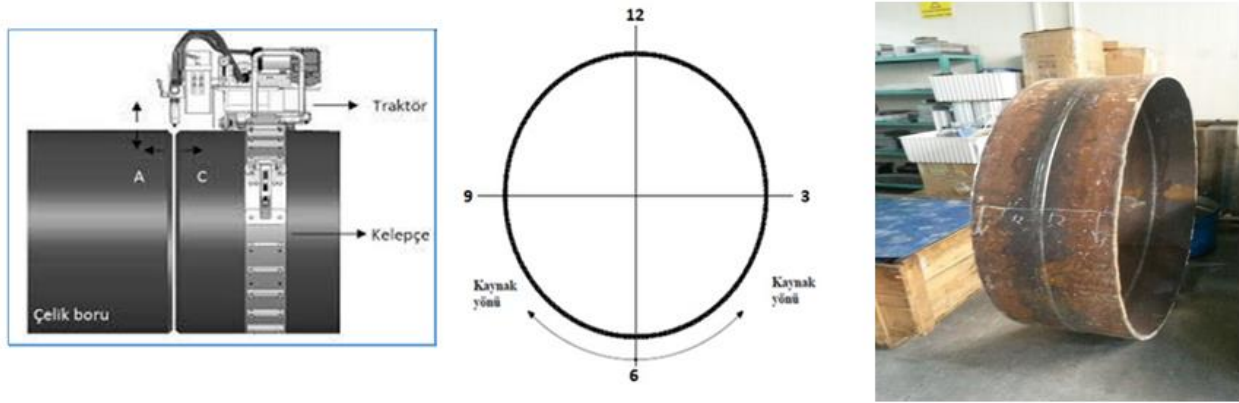
Element / %	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0,07	0,39	1,58	0,017	0,007	0,038
	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb
	1,18	0,003	0,076	0,01	0,019	0,014
Mekanik Özellikler	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)	Darbe Enerjisi (-40 °C) (J)
	650		704		20,4	75

2.2. Metot (Method)

Plazma ile 350 mm genişliğinde kesilen iki adet API 5L X70M çelik boruya önce mekanik yöntemler ile Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği gibi 30° kaynak ağızı açılmıştır. Kaynak yapılacak bölge mekanik yöntemlerle temizlenerek, ağızlama aparatı vasıtasıyla borular ağız ağıza getirilmiş ve Şekil 1’de gösterilen paso sıralamasına uygun olarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 1.** Kaynak ağızı formu ve paso sıralamasının şematik gösterimi

Kaynak işlemi şematik görüntüsü Şekil 2’de gösterilen orbital kaynak sistemindeki traktör (iki adet) ile 06:00’dan 12:00’ye soldan ve sağdan olacak şekilde uygulanmıştır. Bu uygulama ile ilerleme hızı iki katına çıkarılmaktadır. Kök ve sıcak paso muhtemel kaynak hatalarını minimize etmek amacıyla elektrik ark kaynak yöntemiyle, dolgu ve kapak pasolar ise orbital-MAG kaynak yöntemiyle (FCAW) birleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce birleştirme numuneleri 100 °C sıcaklıkta ön tavlama işlemine tabi tutulmuş olup, tanelerin irileşmesini önlemek için pasolararası sıcaklık maksimum 200 °C’de tutulmuştur. Kaynak işlemi gerçekleştirilen birleştirme numunesi ise yine Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Orbital kaynak sistemi temel çalışma prensibi, kaynak yönü genel görünümü ve kaynaklı test numunesi[13, 14].

Kaynak işlemleri Tablo 5'te verilen parametreler dahilinde doğalgaz boru hattı yapım işini gerçekleştirmeye yetkili ve sertifikalı operatör ve kaynakçılar tarafından saha şartlarında gerçekleştirilmiştir. Böylece kaynaklı bağlantıdan beklenen lokal özelliklerin saha şartlarına uygun olarak karşılanabilirliği de test edilmiştir. Kök ve sıcak paso kaynak işlemleri 300 A akım şiddeti değerine kadar kaynak yapabilme imkânı sağlayan ESAB marka, ORIGO TIG 3001 model örtülü elektrot ile ark kaynağı yapabilen kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Dolgu ve kapak paso kaynaklarında ise 425 A akım şiddeti değerine kadar kaynak yapabilme imkânı sağlayan Miller marka, XMT 350 CC/CV model orbital-MAG kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynak işlemi Şekil 1'de görüldüğü gibi tek taraflı 30° toplamda 60° kaynak ağız açısında, kök, sıcak, dolgu ve kapak pasolar olmak üzere toplam 7 katman ve 10 pasoda gerçekleştirilmiştir. Bazik elektrot ile gerçekleştirilen sıcak paso işlemlerinde elektrotlar yaklaşık 300 °C sıcaklıkta fırınlanarak kurutulmuş ve bekletmeden hemen kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Şantiye şartlarında açık havada gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde koruyucu gaz ortamına dışarıdan tesir edebilecek atmosferin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için; kaynak işlemleri portatif bir kulübe içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Deneylerde kullanılan parametreler

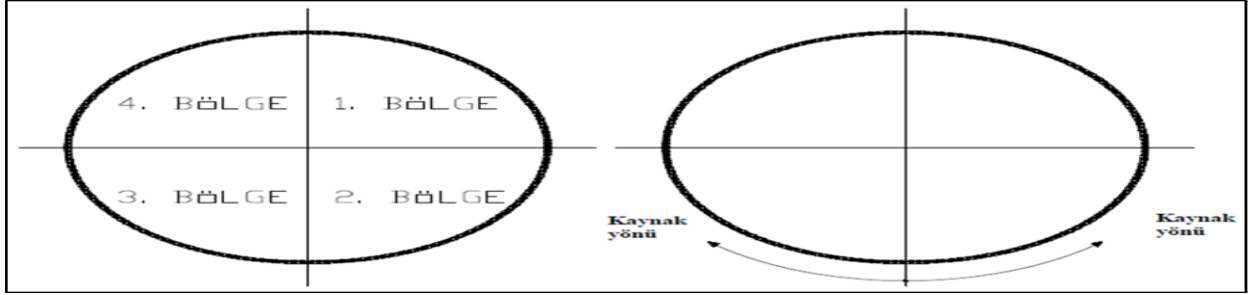
Paso	Katman	Metot	Elektrot	Çap (mm)	Gaz Akış Hızı (Ort) (CFH)	Akım Türü
Kök (R)	1	Elk. Ark (SMAW)	A 5.1-E6010	3,25	N/A	DC-
Sıcak (H)	2	Elk. Ark (SMAW)	A 5.5-E9018-G-H4R	2,50	N/A	DC+
Dolgu (F1)	3	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F2)	4	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F3)	5	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F4)	5	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F5)	6	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Dolgu (F6)	6	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Kapak (C1)	7	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+
Kapak (C2)	7	Orbital FCAW	A 5.36- E91 T1-M21A6-K2	1,20	80	DC+

Paso	Pozisyon ve Yön	Tel Besleme Hızı (IPM)	Ark Gerilimi (Volt)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Isı Girdisi (Ort) (kJ/mm)
Kök	5G PF	N/A	28±3	80±5	90±10	1,29
Sıcak (H)	5G PF	N/A	24±3	85±5	90±10	1,23
Dolgu (F1)	5G PF	N/A	24±2	205±15	180±10	1,76
Dolgu (F2)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	165±10	1,87
Dolgu (F3)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	165±10	1,95
Dolgu (F4)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	160±10	1,94
Dolgu (F5)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	195±10	1,27
Dolgu (F6)	5G PF	280 - 400	24±2	205±15	190±10	1,62
Kapak (C1)	5G PF	250 - 350	24±2	200±10	155±10	1,98
Kapak (C2)	5G PF	250 - 350	24±2	200±10	150±10	1,91

Birleştirmelerde kök paso uygulaması 80 ± 5 A akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilirken, sıcak paso uygulaması 85 ± 5 A arasında akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Dolgu pasodaki kaynak işlemleri 205 ± 15 A akım şiddeti, kapak pasodaki kaynak işlemleri ise 200 ± 10 A akım şiddeti değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Kök paso kaynak işlemi; kökte yanma oluşu gibi kritik hatalar oluşturmamak ve yetersiz ergimeden kaynaklı riskleri minimize etmek için, DC- kutupta gerçekleştirilmiştir. Diğer paso uygulamaları ise DC+ kutupta gerçekleştirilmiştir. Dolgu pasolarında tel besleme hızı 280-400 ipm (inç/dak) kapak pasolarında 250-350 ipm olarak gerçekleştirilmiştir.

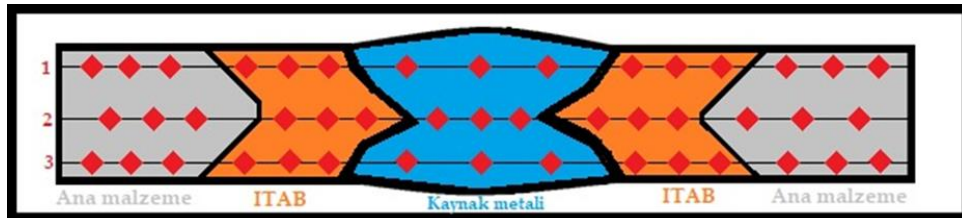
Numune hazırlama

Tahribatlı testler için numune hazırlama aşamasında; numune alınacak bölgeler Şekil 3'te şematik olarak gösterildiği gibi ve API 1104 standardına uygun olarak 4 bölgeye ayrılmış ve numuneler bu bölgelerden hazırlanmıştır. İncelemeler, kaynak yönüne göre saat pozisyonlarında (12:00 – 3:00, 3:00 – 6:00, 6:00 – 9:00, 9:00 - 12:00) değerlendirilmiştir. Saat 12:00 – 03:00 bölgesi 1. Bölge, 03:00 – 06:00 bölgesi 2. Bölge, 06:00 – 09:00 bölgesi 3. Bölge ve 09:00 – 12:00 bölgesi 4. Bölge olarak adlandırılmıştır. Her bir deney parçasından alınan test sonuçları kendi içinde değerlendirilmek üzere bölgesel olarak incelenmiştir. Şekil 3'te şematik olarak gösterilen 4 boru bölgesinden ayrı ayrı olmak üzere çekme, eğme ve makro - mikro yapısal incelemeler ile sertlik testleri için test numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 3. Mekanik test ve mikroyapı numunesi alınan bölgelerin şematik gösterimi ve kaynak yönü

Makro ve mikro analizleri gerçekleştirmek üzere; API 1104 standardında belirtilen bölgelerden birer adet toplamda 4 adet makroyapı / mikroyapı numunesi alınmıştır. Numuneler zımparalama ve parlatma işleminden sonra % 3 Nital (HNO_3) çözeltisiyle dağlanmışır. Mikroyapı fotoğrafları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki LEICA marka ters optik mikroskop yardımıyla görüntülenmiştir. Numuneler makroyapı ve mikroyapı analizlerine tabi tutulduktan sonra makrosertlik testlerine de tabi tutulmuştur. Sertlik testi uygulamaları boru imalatçıları tarafından kullanılan 10 kg'lık yük ile TS EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş. Laboratuvarlarında bulunan Struers marka, Duramin A300 model, tam pnömomatik, değişken yüke sahip, Vickers cinsinden ölçümler yapabilen cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çok pasolu kaynak işleminde pasoların sertliğe olan etkisi düşünülerek; sertlik ölçümlerinden daha efektif bir sonuç elde etmek için, Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği şekilde 3 katmandan toplamda 45 adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Sertlik ölçümleri alınan bölgeler ve katmanlar

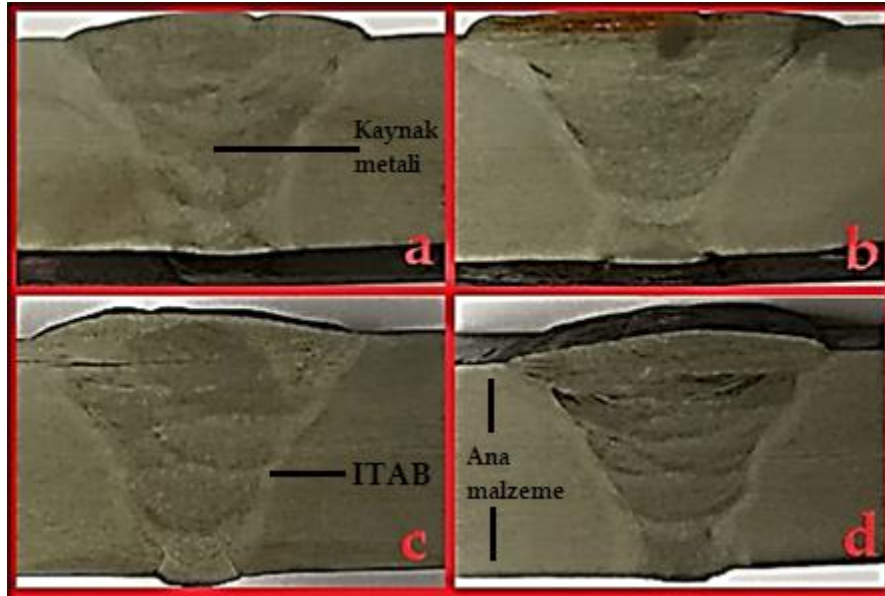
Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelere ayrıca çekme ve eğme testleri gerçekleştirmek amacıyla standart test numuneleri hazırlanmıştır. Akma, çekme, kopma mukavemeti ile % uzama değerlerinin bulunmasını sağlayan ve sabit hız – sıcaklıkta, artan yük ile numuneyi koparmak için uygulanan çekme testleri kapsamında; numuneler API 1104 ve ASTM E8 standardına uygun olarak, her bölgeden birer adet toplamda 4 adet test numunesi

olacak şekilde hazırlanmıştır. Kaynak bölgesinde olası bir süreksizliğin ilerleme hızını ölçmek amacıyla gerçekleştirilen eğme testleri kapsamında; numuneler TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Standart gereği boru dış çapı 323 mm'den daha büyük olduğu için birleştirmelerden yan eğme numuneleri de alınmıştır. Eğme testi her bölgeden ikişer adet, kök ve yüzey bükme şeklinde olmak üzere toplamda 16 adet alınarak işlem gerçekleştirilmiştir. Çekme ve Eğme testleri Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş.'nin Ankara Fabrikasında bulunan 600 kN çekme kapasitesine sahip Instron marka cihazda "TS EN ISO 4136" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada doğalgaz dağıtım ve iletim hatlarında kullanılan ve Tablo 5'te verilen parametrelere uygun olarak saha şartlarında mekanize sistemle birleştirilen API 5L X70M çelik boru malzemesinden elde edilen numunelerin mekanik ve metalurjik özellikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda numuneler mekanik testler ve metalografik analizler ile ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla değerlendirilerek tartışılmıştır.

Tablo 5'te verilen parametrelere uygun olarak birleştirilen API 5L X70M kalitesindeki borulardan alınan metalografik inceleme numunelerinin makroyapı görüntüleri Şekil 5'te verilmektedir. Görüntüler Şekil 3'te şematik olarak gösterilen bölgelerden alınan metalografik inceleme numunelerinden elde edilmiştir.

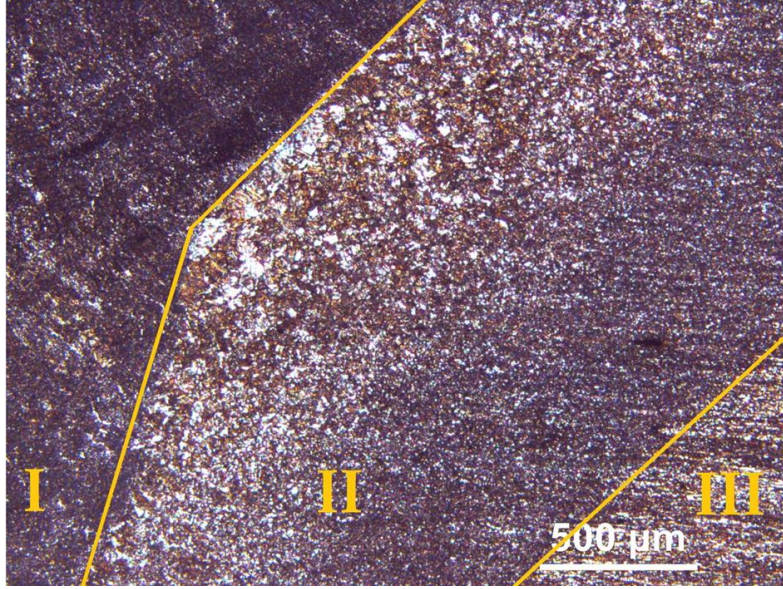


Şekil 5. Makroyapı görüntüleri a. 1. Bölge, b. 2. Bölge, c. 3. Bölge, d. 4. Bölge (1:1 büyütme)

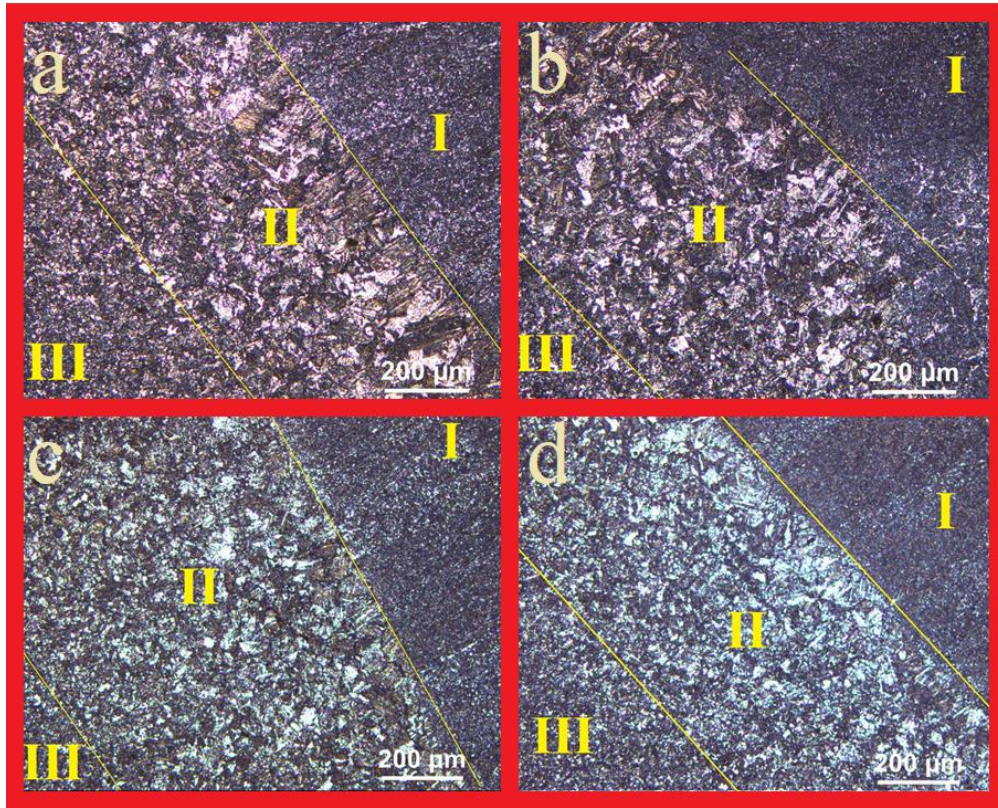
Şekil 5'te verilen makroyapı görüntülerinden birleştirmelerde herhangi bir gözenek, cüruf, yanma çentiği v.b. hataların olmadığı görülmektedir. 10 pasoda gerçekleşen kaynak işleminde pasoların görüntüsü de net bir şekilde görülmektedir. Ana metal ve kaynak metali arasında ergime - katılma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) makroyapı fotoğraflarında görülmektedir. Görüntülerde ITAB genişliğinin bölgesel olarak farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Numune a (1. Bölge) ve d'de (4. Bölge) görülen ITAB bölgesi daha dar iken numune b (2. Bölge) ve c'de (3. Bölge) ITAB daha geniş bir alanda oluşmaktadır. Bunun temel nedeni kaynak pozisyonu ve yönüne bağlı olarak oluşan ısı girdisidir. 1 (a) ve 4 (d) numaralı bölgelerde kaynak pozisyonuna bağlı olarak ısı girdisi daha az iken, 2 (b) ve 3 (c) numaralı bölgelerde yine pozisyona bağlı olarak ısı girdisi daha fazladır. Birleştirme işlemlerinde önceki pasoların, daha sonra uygulanacak pasolara bir nevi normalizasyon ısıl işlemi gerçekleştirdiği de görülmüştür. Bu nedenle çok pasolu gerçekleşen birleştirme işlemlerinde orijinal kaynak metali tane yapısının sadece kapak pasolarda oluştuğu söylenilebilir[7].

Tablo 5'te verilen parametreler dâhilinde birleştirilen API 5L X70M kalitesindeki boruların kaynaklı bölgelerinden mikroyapı görüntüleri de alınmıştır. Mikroyapı sonuçlarında ana malzeme ve boru numunesinin farklı bölgelerinden alınan görüntüler yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda Şekil 3'te şematik olarak belirtilen alanların kaynak bölgelerinden mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Mikroyapı

fotoğraflarında kaynak bölgesinin tüm bölgeleri (kaynak metali, ITAB, ana malzeme) ayrıntılı irdelenmeye çalışılmış, bu yüzden küçük görüntülemelerle (50x, 100x büyütme) mikroskopta görüntüler alınmıştır. Mikroyapı fotoğrafları genel olarak birbirine benzediği için; mikroskoptaki en küçük görüntüleme birimi olan 50x büyütmede alınan görüntü (Şekil 6) tüm borunun mikroyapı analizini ortaya koymak için ayrıntılı olarak açıklanmaya çalışılmıştır. 100x büyütmede alınan mikroyapı görüntülerinde (Şekil 7) ise kaynak pozisyonuna bağlı olarak ısı girdisinin mikroyapıda meydana getirdiği etkiler açıklanmaya çalışılmıştır.



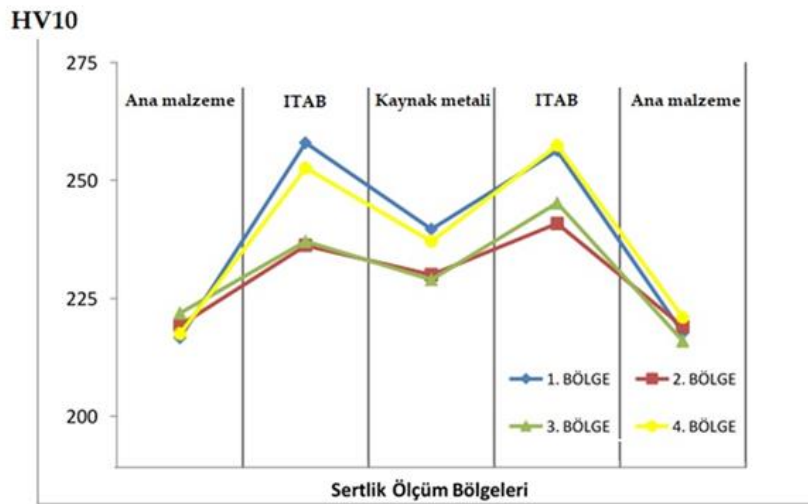
Şekil 6. Kaynak bölgesi genel mikroyapı görüntüsü (50x büyütme)



Şekil 7. Mikroyapı görüntüleri – 100x (I. Kaynak metali, II. İri taneli bölge, III. İnce taneli bölge)
a)1. Bölge, b)2. Bölge, c)3. Bölge, d)4. Bölge

Şekil 6’da 50x büyütmede verilen mikroyapı görüntülerinde; I numara; kaynak metalini, II numara; farklı boyutta yapıların hâkim olduğu ısının tesiri altındaki bölgeyi (ITAB), III numara ise ana malzeme bölgesini ifade etmektedir. I numara ile belirtilen bölge kaynak metaline tane yapısı olup, ince tanelidir. Bu yapının oluşmasında; yoğun ısı girişinden sonra mikroyapıda oluşan asiküler ferrit, beynit ve martensit gibi fazların varlığının neden olduğu bilinmektedir [8,18,19,20]. Şekil 6’da II numara ile belirtilen alan ITAB’ı ifade etmektedir. ITAB tane yapısı içerisinde farklı boyut ve tane yapılarının varlığı göze çarpmaktadır. Kaynak metaline yakın bölgelerde iri taneli bölge oluşurken, iri taneli bölgenin hemen yanında ince taneli bölge oluşmaktadır [19-21]. III numara ile belirtilen bölge ise ince taneli, eş eksenli ve α ferrit ile perlit fazlarından oluşan tipik çelik ana malzeme mikroyapısını ifade etmektedir. Şekil 3’te şematik olarak gösterilen dört farklı bölgeden alınan numunelerin iri taneli bölgelerinin genişliği, buradan da ITAB genişliğini tayin edebilmek amacıyla 100x büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 7’de verilmiştir. 1. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.a’da, 2. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.b’de, 3. Bölgenin fotoğrafı Şekil 7.c’de, 4. Bölgenin fotoğrafı ise Şekil 7.d’de verilmiştir. Şekil 7’de verilen mikroyapı görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde; elde edilen sonuçlar şu şekilde açıklanabilir. 100x büyütmede alınan fotoğraflarda kaynak metalini, iri taneli bölge ve ince taneli bölgenin bir kısmı görülmekte olup, kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisinin iri taneli bölgenin genişliğine bakılarak 4 bölgede farklılıklar gösterdiği görülmüştür. 2. ve 3. bölgelerde tavan kaynağı pozisyonunda kaynak işlemleri gerçekleşmiş ve bu pozisyonun etkisiyle ısı girdisi bu bölgelerde yükselmiştir. Elde edilen görüntülerde 2. ve 3. bölgelerde (Şekil 7 - b ve c) iri taneli bölgenin 1. ve 4. Bölgelere (Şekil 7 - a ve d) oranla bir hayli geniş bir alanda oluştuğu görülmektedir. 1. ve 4. bölgelerde nispeten alın kaynağına yakın bir uygulama ile daha dar bir iri taneli bölge mikroyapısının oluştuğu görülmüştür. Bu duruma sebep kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisidir. Isı girdisinin; tavan pozisyonunu ifade eden 2. ve 3. bölgelerde daha yoğun oluştuğu, alın kaynağını ifade eden 1. ve 4. bölgelerde ise daha düşük oranda oluştuğu iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak belirlenmiştir.

Makroyapısal ve mikroyapısal incelemelerden sonra, kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için birleştirmelerden alınan numunelere sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak sırayla açıklanmıştır. Önceki aşamalarda mikro ve makroyapı görüntüleri alınan numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. 4 ayrı bölgeye Şekil 4’te şematik olarak verilen katman ve bölgelerden 180 adet ölçüm işlemi uygulanıp, ölçümlerin ortalama sonuçları alınarak Şekil 8’de verilen sertlik grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 8. Sertlik sonuçları grafiği

Sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak, Şekil 8’de grafik haline dönüştürülmüştür. Her bir numune kendi içinde değerlendirilecek olursa; buna göre ana malzeme sertlik oranı grafikten de anlaşılacağı üzere ortalama 219 HV ölçülmüş olup, bu değer tüm bölgeler içerisinde en düşük değerdir. ITAB bölgesi sertlik ölçümü ortalaması 248 HV ölçülmüş ve bu değer en yüksek sertlik bölgesidir. Bunun temel nedeni soğuma hızının en hızlı olduğu bölgenin ITAB olması ve ITAB’da özellikle iri taneli bölgede yüksek oranda

martensit fazının oluşmasıdır [22]. Kaynak metalinin ortalama sertliği ITAB'a göre nispeten düşük olsa da ortalama olarak 234 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ısı etkisiyle oluşan asiküler ferrit, beynit ve martensit fazlarının oluşması, dendritik, iğnemsî ve ince taneli yapılar nedeniyle bu bölgede sertlik ana malzemeye göre yüksektir [22]. Kaynak metali merkezinin, en son katılacak ve soğumanın en son gerçekleştiği bölge olması nedeniyle; bu bölge ITAB'a göre nispeten daha düşük, sahip olduğu fazlar ve iğnemsî ve dendritik taneli yapılar nedeniyle de ana malzemenin daha yüksek sertlik sergilemiştir [23]. Sertlik sonuçları bölgesel olarak karşılaştırıldığında ise; 1. ve 4. bölgeden alınan sertlik değerlerinin, 2. ve 3. bölgeden alınan değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni kaynak pozisyonundan dolayı ısı girdisinin farklılık oluşturmasıdır. Kaynak hızının sabit olduğu tüm birleştirmelerde 2. ve 3. bölgeler pozisyon itibarıyla daha yüksek bir ısı girdisi ile karşılaşmaktadır. Bu durum, bu bölgelerde sertlik ölçümlerinin 1. ve 4. bölgelere oranla daha düşük sonuçlar vermesine neden olmuştur. 1. ve 4. bölgelerde tavan kaynağından alın kaynağı pozisyonuna geçiş yapılırken, bu bölgelerde 2. ve 3. bölgelere oranla daha düşük ısı girdisi oluşmuş ve daha düşük sertlik sonuçları elde edilmiştir. Isı girdisi arttıkça tane yapısı irileşmiş ve malzemenin sertliği düşmüştür. Standartlara göre (BS4515-1, TS EN ISO 9015-2, TS EN ISO 3183); çelik boru hat kaynaklarında kaynaklı birleştirmelerden alınan sertlik değerlerinin 9,5 mm üzeri borular için maksimum 300 HV değerinde olması gerekliliği belirtilmiş olup, çalışmadan elde edilen sertlik değerleri bu gerekliliği karşılamıştır.

Sertlik testlerinden sonra ana malzeme kaynaklı birleştirmelerden alınan ve ASTM E8 standardına uygun olarak hazırlanan çekme numunelerine API 1104 standardında belirtildiği gibi çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testi sonuçları Tablo 6'da, test uygulanmış numunelerin görüntüsü ise Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 6. Çekme testi sonuçları

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Ana malzeme	585	620	31
1.bölge	618,64	652,83	8,0
2.bölge	617,85	644	11,7
3.bölge	608,49	628,21	14,8
4.bölge	632,79	671,49	15,2
Ortalama (Kaynaklı numuneler)	619,44	649,13	12,4

Çekme testleri sonucunda kopmaların tamamının kaynak bölgesine yaklaşık 40 mm uzaklıktaki ana malzeme tarafından gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 9). Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülmektedir[24].



Şekil 9. Çekme testi sonrası kaynaklı birleştirme numunelerinin görüntüleri

Yapılan ölçümlerde; ana malzemenin akma mukavemeti 585 MPa ve maksimum çekme mukavemeti 620 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde ise akma mukavemeti ortalaması yaklaşık 620 MPa, maksimum çekme mukavemeti ortalaması ise yaklaşık 650 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynak bölgesinin ana malzemeden daha sert bir yapıya sahip olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmekte ve kopma ana malzemede gerçekleşmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında daha az deformasyona uğraması olarak düşünülmektedir. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerlerinin azalmasına neden olmaktadır [24]. Bu veriler doğrultusunda kaynak metalinin ana malzemeden daha iyi sonuçlar vererek kendinden beklenen mukavemet değerlerini sergilediği görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerin test sonuçları bölgesel olarak incelendiğinde; Şekil 8’de verilen sertlik sonuçlarındaki gibi, 2 ve 3. bölgeye ait numunelerin çekme değerlerinin daha düşük çıktığı görülmüştür. Buradan anlaşılacağı üzere mikroyapı ve sertlik yorumlarında bahsedildiği gibi ısı girdisinin kaynak pozisyonu nedeniyle daha fazla olduğu bu bölgelerde tane yapısıyla ilişkili olarak akma ve çekme dayanımını diğer bölgelere (1. ve 4. bölge) göre azalttığı söylenebilir [24-26]. Uygulanan ısı girdisinin doğal bir sonucu olarak birleştirmelerdeki en yüksek mukavemet değerleri ortalaması 4. Bölgede oluşurken (akma mukavemeti 632,79 MPa, çekme mukavemeti ise 671,49 MPa), en düşük mukavemet değerlerinin 3. Bölgede (akma mukavemeti 608,49 MPa, çekme mukavemeti ise 628,21 MPa) olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3’te verilen bölgelerden alınan numunelere son olarak TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak eğme testleri uygulanmıştır. Yan eğme olarak kaynağın kök ve yüzeyine uygulanmak üzere ikişer numuneye uygulanan teste 118 mm mandrel çapı ve 146,6 mm kalıp mesafesi belirlenmiştir. Eğme testleri sonuç grafiği Tablo 7’de, test uygulanmış numunelerin görüntüsü ise Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Eğme testi sonrası numunelerin örnek görüntüleri

Tablo 7 ve Şekil 10 incelendiğinde; birleştirmelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmektedir. Eğme testlerinde iç yüzeyler basma gerilmesine maruz kalırken, dış yüzeyler çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu gerilmeler kaynaklı birleştirmelerin iç ve dış yüzeylerinde çatlak vb. hataları ortaya koymaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde çatlama ve yırtılma görülmemesi sonucunda birleştirmelerin emniyetli ve yeterli olduğu söylenilebilir. Eğme testi sonuçları Sandness ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile değerlendirildiğinde; bu çalışmadaki birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığı görülmüştür [27].

Tablo 7. Eğme testi sonuçları

<i>Bölge No</i>	<i>Saat Pozisyonu</i>	<i>Numune No</i>	<i>Kök Bükme (180°)</i>	<i>Yüzey Bükme (180°)</i>
1.bölge	12:00-03:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
2.bölge	03:00-06:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
3.bölge	06:00-09:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok
4.bölge	09:00-12:00	1	Hata yok	Hata yok
		2	Hata yok	Hata yok

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Makroyapı fotoğraflarında; ITAB'ın 1. ve 4. bölgede kaynak pozisyonuna bağlı olarak daha dar bir alanda oluştuğu görülürken, 2. ve 3. bölgede daha geniş bir alanda oluştuğu görülmüştür. Mikroyapı incelemelerinde; kaynak pozisyonuna bağlı olarak oluşan ısı girdisinin; tavan pozisyonunu ifade eden 2. ve 3. bölgelerde daha yoğun oluştuğu, alın kaynağını ifade eden 1. ve 4. bölgelerde ise daha düşük oranda oluştuğu fotoğraflardaki iri taneli bölgelerin genişliğine bakılarak belirlenmiştir. Buradan da ısı girdisiyle beraber ısıdan etkilenen bölgelerin 2. ve 3. bölgelerde daha geniş, 1. ve 4. bölgelerde daha dar bir alanda oluştuğu tespit edilmiştir.
- Sertlik ölçümlerinde; 2. ve 3. bölgeler pozisyon itibarıyla daha çok tavan kaynağı pozisyonuna benzediğinden, daha yüksek bir ısı girdisi ile karşılaşmıştır. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki sertlik ölçümlerinin, 1. ve 4. bölgelere oranla daha düşük sonuçlar vermesine neden olmuştur. 1. ve 4. bölgelerde 2. ve 3. bölgelere oranla daha düşük ısı girdisi oluşmuş ve daha düşük sertlik sonuçları elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde; tüm numunelerde ITAB'da en yüksek sertlik değerleri görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerden alınan sertlik değerlerinin standartlara uygun bir şekilde; 9,5 mm üzeri borular için 300 HV'den daha düşük değerler sergilediği görülmüştür.
- Çekme testlerinde ana malzemenin akma mukavemeti 585 MPa, maksimum çekme mukavemeti ise 620 MPa olarak belirlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde ise akma mukavemeti ortalaması 620 MPa, maksimum çekme mukavemeti ortalaması ise 650 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme testleri sonucunda kaynaklı birleştirmelerdeki kopmaların tamamının kaynak bölgesine yaklaşık 40 mm uzaklıktaki ana malzeme tarafından gerçekleştiği görülmüştür.
- Çekme testi sonuçlarında; 2. ve 3. bölgeye ait numunelerin çekme değerlerinin daha düşük değerler sergilediği görülmüştür. Kaynak pozisyonu nedeniyle ısı girdisinin daha fazla olduğu bu bölgelerde tane yapısıyla ilişkili olarak sertliğin azaldığı, bu da çekme dayanımını diğer bölgelere (1. ve 4. bölge) göre azaltmıştır. Uygulanan ısı girdisinin doğal bir sonucu olarak birleştirmelerdeki en yüksek mukavemet değerleri 4. bölgede oluşurken (akma mukavemeti 632,79 MPa, çekme mukavemeti ise 671,49 MPa), en düşük mukavemet değerleri 3. bölgede (akma mukavemeti 608,49 MPa, çekme mukavemeti ise 628,21 MPa) belirlenmiştir.
- 118 mm mandrel çapı ve 146,6 mm kalıp mesafesinde gerçekleştirilen eğme testleri sonucunda; numunelerde makro düzeyde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür.
- Elde edilen tüm sonuçlar ışığında; API 5L X70M borularının özlü tel ile ark kaynağının orbital yöntemle istenilen şekilde birleştirilebildiği, kaynak işleminin kendinden beklenen lokal özellikleri iyi bir şekilde sergilediği görülmüştür. Yapılan makro ve mikro incelemelerde çatlak, yırtılma, gözenek, cüruf kalıntısı gibi kaynak hatalarıyla karşılaşılması. Bu da kaynaklı birleştirme işlemlerinin emniyetli ve yeterli olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Buzatti, D.T., Buzatti, J. T., Lemos, G. V. B., Amavisca, C. V., Oliveira, D. L. P., Mattei, F., Dalpiaz, G., Reguly, A., 2020. Towards friction welding to API grade B steel pipes, *Journal of Advanced Joining Processes*, Volume 2.
- [2] Arora, K.S., Pandu, S.R., Shajan, N., Pathak, P., Shome, M., (2018). Microstructure and impact toughness of reheated coarse grain heat affected zones of API X65 and API X80 linepipe steels. *Int J Press Vessels Pip* 163, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.04.004>
- [3] Yeom, K.J., Kim, W. S., Oh, K. H., (2016). Integrity assessment of API X70 pipe with corroded girth and seam welds via numerical simulation and burst test experiments, *Engineering Failure Analysis*, 70, 375–386.
- [4] Hashemi, S.H., Sedghi, S., Soleymani, V., Mohammedyani, D., (2012). CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel , *Engineering Fracture Mechanics* 82, 46–59.
- [5] Arista, B. V., Hallen, J. M., Albiter, A., (2007). Effect of artificial aging on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe, *Materials Characterization*, 58, 721–729.
- [6] Ada, H., Çetinkaya, C., (2019). Optimization of maximum tensile strength of welded joints of API 5L X65 pipes by Taguchi method, *MaterialsResearch Express*, 6, 036526.
- [7] Ada, H., Çetinkaya, C., and Durgutlu, A., (2019). Radiographic and macrographic investigations of welding parameters determined by Taguchi method in API 5L X65 pipe joints, *Journal of Polytechnic*, 22(2): 375-384.
- [8] Sung, H. K., Shina, S. Y., Cha, W., Oh, K., Lee, S., Kim, N. J., (2011). Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-containing API X80 linepipe steels, *Materials Science and Engineering A*, 528, 3350–3357.
- [9] Stewart, M., (2016). Material requirements. *Surface Production Operations*, Vol III: Facility Piping and Pipeline Systems. Gulf Professional Publishing.
- [10] Specification API 5L, (2018). Specification for line pipe, 46th Edition ed., American Petroleum Institute.
- [11] Saoudi, A., Fellah, M., Sedik, A. et al., (2019). Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel, *Engineering Science and Technology an International Journal*, 23(2), 452-461.
- [12] Torbati, A.M., Miranda, R.M., Quintinoc, L., Williams, S., Yappa, D.,(2011). Optimization procedures for GMAW of bimetal pipes, *Journal of Materials Processing Technology* 211, 1112–1116.
- [13] Karakaş E., (1998). Quality and Automation in welding of Tubes, *Orbital-MAG Welding Systems*, *Proceedings of Pipeline Welding*, 99, 222-229.
- [14] Dilibal, S., Tansuğ, D., Koçak, M. (2015). Robotlu, Mekanize ve Orbital-MAG Kaynak Uygulamalarında Operatör Eğitimi, *Kaykon 9. Ulusal Kongre ve Sergisi*, 211-217.
- [15] Gençkan, D. H., Bal, E., Şahin, F. Ç., Taptık, İ. Y., Koçak, M., (2013), Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of X65 and X70 Grade Pipes Welded with Orbital Welding Technology, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 10(4), 45-56.
- [16] Sabapathy, P.N., Wahab, M.A., Painter, M.J., (2001). Numerical models of in-service welding of gas pipelines. *Journal of Materials Processing Technology* 118, 14-21.

- [17] Wahab, M.A., Sabathy, P.N., Painter, M.Y., (2005). The on set of pipewall failure during in service” welding of gas pipelines. *Journal of Materials Processing Technology* 108, 422–441.
- [18] Costin, W. L., Lavigne, O., Kotousov A., (2016). A study on the relationship between microstructure and mechanical properties of acicular ferrite and upper bainite, *Materials Science & Engineering A*, 663, 193-203.
- [19] Yang, J. H. , Liu, Q. Y., Sun, D. B., Li, X. Y., (2010), Microstructure and transformation characteristics of acicular ferrite in high niobium-bearing microalloyed steel, *Journal of Iron and Steel Research*, 17(6): 53-59.
- [20] Tang, Z. H., Stumpf, W., (2008). The Role of molybdenum additions and prior deformation on acicular ferrite formation in microalloyed Nb-Ti low-carbon line-pipe steels. *Materials Characterization*, 59(6): 717.
- [21] Beidokthi, B., Koukabi, A.H., and Dolati, A., (2009). Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1-9.
- [22] Spanos, G., Fonda, R.W., Vandermeer, R.A., Matuszeski, A., (1995), Microstructural changes in HSLA-100 steel thermally cycled to simulate the heat-affected zone during welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26, 3277-3293.
- [23] Zhu, M.L., Xuan, F.Z., (2010). Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels, *Materials Science and Engineering A*, 527, 4035–4042.
- [24] Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A. (2005). Investigation of the effect of electrode extension distance on microstructural and mechanical properties of low carbon steel welded with submerged arc welding, *Gazi University Journal of Science*. 473–480
- [25] Aksöz, S., Ada, H. Özer, A., (2017). Microstructure and mechanic properties of API 5L X70 grade steel pipes produced by submerged arc welding method, *Gazi University Journal of Science Part C*, 5, 55–64.
- [26] Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J. (2014). Influence of grain size distribution on the hall–petch relationship of welded structural steel. *Materials Science and Engineering*, 592, 28–39.
- [27] Sandnes L., Romere L., Berto F., Welo T., Grong Q, (2019), Assessment of the mechanical integrity of a 2 mm AA6060-T6 butt weld produced using the hybrid metal extrusion & bonding (HYB) process – Part I: Bend test results, *Procedia Manufacturing*, 34, 147-153.