

ORBİTAL TİG KAYNAK YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLMİŞ DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN MEKANİK, METALURJİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ*

Umut Sönmez

Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
usonmez1979@gmail.com

Niyazi Çavuşoğlu**

Dr.,
Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
niyazi.cavusoglu@ege.edu.tr

Vural Ceyhan

Prof. Dr.,
Ege Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
vural.ceyhun@ege.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, özellikle kimya, petrol ve doğalgaz, gemi inşa, ilaç, gıda sanayi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan dubleks paslanmaz çelik boruların orbital TIG kaynağı çalışılmıştır. Kaynak işlemlerinde iki farklı elektrot kullanılmıştır. Kullanılan dubleks paslanmaz çelik borular üç farklı kaynak parametresi kullanılarak kaynak edilmiştir. Koruyucu ve kök koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanılmıştır. Kaynak parçaları alın alına kaynak edilmiştir. Kaynak edilen numunelerin çekme, sertlik ve korozyon testleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde EDX analizi ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dubleks paslanmaz çelik, orbital kaynak, taneler arası korozyon

MECHANICAL, METALLURGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF DUPLEX STAINLESS STEEL WELDED BY ORBITAL GTAW

ABSTRACT

In this study, the orbital TIG welding of duplex stainless steel pipes used widely in areas such as the chemical, petroleum, natural gas pipeline, ship building, pharmaceuticals and food industry has been studied. Two types of welding wire were used in welding process. Duplex stainless steel used were welded using three different welding parameters. Pure argon gas were used as shielding gas. Welding parts were welded butt joint. Tensile test, hardness test and corrosion test were applied on to welded samples. In addition, EDX analysis and microstructure were also carried out on samples.

Keywords: Duplex stainless steel, orbital welding, intergranular corrosion

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 02.02.2016

* 20-21 Kasım 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara'da düzenlenen Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Sönmez, U., Çavuşoğlu, N., Ceyhan, V. 2016. "Orbital TIG Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilmiş Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik, Metalurjik ve Korozyon Özellikleri," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 673, s. 30-38.

1. GİRİŞ

Paslanmaz çeliklerin mükemmel korozyon dayanımları, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri ve estetik görünimleri bu malzemeye geniş bir kullanım alanı açmaktadır. Günümüzde sayıları gittikçe artan bir malzeme grubu olarak yer almakta ve yeni türleri üretilmektedir. Genel olarak yassı mamul, çubuk, boru ve döküm parça olarak üretilmektedir [1]. Paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır. Fakat kullanıldıkları yapıların bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanılabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca, paslanmaz çeliklerin kullanıldığı sistemde yapılacak ömür analizlerinde fiyat açısından kullanımının daha ekonomik olduğu görülecektir [2].

Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşım türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşım türleri ise asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Bu çelikler ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir. Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilir. Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekiştirilir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısı işlemleri ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür. Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebilir. Bu yüzeylerin görünümü ve kalitesi, bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir. Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar [1].

Paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımının yüksek olmasının sebebi, içeriğindeki kromdan kaynaklanmaktadır. Çeliğin içerisinde bulunan krom, yeterli miktarda bulunduğu demir içerisinde çözünür ve alaşım yaptığı metal yüzeyinde ince, görünmez, yapışkan ve yeniden oluşabilen korozyona dirençli pasif bir oksit tabakası oluşturur. Bu oksit tabakasının oluşması için alaşım içerisindeki krom miktarının %10,5 üzerinde olması gerekmektedir. Korozyona dayanıklı olan bu oksit tabakası her korozif ortamda yeteri kadar dirençli olmaz. Bu yüzden, değişik ortamlarda kullanılmak üzere, değişik mekanik özelliklere sahip paslanmaz çelikler elde etmek için molibden nikel ve azot gibi bileşenler içeren alaşımlar yapılmaktadır. Paslanmaz çelik türüne göre değişen bu alaşım elementleriyle oluşturulan paslanmaz çelik ailesi oldukça geniş bir kimyasal bileşim aralığına sahiptir. Paslanmaz çelikler, mutfak eşyaları, banyo küvetleri, inşaat malzemeleri, eşanjörler, kimyasal tankerler, ısıya dayanıklı aletler, bıçaklar, maki-

ne parçaları, petrol rafinerisi parçaları, cıvata, somun, pompa şaftları, çatal, kaşık, endüstriyel fırın parçaları, yakıt ve özel boru hatları, uçak egzoz boruları, kazanlar, otomobil parçaları (silecek, egzoz, susturucu vb.), tıbbi aletler gibi birçok ekipmanın kullanıldığı kimya, gıda ve gemi inşa sanayinde, yapı-inşaat sektöründe, petrol, tekstil, kağıt ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır.

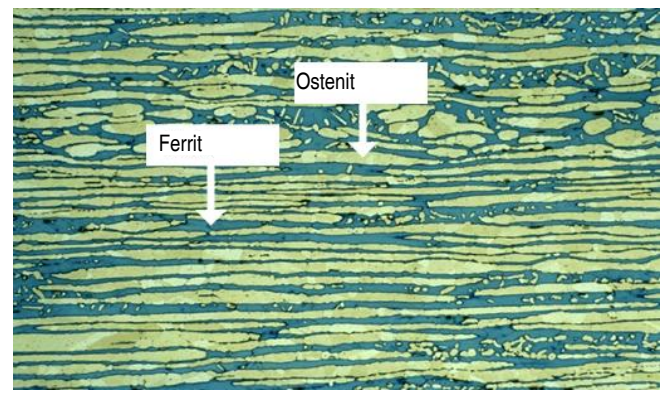
Paslanmaz çelikler mikro yapılarındaki fazlara göre değerlendirilmektedir. Paslanmaz çeliklerin içerisindeki fazlar ferrit, ostenit ve martenzittir. Paslanmaz çelikler 5 ana gruba ayrılmaktadır:

1. Ferritik paslanmaz çelikler
2. Martenzitik paslanmaz çelikler
3. Ostenitik paslanmaz çelikler
4. Ferritik-Ostenitik paslanmaz çelikler (dubleks/çift fazlı)
5. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler

2. FERRİTİK-OSTENİTİK (DUBLEKS) PASLANMAZ ÇELİKLER

İşlenmiş ilk dubleks paslanmaz çelikler, İsveç'teki sülfür kağıt endüstrisinde kullanılmak üzere yaklaşık 80 yıl önce geliştirilmiştir. Dubleks alaşımları esas olarak taneler arası korozyonların, klor içeren sıvıların ve diğer kimyasal likit ürünlerin sebebiyet verdiği korozyon etkilerinden kurtulmak amacıyla üretilmiştir. Dubleks çeliklerin kullanımı son beş yıldan bu yana giderek artmıştır. İlk nesil dubleks paslanmaz çelikleri iyi bir performans karakteristiği sağlamıştır. Ancak, kaynak edilebilme koşullarında bazı sınırlamalar ortaya çıkmıştır. Ancak 1968'lerde dubleks paslanmaz çeliklerde Cr ve Ni içeriklerinde değişiklikler yapılarak ferrit miktarı düşürülmüş, bu çeliklere alaşım elementi olarak azot eklenmesiyle beraber kaynak edilebilirliği iyileştirilmiştir. 1970'lerden sonra, denizlerdeki kıyı gaz ve petrol/yağ üretim tesislerindeki artış, klorlu deniz suyunda korozif dayanımı ve mekanik özellikleri yüksek, işlenebilirliği iyi ikinci nesil dubleks paslanmaz çeliklerin ortaya çıkarılıp geliştirilmelerine öncülük etmiştir [3].

Dubleks paslanmaz çeliklerin, diğer paslanmaz çelik türlerine göre sağladığı en önemli üstünlük, yüksek mekanik özellikleri sayesinde kullanım yerinde diğer paslanmaz çeliklere göre daha ince kesitli parça kullanımına olanak sağlamasıdır. Sınırlamaları ise kaynak sonrası ısıdan etkilenmiş bölgede oluşan ferritik yapı nedeniyle oyuk korozyon dayanımının düşmesi ve ısı yaşlanma sonucunda oluşan gevreklik nedeniyle kullanım sıcaklıklarının 260-300°C ile sınırlanmasıdır [4]. Dubleks paslanmaz çelikler, normal oda sıcaklığında genelde eşit miktarda %50 ostenit ve %50 ferrit içerir. Dubleks malzemenin iç yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Dupleks Paslanmaz Çeliğin İç Yapısı (Ferrit, koyu ve ostenit ise açık renkle gösterilmiştir.) [5]

2.1 Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

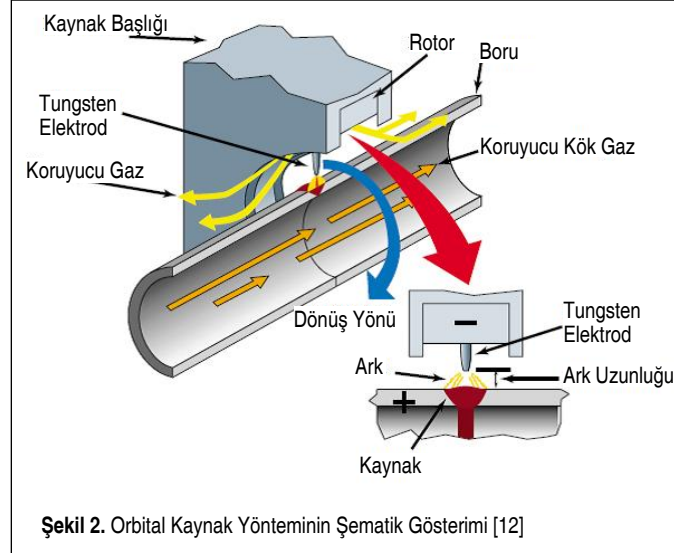
Kaynaklı birleştirme yöntemi metal malzemeler için önemli bir üretim yöntemidir. Dolayısıyla, metal malzemelerin yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için kaynak kabiliyeti çok önemli olmaktadır. Paslanmaz çelikler genel olarak kaynaklanabilir metal malzemelerdir ve farklı birçok kaynak yöntemiyle kaynak edilebilmektedir. Ancak, yine de hatasız kaynak edilebilmeleri için her kaynak yöntemi için uyulması gereken prosedürler bulunmaktadır.

Çoğu durumda kaynak, ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve kaynak metal (KM) mikro yapısının esas metale (EM) göre önemli miktarda değişmesine neden olmaktadır. Bu da istenen faz dengesinde değişikliklerin, metallere arası elementlerin, tane büyümesinin, alaşım veya katışık elementlerinin ayrılması veya diğer bazı reaksiyonların oluşmasına yol açmaktadır [6].

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti genellikle ferritik paslanmaz çeliklerden daha iyi; fakat ostenitik paslanmaz çeliklerden daha kötüdür. Kaynak metalinde ferrit/ostenit dengesinin sağlanması gerekmektedir. Isıdan etkilenmiş bölgede ferrit miktarının artması beklenmelidir. Bu açıdan, çok düşük ısı girdisi ve buna bağlı olarak hızlı soğumalardan kaçınılmalı ve IEB'de ostenit fazının oluşumuna izin verilmelidir [2]. Çok yüksek soğuma hızlarında yüksek ferrit miktarı, nitrür çökelmeleri ve sonuçta düşük tokluk ve düşük korozyon direnci ile karşılaşılır. Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağı alaşım içeriklerine bağlı olarak kontrollü bir ısı girdisi ile yapılmalıdır.

2.2 Orbital TIG Kaynak Yöntemi

Orbital TIG kaynak yöntemi ilk olarak 1960'lı yıllarda uzay havacılık alanında hidrolik devrelerin bağlantısında birleştirme yöntemi olarak kullanılmıştır. 1990'lı yıllardan sonra mikro-işlemci teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak daha yaygın ve tercih edilir hale gelmiştir. Kaynak makinesi ve

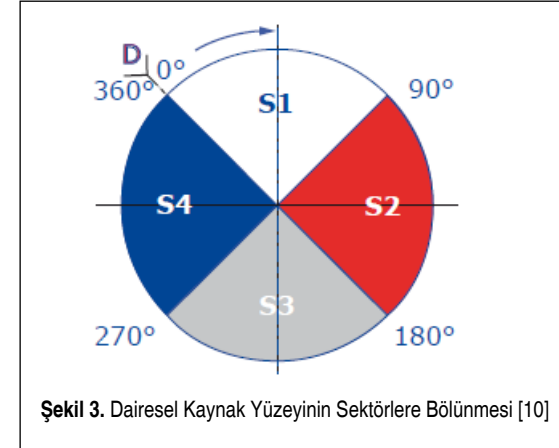


Şekil 2. Orbital Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi [12]

elektrik motoruyla hareket eden tungsten elektrodun bağlı olduğu torç bilgisayar kontrollü sistem ile kaynak parametrelerinin ayarlanmasına ve daha sonra ihtiyaç halinde tekrar kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Normalde kapalı tip kaynak başlıkları, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak bölgesini koruyan çember ile birlikte mükemmel bir hizalamayla 1,6 mm ile 152 mm çapında, maksimum 3,9 mm et kalınlığında boruların kaynağında kullanılır. Daha büyük çap ve et kalınlıklarında açık tip başlıklar tercih edilir [7].

Orbital kaynak yöntemi özellikle boruların yüksek kaliteli kaynağında TIG kaynağı ile birlikte tercih edilmektedir. Orbital denmesinin sebebi, kaynak edilecek boruların dairesel olarak hareket eden başlık içerisinde yer alan elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark tarafından kaynak edilmesi nedeniyledir [8, 9]. Özellikle boruların, flanş, fitting ve valflerin birbirleriyle kaynağında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan ark vasıtasıyla ısı iletimi sağlanmakta ve gerekirse ilave kaynak elektrodu kullanılarak kaynak yapılmaktadır [10]. Kaynak edilecek borular aynı hizaya getirilerek sabitlenir. Küçük DC motor vasıtasıyla tungsten elektrot kaynak edilecek yüzeylerde dairesel şekilde hareket ettirilir. Oksijenin kapalı kaynak başlığı içerisinde elektrot ve kaynak metalini oksidasyona maruz bırakmasını engellemek amacıyla koruyucu gaz (özellikle argon) doldurulur. Ark uzunluğu sabit kalır ve tel besleme ile ark voltajının kontrolüne ihtiyaç duyulmaz [11]. Şekil 2'de orbital TIG yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

Orbital TIG kaynağında kaynak akımı, ark uzunluğu, ilerleme hızı gibi kaynak parametreleri ayarlanabilir ve tekrar edilebilir olduğundan dolayı boruların birleştirilmelerinde kaliteli, tutarlı ve sürekli olarak aynı tip kaynaklar elde edilebilmektedir [13]. Bununla birlikte, yüksek üretim hızı, düşük çarpılma, ısı girdisinin kontrolüyle daha dar IEB oluşması yöntemin



Şekil 3. Dairesel Kaynak Yüzeyinin Sektörlere Bölünmesi [10]

diğer avantajları arasında sayılabilir [14]. Manuel kaynakta kaynakçı çok tecrübeli olsa dahi insan faktörü dolayısıyla hata yapılması olmaktadır.

Orbital kaynakta kaynak edilecek dairesel alan sektörlere bölünmektedir. Genellikle 4 sektöre bölünerek kaynak işlemi yapılır. Bölünen bu sektörler Şekil 3'te görülmektedir. Boruların

Tablo 1. Ana Malzemenin Kimyasal Bileşim Oranları

Kimyasal Bileşim (%)									
Cr	Ni	Mn	C	Mo	Si	P	S	N	Fe
22,31	5,26	0,76	0,017	3,15	0,49	0,023	0,0007	0,17	-

Tablo 2. Kaynak Parametrelerinin Gösterimi

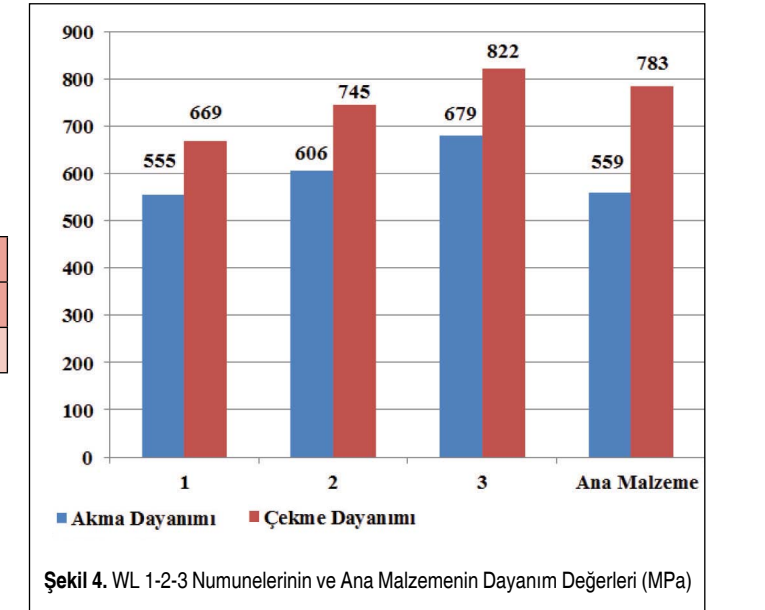
Kaynak parametreleri		1.	2.	3.
1. Bölge	Koruyucu Gaz Debisi (m ³ /s)	25	30	32
	Kök Koruyucu Gaz Debisi (m ³ /s)	15	15	17
	Son Süpürme Zamanı (s)	20	20	20
2. Bölge	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
	Yüksek Akım (A)	42,3	44,5	43,6
	Düşük Akım (A)	19,1	20,0	19,6
3. Bölge	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18
	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
	Yüksek Akım (A)	43,2	45,4	42,1
4. Bölge	Düşük Akım (A)	19,4	20,4	19,1
	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18
	İlerleme Hızı (mm/dak)	85	80	80
Ana Malzeme	Yüksek Akım (A)	41,5	44,1	43,2
	Düşük Akım (A)	18,7	20,0	19,6
	Yüksek-Düşük Akım Zamanı (s)	0,20	0,18	0,18

kaynağında aynı anda çok farklı pozisyonlar söz konusudur. Bu nedenle, ergiyen ve katılaşılan kaynak metalinin kontrolü önemlidir ve darbeli akım kullanılmasını zorunlu kılar [10].

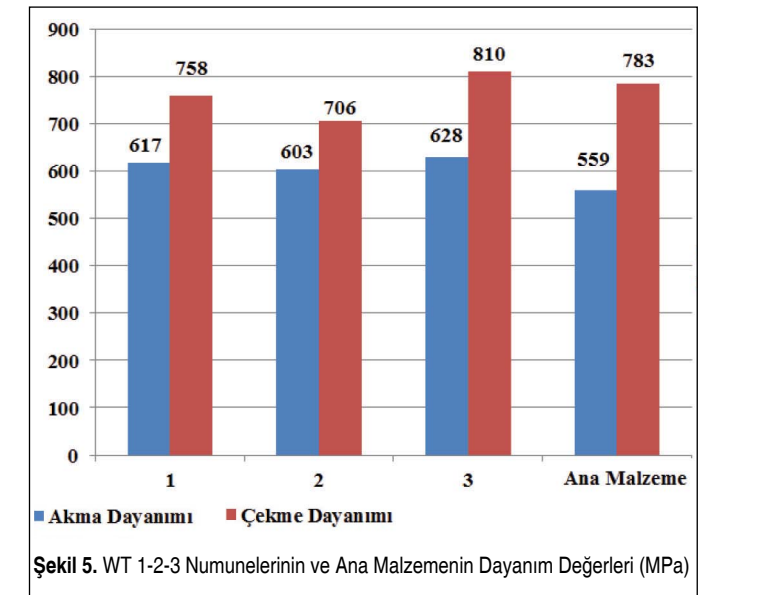
Paslanmaz çelik boruların kaynağında içerdikleri krom ve karbonun borunun iç yüzeyinde oksijen ile birleşerek krom karbür oluşturmasını engellemek amacıyla borunun iç hacmi koruyucu gaz ile beslenir [15].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

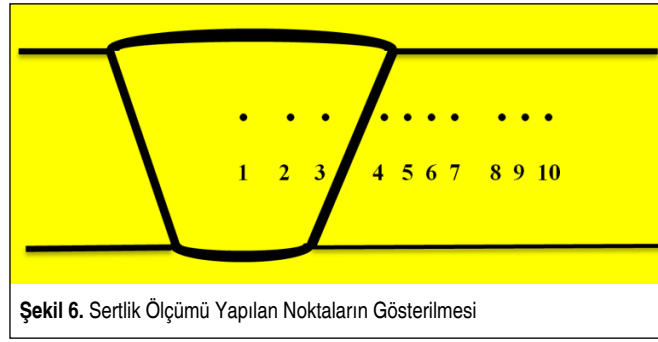
Bu çalışmada, 150 mm uzunluk, 1 mm et kalınlığı ve 25 mm çapında dupleks paslanmaz çelik borular (UNS 31803 ve EN 1.4462) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.



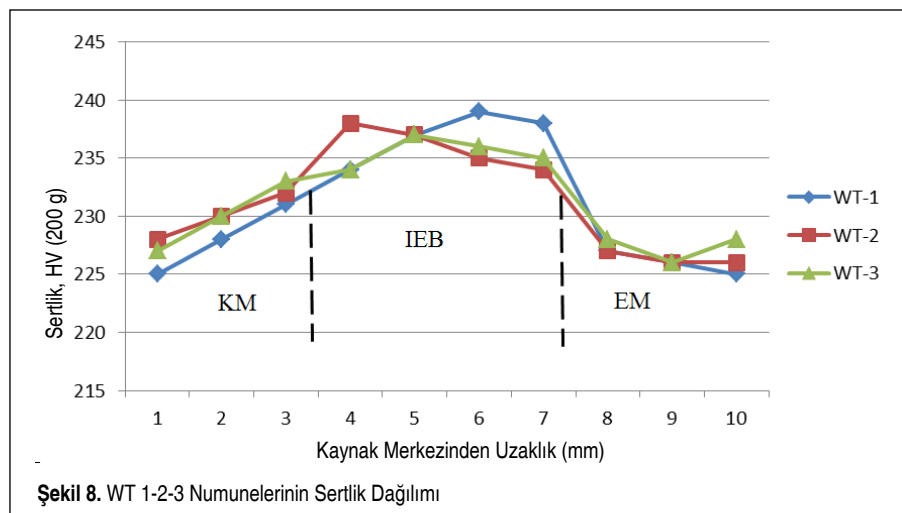
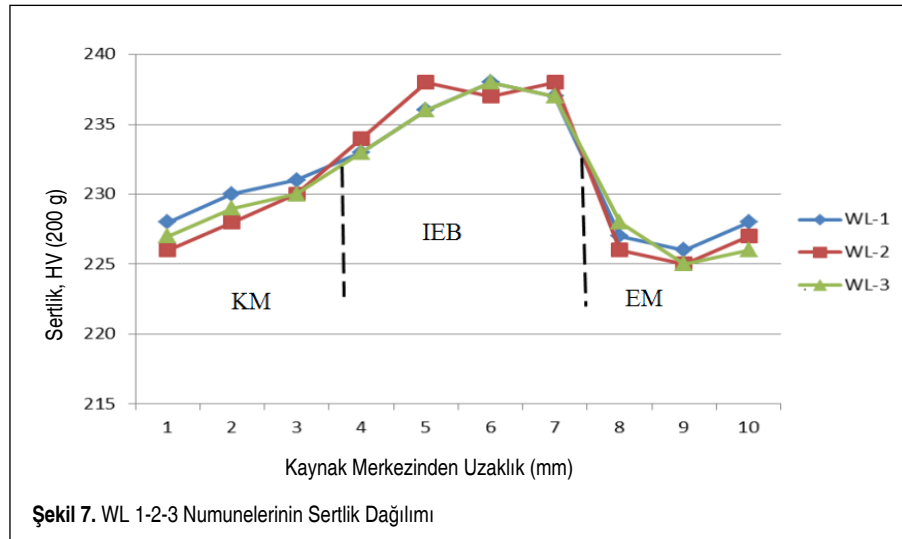
Şekil 4. WL 1-2-3 Numunelerinin ve Ana Malzemenin Dayanım Değerleri (MPa)



Şekil 5. WT 1-2-3 Numunelerinin ve Ana Malzemenin Dayanım Değerleri (MPa)



Kaynak işlemleri, üç farklı kaynak parametresi ile WL-20 (%2 seryum içeren, 30° uç geometrisi) ve WT-40 elektrot (%3,80 ile 4,20 toryum içeren, 30° uç geometrisi) kullanılarak saf argon gaz ortamında alın altına orbital TIG kaynak makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak edilen numunelere çekme, sertlik ve korozyon testi (EN ISO 3651-1) uygulanmış, SEM-EDX analizi ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Kaynak parametreleri ile WL ve WT elektrot



isimleri birleştirilerek numuneler isimlendirilmiştir. Her bir elektrot için Tablo 2'de belirtilen kaynak parametreleriyle kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinin her aşamasında kaynak voltajı 20 V olarak alınmıştır.

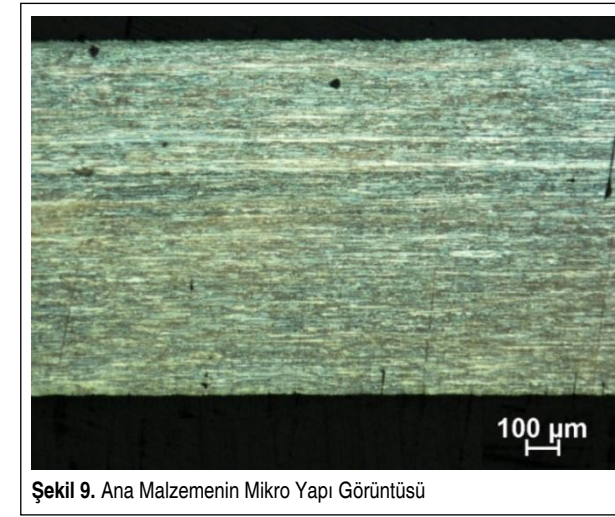
3.1 Çekme Testleri

Kaynaklı numunelerin çekme deneyleri TS EN ISO 4136: 2012 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri kaynak yönüne dik gelecek konumda tel erozyon ile kesilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

Çekme testleri incelendiğinde, kaynaklı birleştirilmiş numunelere ait akma dayanımı değerlerinin ana malzemeninkinden yüksek olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı değerlerinin ise ana malzemeye kıyasla, 1 ve 2 no'lu numunelerde düşük 3 no'lu numunelerde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, tüm numunelerde yüzde uzama değerlerinin ana malzemeye kıyasla daha düşük (%3-4 kadar) kaldığı görülmüştür. Tüm kaynaklı numuneler IEB'den kırılmıştır. Bu tespitlere göre, kaynak işlemi esnasında, yüksek tepe sıcaklığı (~1350 °C) ve yüksek soğuma hızlarına maruz kalan IEB'nin sahip olduğu göreceli ferritik tane iriliği, ferrit tane sınırları içerisinde oluşması muhtemel olan karbürler ve ferrit/ostenit dengesinin (kısmen ferritik ağırlıklı yapı) hepsi birlikte göz önüne alındığında, kaynaklı birleştirmelerin süneklik değerleri üzerinde kuvvetli olumsuz etkileri olduğu değerlendirilmiştir. İlave dolgu malzemesi kullanılmadan yapılan dupleks malzemelerin kaynağında ferrit/ostenit dengesi, akma ve çekme dayanımlarından çok süneklik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Westin [16] yaptığı çalışmada, dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında artan ferrit içeriğinin sünekliği azalttığını bildirmiştir.

3.2 Sertlik Testleri

Kaynaklı parçalardan hazırlanan numunelere 0,2 kg (HV0.2) yük uygulanarak vickers sertlik testleri yapılmıştır. Sertlik ölçümü yapılacak test noktaları için kaynak metalini (KM), ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve esas metalini (EM) kapsayacak şekilde 1 mm aralıklarla Şekil 6'da gösterildiği gibi 10 nokta belirlenmiştir.



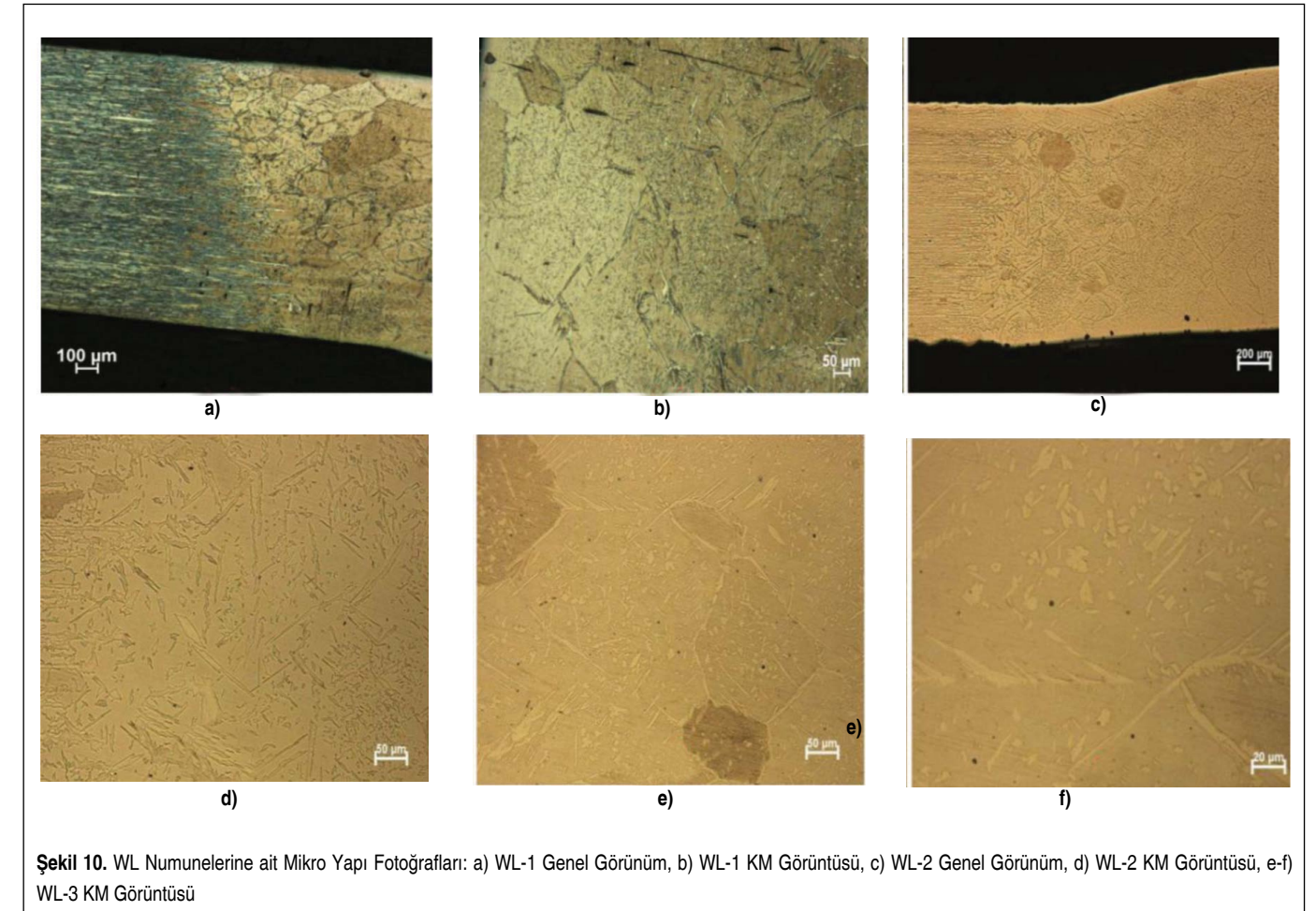
Belirtilen bölgeler için tespit edilen sertlik dağılımları Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.

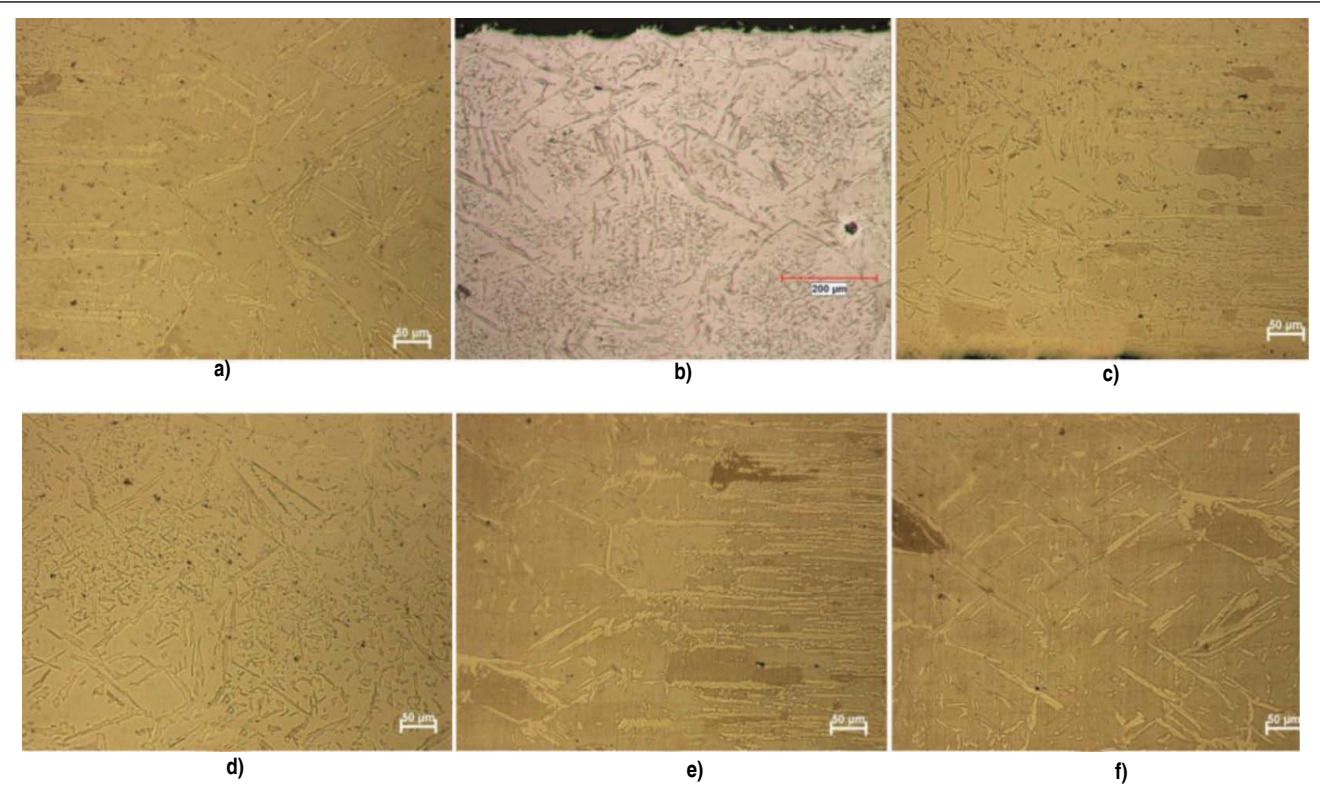
Sertlik değerleri incelendiğinde, tüm numunelerde esas metalin sertlik ortalaması 226 HV, kaynak metalini ve ısıdan etkilenmiş bölgede ise sertlikler sırasıyla 230 HV ve 235 HV ola-

rak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, WL ve WT kaynaklı numunelerinin EM, KM ve IEB'deki sertlik dağılımlarında önemli değişimler gözlenmemiştir. IEB'nin sertlik değerlerinin yüksek çıkması yüksek ısı girdisi ve yüksek soğuma hızları nedeniyle olduğu değerlendirilmektedir. Literatür incelemelerinde, ince et kalınlığına sahip numunelerin sertlik değerlerindeki artışın, kaynak işlemi esnasında IEB'nin maruz kaldığı yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma sonucunda bölgenin ferrit içeriğindeki artış ve artık gerilmeler ile ilişkili olabileceği bildirilmiştir [16].

3.3 Mikro Yapı İncelemeleri

Kaynaklı parçalardan et kalınlığı kesitinde hazırlanan numuneler, zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından Kalling's çözeltisi (5 g CuCl₂, 100 ml HCl, 100 ml Etanol) ile dağlanmış. Dağlanmış olan numunelerin kaynak metalini ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) mikro yapıları değerlendirilmiştir. Şekil 9'da ana malzemenin mikro yapı resmi görülmektedir. Şekil 10'da WL numunelerine ait mikro yapı resimleri ve Şekil 11'de WT numunelerine ait mikro yapı resimleri gösterilmiştir.





Şekil 11. WT Numunelerine ait Mikro Yapı Fotoğrafları: a) WT-1 IEB Görüntüsü, b) WT-1 KM Görüntüsü, c) WT-2 IEB Görüntüsü, d) WT-2 KM Görüntüsü, e) WT-3 IEB Görüntüsü, f) WT-3 KM Görüntüsü

Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde, dupleks çeliğin sıcak işleme (hot finished) üretilmesi neticesinde ostenit ve ferrit tanelerinin işlem yönünde (haddeleme) uzayıp şekil aldıkları görülmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında, öncelikle yapı tamamen ferritik katılaşma gösterir. Katılaşma süresince ostenit oluşumu gözlenmez. Fakat, sıcaklık azaldıkça katı-katı dönüşümüyle ferrit fazından ostenit çöker. Soğuma hızlarının IEB'ye nazaran daha yavaş olduğu kaynak metali içerisinde ve tane sınırlarında allotromorf ve Widmanstätten plakaları halinde oluşan ostenit oranının fazla olduğu görülmektedir.

Tüm numunelerde IEB genişliğinin göreceli olarak birbirine yakın olduğu görülebilir. IEB'ye bitişik bölgede oluşan görece iri tanelerin, ostenitin yüksek sıcaklık altında çözünüp ferrite dönüşmesi neticesinde oluştuğu söylenebilir. IEB'de ferritik katılaşma esnasında meydana gelen tane büyümesine bağlı olarak ferrit miktarında artış ve ferrit tane sınırlarında ostenit oluşumu görülmektedir.

Dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonunun yüksek mekanik özellikler ve korozyon dayanımını sağlaması açısından kaynak işlemi gibi ısı işlemler sonucunda yapılarının eşit miktarda ostenit ve ferrit içermesi beklenmektedir. Ferrit ve ostenit içeriğini belirlemek için parlatılarak dağlanmış numunelerde EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ana

Tablo 3. WL Numunelerine ait EDX Sonuçlarının Gösterimi

Analiz Bölgeleri	Elementler (%)					Numune Adları
	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	
Ana Malzeme	20,66	4,66	2,59	60,91	1,62	2205
Kaynak Metali	20,48	4,64	2,98	60,71	1,62	WL-1
	21,26	4,70	2,86	62,13	1,61	WL-2
	20,89	4,64	2,85	61,03	1,65	WL-3

Tablo 4. WT Numunelerine ait EDX Sonuçlarının Gösterimi

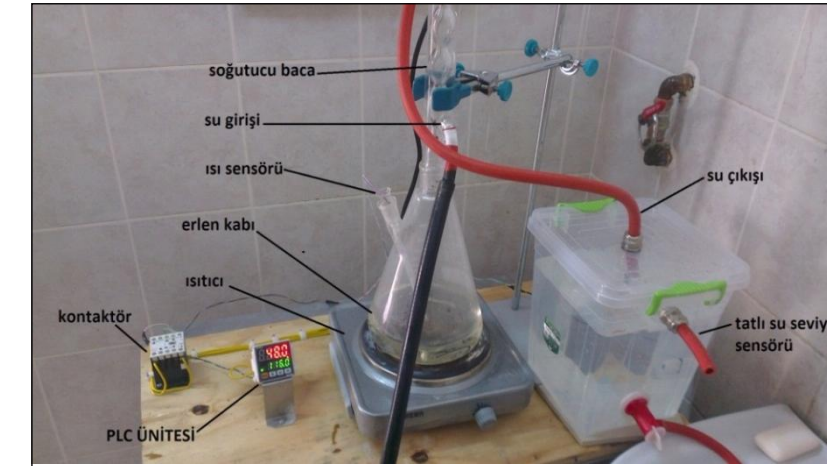
Analiz Bölgeleri	Elementler (%)					Numune Adları
	Cr	Ni	Mo	Fe	Mn	
Ana Malzeme	20,66	4,66	2,59	60,91	1,62	2205
Kaynak Metali	20,86	4,85	3,04	60,69	1,51	WT-1
	21,56	4,88	2,58	63,47	1,61	WT-2
	20,89	4,71	3,11	61,34	1,60	WT-3

metal ve kaynak metali kısımlarında ana alaşım elementleri olan demir, krom, nikel, molibden ve mangan içeriklerine ait EDX analizi sonuçları Tablo 3 ve 4'te yer almaktadır.

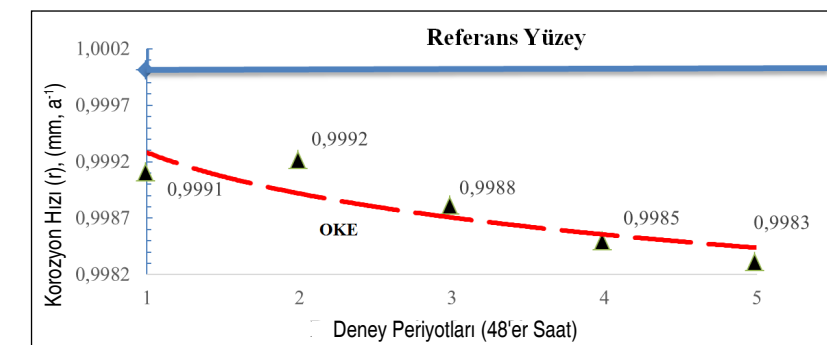
EDX analizi sonucunda, tüm numunelerin kaynak metalindeki kimyasal kompozisyonlarının esas metale yakın olduğu görülmektedir. Cr ve Mo (ferrit yapıcı) elementlerinin miktarları ana malzemeden yüksek, ostenit yapıcı Ni miktarının yüksek, Mn miktarının ise çok az düşük ve yakın olduğu belirlenmiştir. Kaynak metalindeki yüksek ısı girdisi ve soğuma hızına bağlı olarak dengeli bir ostenit/ferrit dağılımı oluştuğu söylenebilir.

3.4 Korozyon Testleri

Taneler arası korozyon deneyi (TS 3156 EN ISO 3651-1), tercihi olarak taneler arasında oluşturulan korozyon deneyini anlatır. Ostenitik ve dupleks paslanmaz çelikler 500-1000°C arası sıcaklıkta sabit tutulacak olursa böyle bir etkiye maruz kalır. Taneler arası korozyona karşı hassasiyet, kaynak işlemi sonucunda meydana gelir. Nitrik asit ortamında taneler arası korozyon, krom karbürlerin çökmesi, molibden içeren çeliklerde sigma fazı gibi metaller arası bileşiklerin çökmesi veya safsızlık elementlerinin tane sınırlarında ayrışması ile ilgili olabilir. Taneler arası korozyon deneyi ileri derecede yükseltgen ortamlarda kullanılması düşünülen (örneğin nitrik asit ortamında) borulara uygulanır.



Şekil 12. Hazırlanan Korozyon Test Düzeneğinin Gösterilmesi



Şekil 13. WL-3 Numunesine ait Korozyon Hızı Grafiği (OKE= Ortalama Korozyon Eğilimi)

Tablo 5. Numunelerin Deney Dönemlerindeki Korozyon Hızı

Deney periyotları	Numunelerin Korozyon Hızı (mm.a ⁻¹)					
	WL-1	WL-2	WL-3	WT-1	WT-2	WT-3
1	0,0010	0,0007	0,0009	0,0008	0,0009	0,0029
2	0,0071	0,0005	0,0008	0,0007	0,0006	0,0059
3	0,0010	0,0008	0,0012	0,0014	0,0015	0,0082
4	0,0012	0,0013	0,0015	0,0021	0,0017	0,0036
5	0,0017	0,0018	0,0017	0,0036	0,0012	0,0028

Tablo 6. Deney Sonu- Başlangıç Ağırlıkları Esas Alınarak Hesaplanan Korozyon Hızı Değerleri

Numune Adı	Numunelerin Korozyon Hızı (mm.a ⁻¹)
WL-1	0,0057
WL-2	0,0052
WL-3	0,0063
WT-1	0,0089
WT-2	0,0062
WT-3	0,0023

1200 mesh zımpara ile yüzeyleri ve kenarları zımparalanarak mekanik tufalı giderilen numuneler Şekil 12'de gösterilen 2 lt'lik 7 soğutucu erlen kabında %65'lik nitrik asidin içerisinde 48 saatlik dönemler halinde 5 defa kaynatılmıştır. Hazırlanan deney sistemi doğruluk, güvenilirlik sağlamak açısından nitrik asidin sıcaklığını kaynama sıcaklığına (123 °C) yakın 117 °C de sabit tutabilmesi ve su kesintisi durumunda sistemin devreden çıkartılabildiği özelliklerine sahip olacak şekilde elektronik kontrollü olarak tasarlanmıştır. Kullanılan sistem Şekil 12'de görülmektedir.

Her dönem sonunda oluşan kütle kaybını belirlemek için hassas terazi kullanılmıştır. Nitrik asit çözeltisinin kimyasal reaksiyon etkileri, her deney periyodunun sonunda ve toplam deney süresinin sonunda ölçülen kütle kaybıyla belirlenmiştir. Kütle kaybı belirlenirken her defasında cihaz kalibre edilmiş, her ölçüm 5'er defa yapılmış ve standart sapma göz önüne alınarak ortalama değerleri hesap edilmiştir. Deney dönemlerindeki korozyon hızı ve deney sonu-başlangıç ağırlıklarına göre korozyon hızları Tablo 5 ve 6'da yer almaktadır.

WL-3 numunesine ait elde edilen korozyon hızı Şekil 13'te verilmiştir.

Korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin korozyon hızlarının referans yüzeyi ile aralarında bulunan alanın çok yakın olduğunu görmekteyiz. Aynı zamanda elde edilen korozyon

hızları, KM ve IEB’de kaynak işlemi sonucunda nitrik asit içerisinde taneler arası korozyona karşı hassasiyeti oluşturan krom karbürlerin ve nitrürlerin çökmesi, sigma fazı gibi metallar arası bileşiklerin çökmesi veya safsızlık elementlerinin tane sınırlarında ayrışması durumlarının yoğun/aşırı olmadığını göstermektedir.

4. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada, dupleks paslanmaz çelik boruların Orbital TIG kaynağında kaynak parametrelerinin, kaynaklı birleştirmenin dayanım, mikro yapı ve korozyon özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- EDX analizi sonucunda, tüm numunelerin kaynak metalindeki kimyasal kompozisyonlarının esas metale yakın olduğu görülmüştür.
- Sertlik değerleri incelendiğinde, tüm numunelerde esas metalin sertlik ortalaması 226 HV, kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölgelerde ise sertlikler sırasıyla 230 HV ve 235 HV olarak tespit edilmiştir.
- Tüm numuneler IEB’den kopmuştur. Tüm numunelerde, EM’in uzama değerlerine (%30) kıyasla çok düşük uzama değerleri (%3-4 kadar) elde edilmiştir.
- Tüm numunelerde kaynak metali içerisinde, ferrit tane sınırlarında ostenit oluşumu, Widmanstätten plakalarının oluşumu ve ferrit taneleri içerisinde ostenit oluşumu görülmüştür.
- Korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin korozyon hızlarının referans yüzeyi ile aralarında bulunan alanın çok yakın olduğunu görmekteyiz. Bu duruma göre, orbital kaynak yöntemi ile birleştirilen dupleks paslanmaz çelik boruların yeterli korozif dayanımı sağladıkları tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

1. **Aran, A., Temel, M. A.** 2004. Paslanmaz Çelikler–Yassı Mammuller, Üretimi-Kullanımı-Standartları, Sarıtaş Teknik Yayın, no: 1, İstanbul.
2. **Kaluc, E., Taban, E.** 2007. Paslanmaz Çelikler, Geliştirilen Yeni Türleri ve Kaynak Edilebilirlikleri, MMO/461, TMMOB MMO Yayın, İstanbul.

3. http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_3rd_Edition.pdf, son erişim tarihi: 22.08.2015.
4. **Ciofu, F., Nioata, A., Dobrota, D.** 2010. “Welds in the Duplex Stainless Steel,” Fascicle of Management and Technological Engineering, vol. 19.
5. <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, son erişim tarihi: 22.08.2015.
6. **Emel, T.** 2007. “Yapısal Uygulamalar İçin Geliştirilen Modifiye 12 Cr Ferritik Paslanmaz Çeliğinin Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti,” Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
7. **Mannion, B., Heinzmann, J.** 1999. “Orbital Tube Welding,” Flow Control. December 1999.
8. **Wildorf, R., Pistor, R., Sixsmith, J. J., Jin, H.** 2006. “Welding Aluminum Pipe and Tube with Variable Polarity,” Welding Journal, vol. 85, no. 4, p. 42-43.
9. **Emmerson, J.** 2000. “Orbital Narrow Gap MCW Pipe Welding,” Welding-Metal Fabrication, vol. 68, no. 8, p. 9-11.
10. <http://www.polysoude.com/orbital-welding>, son erişim tarihi: 29.01.2016.
11. **Garcia, J. A. O., Lima, G. L., Pereira, W. D. B., Guimarães, V. A., Neto, C. M., Paranhos, R. P. R.** 2010. “Characterization of Titanium Welded Joints by the Orbital Gas Tungsten Arc Welding Process For Aerospace Application,” Journal of Aerospace Technology and Management, São José dos Campos, vol. 2, no. 2, p. 211-218.
12. **Benway, E. A.** 2009. “What to Look for in Orbital Welding Training Programs,” Penton's Welding Magazine, vol. 82, no. 5, p. 18-22.
13. **Benway, E. A.** 2000. “Advancements in Automatic Orbital Welding Expand its Use, Provide Welders with More Option,” Industrial Maintenance-Plant Operation, vol. 61, no. 7, p. 22.
14. **Harris, I. D.** 2011. “Welding Advances in Tube And Pipe Applications,” Welding Journal, vol. 90, no. 6, p. 58-63.
15. **Purnell, S.** 2003. “How to Achieve a Clean Process Line in Stainless Steel Pipes,” World Pumps, vol. 2003, no. 447, p. 17-18, 20-21.
16. **Westin, E. M.** 2010. “Microstructure and Properties of Welds in The Lean Duplex Stainless Steel LDX 2101,” Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.