

API 5L X65 Çeliklerinin MAG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde, Kaynak İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Hakan ADA^{*1}, Sinan AKSÖZ¹, Tayfun FINDIK²
Cemil ÇETİNKAYA², Bülent BOSTAN², İlhan CANDAN³

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojisi Bölümü, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş, Ankara

Geliş tarihi: 14.10.2015

Kabul tarihi: 30.04.2016

Özet

Bu çalışmada; doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılan API 5L X65 kalitesindeki çelik malzemeler, MAG kaynak yöntemiyle özlü rutil tel ile birleştirilmiştir. Birleştirmelerden alınan numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda makro ve mikroyapısal olarak, ana malzeme, ITAB) ve kaynak metali incelenmiş, oluşan yapıların tipik kaynak işlem özelliklerine sahip yapılar olduğu tespit edilmiştir. Çekme, çentik darbe, sertlik ve eğme testlerinde kaynak işlemi kusursuz özellikler sergilemiştir. Elde edilen tüm sonuçlar, kaynak işleminin mikroyapısal ve mekanik olarak kendinden beklenen lokal özellikleri karşılayabilecek bir tavır sergilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, Çelik boru, MAG Kaynağı, Kaynak teli

The Investigation of Effect of Welding Process on The Microstructure and Mechanical Properties of API 5L X65 Steel Welded with Gas Metal Arc Welding Method

Abstract

In this study, API 5L X65 steel pipes, used in natural gas and oil pipelines, was welded by the FCAW method using rutile flux-cored wire electrodes. The microstructure and mechanical properties of the samples were investigated. In the experimental studies, the microstructure of main material, HAZ and FZ was examined. It was determined that the formed structures were typical characteristic structures for medduring welding process. Welding process demonstrated perfect features in tensile, charpy impact, hardness and guided bend tests. All results obtained from experimental studies have showed that the welding process exhibits expected local properties as microstructural and mechanical.

Keywords: Welding, Steel pipe, Gas metal arc welding, Welding wire

* Sorumlu yazar (Corresponding author) : Hakan ADA, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojisi Bölümü, Ankara, hakanada@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Boru hattı sistemleri; gaz, petrol ya da buhar gibi akışkan ürünlerin güvenli bir şekilde taşınması işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Doğalgaz ve petrol taşımacılığında kullanılan boru hatları; toprak kayması, göçük gibi dış kuvvetlerin sebep olduğu plastik deformasyona maruz kalabilir. Bu nedenle boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemlerinin, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [1-4].

X65 çeliklerinin kimyasal ve mekanik şartnameleri API 5L standardına göre belirlenmiştir. API 5L X65 çelikleri, büyük çaplı gaz boru hatlarının yapım işlerinde kullanılan yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik (HSLA) serilerinden biridir [5]. Bu çelikler, boru hatları için tercih edilen ve ince taneli asiküler ferritin hâkim olduğu, kontrollü termomekanik haddeleme yöntemi ile üretilen karbon çelikleridir [6-8]. Karbon çelikleri doğalgaz ve petrol ürünlerinin taşındığı boru hattı sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çelikler mühendislik uygulamaları için önemli ölçüde ekonomik özellikleri ile düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [9-11]. API çeliklerinin üretiminde kullanılan termomekanik haddeleme; dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşme adı altındaki iki farklı yumuşatma mekanizması ile gerçekleşmekte olup, çeliklerin mikro yapı dönüşümleri ve mekanik özelliklerini kontrol etmek için haddeleme esnasında ve sonrasında sıcak deformasyon uygulanmaktadır [12, 13].

Doğalgaz boru hatları için üretilen borular genellikle tozaltı kaynak yöntemi ile üretilmekte olup, boruların sahada birleştirme işlemleri ise örtülü elektrodla elektrik ark kaynak yöntemi ile gerçekleşmektedir. Son zamanlarda, yapım işi imalat sürecini hızlandırarak, enerji, maliyet ve zamandan tasarruf etmek için sahada yapılan birleştirme işlemlerinde gazaltı kaynak yöntemleri

de denenmektedir [14]. Örtülü elektrodla ark kaynağı manuel bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercih edilmesine ve kaynakçının maharetine bağlıdır. Gazaltı kaynak yöntemleri tel besleme hızı ve kesintisiz kaynak yapabilmek özelliği nedeniyle sanayi uygulamalarında yoğun olarak kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca kaynak işlemlerinde otomasyon sürecine geçiş noktasında gazaltı kaynağı önemli bir yer tutmaktadır. Otomatik gazaltı kaynağının uygulandığı robotik uygulamalarda son zamanlarda giderek artmaktadır. Otomatik gazaltı kaynağı doğalgaz ve petrol boru hatlarının kaynaklı birleştirme işlemlerinde son zamanlarda denenmekte olup, kullanımı her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır [15].

Bu çalışmada; Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. (Erdemir) tarafından doğalgaz boru hatlarında kullanılmak üzere üretilen API 5L standardında, X65 kalitesinde çelik malzemeler MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmelerden alınan numunelere mikrosertlik, çekme, çentik – darbe ve eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilerek, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılabilirliğine karşı yüksek dirençli API 5L standartlarında, X65 kalitesinde ve 16 mm kesit kalınlığında çelik kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan API5L X65 malzemesine ait kimyasal analiz ve mekanik test sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. İlave tel olarak, Çizelge 2’de kimyasal ve mekanik özellikleri verilen 1,2 mm çapında E71T-1 özlü rutil tel kullanılmıştır. Koruyucu gaz atmosferi ise EN439 standardında M21 koduyla belirtilen %86 Argon, %12 CO₂ ve %2 O₂ içeriğine sahip, karışım gaz olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1. API 5L X65 malzeme kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

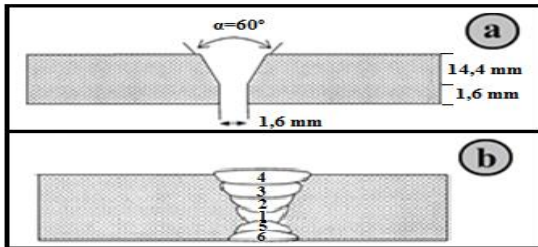
C	Si	Mn	P	S	Karbon Eşd. (%)
Maksimum					
0,12	0,45	1,6	0,03	0,02	0,43
Ak. Muk. MPa	Çek. Muk. MPa	Akma / Çekme Muk. Oranı		% Uzama (min)	Dar. Ener. (Joule) (-20°C)
450-600	535-760	0,93		24	54

Çizelge 2. E71T-1 ilave telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

İlave Tel	C	Si	Mn
E71T-1	0,04-0,08	0,03-0,07	1,10-1,5
Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	% Uzama (min)	Darbe Enerjisi (Joule) (-20°C)
450	540-640	22	54

2.1. Metot

Birleştirme işlemleri 6 pasoda gerçekleştirilmiş olup, kaynak ağız geometrisi ve paso sıralaması sırasıyla Şekil 1. a ve b'de görüldüğü gibidir. Birleştirmeler, Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş'nin Ankara'daki Fabrikasında Çizelge 3'teki kaynak parametrelerine göre, MAG kaynak yöntemi ile doğru akımda (DC) ve pozitif kutuplamada 1G pozisyonunda gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce malzemelere 80°C'de önısıtma işlemi gerçekleştirilmiş, pasolar arası sıcaklık ise maksimum 200°C'de tutulmuştur.



Şekil 1. a) Kaynak ağız geometrisi, **b)** Kaynak pasoları

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri

Paso No	Akım Şiddeti (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (cm/dak)
1	190-200	26-27	10,6
2	240-250	27-28	8,5
3	300-310	32-33	8,6
4	225-235	28-29	10,3
5	230-240	27-28	19,8
6	220-230	28-29	15,6

Çizelge 3'te verilen kaynak parametrelerine uygun olarak birleştirilen parçalardan çekme, çentik darbe ve eğme deneyleri için 5'er adet numune alınarak, testler uygulanmış, ayrıca mikroyapı numunesinden mikro ve makro yapı fotoğrafları alınarak, numunelere mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Makroyapı, mikroyapı ve mikrosertlik incelemeleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında, çekme, çentik - darbe, eğme testleri ise Emek Boru Makine San. ve Tic. A.Ş. Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Makroyapı - mikroyapı incelemeleri ve mikrosertlik ölçümleri için numuneler, metalografik metotlara uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler sırasıyla; 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımparalama işlemine tabi tutulmuş, 6 ve 3 µm'lik keçelerde parlatılmıştır. Parlatılan numuneler, daha sonra %3 HNO₃ (Nital) dağlayıcı ile dağlanarak makro ve mikro incelemelere hazır hale getirilmiştir. Numunelerin mikroyapı fotoğrafları için Leica marka optik mikroskop kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri ise, makro ve mikro ölçümler yapılabilen, Shimadzu marka sertlik cihazında 0,5 ve 1 kg yükler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ASTM E8 standardına uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri 600 KN yük kapasitesine sahip Instron marka çekme cihazında test edilmiştir. Deneylerde maksimum çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine bakılarak, ortalama değerler belirlenmiştir. Eğme testleri ise yine aynı cihazda 40 mm çapında mil (mandrel) ile 63,2 mm kalıp mesafesinde ve 180° açıda kök bükme (root) ve yüzey bükme (face) olarak gerçekleştirilmiştir.

Çentik – darbe deneyleri ise maksimum 300 Joule enerji ölçebilen ve çarpma hızı 5,42 m/sn olan bir cihaz yardımı ile yapılmıştır. Numuneler EN 10045 standardına göre sivri çentikli ISO-V şeklinde testler için hazırlanmıştır. Numune soğutması, sıvı azot banyosu içinde $\pm 0,5$ °C hassasiyet ile yapılmış olup, numunelerin banyo içinde tutulma süresi 7 dakikadır. Çentik – darbe deneyleri, -20 °C’de gerçekleştirilmiş olup, numuneler cihaza çentik eksenine mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüz, çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yapılmıştır.

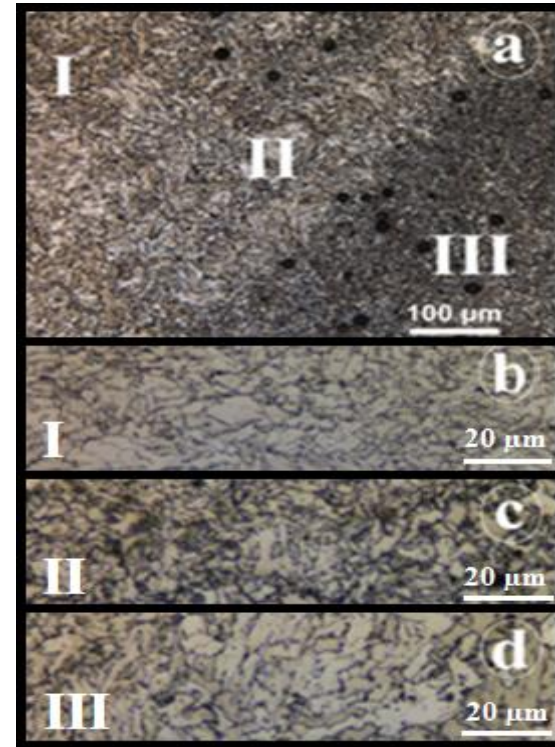
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Metalografik numune hazırlama metodlarına uygun olarak hazırlanan mikroyapı numunesi; makroyapı, mikroyapı ve mikrosertlik incelemelerine tabi tutulmuştur. Şekil 2’de kaynaklı birleştirmeden alınan numunenin makroyapı fotoğrafı görülmektedir. Makroyapı fotoğrafı incelendiğinde, ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinin birbirinden ayrıldığı bölgeler açıkça görülebilmektedir. 6 pasoda gerçekleşen kaynaklı birleştirme işleminde (Şekil 1.b), paso geçişleri de makroyapı fotoğrafında açıkça görülebilmektedir. İlave metal ile birlikte ana metalden ergiyerek kopan taneler yoğun türbülansın da etkisiyle birlikte katılarak, kaynak metalini oluşturmuştur. Kaynak metalindeki katılmanın epitaksiyel olarak ana metalin tanelerinden başlayarak merkeze doğru ilerlediği bilinmektedir [16-18]. Isının tesiri altındaki bölge katılmanın başladığı çizgiden ana metale kadar uzanan ve yapısal farklılıkların makro olarak da görülebildiği bir yapıdır. Ana metal ve kaynak metal arasında kalan, ergime - katılma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan bölge ise, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak Şekil 2’de görülmektedir [16-19]. Maruz kaldığı ısı miktarına göre ITAB içerisinde de yapısal farklılıklar oluşmaktadır. Kaynak metalini sınırında koyu renkte görülen ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha açık renkte olduğu görülmektedir. Mikroyapı incelemelerinde oluşan bu yapısal farklılıklar açıkça görülmektedir (Şekil 3.a).



Şekil 2. X65 malzeme makroyapı fotoğrafı

Şekil 3’te ise mikroyapı görüntüleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Şekil 3.a’da 100 μm ’de ölçeklendirilmiş mikroyapı fotoğrafında ana metal, ITAB ve kaynak metalini mikroyapısını birlikte görülmektedir. Şekil 3.b’de ana metal, Şekil 3.c’de ITAB ve Şekil 3.d’de ise kaynak metalini mikroyapısı 20 μm olarak ölçekli fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 3. a) Kaynak metalini - ITAB - Ana metal mikroyapı görüntüsü, b) Ana metal mikroyapı görüntüsü, c) ITAB mikroyapı görüntüsü, d) Kaynak metalini mikroyapı görüntüsü

Şekil 3.a'da verilen mikroyapı fotoğrafında, tipik ana metal, ITAB ve kaynak metali mikroyapısı bir arada görülmektedir. Fotoğraf üzerinde, I, II ve III numara ile numaralandırılan bölgeler sırasıyla; ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerini göstermektedir. I ve III numara ile gösterilen bölgelerde ana metal ve kaynak metali tanelerinin homojen dağılımlı tane yapısında oluştuğu görülmektedir [20]. Ana metal tanelerinde daha iri taneli yapılar oluşurken, kaynak işlemine aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak oluşan asiküler ferrit tanelerinin yoğunluğu nedeniyle, kaynak metali içerisinde daha ince taneli yapının oluştuğu görülebilmektedir [21, 22]. ITAB'da ise ısının etkisi ile ana metal ve kaynak metalinde oluşan yapılardan daha farklı yapıların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum Şekil 3.a'da verilen II numaralı bölgede açıkça görülmektedir. Bu bölgedeki ITAB yapısında tanelerin, ana metal yönünden kaynak metali yönüne doğru dendritik olarak uzadığı görülmektedir. Dendritik yapının hâkim olduğu ITAB tane yapısı içerisinde yer yer iğnemsî widmanstätten yapının oluştuğu da tespit edilmiştir [23]. Yine kaynak metali içerisinde sütunsal ferrit tanelerinin yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Bu duruma, paso sayısının artmasıyla birlikte ısı girdisinde meydana gelen artışın neden olabileceği düşünülmektedir [24].

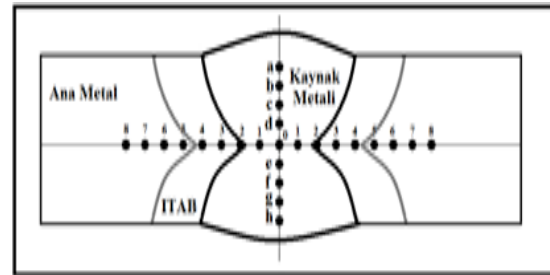
Çizelge 4'teki çekme deney verileri incelendiğinde, bütün numunelerde kopmanın ana malzeme meydana geldiği, kaynaklı bölgede kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuç; uygulanan kaynak işleminin mekanik yüklemelerdeki dayanımının kaynak metalinde, ana malzemeye göre daha iyi tavırlar sergilediğini göstermektedir. Buna sebep olarak kaynaklı bölgede yüksek ısı girdisi ve hızlı soğumadan kaynaklanan ince taneli ve iğnemsî yapıların oluşması gösterilebilir. Oluşan ince taneli yapıların mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [25]. İnce taneli yapıların deformasyona karşı gösterdiği direnç yüksek olduğu için kopma kaynak metalinde gerçekleşmeyip, daha iri tane yapısına sahip olan ana metalde meydana gelmiştir. Kaynaklı bölgenin çekme testi esnasında deformasyona karşı gösterdiği direnç, çekme numunelerinin % uzama

değerlerinin ana malzemeye oranla daha düşük çıkmasına neden olmakta ve bu nedenle kopma ana malzemede oluşmaktadır. Buna paralel olarak çekme mukavemetinin artması yine kaynaklı bölgenin deformasyona karşı gösterdiği direnç nedeniyledir [25,26].

Çizelge 4. Çekme testi sonuçları

Numune	Maksimum Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama	Kırılma Bölgesi
1	590	26	Ana malzeme
2	587	27	Ana malzeme
3	601	22	Ana malzeme
4	595	24	Ana malzeme
5	603	22	Ana malzeme
Ortalama	595	24	Ana Malzeme

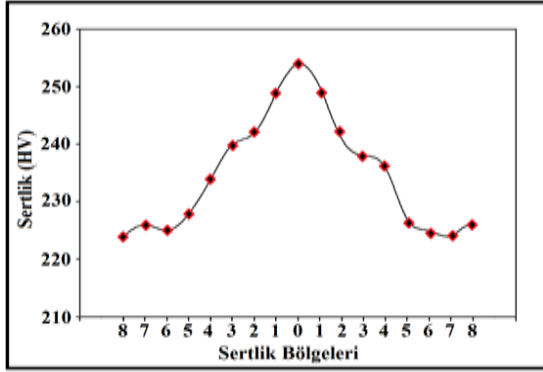
Çekme testi sonuçları incelendiğinde en yüksek maksimum çekme mukavemeti değerinin 603 MPa ile 5 numaralı numunede olduğu görülürken, en düşük maksimum çekme mukavemetinin ise 587 MPa ile 2 numaralı numunede olduğu tespit edilmiştir. 3 ve 5 numaralı numunelerde %22 ile en düşük % uzama değerleri görülürken, en yüksek değer %27 uzama ile 2 nolu numunede görülmektedir. Ortalama değerler ise maksimum çekme mukavemeti için 595 MPa, % uzama değeri için ise %24'tür.



Şekil 4. Sertlik alınan bölgelerin şematik gösterimi

Sertlik ölçümleri ise Şekil 4'te şematik olarak gösterilen noktalardan alınmıştır. Enine 17 noktadan alınan sertlik ölçümleri kaynak işlemi sonucunda oluşan farklı mikroyapıların (ana metal, ITAB, kaynak metali) sertlik davranışını tespit etmek için yapılmıştır. Kaynak metali içerisinde 9 farklı noktadan boyuna alınan sertlik ölçümleri ise, kaynak pasolarının kaynak metali sertliği üzerine

etkilerini tespit etmek için yapılmıştır. Sertlik sonuçları Şekil 5'te verilen grafikteki gibidir.



Şekil 5. Sertlik grafiği

Sertlik sonuçları irdelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde ölçüldüğü görülürken, en düşük değerler ise ana malzemede ölçülmüştür (Şekil 5). En yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde oluşmasına, yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma neticesinde oluşan ince taneli yapıların sebep olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde kaynak metalinde ince taneli ve benzer yapıların varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 5). Tüm kaynak bölgelerinin enine incelendiği ölçümlerde en yüksek sertlik değeri kaynak metalinde 0 noktasında 254 HV olarak ölçülmüştür. En düşük değerler ise ana malzemede, 6,7 ve 8 numara ile belirtilen noktalarda yaklaşık 225 HV olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalarda benzer sertlik sonuçları elde edilmesi yapılan çalışmanın doğruluğunu göstermektedir [27-31].

Çizelge 5. Kaynak metal boyuna sertlik ölçümleri

Bölge	a	b	c	d	0
HV	257	247	237	243	254
Bölge	e	f	g	h	Ort.
HV	261	232	250	235	246

Kaynak bölgesinden boyuna alınan sertlik ölçümlerinde ise Çizelge 5'te verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; kaynak metal sertliğinde, ana malzeme sertlik sonuçlarına oranla daha yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri 261 HV ile e

noktasında tespit edilirken, en düşük sertlik değeri 232 HV ile f noktasında elde edilmiştir. Boyuna alınan sertlik ölçümlerindeki sonuçların farklılık göstermesi, kaynak işleminin çok pasoda gerçekleştirilmesine bağlanmaktadır. Ergime ve katılaşmanın birden fazla gerçekleştiği, çok pasolu kaynak işlemleri, yüksek ısı girdisine ve soğuma hızlarına sebep olduğu için kaynak metal tane yapısının kontrollü ve homojen olarak oluşmasını engellemiştir. Bu nedenle boyuna alınan sertlik sonuçlarında farklı sertlik değerlerine ulaşılmıştır [32].

Kaynak metalinden alınan numunelere, -20 °C'de yapılan çentik – darbe deneylerinde Çizelge 6'da verilen değerler tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek kırılma tokluğu 68 Joule ile 3 nolu numunede görülürken, en düşük ölçüm 63 Joule ile 1 numaralı numunede olduğu görülmüştür. Çentik darbe sonuçlarının ortalaması alındığında ise 66 Joule'lük bir darbe enerjisi elde edilmiştir.

Çizelge 6. Kaynak metal sertlik sonuçları

Numune	Enerji (Joule) Test sıcaklığı:-20°C
1	63
2	66
3	68
4	65
5	67
Ortalama	66

Eğme deneyleri; kaynaklı malzemelerde makro olarak bir hatanın oluşup oluşmadığını görmek için Çizelge 7'de verilen mandrel çapı ve kalıp mesafesinde kaynağın her iki yönüne (kök ve yüzey) uygulanmıştır. 180° açıda uygulanan eğme deneylerinde, malzemelerde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür (Çizelge 7).

Çizelge 7. Eğme testi parametreleri ve sonuçları

Mandrel Çapı (mm)	Kalıp Mesafesi (mm)	Kök Bükme		Yüzey Bükme	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
40	63,2	180°	Hata yok	180°	Hata yok

Eğme testi sonuçları birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Şekil 6’da eğme deneyi uygulanmış bir numunenin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 6. Eğme testi uygulanmış numune

4. SONUÇLAR

- İlave metal ile birlikte ana metalden ergiyerek kopan taneler yoğun türbülansın da etkisiyle birlikte katılarak, kaynak metali yapısını oluşturmuştur.
- Maruz kaldığı ısı miktarına göre ITAB içerisinde de yapısal farklılıklar oluşmuştur. Kaynak metali sınırında koyu renkte görülen ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha açık renkte olduğu görülmüştür.
- Kaynak metali ve ana malzeme mikroyapısının homojen dağılımlı tane yapısında oluştuğu tespit edilmiştir.
- Ana metal tanelerinde daha iri taneli yapılar oluşurken, kaynak işleminde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak oluşan asiküler ferrit tanelerinin yoğunluğu nedeniyle, kaynak metali içerisinde daha ince taneli yapının oluştuğu görülmüştür.
- Isının tesiri altındaki bölgede tanelerin, ana metal yönünden kaynak metali yönüne doğru dendritik olarak uzadığı ve yer yer iğnemi widmanstatten yapının oluştuğu tespit edilmiştir.
- İnce yapılı kaynak metali tanelerinin deformasyonu engellemesi nedeniyle kopma, tüm numunelerde ana malzemelerde meydana gelmiş, kaynaklı bölgelerden herhangi bir kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum kaynak işleminin doğru yapıldığını göstermiştir.

- Sertlik sonuçları irdelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde ölçüldüğü görülürken, en düşük değerler ise ana malzemede ölçülmüştür. Bu durum uygulanan kaynak işleminin uygun performansta olduğunu desteklemiştir.
- Boyuna alınan ölçümlerde sertlik sonuçlarının farklılık göstermesi, kaynak işleminin çok pasoda gerçekleştirilmesinden kaynaklanmıştır.
- Mekanik test sonuçları, birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığını göstermiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Bai, Y., 2001. Pipelines and Risers, Elsevier, Oxford, UK.
2. Baek, J. H., Kim, Y. P., Kim, K., Kim, C.M., Kim, W.S. and Seok, C. S., 2010. Effects of Pre-strain on the Mechanical Properties of API 5L X65 Pipe, Materials Science and Engineering (A), 527, p. 1473-1479.
3. Baek, J., Kima, Y., Kima, W., Koo, J., Seok, C., 2012. Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending, Materials Science and Engineering (A) 540, p. 70-82.
4. Cosham, A., Hopkins, P., 2004. The effect of dents in pipelines - guidance in the pipeline defect assessment manual, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 81 pp. 127-139.
5. API Specifications 5L, 2007. Specifications for Line Pipe, 44th Edition, American Petroleum Institute, USA.
6. Hashemi, S.H., 2011. Strength - hardness statistical correlation in API X65 steel, Material Science and Engineering (A) 528, pp. 1648-1655.
7. Hashemi, S.H., Mohammadyani, D., 2012. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 98, pp. 8-15.
8. Rakhshkhorshid, M., Hashemi, S.H., 2013. Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel, Materials Science and Engineering (A) 573, pp. 37-44.
9. Ada, H. 2006. Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak

- yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
10. Migahed, M.A., Al-Sabagh, A.M., Khamis, E.A., Zaki, E.G., 2015. Quantum Chemical calculations, synthesis and corrosion inhibition efficiency of ethoxylated-[2-(2-{2-[2-(2-benzene sulfonyl amino ethylamino) - ethylamino] -ethylamino} - ethylamino - ethyl] - 4 - alkyl benzene sulfonamide on API X65 steel surface under H2S environment, *Journal of Molecular Liquids*, 212, pp. 360–371.
 11. Rani, B.E., Amitha. and Basu, Bharathibai, J., 2009. Green corrosion inhibitors - an overview, Technical Report, National Aerospace Laboratories, Bangalore, India.
 12. Shaban, M., Eghbali, B., 2010. Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel, *Materials Science and Engineering (A)*, 527, pp. 4320–4325.
 13. Jin, W., Jun, C., Zhen, Z., Xue-yu, R.J., 2008. *Iron Steel Res. Int.* 15, pp. 78–81.
 14. Moradpour, M.A., Hashemi, S.H., Khalili, K., 2015. Multi - objective Optimization of Welding Parameters in Submerged Arc Welding of API X65 Steel Plates, *Journal of Iron and Steel Research*, 22, pp. 870-878.
 15. Kirkwood, P.R., Prosser, K., Boothby, P.J., 1984. The Properties of Pipeline Girth Weld Produced by Arcwelding Process, *Welding in Energy Related Projects*, pp. 359-377.
 16. Keehan, E., 2004. Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals Department of Experimental Physics, Göteborg University, pp. 1-72.
 17. Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Gülsün, M., 2016. Investigation of Microstructure and Mechanic Properties of Petroleum and Natural Gas Pipeline Weldment by Submerged Welding Processes, *Journal of Polytechnic*, 19 (3) : 275-282.
 18. Ada H., Aksöz, S., Özer, A., Candan, İ., 2016. Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Welded Region of API 5L X80 Steel Merged by Submerged Arc Welding Method, ICAT 2016 International Conference on Advances Technology and Science, Konya, 309.
 19. Aucott, L.A., Wen, S.W., Dong, H. 2015. The role of Ti carbo nitride precipitates on fusion zone strength - toughness in submerged arc welded pipeline joints, *Materials Science and Engineering (A)*, 622, pp. 194–203.
 20. Ju, J.B., Kim, W., Jang, J., 2012. Variations in DBTT and CTOD with in weld heat affected zone of API X65 pipeline steel, *Materials Science and Engineering (A)*, 546, pp. 258–262.
 21. Shanmugam, S., Misra, R.D.K., Hartmann, J., Jansto, S.G., 2006. Microstructure of high strength niobium containing pipeline steel, *Materials Science and Engineering (A)*, 441, pp. 215-229,
 22. Hashemi, S.H., Mohammadyani, D. 2012. Characterisation of weldment hardness, impactenergy and microstructure in API X65 steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, pp. 8-15.
 23. Easterling, K., 1992. Introduction to the physical metallurgy of welding, Butterworth-Heinemann; England.
 24. Sulea, J., Gangulya, S., Coules, H., Pirling, T., 2015. Application of local mechanical tensioning and laser processing to refine microstructure and modify residual stres state of a multi - pass 304L austenitic steels welds, *Journal of Manufacturing Processes*, 18, pp. 141–150.
 25. 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 (A)*, 592, pp. 28–39.
 26. Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A., 2005. Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18 (3), 473-480.
 27. Eroğlu, M., Aksoy, M., 2002. 15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, 38.
 28. Pouralihakbar, H., Khalaj, M., Nazerfakhari, M., Khalaj, G., 2015. Artificial Neural Networks

- for Hardness Prediction of HAZ with Chemical Composition and Tensile Test of X70 Pipeline Steels, *Journal of Iron and Steel Research*, 22-5, pp. 446-450.
29. Ada, H., Aksöz, S., Özer, A., 2016. Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Welded Region of API 5L X80 Steel Merged by Gas Metal Arc Welding Method, *International Multidisciplinary Congress of Eurasia 216*, 11st-13th July, Ukraine, 2: 156 – 162.
30. Özer, A., Aksöz, S., Ada, H., Candan, İ., 2016. Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Welded Region of API 5L X80 Steel Merged by Electric Arc Welding Method, *International Multidisciplinary Congress of Eurasia 216*, 11st-13th July, Ukraine, 2: 354-360.
31. Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan B., Candan, İ. 2016. The Investigation of Effect of Welding Process on the Microstructure and Mechanical Properties of API 5L X65 Steel Welded with Electric Arc Welding Method, 4. *International Conference on Welding Technologies and Exhibition*, 11-13 May, Gaziantep, 684-693.
32. Alipooramirabada, H., Paradowska, A., Ghomashchi, R., Kotousova, A., Reid, M., 2015. Quantification of residual stresses in multi - passwelds using neutron diffraction, *Journal of Materials Processing Technology*, 226, pp. 40–49.

