GU J Sci, Part C,5(1): 55-64 (2017)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

dergipark.gov.tr/http-gujsc-gazi-edu-tr

Toz Altı Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen API 5L X70 Kalite Çelik Boruların Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri

Sinan AKSÖZ[1,*], Hakan ADA[1], Alpay ÖZER[1]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara*

Makale Bilgisi

Başvuru:01/10/2016
Kabul:02/02/2017

Anahtar Kelimeler

API 5L X70
Toz Altı Ark Kaynağı
Mekanik Özellikler

Öz

Bu çalışmada; API 5L X70 rulo sac malzemeler toz altı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin makroyapı, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için numunelere çekme, sertlik, Charpy darbe ve eğme testleri uygulanmıştır. Makroyapı incelemeleri birleştirmede tam nüfuziyetin sağlandığını göstermiştir. Mikroyapı fotoğrafları kaynak metalinde farklı büyüklükte tane yapısının, ITAB'da iri taneli bölgede iri ve girift, şekilsiz tane yapısının, ince taneli bölgede ise homojen dağılımlı eş eksenel tane yapısının hâkim olduğunu göstermiştir. Çekme testleriyle kaynaklı birleştirilen numunelerin akma ve maksimum çekme dayanımı değerlerinin ana malzemeden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sertlik testleri sonucuna göre en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinde ölçülmüştür. Charpy darbe testleri en yüksek kırılma tokluğunun ana malzemede, en düşük kırılma tokluğunun ise kaynak metalinde olduğunu göstermiştir.

Microstructure and Mechanical Properties of API 5L X70 Grade Steel Pipes Produced by Submerged Arc Welding Method

Keywords

API 5L X70
Submerged Arc Welding
Mechanical Properties

Abstract

In this study, API 5L X70 steel roll materials welded via submerged arc welding technique (SAW). Macrostructure, microstructure and mechanical properties of welded samples were investigated. Tensile, hardness, Charpy impact and bending tests were performed to determine of mechanical properties. Macrostructure analyses showed that full penetration was achieved on welded parts. Microstructure images showed that fine grain structures were formed in weld metal, large, complex and amorphous grain structures were dominated in the coarse grain region, whereas homogeneously distributed coaxial grain structures were dominated in the fine grained region in HAZ. In addition, it was observed from tensile test that yield and maximum tensile strength values of welded parts were higher than the main metals. According to the hardness tests, the highest hardness values were measured on the weld metal. Charpy impact tests showed that the highest fracture toughness values were measured on the main material, the lowest fracture toughness values were measured on the welded metal.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Boru hattı sistemleri; gaz, petrol ya da buhar gibi akışkanların güvenli bir şekilde taşınmasında yaygın olarak 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 darbelere ve olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [1-6].

Günümüzde hat borularının imalatında kullanılan çelikler API (American Petroleum Institue) standardına göre üretilmektedir. API 5L X70 çelikleri, boru hatlarının yapım işlerinde kullanılan yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik serilerinden biridir [7]. API standardında "X" sınıfında değerlendirilen

*İletişim yazarı, e-mail:sinanaksoz@hotmail.com

malzemelerin ana özelliği, ince taneli ferrit ve perlit yapılarının termomekanik işlemler sonucunda elde edilmesidir. Özellikle yüksek basınçlı boru hatlarında tercih edilen bu malzemeler, mikroyapısında ince taneli asiküler ferritin hâkim olduğu, kontrollü termomekanik haddeleme yöntemi ile üretilen çeliklerdir [8-10]. API çeliklerinde ana mikro alaşım elementi, titanyum ve vanadyum ile kombinasyonu olan niyobyumdur (Nb/V, Nb/Ti, Nb/V/Ti). Bu yapılar çeliklerin akma gerilimini ve tokluğunu olumlu yönde etkilemektedir [11-13]. Bu çelikler düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle günümüzde boru hattı taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır [14-16].

Akışkan taşımacılığında kullanılan hat borularının spiral veya boyuna dikiş yöntemleri ile üretiminde toz altı ark kaynak yöntemi tercih edilen bir birleştirme tekniğidir. Toz altı ark kaynak yöntemi otomatik bir kaynak yöntemi olup, prosesin performans ve başarısı tamamen optimum kaynak parametrelerinin tercihine bağlıdır. Toz altı ark kaynak yöntemi, kalın kesitli malzemelerin kaynağında üstün performans, yüksek metal yığma kapasitesi, düzgün kaynak dikiş formları, yüksek nüfuziyet derinliği, işçilik, enerji, zamandan tasarruf ve yüksek kaynak hızı gibi avantajları nedeniyle günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir [17,18].

Ülkemizde doğalgaz ve petrol boru hatlarının yapım işlerinden sorumlu BOTAŞ'ın kullandığı malzemeler incelendiğinde; genellikle API 5L X52 ve API 5L X65 malzemelerin yoğunlukla kullanıldığı görülmektedir (Örneğin; Doğu Karadeniz Doğalgaz Boru Hattı projesinde API 5L X52, Bakü Tiflis Ceyhan Ham Petrol Boru Hattında ise API 5L X65 malzeme kullanılmıştır). API 5L X70 malzemesi ise yeni bir boru hattı malzemesi olarak geliştirilmiş bir ürün olup, son yıllarda ülkemizde de kullanılmaya başlanmıştır [Trans Anadolu Doğalgaz Boru Hattı Projesi (TANAP)]. Bu nedenle çalışmada; doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılmak üzere üretilmiş API 5L X70 malzemelerin spiral dikiş şeklinde toz altı ark kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği, mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılganlığına karşı yüksek dirençli, API 5L standardında üretilen X70 çeliği, deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deney malzemeleri toz altı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Tablo 1'de API 5L X70 malzemesinin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri verilmiştir. S2Mo kaynak telinin, P223 FX kaynak tozunun ve tel-toz bileşiminin kimyasal analiz sonuçları ise sırasıyla Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 1. *API 5L X70 kalite çeliğin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri (Chemical analysis and mechanical properties of API 5L X70 grade steel)*

Element %	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**$C_{Eş}$**
	0,064	0,226	1,525	0,010	<0,010	0,222	0,012	
	Mo	**Cu**	**Al**	**Ti**	**V**	**Nb**	**W**	
	0,151	0,005	0,038	0,0119	0,029	0,059	<0,003	0,40
	B	**As**	**Sb**	**Sn**	**Pb**	**Ca**	**N**	
	0,0005	<0,002	<0,001	<0,001	<0,001	0,0015	0,0021	

Mekanik özellikler				
API 5L X70	Akma Gerilmesi (min.) MPa	Çekme Gerilmesi (min.) MPa	Akma Gerilmesinin Çekme Gerilmesine Oranı (maks.)	% Uzama
	482	565	0,93	17

Tablo 2. *S2Mo kaynak telinin kimyasal analizi (Chemical analysis of S2Mo welding wire)*

Kaynak Teli	**C**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Cu**
S2Mo	0,087	0,94	0,075	0,0013	0,0014	0,030	0,020	0,50	0,15

Tablo 3. *P223 FX kaynak tozunun kimyasal analizi (Chemical analysis of P223 FX welding flux)*

P223FX	**SiO_2**	**MnO**	**MgO**	**CaF_2**	**NaO**	**Al_2O_3**	**CaO**	**TiO_2**	**K_2O**	**FeO**	**Metal Alaşımı**
%	23	4	21	21	2	20	4	2	1	1	3 Maks.

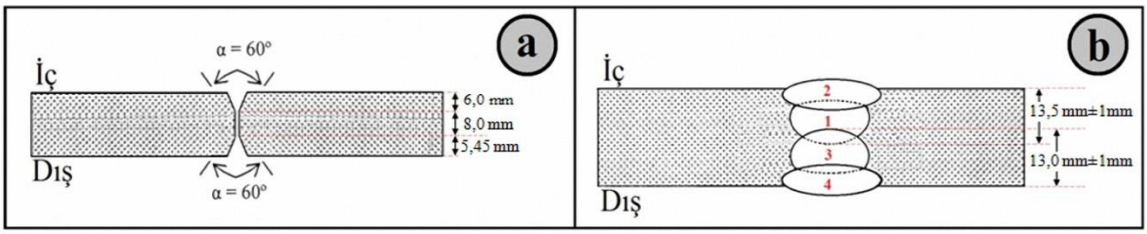
Tablo 4. *Tel-toz (S2Mo – P223 FX) bileşiminin kimyasal analizi(Chemical analysis of wire – flux (S2Mo – P223 FX) combination)*

Tel – Toz Bileşimi	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
S2Mo – P223FX	0,090	1,080	0,160	0,008	0,007	0,030	0,040	0,540	0,10

API 5L X70 yarı mamul çelik sac Tablo 5'deki kaynak parametrelerine uygun olarak, otomatik toz altı ark kaynak makinesinde, spiral dikiş yöntemiyle birleştirilerek boru haline getirilmiştir. Kaynak parametreleri toz altı ark kaynak yöntemi ile boru imalatı gerçekleştiren firmaların fiili olarak kullandığı parametrelerdir. Birleştirme işlemleri 4 pasoda gerçekleştirilmiş olup, kaynak ağzı geometrisi ve paso sıralaması Şekil 1 a-b'de görüldüğü gibidir. Pasolar arası sıcaklık ise maksimum 200°C'de tutulmuştur.

Tablo 5. *Kaynak parametreleri (Welding parameters)*

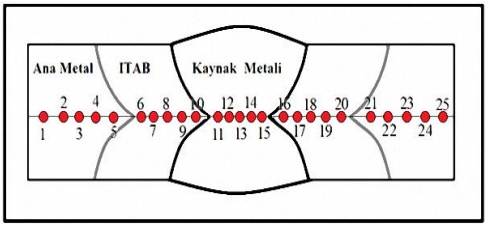
Malzeme	Kaynak Teli / Tozu	Paso No	Tel çapı (mm)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Akım Tipi	Akım Şiddeti (A)	Ark Gerilimi (V)	Isı Girdisi (kJ/cm)
API 5L X70	S2Mo / P223FX	1	4,0	140	DC +	990 – 1210	28 - 34	11,88 – 17,6
		2	4,0	140	AC	612 - 748	28,5 – 34,5	7,4 – 11,0
		3	4,0	140	DC +	1125 - 1375	29,5 – 35,5	14,2 – 20,9
		4	4,0	140	AC	540 - 660	32 - 38	7,4 – 10,7



Şekil 1. *a) Kaynak ağzı geometrisi (Welding groove geometry); b) Kaynak pasosu sıralaması (Weld runs)*

Kaynaklı birleştirmelerden alınan numuneler metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak zımparalanmış, parlatılmış ve % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Hazırlanan numunelerin makro-mikroyapısı incelenmiştir. Ayrıca sertlik, çekme, Charpy darbe ve eğme testleri ile mekanik özellikler belirlenmiştir.

Sertlik testleri Şekil 2'de şematik olarak görüldüğü gibi ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden enine ölçümler alınarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell metodu ile 2,5 mm çapında bilya kullanılarak, 15,25 kg'lık yük altında gerçekleştirilmiştir.



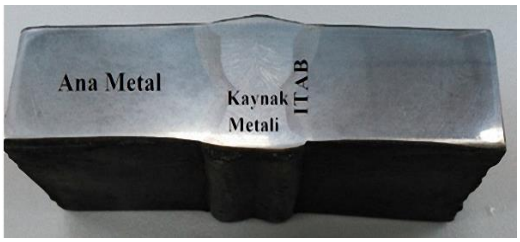
Şekil 2. *Sertlik ölçüm noktaları (Hardness measurement points)*

Ana metal ve kaynaklı numunelerden ASTM E8'e göre çekme testi, ASTM A370'e göre Charpy darbe testi ve ASTM E190'a göre eğme testi numuneleri hazırlanmış ve ilgili testler gerçekleştirilmiştir.

Charpy darbe testi için test sıcaklığı -15 °C olarak belirlenmiştir. ASTM A370 standardında belirtildiği üzere çevresel şartların etkisiyle test sıcaklığı değiştirilebilmektedir. Ülkemizde boru hatlarının geçiş noktalarında genellikle karasal iklimin hâkim olduğu ve servis şartlarında boru hattının maruz kalabileceği en düşük sıcaklığın yaklaşık -15 °C olabileceği düşünülerek test sıcaklığı -15 °C seçilmiştir. Testler için numuneler ana malzeme, kaynak metali, ana metal-kaynak metali ergime sınırı (ES), ergime sınırının 2 mm ilerisi (ES+2) ve ergime sınırının 5 mm ilerisinden (ES+5) 5'er adet alınarak hazırlanmıştır.

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

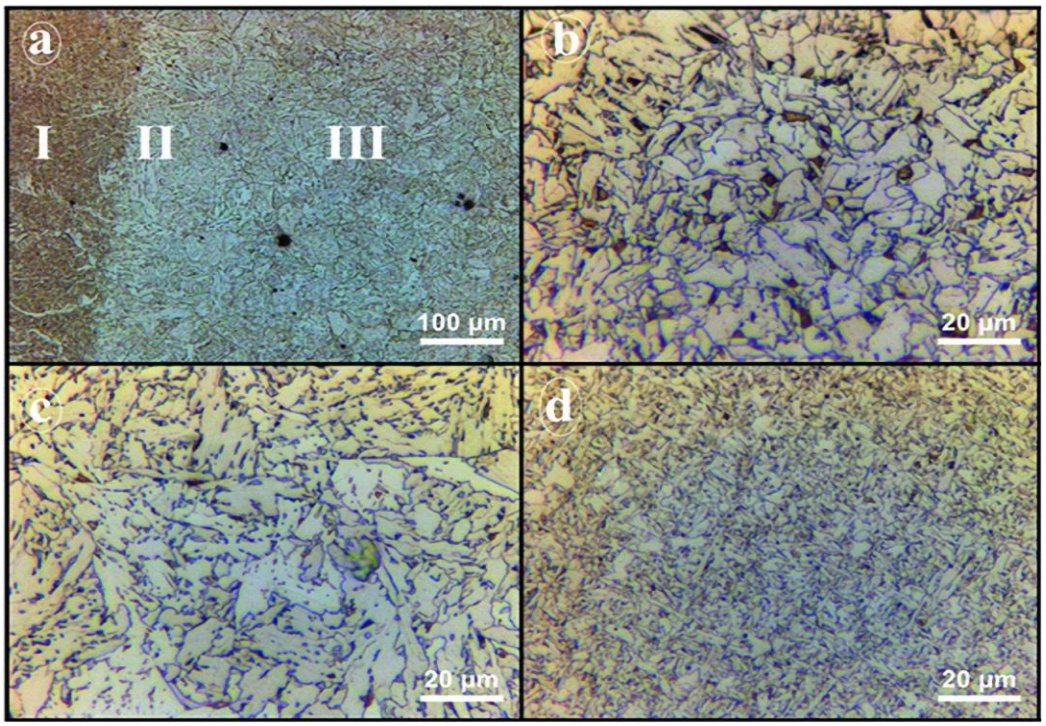
Kaynaklı birleştirme işlemlerinden elde edilen makroyapı görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. Makroyapı görüntüsünden ITAB, kaynak metali ve bölgesel sınırlar net olarak görülmektedir. Ayrıca kaynak metali içerisindeki tanelerin, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönlendiği gözlenmektedir. Makrofotoğraftan birleştirmede tam nüfuziyetin sağlandığı gözlenmiş ve makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (gözenek, kalıntı, çatlak, vb.) rastlanmamıştır. Bu durum seçilen kaynak parametrelerinin doğruluğunun göstergesi olarak söylenebilir.



Şekil 3. *Numune makroyapı fotoğrafı (Macrostructure photo of sample)*

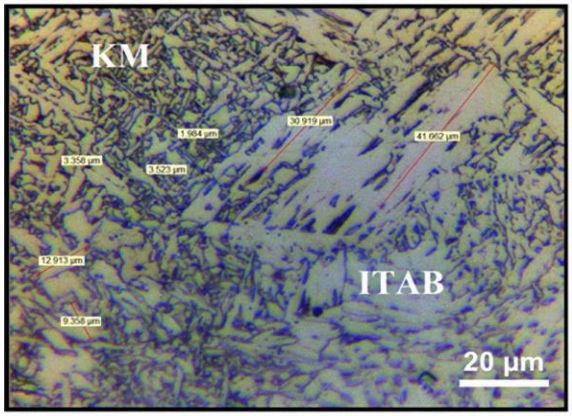
Şekil 4'te numunenin mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.a'da Kaynak metali ve ITAB mikroyapısı bir arada verilirken, Şekil 4.b'de ITAB ince taneli bölge, Şekil 4.c'de ITAB iri taneli bölge ve Şekil 4.d'de ise kaynak metali mikroyapıları görülmektedir.

Şekil 4.a'da I ile belirtilen bölge kaynak metalini; II ile belirtilen bölge ITAB'da iri taneli bölgeyi, III ile belirtilen bölge ise ITAB'da ince taneli bölgeyi göstermektedir. Fotoğraflarda ince taneli bölgede eş eksenli bir yapının, kaynak metalinde katılaşma doğrultusunda yönlenen farklı büyüklükteki tane yapısının ve iri taneli bölgede büyüyen ve irileşen taneler nedeniyle daha iri ve girift yapılı, şekilsiz tane yapısının hâkim olduğu görülmektedir. Kaynak metalinde taneler ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde yönlenirken, yüksek türbülansın etkisiyle kaynak metali tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağılım gösterdiği görülmektedir. Kaynak metalinde (KM) uzun sütunsal ferrit plakaların varlığı da dikkat çekmektedir [19].



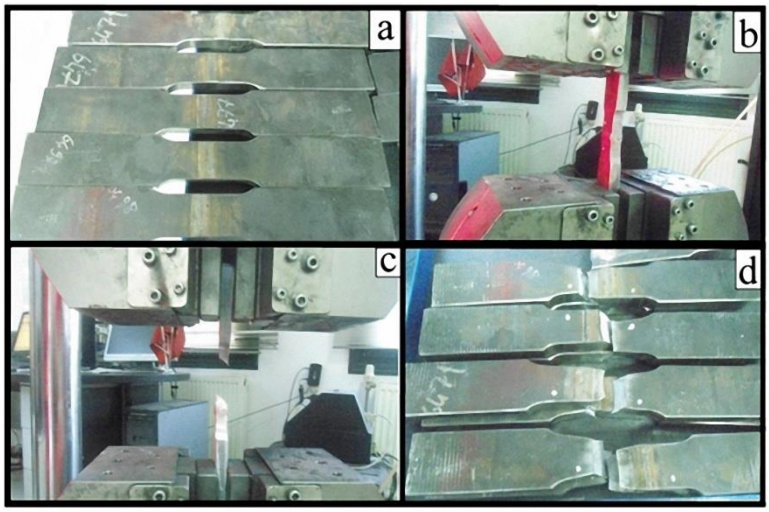
Şekil 4. *a) Kaynak metali (I), ITAB iri taneli bölge (II), ITAB ince taneli bölge (III) (Weld metal (I), HAZ coarse grain region (II), HAZ fine grain region (III); b) ITAB ince taneli bölge (HAZ (fine grain region)); c) ITAB iri taneli bölge (HAZ (coarse grain region)); d) Kaynak metali (Weld metal)*

Şekil 5'te ise numunenin kaynak metali – ITAB (iri taneli bölge) arasındaki, geçiş bölgesinden alınan mikroyapı fotoğrafları görülmekte olup, tanelerin boyutları da fotoğraf üzerinden görülebilmektedir. Fotoğraftan kaynak metali ve ITAB geçiş bölgesinde oluşan girift ve karmaşık tane yapısı nedeniyle belirli boyutlara sahip taneleri tespit etmek oldukça zordur. Fotoğraf üzerinde özellikle en büyük ve en küçük taneler seçilerek, bu tanelerin boyutları mikroskop üzerinde görüntülenmiştir. En büyük tane boyutu ITAB'da yaklaşık 42 µm, en küçük tane boyutu ise KM'de yaklaşık 2 µm olarak ölçülmüştür. ITAB ve KM'de ortalama tane boyutu sırasıyla 36,29 µm ve 6,90 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. *Kaynak metali-ITAB mikroyapı görüntüsü (Microstructure image of weld metal-HAZ)*

Şekil 6'da, ASTM E8'e göre hazırlanan çekme test numuneleri, test öncesi ve sonrası numune fotoğrafları gösterilmiştir. Çekme testlerinde ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerin akma ve maksimum çekme dayanımları ile yüzde uzama değerlerine bakılmıştır. Her numune için 5'er adet çekme testi gerçekleştirilmiş ve testlerin ortalaması alınmıştır. Çekme testi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.



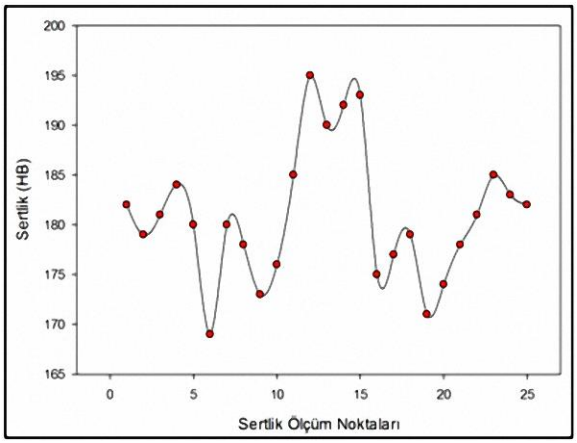
Şekil 6. *a) Çekme test numuneleri (Tensile test samples); b - c) Çekme testi (Tensile test); d) Ana malzemeden kopan kaynaklı test numuneleri (Welded test samples broken from the main material)*

Çekme testi sonuçlarına bakıldığında; ana malzeme ölçüm sonuçları ortalamasında; akma dayanımı 558,85 MPa, maksimum çekme dayanımı 660,65 MPa iken, % uzama değeri %37,46 ve akma/çekme dayanımı oranı 0,85 olarak belirlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerden elde edilen sonuçların ortalamasında ise; akma dayanımı 619,09 MPa, maksimum çekme dayanımı 682,55 MPa, % uzama değeri %22,87 ve akma/çekme dayanımı oranı 0,91 olarak ölçülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerin ortalama akma ve maksimum çekme dayanım değerleri, ana malzemenin ortalama değerlerinden daha yüksektir. % uzama değerleri ise, tam tersine ana malzemede daha yüksek değerlerde ölçülürken, kaynaklı birleştirmelerde daha düşük değerlerde ölçülmüştür. Kaynaklı birleştirme işlemi sırasında oluşan hızlı ısınma ve soğumaya bağlı kaynak metali ve çevresinde oluşan fazlar, tane yapısı, yüksek sertlik değerleri ve kalıntı gerilmeler çekme testi sırasındaki deformasyonu engellemektedir [20]. Bu nedenle kaynaklı birleştirmelerin akma-çekme dayanımı değerleri ana malzemeye oranla daha yüksek, % uzama değerleri ise daha düşük çıkmıştır.

Kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerin tümünde kopma Şekil 6.d'de görüldüğü üzere ITAB'da gerçekleşmiştir. Kaynaklı numunelerin dayanım değerlerinin yüksek çıkmasında kullanılan tel-toz kombinasyonunun da etkisinin olduğu düşünülmektedir. Tablo 1 ve Tablo 4 incelendiğinde; bazı alaşım elementlerinin (C ve Cu) tel-toz kombinasyonundaki oranlarının, X70 malzemesinin bileşimindeki oranlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Kaynak işlemi neticesinde tel ve toz ilavesinin etkisiyle kaynak metalinde alaşım elementlerinin oranları artmıştır. Artan alaşım elementi oranının kaynak metalinin dayanım değerlerini ve sertliğini arttırdığı, kırılma ve tokluk değerlerini ise azalttığı bilinmektedir [21,22].

Tablo 6. *Çekme testi sonuçları (Tensile test results)*

Numune	No	Akma dayanımı (MPa)	Maks. Çekme Dayanımı (MPA)	Yüzde Uzama	Akma / Çekme
Ana Malzeme	1	566,04	663,11	37,33	0,85
	2	569,03	697,16	36,92	0,82
	3	549,29	648,90	38,86	0,85
	4	542,05	649,27	37,61	0,83
	5	567,83	644,80	36,56	0,88
	Ortalama	**558,85**	**660,65**	**37,46**	**0,85**
Kaynaklı bileştirilen numune	1	593,50	680,01	21,55	0,87
	2	621,76	683,87	23,43	0,91
	3	626,61	683,90	22,87	0,92
	4	626,54	683,18	26,62	0,92
	5	627,06	681,81	19,89	0,92
	Ortalama	**619,09**	**682,55**	**22,87**	**0,91**



Şekil 7. *Sertlik testi sonuçları (Hardness test results)*

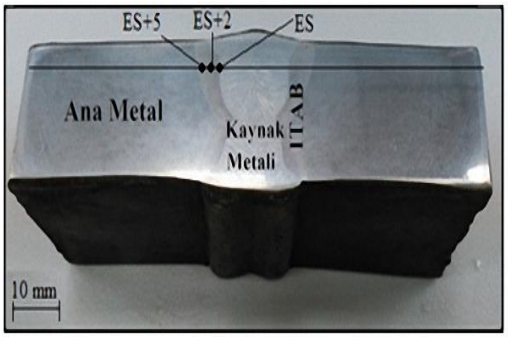
Şekil 7'de ise sertlik testi sonuçları grafik olarak verilmektedir. Sertlik sonuçlarına bakıldığında, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinde elde edilirken, en düşük sertlik değerleri ITAB'da elde edilmiştir. Kaynak metalinde gerçekleşen ısınma ve soğumaya bağlı mikroyapıda oluşan fazların, kaynak bölgesindeki kalıntı gerilmelerin ve ilave tel-toz kombinasyonunun, kaynak metalindeki daha yüksek sertlik değerlerinin oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir [23-29]. ITAB'daki düşük sertliğe ise iri tane yapısının neden olduğu söylenebilir.

Ana malzeme ve kaynaklı birleştirilen malzemelerden elde edilen numunelere Charpy darbe testi uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirilen numunelerin test için hazırlanmasında kaynak metali, ES (Ergime sınırı), ES+2 (Ergime sınırından 2 mm ana malzeme tarafında) ve ES+5 (Ergime sınırından 5 mm ana malzeme tarafında) bölgelerine tek taraflı "V" çentikler açılmıştır. Böylece bu bölgelerin darbe dayanımları belirlenmiştir. Charpy darbe testleri $-15^{\pm 1}$ °C sıcaklıkta uygulanmıştır. Numune çentik açma bölgeleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 9.a ve b'de ise test numunelerinin işlem öncesi ve sonrası fotoğrafları gösterilmiştir.

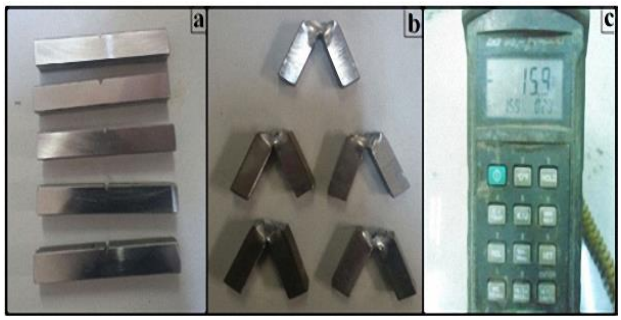
Testler sonucunda elde edilen kırılma tokluğu enerji değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında en yüksek kırılma tokluğu değerlerinin ana malzemede ölçüldüğü görülürken, en düşük kırılma tokluğu değerleri ise kaynak metalinde ölçülmüştür. Sırasıyla kaynak metali, ES, ES+2, ES+5 ve

ana malzeme bölgelerinde gerçekleştirilen kırılma tokluğu enerji ölçümlerinde, enerji miktarının kaynak metalinden ana malzemeye doğru arttığı görülmektedir.

Charpy darbe testleri sonucunda, kaynak metali değerlerinin daha düşük olduğu, ana malzeme değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik sonuçlarında ise bu durumun tam tersi olarak, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinde ölçülmüştür. Darbe testi ve sertlik testi sonuçları arasındaki bu ilişki beklenen bir sonuçtur. Çünkü malzemede sertlik değerini yükselten etkenler kırılma tokluğunu azaltmaktadır [28, 30].



Şekil 8. *Charpy darbe test numunesinde çentik açma bölgeleri (Charpy grooving regions on the sample)*



Şekil 9. *a) Charpy darbe testi numuneleri (Test öncesi) (Charpy impact test samples (Before the test)); b) Charpy darbe testi numuneleri (Test sonrası) (Charpy impact test samples (After the test)); c) Darbe testi esnasında numune sıcaklığı (Temperature of sample during the test)*

Charpy darbe testleri sonucunda en düşük kırılma tokluğu değeri ortalama 125,46 Joule ile KM'de elde edilmiştir. ASTM A370 standardına göre; API 5L X70 malzemesinin -15 ºC'de sahip olabileceği minimum kırılma tokluğu değeri 60 Joule olarak belirtilmiştir. Deneysel olarak bulunan 125,46 Joule değeri standartta istenen değerin oldukça üzerinde elde edildiği için kırılma tokluğu bakımından kaynaklı birleştirme gerekli yeterliliği sağlamıştır.

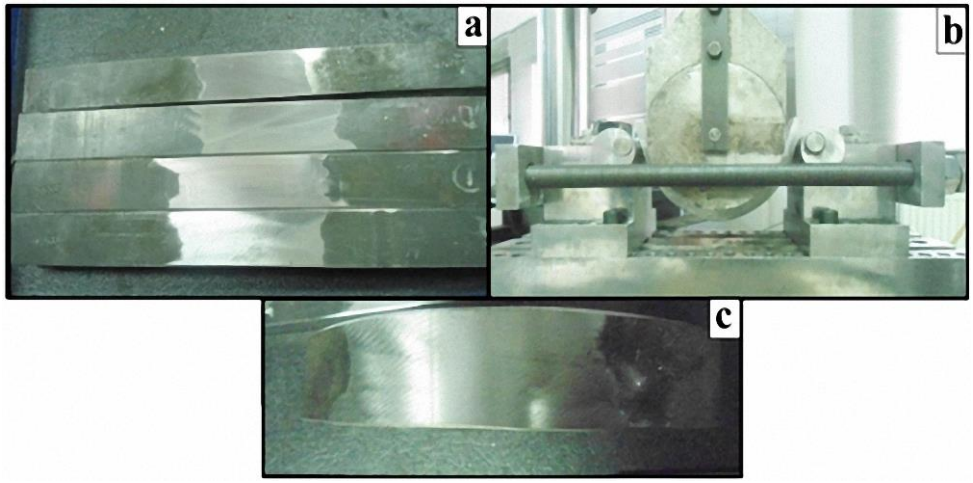
Tablo 7. *Charpy darbe testi sonuçları (Charpy impact test results)*

Numune	**No**	**Darbe Enerjisi (Joule)**				
		Ana Malzeme	**ES**	**ES +2**	**ES +5**	**Kaynak Metali**
Kaynaklı birleştirme numunesi	1	324,51	116,39	184,61	259,69	106,83
	2	308,24	149,23	233,38	261,62	105,73
	3	317,26	167,48	227,47	248,53	129,87
	4	305,18	140,33	252,28	253,30	137,53
	5	314,27	128,88	240,88	257,02	147,36
	Ortalama	**313,89**	**140,46**	**227,72**	**256,03**	**125,46**

Tablo 8. *Eğme testi parametreleri ve sonuçları (Guided bend test parameters and results)*

Numune No (Bölge)	**Mandrel Çapı (mm)**	**Kalıp Mesafesi (mm)**	**Açı**	**Sonuç**
1 – 5 (Kök)	188,5	230,5	180°	Hata yok
1 – 5 (Yüzey)	188,5	230,5	180°	Hata yok

Kaynaklı birleştirilen numuneler son olarak ASTM E190 standardına göre eğme testine tabi tutulmuştur. Tablo 8'de eğme testinde kullanılan mandrel çapı ve kalıp mesafesi verilmiştir. Eğme deneyleri 180° açıda, kök bükme ve yüzey bükme şeklinde uygulanmıştır. Testler sonucunda numunelerde çatlama, yırtılma vb. makro hataların oluşmadığı görülmüştür. Şekil 10'da eğme testi için hazırlanmış numuneler, test işlemi ve test sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 10. *a) Eğme testi numuneleri (Guided bend test samples);b) Eğme testi (Guided bend test); c) Eğme testi uygulanmış numune (Bending test applied sample)*

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Makroyapı fotoğrafından birleştirmede tam nüfuziyetin sağlandığı gözlenmiş ve makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına rastlanmamıştır.
- Mikroyapı fotoğraflarından kaynak metalinde katılaşma doğrultusunda yönlenen ince tane yapısının, ITAB'da iri taneli bölgede iri, girift ve şekilsiz tane yapısının, ince taneli bölgede ise eş eksenel homojen dağılımlı tane yapısının hâkim olduğu gözlenmiştir.
- Çekme testleri sonucunda kaynaklı birleştirilen numunelerin akma ve maksimum çekme dayanımı değerlerinin ana malzemenin değerlerinden daha yüksek olduğu, ortalama % uzama değerlerinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Sertlik testleri sonucuna göre en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinde, en düşük sertlik değerleri ise ITAB bölgesinde tespit edilmiştir.
- Charpy darbe testleri sonucunda en yüksek kırılma tokluğu değerleri ana malzemede, en düşük kırılma tokluğu değerleri ise kaynak metalinde ölçülmüştür.
- Eğme testleri sonucunda numunelerde çatlama, yırtılma vb. makro hataların oluşmadığı görülmüştür.
- Seçilen parametreler ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işlemi kendinden beklenen lokal özellikleri sergilemiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmamızda destek sağlayan EMEK BORU A.Ş. ve çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[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. and Seok C.S., "Effects of pre-strain on the Mechanical Properties of API 5L X65 Pipe" Materials Science and Engineering(A), Cilt 527, 1473-1479, 2010.

[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, Cilt 540, 70–82, 2012.

[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, Cilt 81, 127– 139, 2004.

[5] Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B. and 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, Gaziantep, 674 – 683, 11-13 Mayıs 2016.

[6] Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B. and 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", 4th International Conference on Welding Technologies and Exhibition, Gaziantep, 684 – 693, 11-13 Mayıs 2016.

[7] API Specifications 5L, "Specifications for Line Pipe". 45th Edition, American Petroleum Institute, USA, 2012.

[8] Hashemi, S.H., "Strength - hardness statistical correllation in API X65 steel", Mater. Sci. Eng. A, Cit 528 : 1648–1655, 2011.

[9] Hashemi, S.H., Mohammadyani, D., "Characterisation of weldmenthardness, impactenergyandmicrostructure in API X65 steel", Int. J. Pressure Vessels Piping, Cilt 98 : 8–15, 2012.

[10] Rakhshkhorshid, M., Hashemi, S.H., "Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel", Materials Science & Engineering A, Cilt 573 :37–44, 2013.

[11] Bajicand, N.V. Šijaki-Žeravi, "The analysis of change of structural and mechanical properties of welded joints of microalloyed Nb/V steel grade by changing the composition of filler material", Internat. Conf. On Welding, Belgrade, 2003.

[12] Bajic, N., Sijacki-Zeravcic, V., Rakin, M., and Kovacevic, K., "Structure optimization of weld metal and HAZ in microalloyed high strength steel welded joints", Yucomat 2005, Herceg Novi, (ISBN: 86-80321-08-7), pp. 193–200, 2005.

[13] Radovic, A., Bajic, N., and Grabulov, V., "Specific quality of the weld metal of welded joints of fine-grained microalloyed steels", Zavarivanje 96, 61–72, Belgrade, 1996.

[14] Ada, H. "Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların toz altı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

[15] 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 –benzen esulfonylaminoethylamino) - ethylamino] - ethylamino} - ethylamino) - ethyl] -4 - alkyl benzenesulfonamide on API X65 steel surface under H2S environment", Journal of Molecular Liquids, 212 : 360–371, 2015.

[16] Rani, Amitha, B.E. and Basu, Bharathibai, J., "Green corrosion inhibitors - an overview", Technical Report, National Aerospace Laboratories, Bangalore, India, 2009.

[17] Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., "Toz altı ark kaynağı ile birleştirilen farklı kalınlıktaki Grade A gemi saclarının mekanik özelliklerinin araştırılması", J. New World Sci. Acad. Eng. Sci., Cilt 5, Sayı 2, 348-357, 2010.

[18] Çetinkaya, C., "Orta karbonlu çeliklerin toz altı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerin incelenmesi", Politeknik Dergisi, Cilt 1, Sayı 3-4, 61-67, 1998.

[19] Alizadeh, M., Bordbar, S., "The influence of microstructure on the protective properties of the corrosion product layer generated on the welded API X70 steel in chloride solution", Corrosion Science, Cilt 70, 170–179, 2013.

[20] Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A., "Toz altı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 18, Sayı 3, 473-480, 2005.

[21] Deniz, A, "Çeliklerde Tane Boyutunun Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi", Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 40, Ağustos, 2012.

[22] Kara, R., "Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi", Yüksek lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2005.

[23] Chen, S., Daehn, G.S., Vivek, A., Liu, B., Hansen, S.R., Huang, J. and Lin, S., "Interfacial microstructures and mechanical property of vaporizing foil actuator welding of aluminum alloy to steel", Materials Science & Engineering A, Cilt 659, 12–21, 2016.

[24] Bilmes, P.D., Solari, M., Llorente, C.L. "Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13Cr–NiMo martensitic steel weld metals. Materials Charac., Cilt 46, Sayı 4, 285–296, 2001.

[25] Thibault, D., et al., "Reformed austenite transformation during fatigue crack propagation of 13%Cr–4%Ni stainless steel", Mater. Sci. Eng. A, Cilt 528, No 21, 6519–6526, 2011.

[26] 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", 2nd International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Odessa, 333-338, 11-13 Temmuz, 2016.

[27] 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, 1195 - 1199, 1-3 Eylül, 2016.

[28] Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Gülsün, M., "Tozaltı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Petrol ve Doğalgaz Borularının Mikroyapi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Politeknik Dergisi, Cilt 19, No 3, 275-282, 2016.

[29] 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", 2nd International Multidisciplinary Congress of Eurasia, , Odessa, 158 - 164, 11-13 Temmuz, 2016.

[30] Eroğlu, M, Aksoy, M, "15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mîkroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi, 31-40, 11-14 Kasım, 1999.