



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

**Taguchi metoduyla belirlenen kaynak parametrelerinin API 5L X65 boru birleştirmelerinde radyografik ve makrografik incelemeleri**

*Radiographic and macrographic investigations of welding parameters determined by Taguchi method in API 5L X65 pipe joints*

*Yazar(lar) (Author(s)): Hakan ADA<sup>1</sup>, Cemil ÇETİNKAYA<sup>2</sup>, Ahmet DURGUTLU<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0412-5789*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-0298-1143*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-3839-2903*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ada H., Çetinkaya C. ve Durgutlu A., "Taguchi metoduyla belirlenen kaynak parametrelerinin API 5L X65 boru birleştirmelerinde radyografik ve makrografik incelemeleri", *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.404001

# Taguchi Metoduyla Belirlenen Kaynak Parametrelerinin API 5L X65 Boru Birleştirmelerinde Radyografik ve Makrografik İncelemeleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hakan ADA<sup>1\*</sup>, Cemil ÇETİNKAYA<sup>2</sup>, Ahmet DURGUTLU<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.01.2018 ; Kabul/Accepted : 29.01.2018)

## ÖZ

Bu çalışmada Taguchi metoduyla belirlenen parametreler dâhilinde kaynak işlemine tabi tutulan API 5L X65 boru birleştirmelerinin floroskopik incelemelerinden elde edilen radyografi görüntüleri ve optik mikroskop ile görüntülenen birleştirmelerin kaynak bölgesi makroyapıları incelenmiştir. Elde edilen radyografi ve makrografik görüntülerinden yukarıdan aşağı yönde bazik elektrodla düşük amper değerlerinde birleştirilen malzemelerde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların oluştuğu görülürken, bu birleştirmeler haricindeki tüm birleştirmelerin genel olarak kusursuz bir şekilde gerçekleştiği, makro düzeyde ve hata boyutunda değerlendirilebilecek süreksizliklere rastlanmadığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** API 5L X65 boru, kaynak, taguchi, makrografi, radyografi.

## Radiographic and Macrographic Investigations of Welding Parameters Determined by Taguchi Method in API 5L X65 Pipe Joints

### ABSTRACT

In this study, radiographic images obtained from fluoroscopic examinations and macrographic images of API 5L X65 pipe joints welded within the parameters determined by Taguchi method were examined in detail. In the obtained radiographs and macrographs, defects such as inadequate penetration and fusion deficiencies were observed in the joints 2 and 4, which were connected with the basic electrode from top to bottom direction. It has been found that all joints except joints 2 and 4 are generally performed perfectly. There are also no discontinuities that can be evaluated at the macro level in terms of defect size

**Keywords:** API 5L X65 pipe, welding, taguchi, macrography, radiography.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uzak mesafelere petrol ve gaz ürünlerini taşımak için kullanılacak en kolay ve ekonomik yolun doğalgaz ve petrol boru hatlarını kullanmak olduğu bilinmektedir. Modern taşınabilir boru hattı sistemleri dünyanın her yerinde çıkarıldığı üretim bölgelerinden tüketicilere, petrol, doğalgaz ve ürünlerini taşımaktadır. Dünyada enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artması da yüksek taşıma kapasitesine sahip yüksek basınçlı boru hatlarının inşa edilmesi gerçeğini ortaya koymaktadır [1-6]. Hem ekonomik, hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın buldukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerinse kullanım yerlerine taşınmaları önemli bir işlemdir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise ancak büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır [7-12].

Boru hattı ile taşıma sistemleri; gaz, petrol gibi akışkanların taşınmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Plastik deformasyona neden olabilecek doğa olaylarının (deprem, toprak kayması, göçük, v.b.) oluşabilme ihtimali, boru hatlarının tasarımının ve seçilecek malzemenin önemini ortaya koymaktadır. Boru hattı malzemesi ve bağlantı sistemleri, dışarıdan meydana gelebilecek olumsuz etkilere karşı koyabilecek mekanik özelliklere sahip olmalıdır [13-16].

Günümüzde doğalgaz ve petrol hat borularının imalatında kullanılan çelikler; API (American Petroleum Institute) 5L standardına göre üretilmektedir [17]. API 5L X65 çelikleri, özellikle doğalgaz ve petrol iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik serilerinden biridir [18-20]. Yüksek mekanik özellikleri, düşük maliyetleri ve kolay elde edilebilmeleri nedeniyle boru hattı taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır [21,22]. API 5L standardında, "X65" kalitesinde değerlendirilen bu malzemeler; ince taneli yapının hâkim olduğu, kontrollü termomekanik haddelene yöntemi ile üretilen

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : hakanada@kastamonu.edu.tr

malzemelerdendir [18-20]. API çeliklerinde genel olarak ana mikroalaşım elementi, titanyum ve vanadyum ile kombinasyonu olan niyobyumdur (Nb/V, Nb/Ti, Nb/V/Ti). Bu kombinasyonlar çeliklerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir [23-25]. Kolay elde edilmesi ve yüksek dayanım özelliklerine sahip olması nedeniyle X65 çelikleri boru hattı ile doğalgaz ve petrol taşımacılığında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1,2,21, 22].

Boruların birleştirildiği yapımlarında genel olarak, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik-kimyasal özellikleri ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (mukavemet ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulamadığı, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile belirlendiği görülmektedir. Kaynak tekniğinin doğru seçilememesi kalite kontrol işlemlerinde alışılmışın dışına çıkılmasını engelleyerek, ya gereksiz yönde fire verilmesine, ya da belirli hataların farkına varılamamasına yol açmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı, kaynak güvenilirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimliliğin düşmesine hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik sistematik bir yöntemin oluşturulamamasıdır.

Taguchi metodu, yukarıda bahsedilen eksikliklerin bertaraf edilmesi için kullanılacak uygun ve güçlü bir yöntemdir. Taguchi metodu, kullanıcılarına, maliyet, ekonomiklik, kalite ve performans tasarımlarını optimize edebilmek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Taguchi metodu; bir ürün, işlem ya da sistemin mühendislik optimizasyonunu; sistem, parametre ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır [26, 27]. Klasik deney tasarım yöntemlerinin kullanımı endüstriyel şartlar altında zaman zaman verimli olamamaktadır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça, yapılması gereken deneylerin sayısı da artmakta, bu nedenle fireler ve maliyetler yükselmekte, uygulamalar ise bir hayli zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda kesirli faktöriyel tasarım olan Taguchi Metodu sistemi hem daha verimli, hem de kolay bir hale getirmektedir. Karar vermeyi gerektiren birçok durumda da Taguchi Metodu başarı ile uygulanabilmektedir [28].

Taguchi metodunun tercih edilme nedenlerini ortaya koyan bu hususlar, çalışmamızda kaynak parametrelerini belirlemedeki temel amacı da genel olarak ifade etmektedir. Bu çalışmada doğalgaz ve petrol borularının kaynak işlemlerinden elde edilen birleştirmelerin ptimum

mekanik özelliklere sahip olması amacıyla Taguchi metodu kullanımı tercih edilmiştir. Taguchi metoduyla belirlenen parametreler dâhilinde kaynak işlemleri gerçekleştirilen API 5L X65 boru birleştirmeleri daha sonra tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografik teste tabi tutulmuştur. Radyografi testleri EN 1435 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Muayene ve değerlendirme işlemleri EN 473 standardına uygun olarak vasıflandırılmış RT (Radyografik Test) Seviye 2 sertifikasına sahip kalifiye bir personel tarafından yapılmıştır. Radyografi işlemlerinden sonra da numunelerin makrografik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Makroyapı incelemelerinde; akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrot türünün etkilerine bağlı olarak oluşan kaynak metal ve ısınım tesiri altındaki bölge (ITAB) detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiş olup, ilk aşama boruların kaynaklı birleştirme aşaması, ikinci aşama birleştirmelerin radyografik muayenesi, üçüncü aşama ise birleştirmelerin makro yapılarının incelendiği makrografik inceleme aşamasıdır. İlk aşama olan birleştirmelerin kaynak işlemlerinde Taguchi metodu kullanılarak, gerçek ve akılcı çözümler üretebilmek ve en uygun değişkenler belirlenerek endüstriyel uygulamalara katkılar sunmak amaçlanmıştır. İkinci aşamada, Taguchi metoduyla belirlenen parametrelerle gerçekleştirilen birleştirmelerin radyografik incelemeleri yapılarak, metalurjik ve mekanik özellikler açısından kalite kontrol işlemlerinin bir ön çalışması planlanmıştır. Üçüncü aşamada ise, makrografik incelemeler yapılarak, birleştirmelerin makro düzeyde metalurjik özellikleri araştırılmaya çalışılmıştır.

Kaynak işlemlerinde akım şiddeti değeri, elektrot türü ve kaynak yönü gibi parametreler dikkate alınmıştır. Deneylerde 110-140, 120-150, 130-160, 140-170, 150-180, 160-190, 170-200 ve 180-210 A aralığında akım şiddeti değerleri kullanılmış, borular iki farklı yönde olmak üzere, (aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı) iki farklı elektrot türü (selülozik ve bazik) ile birleştirilmiştir. Belirlenen faktör ve seviyeler neticesinde Taguchi L16 deney düzeneği (8\*2\*2) ile kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodu ile belirlenen faktör ve seviyeler Çizelge 1'de, Taguchi L16 deney düzeneği ise Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Deney faktörleri ve seviyeleri (Factors and levelsof experiments)

Sembol	Faktörler (Kaynak Parametreleri)	Seviyeler							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Akım Şiddeti Değerleri (A)	110-140	120-150	130-160	140-170	150-180	160-190	170-200	180-210
B	Kaynak Yönü	Aşağıdan yukarı ↑	Yukarıdan Aşağı ↓						
C	Elektrot Türü	Selülozik	Bazik						

**Çizelge 2.** Taguchi  $L_{16}$  deney düzeneği ( Taguchi  $L_{16}$  experiment setup)

Deney No	-A- (Akım Şiddeti) (Amper)	-B- (Kaynak Yönü)	-C- (Elektrod Türü)
1	1 (110 – 140)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	1 (Selülozik)
2	1 (110 – 140)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	2 (Bazik)
3	2 (120 – 150)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	1 (Selülozik)
4	2 (120 – 150)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	2 (Bazik)
5	3 (130 – 160)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	1 (Selülozik)
6	3 (130 – 160)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	2 (Bazik)
7	4 (140 – 170)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	1 (Selülozik)
8	4 (140 – 170)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	2 (Bazik)
9	5 (150 – 180)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	2 (Bazik)
10	5 (150 – 180)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	1 (Selülozik)
11	6 (160 – 190)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	2 (Bazik)
12	6 (160 – 190)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	1 (Selülozik)
13	7 (170 – 200)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	2 (Bazik)
14	7 (170 – 200)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	1 (Selülozik)
15	8 (180 – 210)	1 (Aşağıdan yukarı ↑)	2 (Bazik)
16	8 (180 – 210)	2 (Yukarıdan aşağı ↓)	1 (Selülozik)

Deneylerde Çizelge 3'te kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri verilen API 5L X65 kalitesinde, 12,7 mm kesit kalınlığında ince taneli yapı çeliği kullanılmıştır. İlave tel (elektrod) olarak ise selülozik ve bazik elektrodlar kullanılmıştır. Selülozik elektrod ile yapılan birleştirmelerde kök pasoda 3,25 mm çapında E6010 AWS kodlu elektrod kullanılmış olup, sıcak paso ara paso ve kapak pasolarda ise 4,00 mm çapında E8010 AWS kodlu elektrod kullanılmıştır. E6010 ve E8010

kodlu selülozik elektrodların kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Çizelge 4 ve 5'te verilmektedir. Bazik elektrod ile yapılan birleştirmelerde ise E9018-D1-H4 AWS kodlu elektrod kullanılmış olup, kök pasoda 3,25 mm, diğer pasolarda ise 4,00 mm çapında elektrodlar tercih edilmiştir. E9018-D1-H4 AWS kodlu elektrodun kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri ise Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.** Deneylerde kullanılan X65 malzeme kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of X65 material)

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
		0,064	0,29	1,61	0,008	0,0018	0,021	0,001
Mekanik Özellikler	Cu	Al	Ti	V	Nb	N	Fe	C <sub>ES</sub>
	0,008	0,035	0,023	0,051	0,052	0,0028	97,83	0,348
Mekanik Özellikler	Akma Muk. (MPa)		Çekme Muk. (MPa)		Uzama (%) (min.)		Darbe Enerjisi (0°C) (Joule)	
	566		650		34		209	

**Çizelge 4.** AWS/ASME FA.5.1. E6010 kodlu selülozik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME FA.5.1. E6010 coded celulosic electrode)

Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi			Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)			
C	Si	Mn	Akma Muk. (min) (N/mm2)	Çekme Muk. (min) (N/mm2)	Uzama (%)	Çentik Darbe Enerjisi (0 °C) (min) (Joule)
0,10	0,20	0,50	470	530	26	60

**Çizelge 5.** AWS/ASME FA.5.1. E8010 kodlu selülozik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME FA.5.1. E8010 coded celulosic electrode)

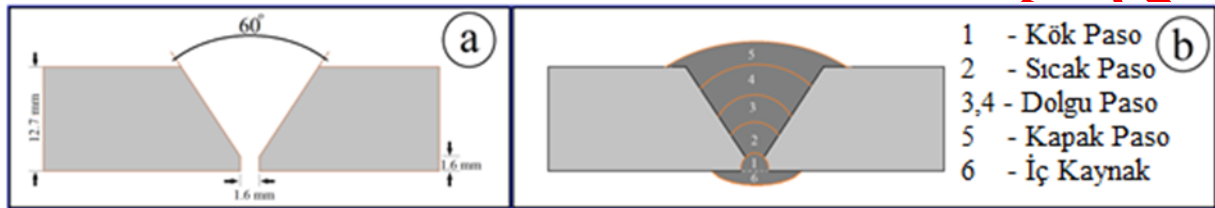
Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi				Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)			
C	Si	Mn	Ni	Akma Muk. (min) (N/mm2)	Çekme Muk. (min) (N/mm2)	Uzama (%)	Çentik Darbe Enerjisi (-20 °C) (min) (Joule)
0,10	0,20	0,80	0,90	500	570	24	60

**Çizelge 6.** AWS A5.5. E9018-D1-H4 kodlu bazik elektrod kimyasal analiz ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS A5.5. E9018-D1-H4 coded alkaline electrode)

Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi				Kaynak Metalinin Tipik Mekanik Özellikleri (%)		
C	Si	Mn	Mo	Akma Muk. (min) (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Muk. (N/mm <sup>2</sup> )	Çentik Darbe Enerjisi (-50 °C) (min) (Joule)
0,075	0,40	1,60	0,45	550	610-780	47

Saha birleştirmelerinde yoğunlukla kullanılan, örtülü elektrodla elektrik ark kaynak yöntemi birleştirme metodu olarak tercih edilmiş, kaynak işlemleri Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Kaynak Teknolojisi Programı laboratuvarlarında, redresör tipi kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak ağzı geometrisi ve paso sıralaması Şekil 1’de verilmektedir.

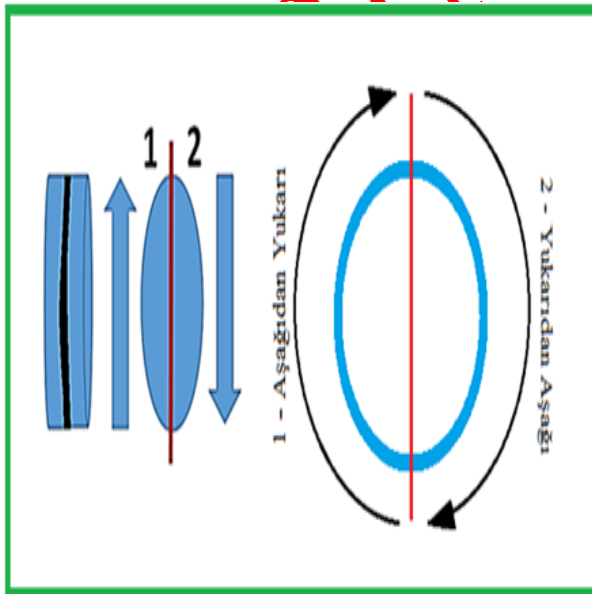


Şekil 1. a. Kaynak ağzı geometrisi, b. Paso sıralaması (a. Weld groove geometry, b. Pass sequence)

Kaynaklı birleştirmelerde parçalar öncelikle kaynak işlemine hazırlanmıştır. Tozaltı kaynak yöntemiyle spiral olarak üretilmiş olan 1.066,8 mm (42” çapında), 12,7 mm et kalınlığındaki API 5L X65 kalitesindeki çelik borular otomatik plazma kesme makinesi ile 300 mm genişliğinde kesilmiştir. Kesilen borulara 30° kaynak ağzı açılarak, kaynak işlemine hazırlanmıştır. Her bir deney yarım boru birleştirmesi olacak şekilde yani tam bir boru çevresi ikiye bölünerek, bir çevreden iki deney elde edilecek şekilde aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yönlerde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Kaynak işlemi için hazırlanmış boru şekilleri Şekil 3’te görülmektedir.



Şekil 3. Kaynak işlemi için hazırlanan borular (Pipes prepared for welding process)



Şekil 2. Birleştirme işlemlerinin şematik görüntüsü (Schematic illustration of welding processes)

Taguchi metodu yardımıyla en uygun kaynak parametreleri Çizelge 2’de verildiği gibi L16 (8\*2\*2) düzeninde belirlenmiş ve kaynak işlemleri bu düzenlemeye uygun olarak Çizelge 7’de belirtildiği gibi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kök pasoları sabit bir akım şiddeti değerinde (100 Amper) birleştirilmiş olup, elektrodun ergime gücü ve metal yığıma kapasitesi düşünülerek, sıcak paso ile birlikte akım şiddeti değeri her pasoda 10 Amper artırılmıştır. Kaynak işleminin sonunda borular kapak pasoda (5. paso) kullanılan akım şiddeti değerinde, içeriden de ayrıca iç kaynak (6. paso) işlemine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda belirlenen deney düzeneğinin son hali, paso geçişlerinde akım şiddeti değerlerinin yükseltilmesi ihtiyacına karşın ve Çizelge 2’de belirtilen akım şiddeti değerlerinin sabit oranda (10 A) artırılması neticesinde Çizelge 7’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kaynak hızı sabit tutulmuş olup,

birleştirmeler kök pasoda 120 mm/dak, diğer pasolarda ise 150 mm/dak kaynak hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan bazik elektrodlar 250 – 300 °C’de

1 saat süre ile kurutularak hiç bekletmeden, selülozik elektrodlar ise özelliği gereği kurutulmadan kaynak işleminde kullanılmıştır.

**Çizelge 7.** Taguchi  $L_{16}$  deney düzeneği ile oluşturulan ve deneylerde kullanılan parametreler (Parameters set by Taguchi  $L_{16}$  experiment setup and used in experiments)

Deney No	Kaynak Yönü	Elektrod Türü	Akım Şiddeti (Amper)						
			Kök Paso	Sıcak Paso	Dolgu Pasoları		Kapak Paso	İç Kay. Pas.	
			Ø 3,25 mm	Ø 4,0 mm					
			-Paso 1-	-Paso 2-	-Paso 3-	-Paso 4-	-Paso 5-	-Paso 6-	
1	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik							
2	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik	100	110	120	130	140	140	
3	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik							
4	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik	100	120	130	140	150	150	
5	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik							
6	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik	100	130	140	150	160	160	
7	Aşağıdan yukarı ↑	Selülozik							
8	Yukarıdan aşağı ↓	Bazik	100	140	150	160	170	170	
9	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik							
10	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik	100	150	160	170	180	180	
11	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik							
12	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik	100	160	170	180	190	190	
13	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik							
14	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik	100	170	180	190	200	200	
15	Aşağıdan yukarı ↑	Bazik							
16	Yukarıdan aşağı ↓	Selülozik	100	180	190	200	210	210	

Çizelge 7’de verilen parametrelere uygun olarak kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş olup, kaynak işlemi tamamlanan boru birleştirmeleri sonraki aşama olan radyografik incelemeye hazır hale getirilmiştir.

#### **Radyografi ve Makrografi İşlemleri** (Radiography and Macrography Processes)

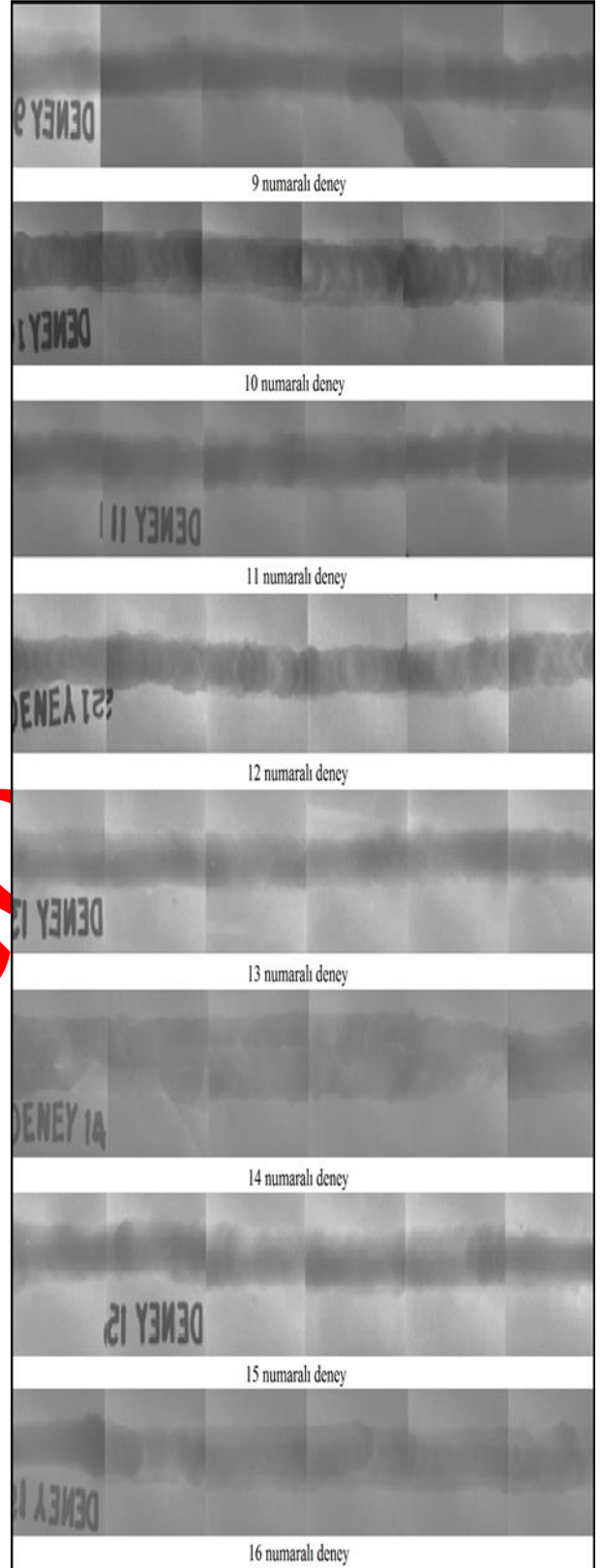
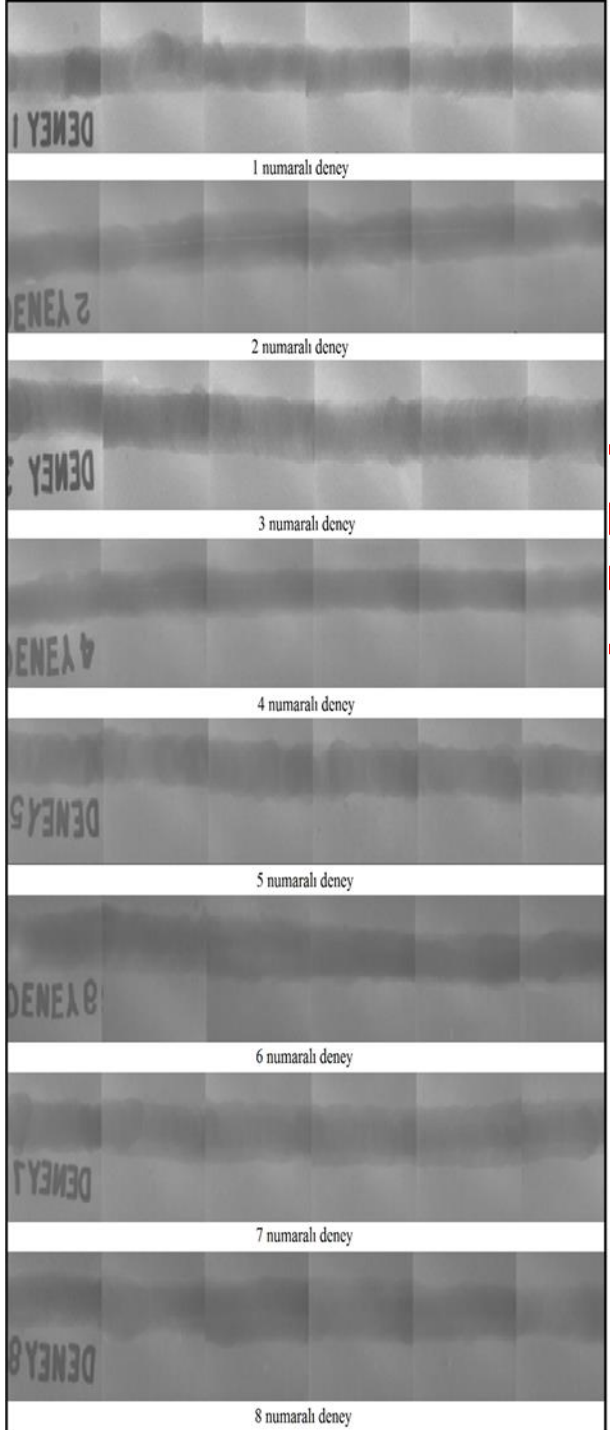
Kaynaklı birleştirme işlemlerinden sonra yapılan radyografik incelemeler, kaynak bölgesinde gözenek, boşluk, çatlak, cüruf kalıntısı, yetersiz ergime, dikişte süreksizlik, yanma oluşu gibi hataların tespit edilmesi için yapılmaktadır. Radyografi testinde rastlanabilecek olası hatalar kaynaklı bağlantının kalitesizliğini göstermekte ve bu hatalar giderilmeden sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek olan diğer test işlemlerinde sorunlar yaşanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada kaynak işlemleri gerçekleştirilen borular tahribatsız muayene işlemlerinden radyografik teste tabi tutulmuştur. Radyografi testleri EN 1435 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş, değerlendirme ise EN 473 standardına uygun olarak vasıflandırılmış Seviye 2 bir personel tarafından, ISO 5817 standardına uygun olarak Kabul Seviyesi C’de değerlendirilmiştir.

Kaynaklı birleştirme işlemlerinden sonra yapılan makrografik incelemeler ise; birleştirme işlemi makro boyutta detaylı olarak incelemek ve kaynak bölgesinde oluşabilecek makro düzeydeki hata ve süreksizliklerin tespit edilmesi için yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada kaynak işlemleri gerçekleştirilen boru birleştirmelerinden alınan numuneler makro incelemeye tabi tutulmuştur. Çizelge 7’deki parametrelere bağlı kalınarak yapılan kaynak işlemlerinden sonra her bir deney kapsamında birleştirmelerin makro analizleri için metalografik test numuneleri alınmıştır. Boru kaynağının pozisyona bağlı etkilerini elemine etmek ve görüntüler hakkında doğru yorumlamalar yapabilmek için aşağıdan yukarı yönde gerçekleştirilen birleştirmelerde 10:30 – 12:00 saat pozisyonundan, yukarıdan aşağıya yapılan birleştirmelerde ise saat 12:00 – 01:30 saat pozisyonundan numuneler alınmıştır. Alınan numuneler, standart metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gridlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra 6, 3 ve 1 µm’lik keçe ve uygun solüsyonlar ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler % 3 Nital (HNO<sub>3</sub>) çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin makroyapı fotoğrafları Emek Boru Mak. San. A.Ş.

Laboratuvarındaki Leica marka stereo mikroskop ile görüntülenmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

EN 473 standardına uygun olarak vasıflandırılmış Seviye 2 bir personel tarafından, ISO 5817 standardına uygun olarak, Kabul Seviyesi C’de değerlendirilen radyografi test sonuçlarını ifade eden, radyografik muayene görüntüleri Şekil 4’te verilmiştir.



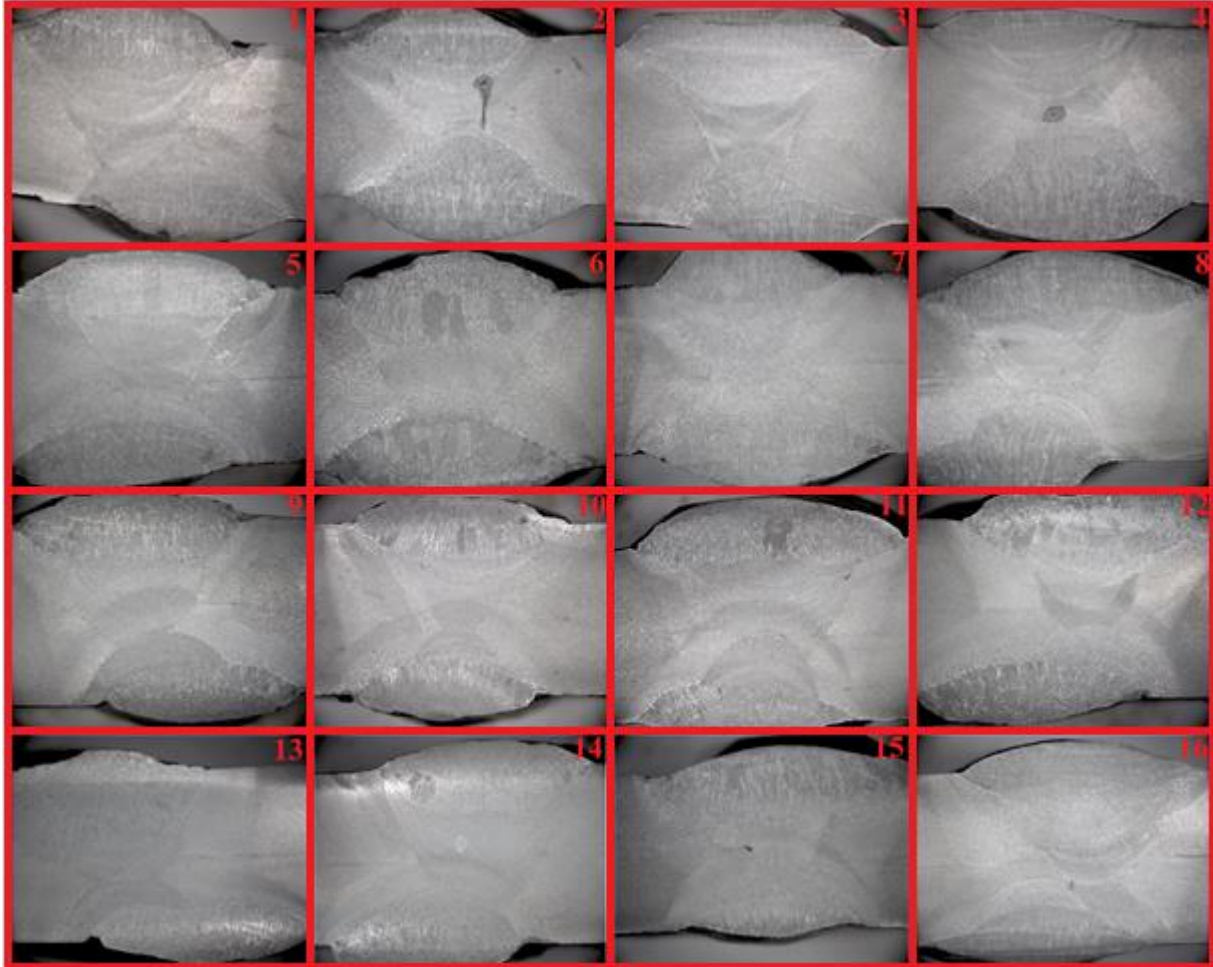
Şekil 4. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayene görüntüleri (Radiographic images of welded joints)

EN 473 standardına göre RT Seviye 2 bir personel tarafından ISO 5817 standardına uygun olarak kabul Seviyesi C’de değerlendirilmelerine göre; 2 ve 4 numaralı

deneylerde yetersiz ergime nedeniyle birleşme eksikliği hatası tespit edilmiş, bu nedenle söz konusu deneylerde kaynaklı birleştirmeler reddedilmiştir. Bu deneylerin haricinde 9, 11, 13, 14, 15 ve 16 numaralı deneylerde gözenek, 14 ve 15 numaralı deneylerde ise cüruf kalıntısına rastlanmış, fakat söz konusu süreksizlikler kabul kriterlerine göre hata boyutunda olmadığı için ilgili deneyler kabul edilmiştir. Genel olarak 2 ve 4 numaralı deneylerin haricinde kaynaklı birleştirmelerin kusursuz bir şekilde gerçekleştirildiği, kabul kriterlerinin üzerinde hata boyutunda süreksizliklere rastlanmadığı tespit edilmiştir. 2 ve 4 numaralı deneyler bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda gerçekleşen deneyler olup, söz konusu deneylerin radyografik incelemesinde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların olduğu gözlemlenmiştir. Radyografi resimlerinde düz bir çizgi halinde beliren bu hata yetersiz ergime nedeniyle oluşan birleşme noksanlığı hatasını ifade etmektedir. Bazik elektrodla, yukarıdan aşağı pozisyonda, deneylerdeki en düşük akım şiddeti değerlerinde (110 - 140 ve 120 - 150 A) gerçekleşen birleştirme işlemlerinde yeterli nüfuziyetin sağlanamadığı görülmüştür. Söz konusu belirtilen hatanın seçilen bu değerlerin bazik elektrod için yukarıdan aşağı kaynağında yeterli nüfuziyeti sağlayamaması nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

Radyografik muayenede temel prensip olarak; boşluklar veya hatalar farklı koyuluktaki bölgeler olarak görülmesi gerekirken yukarıda verilen radyografi görüntülerinde 2 ve 4 numaralı deneyler haricinde, kabul kriterleri dışında böylesi farklılıklar görülmemektedir. Dolayısıyla; bu da kaynaklı birleştirmelerin hata boyutunda herhangi bir çatlak, gözenek, kalıntı, boşluk ve süreksizlik içermediğini göstermekte olup, 2 ve 4 numaralı deneyler hariç diğer kaynaklı parçalarda sağlıklı birleştirmelerin gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5'te verilen radyografi görüntülerinde farklı genişliklerde kaynak dikişlerinin elde edilmesinin nedeni ise deneylerin farklı parametrelerde gerçekleşmesindedir. Tüm birleştirmelerde borulara açılan kaynak ağız açısı 30° olup, birleştirmeler 6 pasoda gerçekleşmiştir. Buna karşın, akım şiddeti, kaynak yönü ve elektrod türü dikiş genişliğinin farklı oluşmasına etki etmektedir. Genel olarak görüntülerde, akım şiddetinin artması ile kaynak dikiş genişliğinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 8'de verilen parametrelere uygun olarak birleştirilen API 5L X65 kalitesindeki borulardan alınan metalografik inceleme numunelerinin makroyapı görüntüleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Kaynaklı birleştirmelerin makrografi görüntüleri (Macrographic images of welded joints)



Şekil 5'te verilen makroyapı fotoğrafları incelendiğinde yukarıdan aşağı yönde bazik elektrod ile birleştirilen 2 ve 4 numaralı deneylerde yetersiz ergime sebebi ile birleşme eksikliği görülmekte olup diğer görüntülerde herhangi bir hata görülmemektedir. Radyografi deneylerinden elde edilen görüntüler ve radyografik test raporu da bu durumu desteklemektedir. Çalışmalarda uygulanan kaynak işlemi ve boru ağızlama işlemleri manuel olarak yapıldığı için bazı numunelerde iç-dış kaynaklarda aksenel kaçıklık hatası olmuştur. Bu durum makro görüntülere yansımış ancak kaynak kalitesini etkileyecek bir veri tespit edilmediği için hata olarak değerlendirilmemiştir.

Bazik elektrod ile yukarıdan aşağı yapılan birleştirmelerde en düşük akım şiddeti değerlerinde birleştirilen 2 ve 4 numaralı deneylerde yetersiz ergime sebebiyle birleşme eksikliği görülmüştür. Bu durum 2 ve 4 numaralı deneylerde ısı girdisinin yeterli miktarda olmadığını, bu nedenle yeterli ergime ve birleşmenin sağlanmadığını göstermektedir. 2 ve 4 numaralı deneyler haricindeki birleştirmelere bakıldığında; birleştirmelerde tam nüfuziyetin sağlandığı gözlenmiş ve makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği v.b.) rastlanılmamıştır. Makroyapı görüntülerinin tümünde ise ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak metali ve bölgesel sınırlar net olarak görülmektedir. Ayrıca fotoğraflardan, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönlendiği net bir şekilde gözlenmektedir. Birleştirme işlemlerinde önceki pasolar, daha sonra uygulanacak pasolara aynı zamanda ön tav ısıtma işlemi görevi de yapmaktadır.

6 pasoda gerçekleşen kaynaklı birleştirme işleminde, paso geçişleri makroyapı fotoğraflarından görülebilmektedir. Merkez bölgede yer alan ilk pasoların ince taneli, iç ve dış kapakları oluşturan son pasoların ise iri ve sütunsal taneli yönlennmiş yapıları belirgin olarak seçilebilmektedir. Her paso kendinden önceki pasolar üzerine yüksek sıcaklıklarda bir ısıtma işlemi uygulanmış, her yeni pasonun çekilişinde alttaki pasoların ısıtma işlemi tekrarlanmıştır. Bu ısıtma işlemler taneler yapıyı normalize ettiği için taneler küçülmüş; yönlennme kaybolmuştur. Fakat son pasoda böyle bir durum söz konusu değildir [29].

Yine ilave metal ile birlikte ana malzeme de ergiyerek ve yoğun türbülansın etkisiyle birlikte katılaşarak, kaynak metali yapısını oluşturmuştur. Kaynak metalindeki katılaşmanın epitaksiyel olarak ana metalin tanelerinden başlayarak merkeze doğru ilerlediği bilinmektedir [30]. ITAB, katılaşmanın başladığı çizgiden ana metale kadar uzanan ve yapısal farklılıkların, geçiş bölgesi olarak net bir şekilde makro olarak görülebildiği bir yapıdır. Ana metal ve kaynak metali arasında ergime - katılaşma olmadan yüksek ısı etkisi ile yapısal olarak değişime uğrayan bu bölgeler makroyapı fotoğraflarında açıkça görülmektedir [30, 31]. Kaynak metali sınırında iri tanelerden oluşan ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir.

Yine makroyapı görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde; nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin malzemeye uygulanan kaynak yönü - elektrod türü - akım şiddetinin bir neticesi olan ısı girdisine bağlı olarak değişiklik gösterdiği görülmüştür. Aynı elektrod türü ile aynı yönde yapılan birleştirmelerde uygulanan akım şiddetinin değiştirilmesi ile ısı girdisi miktarı değişiklik göstermiştir. Elektrik ark kaynağında ısı girdisi eşitliğine göre akım şiddeti ile ısı girdisi arasında doğru orantı bulunmaktadır. Diğer değişkenler sabit tutularak akım şiddeti arttırıldığında, ısı girdisi de aynı oranda artmaktadır. Akım şiddetinin yüksek olduğu deneylerde, ısı girdisi miktarı yükselmekte ve nüfuziyet derinliği - ITAB genişliği daha geniş bir alanda oluşmaktadır. Makroyapı fotoğrafları ayrıntılı olarak incelendiğinde bu durum net bir şekilde gözlemlenmektedir.

Diğer parametreler sabit tutularak elektrod türünde değişikliğe gidilmesi ısı girdisinde bariz bir değişikliğe neden olmamakla birlikte, kaynak yönünün değiştirilmesi birleştirmelere uygulanan ısı girdisini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Aşağıdan yukarı kaynak yönünde, pozisyon gereği ısı girdisi daha yoğun bir şekilde oluşmuştur. Makro fotoğraflar incelendiğinde, aşağıdan yukarı kaynak pozisyonlarında daha fazla nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin oluştuğu görülmüştür.

Makroyapı fotoğrafları genel olarak değerlendirildiğinde benzerlikler arz etmektedir. ısı girdisi miktarına bağlı olarak kaynaklı bölgenin ve tanelerin görüntüleri de değişmektedir. ısı girdisi miktarının yoğun olduğu birleştirmelerde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB'ların daha geniş olduğu yine fotoğraflardan görülebilmektedir. Kaynak metalinde ergime ve katılaşmanın etkisiyle asiküler ferrit oluşumunun artması sonucu tane yapısı da incelmektedir.  $\Delta t_{8/5}$  soğuma süresinin artmasıyla asiküler ferrit miktarı da artış göstermektedir. ısı girdisinin artması  $\Delta t_{8/5}$  soğuma süresini arttırmakta, buna bağlı olarak yapıdaki asiküler ferrit oranı da artış göstermektedir. Bu durum kaynak metali tane yapısının daha ince bir şekilde oluşmasına neden olmaktadır [32].

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

API 5L X65 kalitesinde ince taneli yapı çeliğinin Taguchi metodundan faydalanılarak elde edilen parametreler ile birleştirilmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

✓ ISO 5817 standardına uygun olarak Kabul Seviyesi C'de gerçekleştirilen değerlendirmelere göre; 2 ve 4 numaralı deneylerde düşük amper değerleri nedeniyle yetersiz ergime hatası tespit edilmiş, bu nedenle söz konusu deneylerde kaynaklı birleştirmeler reddedilmiştir.

✓ Düşük amper değerleri ile elde edilen numuneler haricindeki bazı birleştirmelerde ise gözenek ve cüruf kalıntısına rastlanmış, fakat söz konusu süreksizlikler

kabul kriterlerine göre hata boyutunda olmadığı için ilgili deneyler kabul edilmiştir.

✓ Bazik elektrod ile yukarıdan aşağı pozisyonda en düşük amper değerleri ile gerçekleştirilen deneyler (2 ve 4 numaralı birleştirmeler) sonucu elde edilen numunelerin radyografik incelenmesinde yetersiz ergime, birleşme noksanlığı gibi hataların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu birleştirmelerde yeterli nüfuziyetin sağlanamadığı görülmüştür.

✓ Bazik elektrod ile yukarıdan aşağı yapılan birleştirmelerde en düşük akım şiddeti değerlerinde birleştirilen numunelerde (2 ve 4 numaralı birleştirmeler) ısı girdisinin yeterli miktarda olmaması sonucu yeterli ergime oluşmamış ve birleşme eksikliği görülmüştür. Diğer birleştirmelerde tam nüfuziyet elde edilmiş ve herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır.

✓ Makroyapı görüntülerinin tümünde ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak metali ve bölgesel sınırlar net bir şekilde görüldüğü ve kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönlendiği tespit edilmiştir.

✓ Nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliği, malzemeye uygulanan kaynak yönü - elektrod türü ve akım şiddetinin bir neticesi olan ısı girdisine bağlı olmak üzere değişiklik göstermiştir.

✓ Diğer parametreler sabit tutularak elektrod türünde değişikliğe gidilmesi ısı girdisinde bariz bir değişikliğe neden olmamakla birlikte kaynak yönünün değiştirilmesi kaynak hızı sebebiyle birleştirmelere uygulanan ısı girdisini önemli bir şekilde etkilemiştir. Aşağıdan yukarı kaynak yönünde, pozisyon gereği kaynak hızı çok az da olsa yavaşladığından daha geniş bir nüfuziyet derinliği ve ITAB genişliğinin olduğu görülmüştür.

✓ Isı girdisi miktarının artışıyla birlikte birleştirmelerde sütünsal tanelerin daha kaba ve belirgin, ITAB'ların daha geniş olduğu görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] 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, Ankara, (2006).
- [2] Ada H., "API borularının kaynaklı birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2017).
- [3] Ada H., Aksöz S., Fındık T., Çetinkaya C. ve Gülsün M., "Tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilen petrol ve doğalgaz borularının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Politeknik*, 19 (3): 275-282, (2016).
- [4] Aksöz S., Ada H. ve Özer A., "Tozaltı kaynak yöntemiyle üretilen API 5L X70 kalite çelik boruların mikroyapı ve mekanik özellikleri", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım Ve Teknoloji*, 5(1): 55-64, (2017).
- [5] Aksöz S., Ada H., Fındık T., Çetinkaya C., Bostan B. ve Candan İ., "API 5L X65 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(1): 72-81, (2017).
- [6] Ada H., Aksöz S., Fındık T., Çetinkaya C., Bostan B. ve Candan İ., "API 5L X65 çeliklerinin mag kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1): 1-9, (2016).
- [7] Ada H., Fındık T. ve Çetinkaya C., "Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen API 5L X65 boruların birleştirilmesinde kaynak teli kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi", *ICWET Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, (2012).
- [8] Ada H., Aksöz S., Özer A. ve Candan İ., "Investigation of metallurgical and mechanical properties of weld region of API 5L X80 steel joints by submerged arc welding method", *3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16)*, (2016).
- [9] Özer A., Aksöz S., Ada H. ve Candan İ., "Elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirilen API 5L X80 çeliklerinin kaynak bölgesi metalurjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", *2. Uluslararası Disiplinlerarası Avrasya Kongresi*, Odessa, Ukrain, (2016).
- [10] Ada H., Aksöz S. ve Özer A., MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen API 5L X80 çeliklerinin kaynak bölgesi mekanik ve metalurjik özelliklerinin incelenmesi", *2. Uluslararası Disiplinlerarası Avrasya Kongresi*, Odessa, Ukrain, (2016).
- [11] Aksöz S., Fındık T., Çetinkaya C. ve Ada H., "Tozaltı kaynağı ile API 5L X52 malzemeden üretilen boruların kaynak bölgesinin mekanik incelemesi", *2. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı*, Kapadokya, IMSTEC 2017, (2017).
- [12] Ada H., Çetinkaya C., Fındık T. Ve Aksöz S., "Tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen API 5L X52 doğalgaz boru malzemesinin kaynak bölgesinin metalurjik araştırması", *2. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı*, Kapadokya, IMSTEC 2017, (2017).
- [13] Bai Y., "Pipelines and Risers", Elsevier, Oxford, UK, (2001).
- [14] 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)*, 527: 1473-1479, (2010)
- [15] Baek J., Kima Y., Kima W., Koo J. and Seok C., “Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending”, *Materials Science and Engineering (A)*, 540: 70–82, (2012).
- [16] Cosham A. and Hopkins P., “The effect of dents in pipelines - guidance in the pipeline defect assessment manual”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 81: 127–139, (2004).
- [17] API Specifications 5L. “*Specifications For Line Pipe*”, 45th Edition. American Petroleum Institute, USA, (2012).
- [18] Hashemi S.H., “Strength - hardness statistical correlation in API X65 steel”, *Material Science and Engineering (A)*, 528: 1648–1655, (2011).
- [19] Hashemi S.H. and Mohammadyani D., “Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98: 8–15, (2012).
- [20] Rakhshkhorshid M. and Hashemi S.H., “Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel”, *Materials Science and Engineering (A)*, 573: 37–44, (2013).
- [21] Migahed M.A., Al-Sabagh A.M., Khamis E.A. and Zaki E.G., “Quantum chemical calculations: synthesis and corrosion inhibition efficiency of ethoxylated-[2-(2-{2-[2-(2-benzenesulfonylaminoethylamino)ethylamino]-ethylamino}-ethylamino)-ethyl]-4-alkylbenzenesulfonamide on API X65 steel surface under H<sub>2</sub>S environment”, *Journal of Molecular Liquids*, 212: 360–371, (2015).
- [22] Amitha Rani B.E. and Bharathi Bai J.B., “Green corrosion inhibitors - an overview”, *Technical Report, National Aerospace Laboratories*, Bangalore, India, (2009).
- [23] Radovic A., Bajic N. and Grabulov V., “Specific quality of the weld metal of welded joints of finegrained microalloyed steels”, *Zavarivanje 96*, 61–72, Belgrade, (1996).
- [24] Bajic N., Sijacki-Zeravic 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).
- [25] Bajic and 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”, *International Conference on Welding*, Belgrade, (2003).
- [26] Çakıroğlu R. and Acır A., “Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method”, *Measurement*, 46(3525-3531): (2013).
- [27] Davim J. P., A note the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 116: 305-308. (2003).
- [28] Şeker M., “Fren balatalarının üretim şartları ve içeriğinin performansa etkisinin Taguchi yöntemiyle araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, (2013).
- [29] Özden N., “*Kaynağın Isıl İşlemi*”, Nurettin Uycan Cilt ve Basım Sanayii A.Ş., 1-22. İstanbul, (1985).
- [30] Keehan E., “Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel weld metals”, *PhD Thesis*, University of Gothenburg Department of Experimental Physics, Gothenburg, 1-72. (2004).
- [31] Aucott L.A., Wen S.W. and Dong H., “The role of Ti carbonitride precipitates on fusion zone strength-toughness in submerged arc welded pipeline joints”, *Materials Science and Engineering (A)*, 622: 194–203. (2015).
- [32] Yüklér A.İ., “*Kaynak Metali*”, İstanbul: MÜTEF Matbaası, 2-60, (1994).