



Makale / Research Paper

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

**Sinan AKSÖZ¹, Hakan ADA¹, Tayfun FİNDİK², Cemil ÇETİNKAYA², Bülent BOSTAN²,
İlhan CANDAN³**

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Tek. Bölümü, 06374, Ankara/TÜRKİYE
²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 06500, Ankara/TÜRKİYE
³Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş., 06930, Ankara/TÜRKİYE
sinanaksoz@gazi.edu.tr

Özet: Bu çalışmada; doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılan API 5L X65 kalitesindeki çelik malzemeler, elektrik ark kaynak yöntemiyle, bazik elektrod kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmelerden alınan numunelere makroyapı – mikroyapı analizleri ve çekme, % uzama, kırılma tokluğu, eğme ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda makro ve mikroyapısal olarak, ana malzeme, ITAB ve kaynak metali incelenmiştir. Mekanik incelemelerde ise, kaynak işleminin mekanik performansı irdelenmiştir. Çekme, çentik darbe, sertlik ve eğme testlerinde kaynak işlemi başarılı bir performans göstermiştir. Çekme testlerinde ortalama 579MPa maksimum çekme kuvveti ve % 22 uzama ile kopma ana malzemelerde gerçekleşerek, çalışmada istenilen mukavemet özelliklerinin sağlandığı tespit edilmiştir. 0°C’de yapılan çentik-darbe deneylerinde ise ortalama 74 Joule’ lük bir kırılma tokluğu enerjisi ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değeri kaynak metalinde 310 HV olarak ölçülürken, en düşük değer ise yaklaşık 205 HV olarak ITAB’da ölçülmüştür. Eğme testlerinde ise kaynaklı bölgede herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Sonuçlar incelendiğinde; kaynak işleminin kendinden beklenen özellikleri sergileyerek, başarılı bir mekanik tavır gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: API 5L X65, elektrik ark kaynağı, bazik elektrot, mikroyapı, mekanik özellikler.

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

Abstract: In this study, API 5L X65 steel pipes, used in natural gas and oil pipelines, was welded by the SMAW method using alkaline electrode. The microstructure and mechanical properties (tensile, % elongation, fracture toughness, hardness) of welded samples were investigated. In the experimental studies, the macro and microstructure properties of main material, HAZ and weld metal zones were examined. In the mechanical examinations, the mechanical performance of the welding process was examined. The welding process showed successful performance in the tensile, charpy impact, hardness and guided bend tests. Average 579 MPa maximum tensile strength and %22 elongation was measured in the tensile tests and the rupture occurred in the main material. It was found that the desired strength properties was provided in this study. The fracture toughness energy was measured average 74 Joule in the charpy impact tests was performed at 0°C. The highest hardness result was measured as 310 HV in the weld metal. The lowest hardness value was measured as approximately 205 HV in the HAZ. It has not found any error in the weld zone in the bend tests. All results obtained from experimental studies have showed that the welding process exhibits expected mechanic behavior.

Keywords: API 5L X65, electric arc welding, alkaline electrode, microstructure, mechanical properties.

Bu makaleye atıf yapmak için

Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., “API 5L X65 Çeliklerinin Elektrik Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde, Kaynak İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi” El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2017, 4(1); 72-81.

How to cite this article

Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., “The Investigation of Effect of Welding Process on The Microstructure and Mechanical Properties of API 5L X65 Steel Welded with Electric Arc Welding Method” El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2017, 4(1); 72-81.

1. Giriş

Boru hattı ile taşıma sistemleri; gaz, petrol, su ya da buhar gibi ürünlerin taşınmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Plastik deformasyona neden olabilecek doğa olaylarının (toprak kayması, göçük, v.b.) oluşabilme ihtimali, boru hattı tasarımı ve malzeme seçiminin önemini ortaya koymaktadır. Boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemleri, dışarıdan gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olmalıdır [1-4].

API borularında aranan kimyasal ve mekanik özellikler API 5L standardında belirtilmiştir. API 5L X65 çelikleri, özellikle doğalgaz ve petrol iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik (HSLA) serilerinden biridir [5]. X65 çelikleri, boru hatlarında tercih edilen, ince taneli asiküler ferrit yapının hâkim olduğu, kontrollü termomekanik haddeme yöntemi ile üretilen karbon çeliklerinden biridir [6-8]. Yüksek mekanik özellikleri, düşük maliyetleri ve kolay elde edilebilmeleri nedeniyle X65 çelikleri boru hattı taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır [9-11].

Boru hatları için üretilen borular, genellikle tozaltı kaynak yöntemi ile üretilmektedir. Boruların sahada birleştirme işlemleri ise daha çok örtülü elektrodla elektrik ark kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Örtülü elektrodla ark kaynağı manuel bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercihine ve kaynakçının maharetine bağlıdır. Yöntemde kullanılan örtülü elektrot, kaynak metali (KM) işlevini görmektedir. Demir esaslı veya demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında 1.2 mm ve daha kalın parçalara her pozisyonda kaynak yapılabilmektedir. Elektrik ark kaynağında ark, iş parçası ve elektrodu ergiterek KM haline dönüşür. Elektrot örtüsü de aynı anda yanarak erir. Açığa çıkan gaz ark bölgesini korur ve oluşan cüruf da kaynak dikişini örterek kaynak bölgesinin korunmasını sağlar [12].

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 elektrik ark 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. Deneysel Çalışmalar

2.1. Materyal ve Metot

Çalışmada, termomekanik haddemeye tabi tutulmuş, sürekli döküm yolu ile üretilen, hidrojen kırılma hızına karşı yüksek mukavemetli API 5L standartlarında, X65 kalitesinde ve 16 mm et kalınlığında çelik kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan API5L X65 malzemesine ait kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. X65 malzeme kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

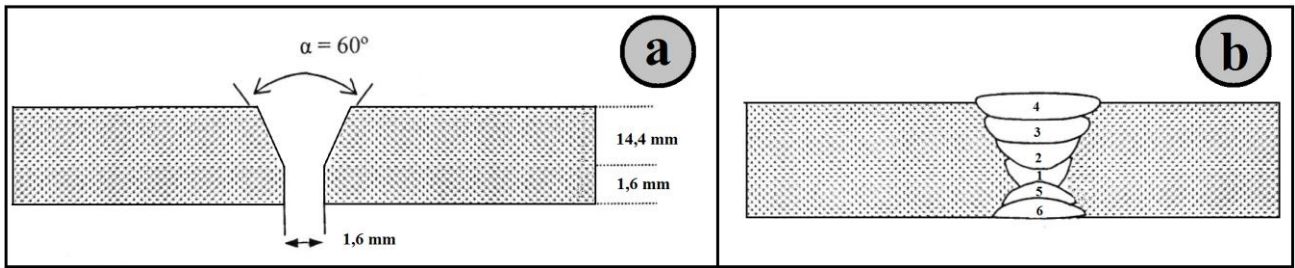
C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Karbon Eşdeğerliği (C _{es})	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	% Uzama (min)	Darbe Enerjisi (Joule) (-60°C)
0,12	0,45	1,60	0,025	0,015	0,43	450 – 600	535 - 760	24	54

İlave tel olarak, Tablo 2’de kimyasal ve mekanik özellikleri verilen 4 mm çapında E9018-G bazik elektrod kullanılmıştır.

Tablo 2. E9018-G ilave telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

İlave Tel	C	Si	Mn	Ni	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	% Uzama (min)	Darbe Enerjisi (Joule) (-60°C)
E9018-G	0,08	0,4	1,5	0,80	530	620	21	60

Kaynaklı birleştirmeler 6 pasoda gerçekleştirilmiştir. Kaynak ağzı geometrisi ve paso sıralaması sırasıyla Şekil 1 a ve b'de görülmektedir. Kaynaklı birleştirmeler, Emek Boru Mak. San. ve Tic. A.Ş.'nde (Ankara) Tablo 3'deki kaynak parametrelerine göre, elektrik ark kaynak yöntemi ile doğru akımda (DC) ve pozitif kutuplamada 1G pozisyonun gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce parçalar 80°C'de önısıtma işlemine tabi tutulmuş ve pasolar arasındaki sıcaklık maksimum 200°C'de tutulmuştur.



Şekil 1.a) Kaynak ağzı geometrisi; b) kaynak pasoları

Tablo 3. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri

Paso No	Akım Şiddeti (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (cm/dak)
1	175 - 185	22 - 24	13,3
2	180 - 195	23 - 26	14,4
3	180 - 190	22 - 26	13,5
4	175 - 185	22 - 26	11,4
5	175 - 185	22 - 24	13,3
6	180 - 195	23 - 26	14,4

Tablo 3 baz alınarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerden çentik darbe, çekme ve eğme deneyleri için 5'er adet numune alınmıştır. Ayrıca mikroyapı, makroyapı ve mikrosertlik incelemeleri için numune alınmıştır. Metalografik incelemeler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında, mekanik testler ise Emek Boru Makine San. ve Tic. A.Ş. Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

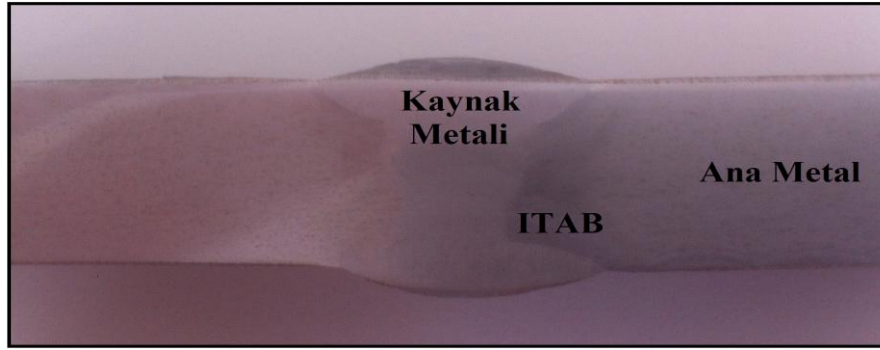
Metalografik işlemler için numuneler sırasıyla; 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalanan numunelere 6 ve 3 µm'lik keçelerde parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler daha sonra %3 HNO₃ (Nital) dağlayıcı ile dağlanarak makro ve mikro incelemelere hazır hale getirilmiştir. Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Leica marka optik mikroskop yardımı ile alınmış olup, mikrosertlik değerleri ise, makro ve mikro ölçümler yapılabilen, Shimadzu marka sertlik cihazında 0,5 ve 1 kg yükler kullanılarak alınmıştır.

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, 0 °C’de gerçekleştirilmiş olup, numuneler cihaza çentik eksenine mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüz, çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yapılmıştır.

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

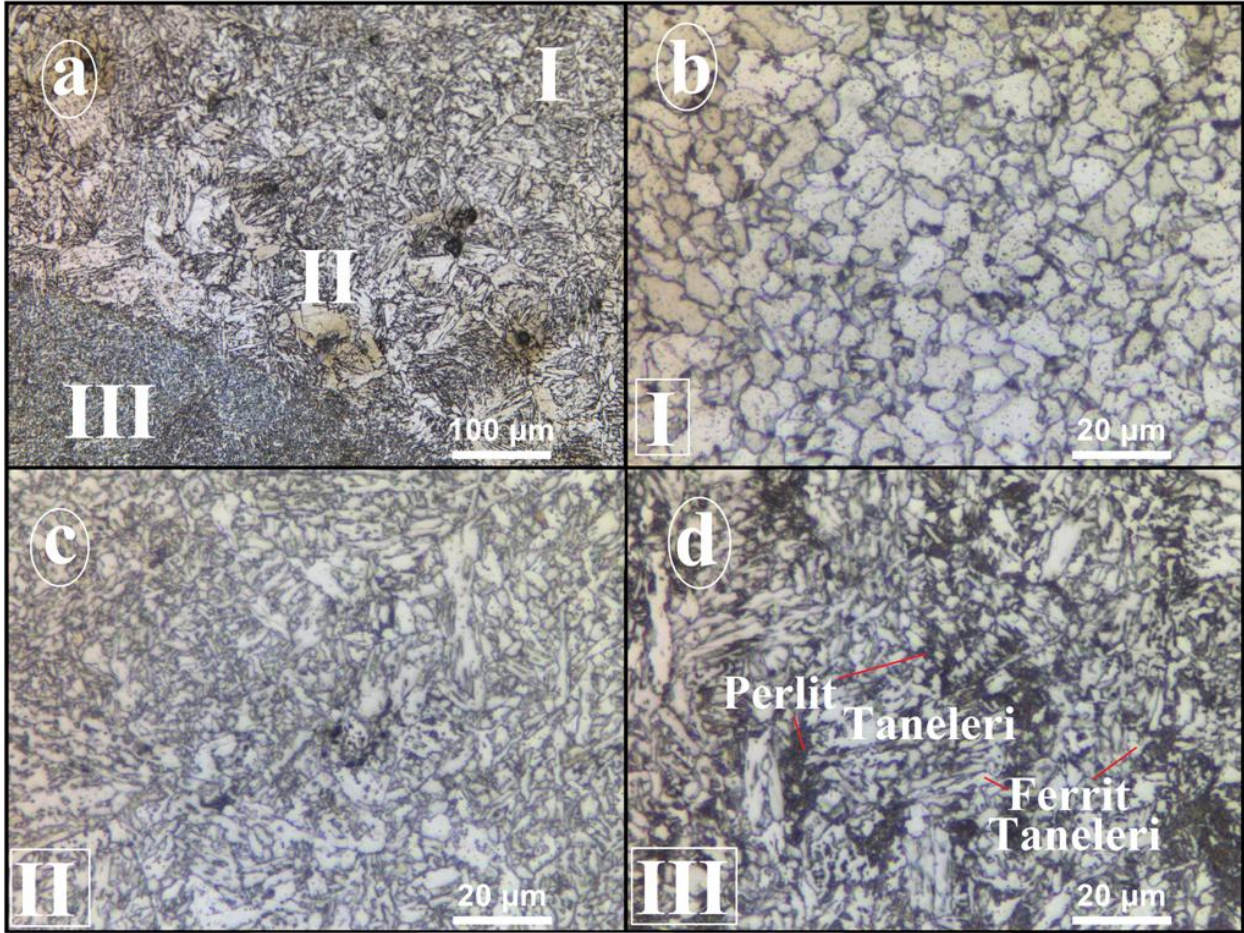
Şekil 2’de kaynaklı birleştirmeden alınan numunenin makroyapı fotoğrafı görülmektedir. Makroyapı fotoğrafı incelendiğinde, ana malzeme, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve KM birbirinden ayırt edilebilecek şekilde görülebilmektedir. 6 pasoda gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işleminde (Şekil 1.b), paso geçişleri de görülebilmektedir. İlave metal ile birlikte ana metalden ergiyerek kopan taneler yoğun türbülansın da etkisiyle karışarak katılmıştır. Katılan ana metal ve ilave metalde oluşan yapı KM’yi oluşturmuştur. Ana metal ve KM arasında kalan, ergime - katılma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan bölge ise ITAB’dır. Bu bölge de makroyapı fotoğrafında görülebilmektedir [13-16].



Şekil 2. X65 malzeme makroyapı fotoğrafı

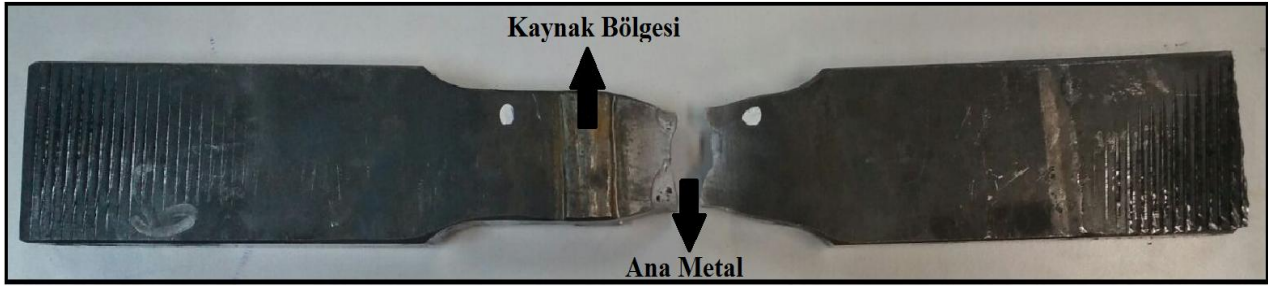
Şekil 3’te ise mikroyapı görüntüleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Şekil 3.a’da 100 µm’de ölçeklendirilmiş mikroyapı fotoğrafında ana metal, ITAB ve KM mikroyapısı birlikte görülmektedir. Şekil 3.b’de ana metal, Şekil 3.c’de ITAB ve Şekil 3.d’de ise KM mikroyapısı 20 µm olarak ölçekli fotoğraflar verilmiştir.

Şekil 3.a’da, ana metal, ITAB ve KM mikroyapısı 100 µm ölçekli olarak bir arada verilmiştir. I, II ve III numara ile adlandırılan bölgeler ise sırasıyla; ana metal, ITAB ve KM bölgelerini temsil etmektedir. I ve III numara ile gösterilen bölgelerde ana metal ve KM tane yapılarının eşeksenel olarak yönlendiği görülebilmektedir. Fakat ana metal taneleri, KM tanelerine göre daha iri tanelerden oluşmaktadır. Buna etken ise KM tanelerinde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak asiküler ferrit ve martensit oluşumudur. Asiküler ferrit ve martensit daha ince taneli bir yapının oluşmasını sağlamaktadır [7,17]. Yapılan çalışmada, ana metal ve KM tanelerinin eş eksenli yapılardan oluştuğu yine fotoğraf üzerinden görülmektedir [18]. ITAB’da ise ısının etkisi ile ana metal ve KM’de oluşan yapılardan daha farklı yapıların oluştuğu Şekil 3.c’de verilen II numaralı bölgede açıkça görülmektedir. Bu bölgedeki ITAB yapısında dendritik tanelerin, ana metal yönünden KM yönüne doğru uzadığı görülmektedir. Dendritik yapının hâkim olduğu ITAB tane yapısı içerisinde yer yer iğnemsî yapıların (widmanstätten ferrit) oluştuğu da tespit edilmiştir [19]. Ayrıca KM içerisinde sütunsal ferrit tanelerinin yoğun olarak bulunduğu görülmekte olup bu duruma ise artan paso sayısının artmasıyla birlikte ısı girdisinde meydana gelen artış ve aşırı soğuma hızlarının neden olabileceği düşünülmektedir [20].



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

Çekme deney sonuçları incelendiğinde (Tablo 4), numunelerin hepsinde kopmanın ana metalden olduğu ve kaynaklı yapıda herhangi bir kopmanın meydana gelmediği tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu durum; pratikte kaynak işleminin başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. Kopma işleminin ana malzemede meydana gelmesi, mekanik yüklemelerde dayanımın KM’de, ana malzemeye göre daha iyi tavırlar sergilediğini gösteren bir durumdur. Buna sebep olarak ise kaynaklı bölgede yüksek ısı girdileri ve hızlı soğumadan kaynaklanan ince taneli ve iğnemsî yapıların oluşması gösterilebilir. Oluşan ince taneli yapıların mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir [21]. İnce taneli yapılar deformasyona karşı mukavemet gösterdiği için kopma KM’de gerçekleşmeyip, deformasyonun nispeten daha kolay olduğu ve daha iri tane yapısına sahip olan ana metalde meydana gelmiştir. Kaynaklı bölgenin çekme testi işlemlerinde kaynaklı çekme numunelerinin % uzama değerleri, ana malzemeye oranla daha düşük çıkmıştır. Buna paralel olarak kaynaklı numunenin, çekme mukavemetinin artması yine kaynaklı bölgenin deformasyona karşı gösterdiği direnç nedeniyledir [22,23]. Çekme verileri mukayese edildiğinde, maksimum çekme mukavemeti değerinin en yüksek olduğu numune 590MPa dayanım sergileyen 1 numaralı numunedir. En düşük maksimum çekme mukavemetinin ise 572 MPa ile 2 numaralı numunede gerçekleştiği görülebilmektedir. 4 numaralı numunede %19 ile en düşük uzama değerleri görülürken, en yüksek değer % 24 uzama ile 3 nolu numunede görülmektedir. Ortalama değerler ise maksimum çekme mukavemeti için 579 MPa, % uzama değeri için ise % 22’dir.

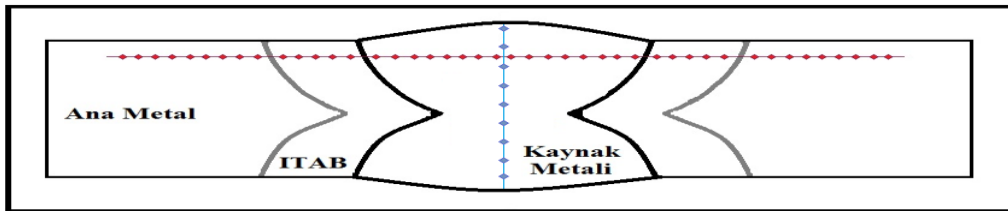


Şekil 4. Çekme testi uygulanmış numune

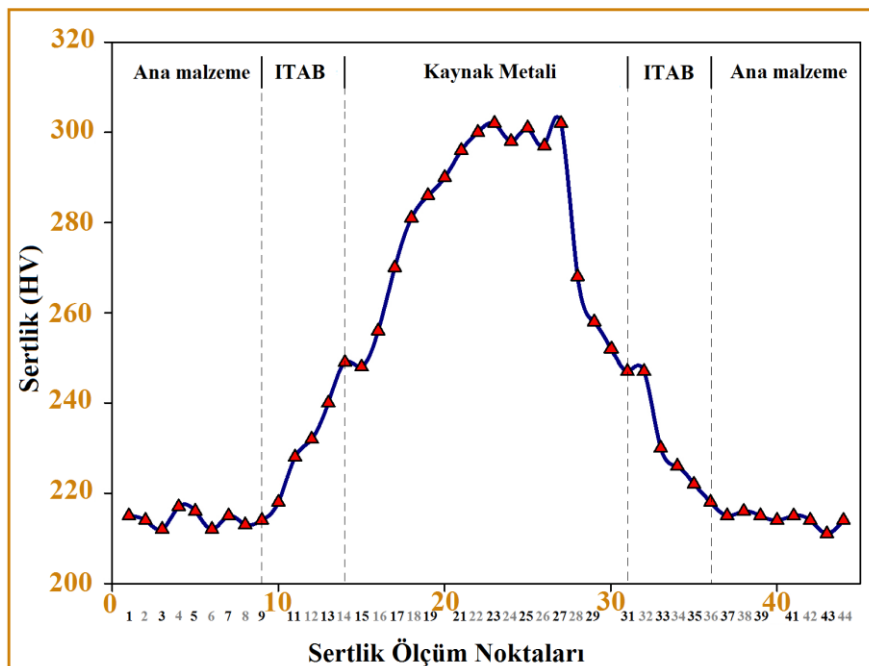
Tablo 4. Çekme testi sonuçları

Numune	Maximum Çekme Dayanımı (Mpa)	% Uzama	Kırılma Bölgesi
1	590	22	Ana Malzeme
2	572	23	Ana Malzeme
3	566	24	Ana Malzeme
4	581	19	Ana Malzeme
5	585	20	Ana Malzeme
Ortalama	579	22	Ana Malzeme

Şekil 5’de şematik olarak gösterilen noktalar üzerinden sertlik ölçümleri alınmıştır. Kaynak işlemi sonucunda oluşan farklı mikroyapıların (ana metal, ITAB, KM) sertlik davranışını tespit etmek için enine 31 noktadan ölçüm yapılmıştır. Kaynak pasolarının, KM sertliği üzerine etkilerini tespit etmek için ise, KM içerisinde 10 farklı noktadan boyuna sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik sonuçları Şekil 6’daki grafikte görüldüğü gibidir.



Şekil 5. Sertlik alınan bölgelerin şematik gösterimi



Şekil 6. Sertlik grafiği

Çalışmada ölçülen sertlik verileri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerlerine kaynak bölgesinde ulaşıldığı görülürken, en düşük sertlik değerleri ise ana metal yapısı içerisinde ölçülmüştür (Şekil 6). KM'de yüksek sertlik değerlerinin oluşmasına, aşırı ısınma ve hızlı soğuma ile birlikte meydana gelen ince taneli yapıların sebep olduğu düşünülmektedir. İncelenen mikroyapı fotoğraflarında da KM'nde ince taneli ve eşksenel yapıların varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 3). Tüm kaynak bölgelerinin enine incelendiği ölçümlerde en yüksek sertlik değeri KM'de 305 HV olarak, en düşük değerler ise ana metalde yaklaşık 210 HV olarak ölçülmüştür [24 – 27].

Tablo 5'de KM içinden boyuna alınan sertlik ölçümleri verilmiştir. Veriler irdelendiğinde; KM sertliğinde yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Yapılan ölçümlerde, en yüksek sertlik değeri 318 HV, en düşük sertlik değeri de 267 HV olarak elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerindeki bu farklılıkların, kaynak işleminin 6 pasoda gerçekleştirilmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Çok pasolu kaynak işlemleri esnasında ergime ve katılaşma işlemleri birden fazla kez gerçekleşir. Çok pasolu kaynak işlemleri, yüksek ısı girdisine ve soğuma hızlarına sebep olduğu için KM tane yapısının kontrollü ve homojen oluşumunu engeller. Bu sonuçlar ise KM içerisinde farklı sertlik değerleri oluşmasına neden olmuştur [28].

Tablo 5. Kaynak metali boyuna sertlik sonuçları

Sertlik Bölgesi	a	b	c	d	e	f	g	h	ı	Ort.
Sertlik Değeri (HV)	267	285	310	318	307	285	273	275	268	288

Tablo 6'da 0 °C'de yapılan çentik – darbe deneylerinde elde edilen enerji değerleri verilmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kırılma tokluğunun 80 Joule ile 3 nolu numunede olduğu görülürken, en düşük tokluk değerinin ise 70 Joule ile 1 numaralı numunede oluştuğu görülmüştür. Çentik darbe sonuçlarının ortalaması alındığında ise 74 Joule'lük bir darbe enerjisi elde edilmiştir.

Tablo 6. Numunelere ait çentik - darbe deney sonuçları

Numune No	Enerji (Joule) Test sıcaklığı:0°C
1	70
2	74
3	80
4	72
5	76
Ortalama	74

Tablo 7'de verilen mandrel çapı ve kalıp mesafesinde, kaynaklı malzemelerde makro bir hatanın oluşup oluşmadığını görmek için kaynağın her iki yönüne (kök ve yüzey) uygulanan eğme deneyleri 180° açıda gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda numunelerde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür (Tablo 7). Testler örtülü elektrodla yapılan elektrik ark kaynağı birleştirmelerinin uygun bir şekilde yapıldığını göstermektedir.

Tablo 7. Eğme Testi Parametreleri ve Sonuçları

Numune No	Mandrel Çapı (mm)	Kalıp Mesafesi (mm)	Kök Bükme		Yüzey Bükme	
			Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
1-5	40	63,2	180°	Hata yok	180°	Hata yok

4. Sonuçlar

- Makroyapı fotoğrafı incelendiğinde, ana malzeme, ITAB ve KM birbirinden ayırt edilebilecek şekilde görülmüştür.
- İlave metal ile birlikte ana metalden ergiyerek kopan taneler yoğun türbülansın da etkisiyle karışarak katılmış ve KM yapısını oluşturmuştur.
- I ve III numara ile gösterilen bölgelerde ana metal ve KM tanelerinin benzerlik gösterdiği görülmüştür.
- Ana metal tanelerinin daha iri tanelerden oluştuğu görülürken, KM tanelerinde aşırı ısınma ve hızlı soğuma etkilerine bağlı olarak asiküler ferrit ve martensit oluşumu nedeniyle daha ince taneli bir yapının hâkim olduğu görülmüştür.
- Ana metal ve KM tanelerinin eş eksenli yapılardan oluştuğu görülmüştür.
- ITAB’da ise ısının etkisi ile ana metal ve KM’de oluşan yapılardan daha farklı yapılar oluşmuştur.
- ITAB yapısı içerisinde dendritik ve sütunsal yapıların varlığı görülmüştür.
- Tüm çekme numunelerinde kopma ana malzemede meydana gelmiş, kaynaklı bölgede herhangi bir kopma olmamıştır.
- Çekme testi sonuçları incelendiğinde en yüksek maksimum çekme mukavemeti değerinin 590MPa ile 1 numaralı numunede olduğu görülürken, en düşük maksimum çekme mukavemetinin ise 572 MPa ile 2 numaralı numunede olduğu tespit edilmiştir. 4 numaralı numunede %19 ile en düşük uzama değerleri görülürken, en yüksek değer % 24 uzama ile 3 nolu numunede görülmektedir. Ortalama değerler ise maksimum çekme mukavemeti için 579 MPa, % uzama değeri için ise % 22’tür.
- Tüm kaynak bölgelerinin enine incelendiği sertlik ölçümlerinde, en yüksek sertlik değerlerinin KM içerisinde ölçüldüğü görülürken, en düşük değerler ise ana metal yapısı içerisinde ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri 305 HV olarak KM’de ölçülürken, en düşük değer ise 210 HV olarak ana metalde ölçülmüştür.
- Boyuna alınan sertlik ölçümlerinde; en yüksek sertlik değeri 318 HV ile d noktasında tespit edilirken, en düşük sertlik değeri 267 HV olarak a noktasında elde edilmiştir.
- Çok pasolu kaynak işlemleri, yüksek ısı girdisine ve soğuma hızlarına sebep olduğu için boyuna alınan sertlik sonuçlarında farklı sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
- 0 °C’de yapılan çentik – darbe deneylerinde en yüksek kırılma tokluğunun 80 Joule ile 3 nolu numunede olduğu görülürken, en düşük tokluk değerinin ise 70 Joule ile 1 numaralı numunede oluştuğu görülmüştür. Çentik darbe sonuçlarının ortalaması alındığında ise 74 Joule’lük bir darbe enerjisi elde edilmiştir.
- Eğme testleri sonucunda numunelerde çatlama, yırtılma v.b. hataların oluşmadığı görülmüştür.
- Mekanik test sonuçları, birleştirme işleminin uygun bir şekilde yapıldığını göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] Bai Y., “Pipelines and Risers”, Elsevier, Oxford, UK, (2001).
- [2] Baek J. H., Kim Y. P., Kim K., Kim C.M., Kim W.S., Seok C. S., “Effects of Pre-strain on the Mechanical Properties of API 5L X65 Pipe”, Materials Science and Engineering (A), 2010, 527: 1473-1479.
- [3] Baek J., Kima Y., Kima W., Koo J., Seok C., “Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending”, Materials Science and Engineering (A), 2012, 540: 70–82.
- [4] Cosham A., Hopkins P., “The effect of dents in pipelines - guidance in the pipeline defect assessment manual”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81: 127–139.

- [5] API Specifications 5L, “Specifications for Line Pipe”, 44th Edition, American Petroleum Institute, (2007).
- [6] Hashemi S.H., “Strength - hardness statistical correlation in API X65 steel”, *Material Science and Engineering (A)*, 2011, 528: 1648–1655.
- [7] Hashemi S.H., Mohammadyani D., “Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2012, 98: 8–15.
- [8] Rakhshkhorshid M., Hashemi S.H., “Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel”, *Materials Science and Engineering (A)*, 2013, 573: 37–44.
- [9] Migahed M.A., Al-Sabagh A.M., Khamis E.A., Zaki E.G., “Quantum chemical calculations, synthesis and corrosion inhibition efficiency of ethoxylated-[2-(2-{2-[2-(2-benzenesulfonylaminoethylamino)-ethylamino]-ethylamino}-ethyl)-4-alkylbenzenesulfonamide on API X65 steel surface under H₂S environment”, *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 212: 360–371.
- [10] Ada H., “Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
- [11] Rani B.E., Amitha. and Basu, Bharathibai J., “Green corrosion inhibitors - an overview”, *Technical Report, National Aerospace Laboratories, Bangalore, India*, (2009).
- [12] Kırbaş C., “AISI P11 ve AISI P91 Kalite Dikişsiz Boru Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Gerilme Giderme Tavlama Sıcaklığının Etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).
- [13] Keehan E., “Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals”, *Department of Experimental Physics, Göteborg University*, 2004.
- [14] Aucott L.A., Wen S.W., Dong H., “The role of Ti carbonitride precipitates on fusion zone strength-toughness in submerged arc welded linepipe joints”, *Materials Science and Engineering (A)*, 2015, 622: 194 – 203.
- [15] Ada H., Aksöz S., Fındık T., Çetinkaya C., Gülsün M., “Investigation of Microstructure and Mechanic Properties of Petroleum and Natural Gas Pipeline Weldment by Submerged Welding Processes”, *Journal of Polytechnic*, 2016, 19 (3) : 275-282.
- [16] Ada H., Aksöz S., Özer A., Candan İ., “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, (2016).
- [17] Ju J. B., Kim W., Jang J. “Variations in DBTT and CTOD within weld heat-affected zone of API X65 pipeline steel”, *Materials Science and Engineering (A)*, 2012, 546: 258–262.
- [18] Shanmugam S., Misra R.D.K., Hartmann J., Jansto S.G., “Microstructure of high strength niobium-containing pipeline steel”, *Materials Science and Engineering (A)*, 2006, 441: 215-229.
- [19] Easterling K. “Introduction to the physical metallurgy of welding”, *Butterworth-Heinemann, England*, (1992).
- [20] Sulea J., Gangulya S., Coules H., Pirling T., “Application of local mechanical tensioning and laser processing to refine microstructure and modify residual stress state of a multi-pass 304L austenitic steels welds”, *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 18: 141–150.
- [21] Lehto P., Remes H., Saukkonen T., Hänninen H., Romanoff J., “Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel”, *Materials Science and Engineering (A)*, 2014, 592: 28–39.
- [22] Kahraman N., Gülenç B., Durgutlu A. “Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2005, 18 (3): 473-480.

- [23] Eroğlu M., Aksoy M., “15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi, Ankara, 38 – 45, (2002).
- [24] Pouraliakbar H., Khalaj M., Nazerfakhari M., Khalaj G., “Artificial Neural Networks for Hardness Prediction of HAZ with Chemical Composition and Tensile Test of X70 Pipeline Steels”, Journal of Iron and Steel Research, 2015, 22(5): 446-450.
- [25] Özer A., Aksöz S., Ada H., Candan İ., “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 2016, Odessa - Ukraine, 2:354-360, (2016)
- [26] Ada H., Aksöz S., Özer A., “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 2016, Odessa - Ukraine, 2: 156 – 162, (2016).
- [27] Ada H., Aksöz S., Fındık T., Çetinkaya C., Bostan B., Candan İ., “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”, 4th International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 11-13 May, Gaziantep, 674 – 683, 2016.
- [28] Alipooramirabada H., Paradowska A., Ghomashchi R., Kotousova A., Reid M., “Quantification of residual stresses in multi-pass welds using neutron diffraction”, Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 40–49.