



Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü

Surveying of Welding Zone of X60, X65 and X70 Steels Joined with Submerged Arc Welding Method

Ali Akın Akay¹, Yakup Kaya^{2*}, Nizamettin Kahraman²

¹Emek Boru Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ankara

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Karabük

Özet

Bu çalışmada, petrol ve doğal gaz hatlarında kullanılan, düşük alaşımlı, ince taneli ve yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile iki farklı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere, öncelikle yüzey ve yüzey altı kusurların belirlenebilmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden gözle ve ultrasonik muayeneye teknikleri uygulanmış, sonrasında birleştirmelerin dayanımlarını belirlemek amacıyla, çekme ve eğme testi uygulanmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde sertlik ve makroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan gözle ve ultrasonik muayene sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda, tüm numunelerde kopma, ana malzemeden gerçekleşmiş ve bütün bağlantı dayanımları, ana malzemelerden daha yüksek bulunmuştur. Eğme testleri sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak, yırtık vb. hata görülmemiştir. Yapılan sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Makroyapı resimleri incelendiğinde kaynak bölgesinde çatlaklara, yırtılmalara, boşluklara, ergime/nüfuziyet azlığına, curuf kalıntılarına ve yanma oluklarına rastlanılmamıştır. Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, X70 malzemede kullanılan, S2Mo teli ve P223 tozu en verimli mekanik test sonuçları vermiştir.

Anahtar Sözcükler: Tozaltı ark kaynak, Tahribatlı muayene, Tahribatsız muayene, Mekanik özellikler

Abstract

In this study, low alloyed, fine grained, high strength X60, X65 and X70 steels used in petroleum and natural gas pipeline were joined with Submerged Arc Welding by using different type of welding fluxes (LN761 ve P223) and wires (S1 ve S2Mo). Initially, visual and ultrasonic inspection techniques were subjected to welded joints for determining surface and subsurface defects. After that, in order to determine the strength of joints, tensile and bending tests were applied. Furthermore, hardness and macrostructure studies were also carried out on the samples. As a result of the visual and ultrasonic inspection on the welded samples, there were no weld defects on joints were observed. As a result of tensile tests, all the welded tensile test pieces ruptured from base material and the tensile strengths of all the joints were higher than those of the base materials. Bending test results showed that there were not any cracks, tears defects etc. on weld zone. With respect to hardness test, the highest hardness value was measured on weld metal and this was followed by heat affected zone and the base material. As the macrostructure images were analyzed, there were not any cracking, tears, holes, melting / lack of penetration, slag residues and burning grooves were observed in the weld zone. Generally, the joint obtained by X70 material, S2Mo and P223 welding flux had the highest mechanical property.

Keywords: Submerged arc welding, Destructive inspection, Non-destructive inspection, Mechanical properties

1. Giriş

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir. Dikişsiz borular şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borulardır. Dikişli boru imalatında birçok farklı imalat yöntemi mevcuttur. Bu

yöntemler boru üzerindeki boyuna dikişin sayısına ve kullanılan kaynak ekipmanına bağlı olarak farklılık gösterir.

Dikişli borulara örnek olarak; elektrik ark kaynaklı, tozaltı kaynaklı, gaz metal ark kaynaklı, çift dikişli ve spiral dikişli borular verilebilir (Ada 2006, Yıldız 2000). Gaz ve petrol iletim hatlarında çoğunlukla tozaltı kaynak

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: ykaya@karabuk.edu.tr

yöntemi ile üretilen spiral veya düz dikişli borular kullanılmaktadır (Ada 2006, Akay 2012).

Tozaltı ark kaynağında kaynak metali; esas malzeme, ilave metal ve kaynak tozunun kimyasal ve fiziksel reaksiyonu sonucu meydana gelir (Kaya vd. 2010, Kahraman vd. 2005, Durgutlu vd. 2002). Kaynak arkı, otomatik olarak kaynak yerine gelen çıplak bir elektrot ile iş parçası arasında meydana gelir (Kahraman ve Gülenç 2009) ve kaynak arkı taneseli ve eriyebilen bir toz kütlesi tarafından korunur (Ogborn 1993). Kaynak yönteminin yarı-otomatik veya otomatik olarak yapılabilmesi, çok yüksek bir metal biriktirme oranı, mükemmel görünüşlü kaynak dikişleri (Kaya vd. 2010) derin nüfuziyet, enerji ekonomisi, yüksek ergime gücü ve kaynak hızı gibi üstünlükleri bilinmektedir (Çetinkaya 1998).

Bu çalışmada; petrol ve doğal gaz hatları için üretilmiş API 5L standardında, X60, X65 ve X70 kalitesindeki çelik malzemeler, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı kimyasal kompozisyona sahip iki ayrı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemi tamamlanan numunelere, öncelikle gözle muayene ve ultrasonik muayene teknikleri uygulanmış, daha sonra ise mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde sertlik ve makroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, X60, X65 ve X70 çelik malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Birleştirme işlemlerini gerçekleştirmek için S1 ve S2Mo kaynak telleri kullanılmış ve kimyasal bileşimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Ayrıca çalışmada koruyucu toz olarak, tozaltı ark kaynak işlemine fiziksel ve metalurjik bakımdan tesir eden LN761 ve P223 kaynak tozları kullanılmış ve kimyasal bileşimleri de Çizelge 4'de verilmiştir.

API 5L standardında üretilmiş, boyutları 500x175x14.3 mm olan X60, X65 ve X70 malzemelere TS EN ISO 9692-2 standardına uygun olarak 45° kaynak ağı açılmıştır. Örtülü elektrotla puntalanan numuneler, tozaltı kaynağı ile Çizelge 5'te verilen parametrelerde kaynatılmıştır. Tel ve tozlar hariç diğer kaynak parametreleri tüm kaynaklar için sabit tutulmuştur. Kaynak işlemleri esnasında bakır altlık kullanılmış ve birleştirilen numuneler, kaynak sonrasında normal atmosfer şartlarında soğumaya bırakılmıştır.

Tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı kaynak tel ve tozları kullanılarak birleştirilen numuneler, öncelikle uzman bir personel tarafından gözle muayeneleri yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numuneler ultrasonik teste tabi tutulmuştur.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri

Malzeme	Kimyasal Bileşim												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb
X60	0.065	0.191	1.260	0.009	0.005	0.032	0.011	0.034	0.013	0.039	0.019	0.045	0.044
X65	0.073	0.161	1.265	0.011	0.005	0.100	0.013	0.077	0.019	0.036	0.017	0.037	0.042
X70	0.074	0.188	1.413	0.009	0.003	0.172	0.169	<0.0001	0.012	0.027	0.012	0.044	0.034

Çizelge 2. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
X60	595 ± 5	30.5± 2
X65	605 ± 5	31.2± 2
X70	620 ± 5	32.1± 2

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan tellerin kimyasal analizleri

Kullanılan tel	Kimyasal Bileşim												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V	
OE S1	0.075	0.56	0.05	0.007	0.003	0.08	0.02	0.009	0.05	0.001	0.002	0.02	
OE S2Mo	0.09	1.115	0.12	0.006	0.007	0.07	0.05	0.48	0.08	0.003	0.003	0.01	

Çizelge 4. Deneylerde kullanılan kaynak tozlarının kimyasal kompozisyonu

Kullanılan toz	Kimyasal Bileşim (%)										
	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Metal Alaşımı		
LN 761	45	19	22	5	2	2	2	1	6 max		
P 223	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	NaO	Metal Alaşımı
	23	4	21	21	20	4	2	1	1	2	3 max.

Çizelge 5. Kaynak esnasında kullanılan kaynak parametreleri

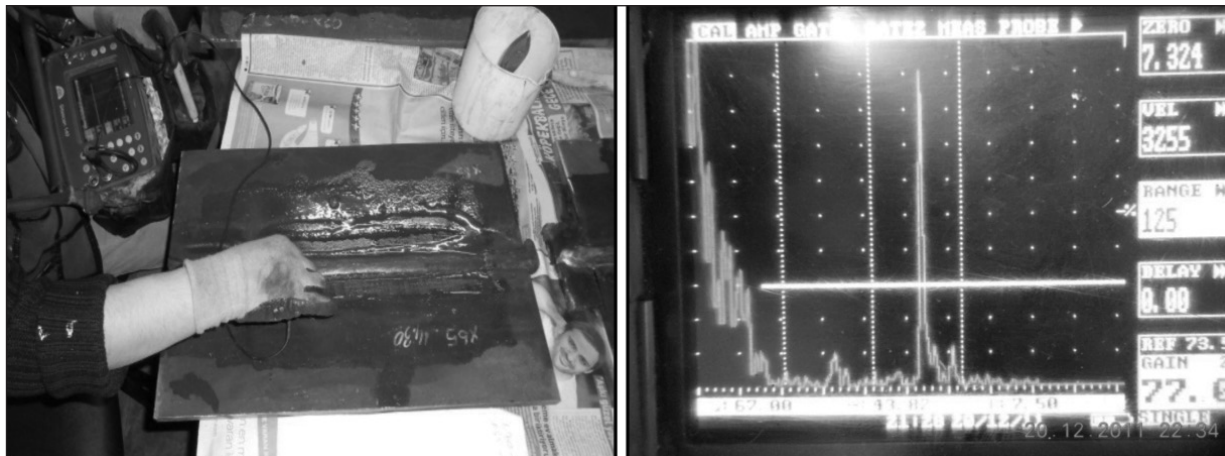
Malzeme	Akımı (A)	Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Tel çapı (mm)	Akım tipi	İlave tel	Kaynak tozu	Isı girdisi (KJ/mm)
X60	800	29.5	15	4.0	DC +	S1	LN 761	9.44
X65								
X70								
X60	800	29.5	15	4.0	DC +	S2Mo	P 223	9.44
X65								
X70								

Ana malzeme, kaynak dikişi ve ITAB'ın ultrasonik ses dalgaları ile muayenesi 60° ve 70° açılı proplar vasıtasıyla Sitescan 140 manuel ultrasonik muayene cihazı ile yapılmıştır. Muayene EN 1712, EN 1713 ve EN 1714 muayene talimatı ve metot 1, kabul seviyesi 2 normları gözetilerek, teste tabi tutulan numuneler konu hakkında gerekli belgeye sahip (NDT Level 2) ultrasonik muayene uzmanı tarafından yapılmış ve değerlendirilmiştir. Şekil 1'de kaynaklı bölgenin ultrasonik muayenesi ve çalışma ekranında görülen form ekosu verilmiştir.

Birleştirilen her malzemeden 3 adet, toplamda ise 18 adet kaynaklı çekme numunesi alınmıştır. Çekme deney numune ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan çekme cihazı Instron marka olup 600 kN yüklemeye kapasitesine sahiptir. Çekme testleri oda sıcaklığında ve 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Eğme numuneleri birleştirilen her malzemeden 1 adet kök, 1 adet keş olmak üzere 2 adet olmak üzere toplamda 12 adet hazırlanmıştır. Kaynak kök ve keşleri freze tezgahında işlenerek giderilmiştir. Numuneler 150x25x14.3 mm ölçülerinde hazırlanmış ve üst mandrel çapı 128.7 mm olarak seçilmiştir. Testler oda sıcaklığında, 5 mm/dk eğme hızında ve numuneler 180° eğilene kadar gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklı numunelerin sertlik ölçümleri Vikers sertlik ölçme metodu ile kaynak metali, ITAB ve ana



Şekil 1. Kaynaklı bölgenin ultrasonik muayenesi ve çalışma ekranında görülen form ekosu.

malzemeyi kapsayacak şekilde, kaynak kesitinden gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri çift yönlü olarak, Şekil 3’de gösterilen noktalardan alınmıştır. Sertlik ölçümleri, kaynak metali merkezinden kep ve kök yönüne doğru 1’er mm aralıklarla 4’er adet olmak üzere toplamda 8 adet olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kaynak metali merkezinden ana malzemeye doğru 12 adet ölçüm alınmıştır. Sertlik ölçme işleminde 10 kg yük uygulanmıştır. Makroyapı fotoğrafları için alınan numuneler sırasıyla 200, 400 ve 600 gritlik zımparalarla zımparalanmış ve dağlanmış.

4. Sonuçlar ve Tartışma

4.1. Gözle Muayene

Tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak yapılan birleştirmeler, yüzey kusurlarının tespiti için gözle muayeneye tabi tutulmuşlardır. Yapılan muayene sonucunda, kaynak yüzeyinde çatlak, yetersiz nüfuziyet ve kökte çökme gibi kaynak hatalarının bulunmadığı tespit edilmiştir. Ancak kaynaklarda, kısmen yanma oluklarının oluştuğu, ancak bu hataların kabul standardının izin verdiği sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir.

4.2. Ultrasonik Muayene

Kaynaklı birleştirmeler, yüzey altı kusurların tespiti için ultrasonik muayeneye tabi tutulmuşlardır. Yapılan ultrasonik muayene sonucunda, tozaltı ark kaynağında oluşabilecek nüfuziyet yetersizliği, yanma olukları, gözenek oluşumu, kalıntılar, çatlaklar vb. hatalar gözlemlenmemiş ve gözetilen normlar dâhilinde kabul

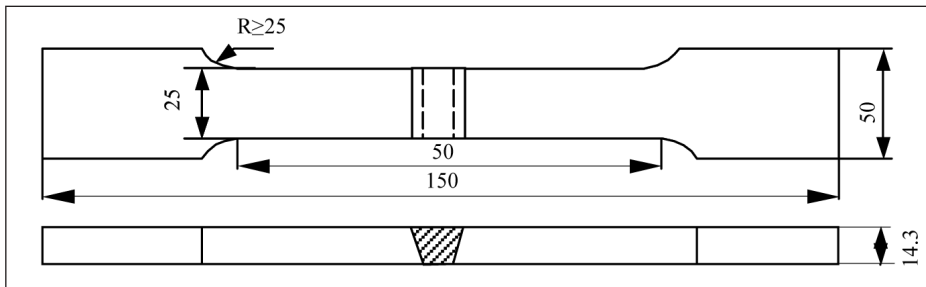
edilmiştir. Şekil 4’te NDT uzmanı tarafından hazırlanmış 6 deney numunesinin raporu verilmiştir.

4.3. Çekme Testi

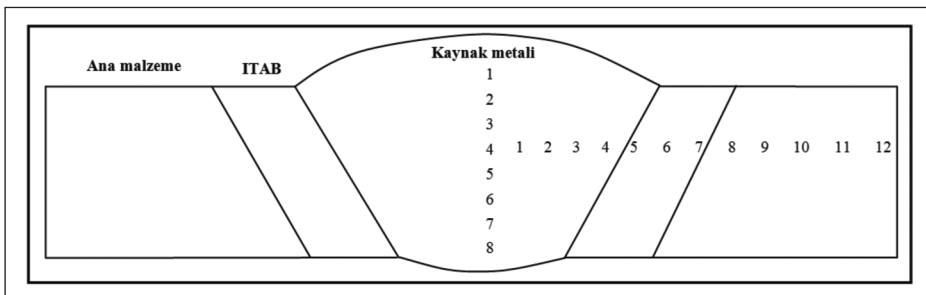
Kaynaklı birleştirmelere uygulanan çekme testi sonucunda bütün numunelerde kopma kaynak bölgesi dışından gerçekleşmiştir. Şekil 5’de çekme testi sonrası çekme numunelerinin kaynak kök ve kep tarafından alınan görüntüleri, Şekil 6’da ise kaynaklı numunelerin gerilim-uzama grafikleri verilmiştir.

Şekil 6’deki kaynaklı bağlantılara ait max. çekme dayanımları incelendiğinde, tüm değerlerin Çizelge 2’de verilen ana malzemelerin max. çekme dayanım değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Çekme deneylerinde kopmanın ana malzemelerden olması, kaynaklı bölgenin çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir.

Yapılan deneylerde, çekme dayanım değerlerinin ana malzemeden daha yüksek değer vermesinin nedeni kaynak metalinin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten kaynaklandığı belirtilmektedir. Genellikle kaynak metali, ana malzemeye nazaran daha yüksek sertlik değerler verir. Kaynaklı malzemenin sünekliği genellikle kaynaklanan ana malzemeye nazaran daha düşük değerler verir. Bu durum özellikle başta kaynak metali olmak üzere ITAB’ı da içine alan kaynak bölgesinin daha az deformasyona uğramasına, dolayısıyla deformasyonun daha dar bir bölgede meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bilindiği üzere aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme



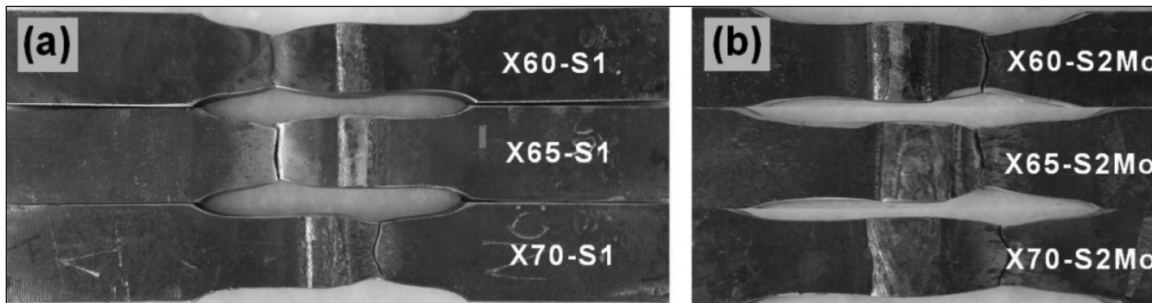
Şekil 2. Çekme deney numune ölçüleri.



Şekil 3. Sertlik ölçme testine ait numune şekli ve sertlik ölçüm noktaları.

Emek Boru Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.		UTLASONİK TEST RAPORU ULTRASONIC TEST REPORT				Date/ Tarih: 20.12.2011											
Muayene Parçası		Tozaltı ark kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş plaka															
Muayene Gerekleri		%100 ultrasonik muayene															
Nominal Boyutlar		500x175x14,3 mm		Malzeme		X60, X65, X70											
Prosedür/Muayene Talimatı		EN 1712, EN 1713, EN 1714		Muayene Sınıfı		Metot 1 kabul seviyesi 2											
Muayene Kapsamı		Kaynak dikisi ve ITAB %100 Ultrasonik muayene															
Cihaz		Sitiescan 140															
Yüzey Koşulları		Pas, tufal vb. temizlendi		Temas Sıvısı		10 numara makine yağı											
Tarama Pozisyonu	Prop				Mesafe Kalibrasyonu		Duyarlılık Kalibrasyonu				Maksimum ses mesafesi için kazanç ayarı						
	Prop tipi/Özellikleri	Demet açısı (°)	Prop indeksi mm	Taban adaptasyonu	Zaman eksenli aralığı	Teknik (s,SPD)	Değerlendirme Tekniği	Kalibrasyon bloğu	Kalibrasyon yansıtıcı	Referans yansıtıcıya olan ses mesafesi	Kayıt seviyesi (DSR, % ref. Yansıtıcı)	Maksimum ses mesafesi	Duyarlılık kalibrasyonu için ilave kazanç ΔV	Transfer düzeltmesi	Diğer düzeltmeler (ör. K1, K2)	Duyarlılık düzeltmesi toplamı	Ses zayıflaması dB/ mm
1	Mnb 70-4	68°	13	+1 EY	125	S	KB/RE	m.p	∅ 1,6 RAD	Sp/2 Sp	DAC (ref)	1,2xsp	+2 db	✓	✓	+2 db	✓
1	Mnb 60-4	58°	12	+1 EY	125	S	KB/RE	m.p	∅ 1,6 RAD	Sp/2 Sp	DAC (ref)	1,2xsp	+2 db	✓	✓	+2 db	✓
2	Mnb 70-4	68°	13	+1 EY	125	S	KB/RE	m.p	∅ 1,6 RAD	Sp/2 Sp	DAC (ref)	1,2xsp	+2 db	✓	✓	+2 db	✓
2	Mnb 60-4	58°	12	+1 EY	125	S	KB/RE	m.p	∅ 1,6 RAD	Sp/2 Sp	DAC (ref)	1,2xsp	+2 db	✓	✓	+2 db	✓
Parça No	Belirti no	Tarama pozisyonu	Prop tipi	Hataların konum ve dağılımı						Sonuç		Değerlendirme		Açıklamalar			
				Ses mesafesi (PD, SPD)	Referans konumda n mesafe	Boyuna	Enine	Temas yüzeyinden olan derinlik	Boyuna hata	Enine hata	Kayıt seviyesinden olan sapma	Kayıt uzunluğu/ alan	Arka duvar yankısında düşme		Kabul	Red	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	

Şekil 4. Ultrasonik muayene raporu.

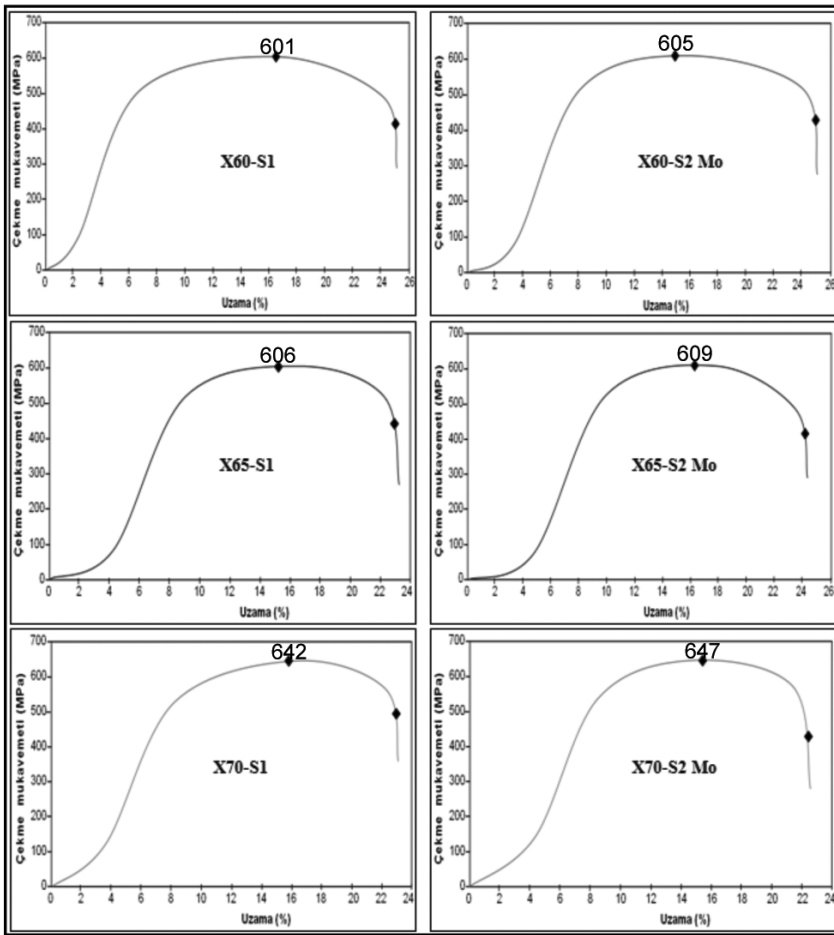


Şekil 5. Çekme testi sonrası numunelerin kopma bölgeleri A) kaynak kökü üstte ve B) kaynak kepi üstte.

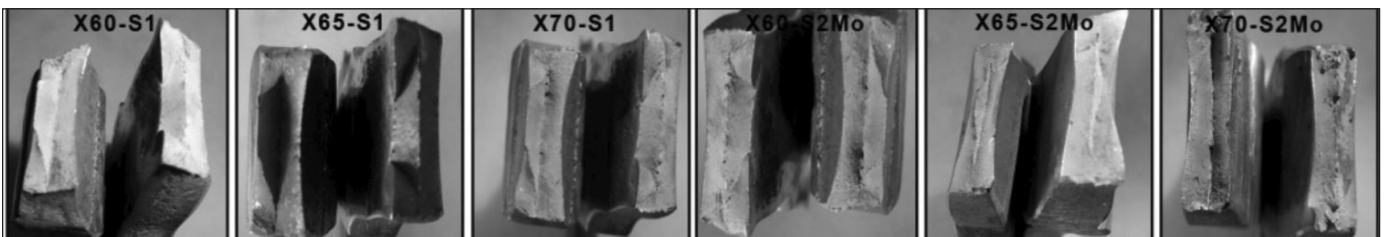
testleri sonucu, eğer çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzeme hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterir. Literatürde verilen bilgilerin, yapılan çalışma ile paralellik gösterdiği görülmektedir (Ada 2006).

Tozaltı ark kaynak yönteminde, diğer kaynak yöntemlerine göre yüksek ısı girdisi meydana gelmektedir. Yüksek ısı girdisi de, malzemenin sertliğinin artmasına sebep olmaktadır. Hem sertlik, hem de çekme dayanımı, metallerin plastik deformasyona direncini gösterdiklerinden, sonuç olarak bu iki değer kabaca orantılıdır. Bir başka ifadeyle, kopma işleminin, kaynak metali veya ITAB yerine, sertliği düşük olan ana malzemeden olması bu sonucu doğrulamaktadır.

Şekil 7'de kaynaklı numunelerin kopma yüzey görüntüleri verilmiştir. Çekme testleri sonucunda, kopmuş kaynaklı numuneler üzerinde, gözle yapılan incelemeler sonucunda kopma türlerinin genelde sünek türde olduğu tespit edilmiştir. Kopma türü sünek olmasına rağmen, kaynaklı numunelerin göstermiş oldukları % uzama miktarının, ana malzemelerden yaklaşık olarak % 25 daha düşük olması bir çelişki olarak görülmemelidir. Çalışmada, çekme numuneleri standarda uygun olarak hazırlandığından, kaynaklı numunelerdeki kaynak bölgesinin sert olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi ise dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olurken, kaynaklı numunelerin % uzama değerlerinin düşük



Şekil 6. Kaynaklı numunelerin gerilim-uzama grafiği.



Şekil 7. Kaynaklı numunelerin kopma yüzey görüntüleri.

çıkmasına neden olmuştur. Daha önce benzer konuda yapılan çalışmada da (Ada 2006), % uzamanın azalmasına sebep olarak, kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramaması gösterilmiştir. Sonuç olarak, kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direncin, çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olduğu belirtilmiştir.

4.4. Eğme Testi

Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak dikişi ve çevresinin şekil değiştirme kabiliyeti ve kaynak dikişi ile esas metal arasında iyi bir bağlantı olup olmadığı bu deneylerle tespit edilmektedir. Nötr eksene göre uygulanan kuvvetlere bakıldığında, eğer sünek bir malzeme test ediliyorsa yüksek basma dayanımı göstermekte ve malzeme hasara uğramadan eğilmektedir. Gevrek bir malzeme test edilirse çekme gerilmesi daha yüksek değerlere ulaşır ve malzeme tamamen eğilmeden belli bir açıda kırılma olur. Eğer test edilen numunede kalınlık yönünde mikro yapısal bir hata yoksa uygulanması gereken basma ve çekme yükleri de artar (Asarkaya 2006).

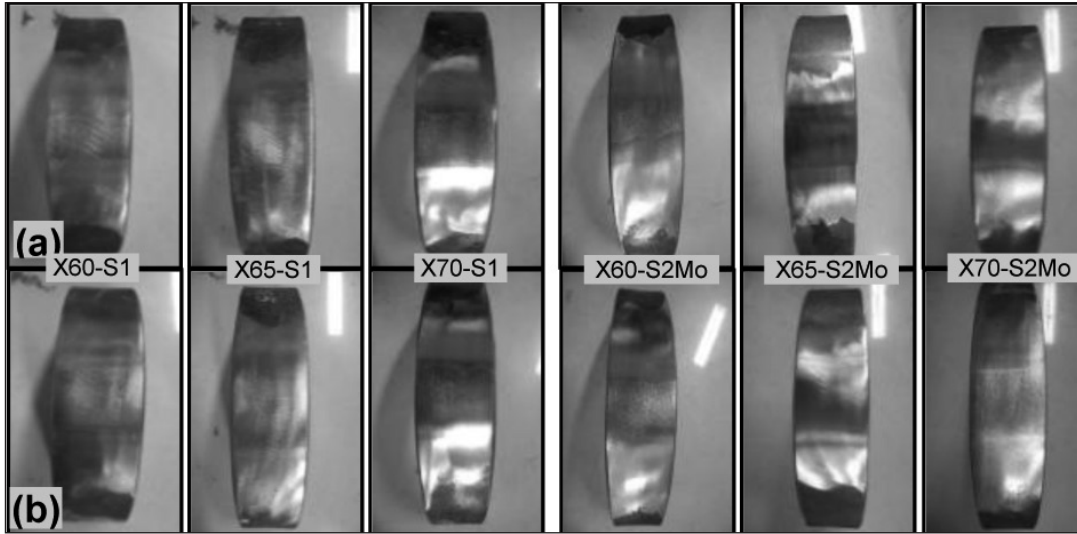
Şekil 8'de, numunelere 180° olarak uygulanan kök ve kep eğme testlerinde, kaynak dikişi ve çevresinde çatlama,

yırtılma gibi herhangi bir hatanın oluşmadığı göz muayenesi ile tespit edilmiştir. Bu durum, malzemelerin birleştirilmesinin uygun bir şekilde yapıldığını ve bu tür kaynaklı bağlantıların 180° eğilerek servis şartlarında kolaylıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan bir araştırmada, tozaltı ark kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin 180°'ye kadar eğilmesi sonucunda, herhangi bir hasara uğramadan kalmaları, sünek bir kaynaklı bağlantı yapıldığının göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Asarkaya 2006).

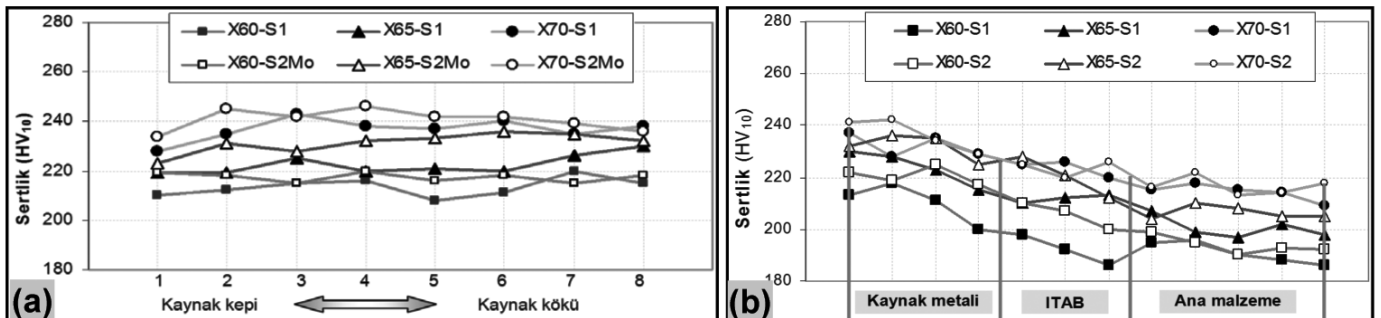
4.5. Sertlik Testi

Düşük karbonlu, az alaşımlı çeliklerin kaynağında ITAB'da çatlama karşı emniyet için sertliğin 350 HV sertlik değerini geçmemesi tavsiye edilmektedir. Tüm kaynaklı numunelerden, bu kritik değer altında sertlik değerleri alınmıştır.

Sertlik ölçümleri, Şekil 3'de gösterilen biçimde belirtilen noktalardan alınmıştır. Kaynaklı numunelerden alınan ölçümlere göre (Şekil 9), genel olarak kaynak metalinin ITAB ve ana malzemeden daha sert olduğu görülmektedir. Ana malzemede en yüksek sertlik X70 malzemesinde 222 HV olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik ise



Şekil 8. Kaynaklı numunelerin eğme testi sonucu A) kök eğmesi B) kep eğmesi.



Şekil 9. Kaynaklı numunelerden alınan sertlik ölçüm sonuçları A) dikey doğrultuda ve B) yatay doğrultuda.

X60 malzemesinde 186 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ise en yüksek sertlik değeri S2Mo teli ile kaynatılan X70 malzemesinde 246 HV, en düşük sertlik değeri ise S1 teli ile kaynatılan X60 malzemesinde 200 HV olarak ölçülmüştür.

Tozaltı ark kaynağı ile (Ada 2006, Kaya vd. 2010, Durgutlu vd. 2002, Asarkaya 2006) birleştirilmiş numunelerde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğunu ve onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada (Kılınçer 1998), farklı karbon oranına sahip çelikleri tozaltı ark kaynağı ile birleştirilmiş ve % 0,22'den az karbon oranına sahip kaynaklı bağlantıların en sert bölgesinin kaynak metalini olduğunu ve kaynak metalinden ana malzemeye doğru gidildikçe sertliğin azaldığını tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynaklı numunelerdeki kaynak metalinin sertliğinin ana malzemeden daha yüksek olması, kaynak esnasında kullanılan ilave metaldeki karbon ve diğer alaşım elementlerinin oranıyla ilişkilidir. ITAB'dan ölçülen sertlik değerlerinin, ana malzemeden daha yüksek olmasının sebebi ise bu bölgede meydana gelen tane irileşmesi ve soğuma hızıdır.

4.6 Makroyapı İncelemeleri

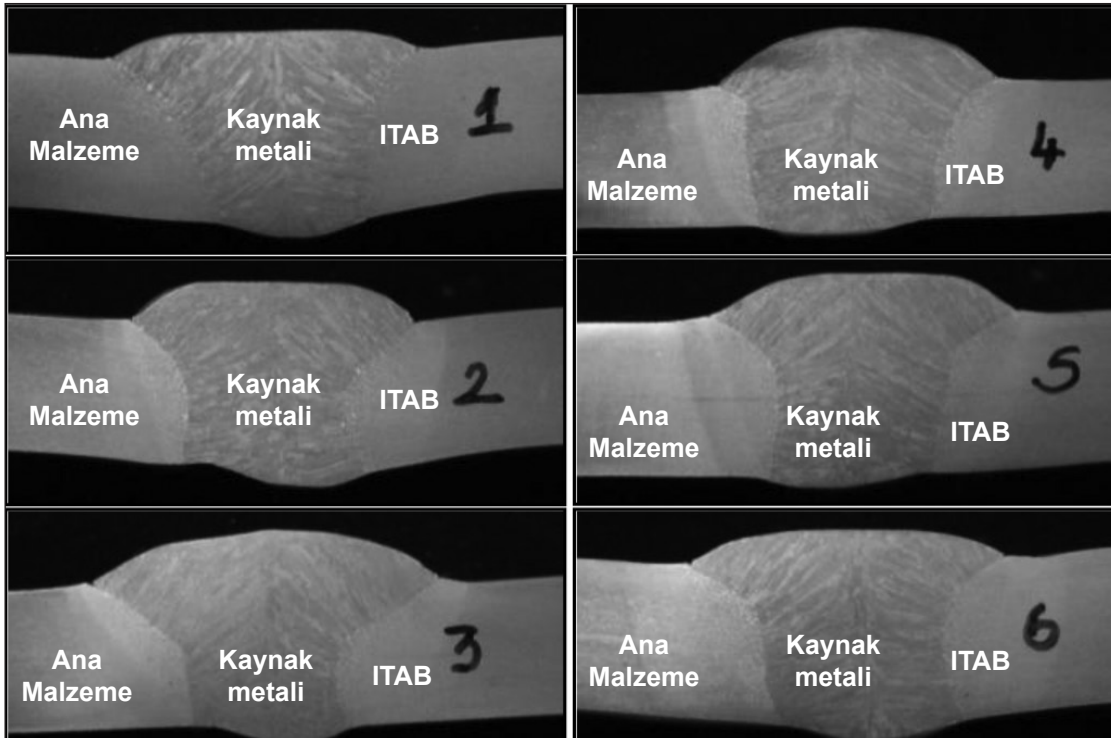
Makroskobik muayene, TS EN 1321 "Melatik Malzemelerdeki Kaynaklarda- Tahribatlı Muayene-Kaynakların Makroskobik ve Mikroskobik Muayenesi" standardına göre yapılmakta olup, kaynaklı birleştirmenin genellikle

enine kesitinin incelenmesi ile makroskobik özelliklerinin ortaya çıkarılmasında kullanılmaktadır (TS EN 1321). Makroyapı incelemeleri, dağlanmış kaynaklı numunelerin çıplak gözle veya küçük bir büyütme ile incelenmesini kapsamaktadır. Şekil 10'da kaynaklı numunelerden görüntülenen makroyapı fotoğrafları verilmiştir.

Fotoğraflar incelendiğinde kaynak bölgesinde çatlaklara, yırtılmalara, boşluklara, ergime/nüfuziyet azlığına, curuf kalıntılara ve yanma oluklarına rastlanılmamıştır. Makroyapı fotoğraflarında, kaynak bölgesinin kaynak metalini, ITAB ve ana malzeme olarak belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği görülmektedir. Ayrıca, kaynak metalinin tanelerinin ısı akışı yönüne yönlendiği ve nüfuziyetin tam olduğu görülmektedir. Makroyapı fotoğraflarında göze çarpan diğer bir husus da ITAB'ın geniş bir alana yayılmış olmasıdır. Kaynak esnasında parametrelerinden kaynak hızının yavaş olması ve kaynak akımının yüksek olması, yüksek ısı girdisine ve dolayısı ile geniş bir ITAB ve kaynak metalini oluşumuna neden olmuştur.

5. Sonuçlar

- Kaynaklı numunelere gözle yapılan muayene sonucunda, kaynak yüzey hatalarına (eksik veya fazla kaynak kepi, kökte sarkma vb) rastlanılmamıştır.
- Ultrasonik muayene sonucunda, kaynak bölgesinde, çatlak, gözenek, gaz boşluğu vb kaynak hatalarının bulunmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 10. X70-S2Mo numunesinin makro yapı fotoğrafı.

- **Çekme testleri sonucunda, bütün numunelerde kopma, kaynak bölgesi dışında meydana gelmiş ve kaynaklı numunelerin çekme dayanımları, ana malzemelerden daha yüksek değerlerde ölçülmüştür.**
- Kaynaklı numunelere, her iki yöne uygulanan eğme testlerinde (kök ve kep eğme), kaynaklı numuneler 180°'ye kadar sorunsuz bir şekilde eğilebilmiştir.
- Tüm numunelerde en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden, en düşük sertlik değerleri ise ana malzemelerden ölçülmüştür.
- **Çalışma sonucunda, S2Mo ve P223 tel-toz kombinasyonunun, S1 ve LN 761 tel-toz kombinasyonundan, mekanik özellik bakımından daha üstün olduğu tespit edilmiştir.**
- Tozaltı ark kaynağı ile gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde kaynak esnasında kullanılan tel ve tozların, kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini etkiledikleri sonucuna varılmıştır.

6. Kaynaklar

- 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.*
- Akay, AA. 2012.** Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi. *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.*
- Asarkaya, M. 2006.** Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 54-86.*
- Çetinkaya, C. 1998.** Orta karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerin incelenmesi. *Politeknik Derg., 1(3-4): 61-67.*
- Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B. 2002.** Tozaltı ark kaynağında kaynak tozunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *ESEF, 10(11):1-8.*
- Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A. 2005.** Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması. *GUSJ, 18(3):473-480.*
- Kahraman, N., Gülenç, B. 2009.** Modern Kaynak Teknolojisi Kitabı. Epa-Mat Basın Yayın Ltd. Şti, Ankara, 30-36.
- Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B. 2010.** Tozaltı ark kaynağı ile birleştirilen farklı kalınlıktaki grade a gemi saclarının mekanik özelliklerinin araştırılması. *J. New World Sci. Acad. Eng. Sci., 1A0088, 5(2): 348-357.*
- Kılınçer, S. 1998.** Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.*
- Ogborn, JS. 1993.** Submerged Arc Welding. *ASM Handbook, 6: 202-204.*
- TS EN 1321, 2001.** Metalik Malzemelerdeki Kaynaklarda-Tahribatlı Muayene- Kaynakların Makroskobik ve Mikroskobik Muayenesi. *TSE, Ankara.*
- Yıldız, M. 2000.** Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.*