

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402

MART/MARCH 2016 SAYI/NUMBER : 674



tmmob makina mühendisleri odası aylık yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendisimakina

makale

50

ZİRH ÇELİKLERİNİN KAYNAĞINDA HİDROJEN İÇERİĞİNİN RAMAN SPEKTROSKOPİ YÖNTEMİ İLE ANALİZ EDİLMESİ
INVESTIGATION OF THE HYDROGEN CONTENT IN WELDING OF ARMOR STEELS BY RAMAN SPECTROSCOPY
Göksef DURKAYA, Hakan KAPLAN, Barış ÇETİN, Murat GÜRLEYİK, Ali Rıza PIŞKIN, Kıvılcım ERSOY, Halim MEÇO

57

GAZALTI KAYNAĞINDA BULANIK MANTIK KONTROLLÜ İZ TAKİP SİSTEMİNİN UYGULANMASI
APPLICATIONS OF FUZZY CONTROL IN GAS SHIELDED ARC WELDING SEAM TRACKING SYSTEM
Ahmet ÖZTÜRK, İlhan ASİLTÜRK, Hayrettin DÜZCÜKOĞLU, Ömer AYDOĞDU

65

İNCE PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARIN FİBER LAZER İLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ
INVESTIGATION OF THE WELDABILITY OF THIN STAINLESS STEEL SHEET BY FIBER LASER
Cansu KÖKEY, Seçkin SEZGİN, Niyazi ÇAVUŞOĞLU, Simge GENÇALP İRİZALP, İbrahim Etem SAKLAÇOĞLU

ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAĞINDA HİDROJEN İÇERİĞİNİN RAMAN SPEKTROSKOPİ YÖNTEMİ İLE ANALİZ EDİLMESİ*

Göksel Durkaya¹

Yrd. Doç. Dr.,
goksel.durkaya@atilim.edu.tr

Hakan Kaplan¹

hakan.kaplan@psaron.com

Barış Çetin²

cecin.baris@fnss.com.tr

Murat Gürleyik² **

murat.gurleyik@fnss.com.tr

Ali Rıza Pişkin²

aliriza.piskin@fnss.com.tr

Kıvılcım Ersoy²

Dr.,
kivilcim.ersoy@fnss.com.tr

Halim Meço²

Dr.,
halim.meco@fnss.com.tr

¹ Atılım Üniversitesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği,
Nanoskopi Laboratuvarı, Ankara

² FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., Ankara,

INVESTIGATION OF THE HYDROGEN CONTENT IN WELDING OF ARMOR STEELS BY RAMAN SPECTROSCOPY

ÖZ

Yüksek dayanımlı çeliklerin özel bir sınıfı olan zırh çeliklerinin kaynaklı birleşiminde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri soğuk çatlaklardır. Soğuk çatlakların oluşum mekanizması günümüzde bile tam olarak belirlenememiş olsa da en büyük risk faktörünün ortamda veya çelik alaşımında bulunan hidrojen içeriği olduğu bilinmektedir. Literatürde farklı görüşler olsa da genel bir kabul olarak, 5 ppm değerinden daha yüksek oranda hidrojen içeren çelik malzemelerde yüksek oranda soğuk çatlak riski bulunmaktadır. Bu değer üzerindeki çözülmüş hidrojen miktarı, ince çatlaklara, hidrojen gevrekliği ve kabarcıklanmasına yol açarak çeliğin mekanik performansını yıkıcı şekilde etkileyebilmektedir. Raman spektrometresi ise temel olarak fonon titreşimleri ile ışığın etkileşimini analiz ederek malzemenin kimyasal özelliklerini tespit etmeye yarayan tahribatsız bir yöntemdir. Bu çalışmada, hidrojenin, çeliğin moleküler yapısına etkisini incelemek için Raman spektroskopisi ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde kaynak bölgesinde analizler yapılarak karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen, bağ yapısının oluşum dinamikleri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, hidrojen içeriği, soğuk çatlak, Raman spektroskopisi

ABSTRACT

Cold crack formation is one of the major challenges in welding of armor steels which is a special class of high strength steels family. Although the origin and the pathways leading to cold crack mechanism are not completely understood, it is a well-known fact that the existence of ambient hydrogen in steel alloy or weld pool plays the major role. Generally, it is accepted that steels with hydrogen content more than 5 ppm have high tendency in cold cracking. Having hydrogen content superior to this specific value may cause hairline cracks, hydrogen embrittlement or hydrogen blistering which result in catastrophic deviations in mechanical properties. On the other hand, Raman spectroscopy is a non-destructive testing method that is used to determine chemical composition and molecular strain in materials by utilizing phonon vibrations. In this study, Raman spectroscopy experiments have been performed on welded armor steels in order to analyze the bonding dynamics of carbon, hydrogen, oxygen, and nitrogen.

Keywords: Steel, hydrogen content, cold crack, Raman spectroscopy

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 15.03.2016

* 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 Dergimiz için makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Durkaya, G., Kaplan, H., Çetin, B., Gürleyik, M., Pişkin, A. R., Ersoy, K., Meço, H. 2016. "Zırh Çeliklerinin Kaynağında Hidrojen İçeriğinin Raman Spektroskopisi Yöntemi ile Analiz Edilmesi," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 674, s. 50-56.

1. GİRİŞ

Kaynaklı imalat, endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın birleştirme yöntemlerinden biridir. Kaynaklı birleştirme yöntemleri çelik, demir vb. metalik parçaların birleştirilmesinde kullanılabilirdiği gibi termoplastik, kompozit vb. gibi demir dışı (non-ferrous) malzemelerin birleştirilmesinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle yapısal parçalar için kullanılacak metalik kaynak işlemlerinde, daha özel olarak çelikler içinse gazaltı kaynağı (MIG/MAG) en yaygın yöntemdir. 1930'larda keşfedilen bu kaynak yöntemi çelikler için en verimli birleştirme yöntemi olarak kabul edilmektedir [1].

Mühendislik tasarımlarında, bitmiş ürün üstündeki dayanım istekleri gün gittikçe artmaktadır. Tasarım mühendisleri sürekli olarak daha yüksek dayanıma sahip, bir başka deyişle, daha yüksek statik veya dinamik kuvvetlere dayanabilecek tasarım, malzeme ve birleştirme teknikleri üzerine çalışmaktadırlar. Diğer bir taraftan, temel olarak otomotiv sektöründeki zorlayıcı koşullar ve yönetmelikler, devamlı bir şekilde daha yüksek dayanımlı çeliklerin üretilmesini ve geliştirilmesini tetiklemektedir. Sektördeki güvenlik standartlarının artması, daha az emisyon oranına sahip olması açısından, daha hafif araçların üretilmek istenmesi, vb. nedenlerle uzun yıllardır, yüksek dayanımlı (mukavemetli) çelikler (Advanced High Strength Steels / AHSS) konusu araştırılmakta ve geliştirilmektedir [2]. Yeni geliştirilen bu yüksek mukavemetli çelikler her ne kadar önemli bir ilerleme potansiyeline sahip olsa da kaynaklı birleştirme anlamında yeni zorluklar da yaratabilmektedir. Örneğin otomotiv sektörü için geliştirilmiş olan TWIP çelikleri Mn, Si, Al gibi yüksek oranda içerdikleri alaşım elementleri nedeniyle kaynak performansları ciddi oranda düşüktür [2]. Aslında "kaynaklanamaz" çelik diye bir malzeme yoktur. Doğru metalurjik koşulların yerine getirilmesi şartıyla her çelik kaynaklanabilir. Ancak bu koşullar bazen o kadar çapraşık ve zorlu olabilir ki bunların pratikte uygulanması rasyonel olmaz [3].

Askeri kara araçları imalatı sektörü özelinde ise gerek balistik koruma, gerekse yüksek yapısal dayanım istekleri için yüksek mukavemetli çeliklerin tasarımlarda kullanımı olmazsa olmazdır. Aynı şekilde askeri kara araçlarının imalatında kullanılan kaynaklı birleştirmelerde balistik performansla ilgili istekler de mevcuttur. Bu tip uygulamalarda hem malzemenin hem de kullanılan dolgu malzemesinin ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB), şartnamelerde belirtilen dayanım değerlerini aynı anda sağlaması gerekmektedir.

2. YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLERİN KAYNAĞINDAKİ TEKNİK ZORLUKLAR

Yüksek dayanımlı çelikler, özellikle ultra yüksek dayanımlı çelikler genel olarak yüksek oranda karbon içeriğine ve yo-

ğun olarak martensitik bir mikro yapıya sahiptir. Sahip oldukları yüksek karbon ve bazı alaşım elementleri nedeniyle eşdeğer karbon içeriği değerleri yüksektir. Yüksek eşdeğer karbon içeriği ve martensitik mikro yapı kaynak edilebilirlik için zorlayıcı etkiler yaratmaktadır. Soğuk çatlak (cold crack) oluşumu, martensitik yüksek dayanımlı çeliklerin kaynaklı birleştirilmesinde görülen en tipik hata biçimidir [4]. Soğuk çatlakların en kritik yanı, kaynaktan sonraki 48 saat içinde ortaya çıkabilme riskidir. Kaynakta soğuk çatlak oluşumu için 3 temel etkenin bir arada bulunması gereklidir:

1. Malzemedeki görece yüksek alaşım miktarı
2. Birleşim detayındaki hidrojen miktarı (nem, yağ, kir, pas, boya vb.)
3. Birleşimde kaynak sonrası oluşan kalıntı çekme gerilmeleri

Bu etkenlerden birincisine, tasarım istekleri ve son üründen beklentiler nedeniyle müdahale etmek mümkün olmamaktadır. Fakat malzemenin alaşım miktarına ve eşdeğer karbon içeriğine bağlı olarak ön ısı uygulayarak, soğuma hızını kontrol altına almak (azaltmak) ve hidrojenin ortamdaki uzaklaşması için yeterli zamanı sağlamak, soğuk çatlak oluşma riskini önemli ölçüde azaltacaktır. İkinci etkenin ortadan kaldırılması için, kaynak öncesi temizlik uygulamaları ile yabancı maddeleri uzaklaştırmak ve ön ısı ile hidrojen kaynağı olan nemi ortamdaki kaldırmak, soğuk çatlak oluşumunu önlemek için kritik öneme sahiptir. Etkenlerden üçüncüsü olan kalıntı gerilmeler, her ne kadar fiktürel metotları ve çeşitli imalat yöntemleri (dinamik kenetleme uygulamaları vb.) ile azaltılabilir de kaynak işlemindeki hızlı ve bölgesel ısınma-soğuma etkilerinden dolayı kaçınılmazdır. Fakat etkenlerden biri ve/veya birkaçı ortadan kaldırıldığında, soğuk çatlak riski büyük ölçüde azalmış olur. Bu nedenle zırh çelikleri gibi yüksek dayanımlı ve yüksek tokluk değerli çelikler, kaynak işlemi öncesinde, kaynak sonrası soğuma hızını azaltma amacıyla ön ısıtma (pre-heating) işlemine tabii tutulur [2]. Soğuk çatlakları önlemek için değişik çeliklere uygulanması gereken ön ısıtma sıcaklık değerlerine ilişkin tavsiyeler FD CEN ISO/TR 17844 numaralı teknik rapor dokümanında yer almaktadır [5].

Soğuk çatlamanın en büyük nedeni olan hidrojen gevrekliğini açıklayan birçok mikroyapısal mekanizma literatürde tanımlanmıştır. Fakat hangi mekanizma ile tanımlanırsa tanımlansın, hidrojen içerik miktarı, hidrojenin kaynağı ve sisteme uygulanan gerilmelere göre karşılaşılan malzeme davranışı farklı olabilmektedir [6]. Hidrojen içeriği kadar bunun hangi aşamada malzeme sistemine girdiği (çelik üretiminde sıvı haldeyken, kaynak işlemi esnasında vb.), malzemenin mikroyapısı (düşük karbonlu çelik, martensitik çelik, paslanmaz çelik vb.), malzemenin maruz kaldığı dış kuvvetler de malzemenin servis ömrü boyunca ortaya koyacağı me-

kanik performansı için önemlidir. Değişik malzemeler için deneylerle tespit edilmiş kritik hidrojen içerikleri literatürde mevcuttur. Örneğin vakum ortamında işlenmiş bir çelik için gevrekliği ortadan kaldıran hidrojen içerik değerinin 2 ppm olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde belirli bir kimyasal kompozisyondaki %0,005 oksijen ve %0,005 kükürt içeren bir jant çeliği içinse kritik hidrojen içeriği sıvı hal için 1,9 ppm, katı hal içinse 1,06 ppm olabilmektedir [7]. Bu konu özelinde çeşitli kalitedeki paslanmaz çelikler için de önemli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin matematiksel modellemeler ve deneysel çalışmalar ile AISI 430 paslanmaz çelik için sünek mikro çatlak davranıştan, gevrek (brittle) davranışa geçişi sağlayan hidrojen miktarının $1,45 \cdot 10^{-5}$ mol/cm³ olduğu tespit edilmiştir [8]. Fakat genel ve çok hassas olmayan bir yaklaşımla, çeliklerde 5 ppm değerinin üzerindeki hidrojen içeriğinin soğuk çatlak oluşumu için ciddi bir risk faktörü oluşturduğu belirtilebilir.

Açıklanmaya çalışılan tüm bu nedenlerden ötürü, yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde özellikle kaynak dikişi ve bu bölgeye yakın bölgelerde hidrojen içeriğinin tespit edebilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Raman spektrometresi ölçümleri alınarak çelik, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak (füzyon) bölgesinde kimyasal analiz yapılarak hidrojen içeriği tespit edilmesine dönük analizler yapılmıştır.

3. RAMAN SPEKTROSKOPİ

Raman spektrometresi ise temel olarak fonon titreşimleri ile ışığın etkileşimini analiz ederek malzemenin kimyasal özelliklerini tespit etmeye yarayan tahribatsız bir yöntemdir. Yöntem, 1928 yılında Hintli fizikçi C. V. Raman tarafından keşfedilmiştir. C. V. Raman, kendisine 1931 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandıran çalışmasında, moleküllerle etkileşim sonucunda saçılan ışığın dalga boyunun büyük bir kısmının gelen ışık ile aynı dalga boyunda olduğunu, çok az bir kısmının ise farklı dalga boylarına kaydığını ve bu kaymanın saçılmaya neden olan moleküllerin kimyasal yapısına bağlı olduğunu bulmuştur. Işığın farklı dalga boylarına kayması "Raman Saçılması" olarak adlandırılır ve Raman saçılmasının fiziksel temeli, ışık demetini oluşturan taneçikler ile ortamda bulunan moleküllerin çarpışması ile oluşan elastik olmayan saçılmadır. Elastik olmayan saçılma ile kastedilen fotonlarla moleküllerin çarpışması sonucunda fotonların enerjisinde, dolayısıyla da dalga boyunda değişim olmasıdır. Işık saçılması sırasında saçılan ışığın enerjisi ve moleküller ile etkileşen foton enerjisi eşit ise bu tür saçılmaya da elastik saçılma (Rayleigh Saçılması) adı verilir. Rayleigh saçılmasında, Raman saçılmasına göre $10^4 - 10^5$ kez daha şiddetli saçılma oluşur. Raman saçılması sonrasında toplam enerji korunduğu için fotonun kaybettiği ya da kazandığı enerji,

molekülün titreşim enerji düzeyleri arasındaki enerjiye eşit olmalıdır. Fotonun kazandığı ya da kaybettiği enerji miktarı belirlenerek moleküllerin titreşim enerji düzeyleri hakkında bilgi edinilebilir [9]. Raman spektrometresi özellikle ince film kaplamaların karakterizasyonunda yoğun olarak kullanılmaktadır [10].

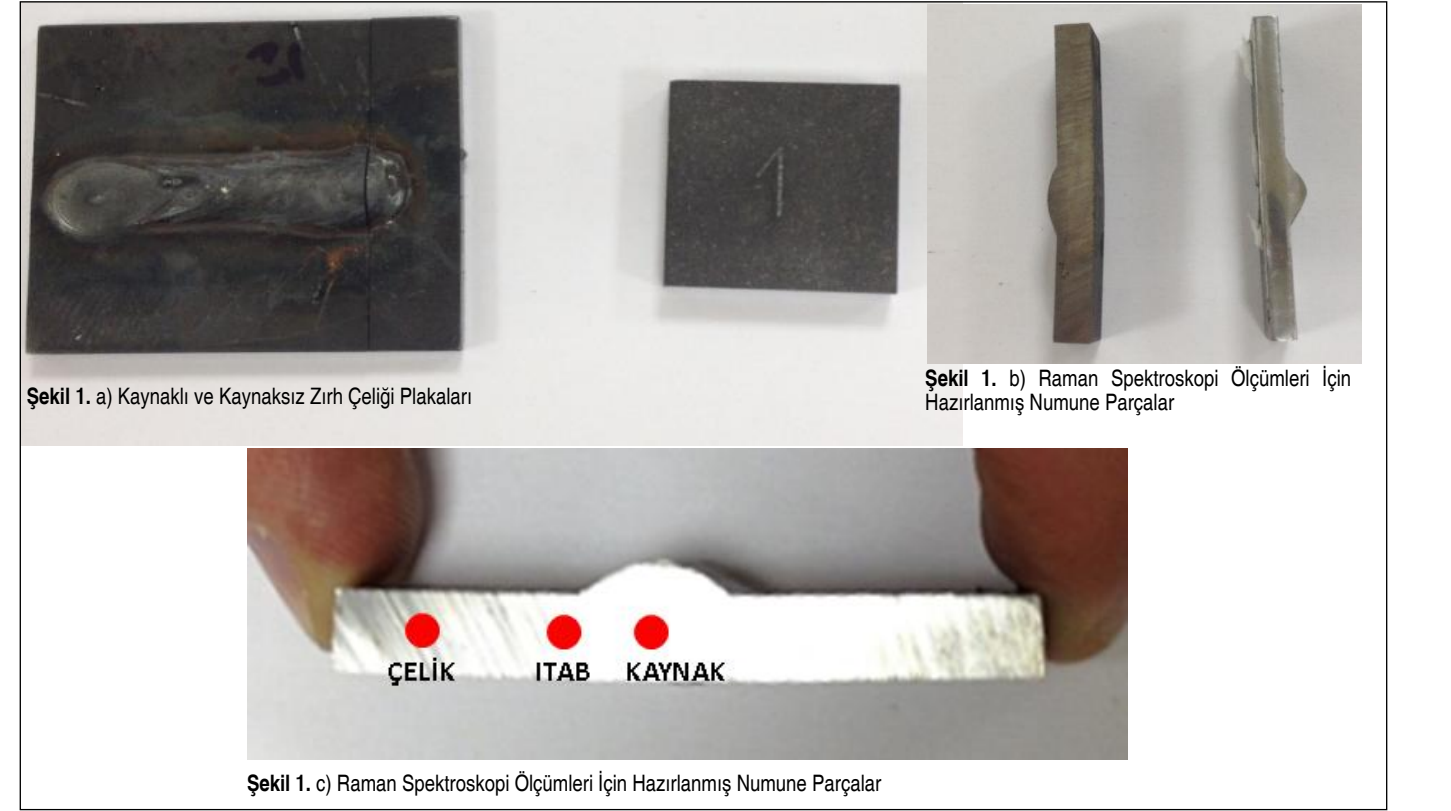
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar, Atılım Üniversitesi Nanoskopi Laboratuvarı'nda metal parçaların analizi için özel olarak geliştirilen Raman spektrometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu deneylerde incelenecek kaynak bölgelerindeki yüzeylerin, kimyasal yapısını değiştirmemek için numuneler üzerinde asgari düzeyde işlem yapılmış, numuneler sadece kesme operasyonundan geçirilmiştir. Çünkü bu aşamada henüz, hassas sıvı ile zımparalama ve bakalitleme gibi standart metalografik numune hazırlama işlemlerinin incelenecek yüzeydeki kimyasal etkilerine karşı bir bilgi mevcut değildir. Standart metalografik örnek hazırlama işlemlerinin malzemeye etkileri üzerine karşılaştırmalı analizler daha sonraki çalışmalarda yapılacaktır.

Hazırlanan kaynaklı ve kaynaklız ArmoX 500T (MIL-DTS-46100, Class I) zırh çeliği plakalar Şekil 1a ve 1b'de gösterilmektedir. Şekil 1a'da gösterilen kaynaklı plakalar, SiC testere ile kesilerek Şekil 1b'de gösterilen numuneler hazırlanmış, daha sonra da Raman spektroskopik analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı numuneler, standart metalografik işlemlerle de hazırlanarak bakalite yerleştirilmiş ve sonraki deneyler için hazırlanmıştır. Şekil 1c'de ise deneylerin yapıldığı parça kesiti ve ölçüm noktaları gösterilmektedir. Numuneler üzerinde 3 ayrı noktada ölçümler yapılmıştır: 1) Çelik: Kaynaktan etkilenmemiş bölge, 2) ITAB: Isı tesiri altındaki bölge, 3) Kaynak: Kaynak bölgesi.

Gazaltı kaynak işlemi için ER 110 S-G kaynak teli kullanılmıştır. ArmoX 500T çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir. ER 110 S-G kaynak teline ait kimyasal kompozisyon değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Zırh çeliği plakalarının gazaltı kaynağında kullanılan kaynak parametreleri ise Tablo 4'te belirtilmiştir.

Standart Raman spektroskopi sistemleri, mikroskopi uygulamaları için geliştirilmiş ve yoğun olarak kimyasal, biyolojik ve küçük katı örnekler için tasarlanmıştır. Dolayısıyla, direkt sanayi örneklerinde kullanımları zordur. Bu sebepten dolayı, sanayi örneklerini analiz edebilecek özel bir metalurjik Raman spektroskopi sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem, 50mW, 532 nanometre dalga boyunda bir lazer kaynağını Raman uyarım kaynağı olarak kullanmakta ve değişik büyüklükte ve geometride örneklerin kolay analizine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. a) Kaynaklı ve Kaynaklız Zırh Çeliği Plakaları

Şekil 1. b) Raman Spektroskopi Ölçümleri İçin Hazırlanmış Numune Parçaları

Şekil 1. c) Raman Spektroskopi Ölçümleri İçin Hazırlanmış Numune Parçaları

Tablo 1. ArmoX 500T Çeliğinin Mekanik Özellikleri

Sertlik (HBW)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%) A ₅	Uzama (%) A ₅₀
480-540	1250	1450-1750	%8	%10

Tablo 2. ArmoX 500T Kimyasal Kompozisyonu

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0,32	0,4	1,2	0,015	0,010	1,0	1,8	0,7	0,005

Tablo 3. ER 110 S-G Kimyasal Kompozisyonu

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo 0,07
%0,07	%1,60	%0,45	%0,30	%2,10	%0,40

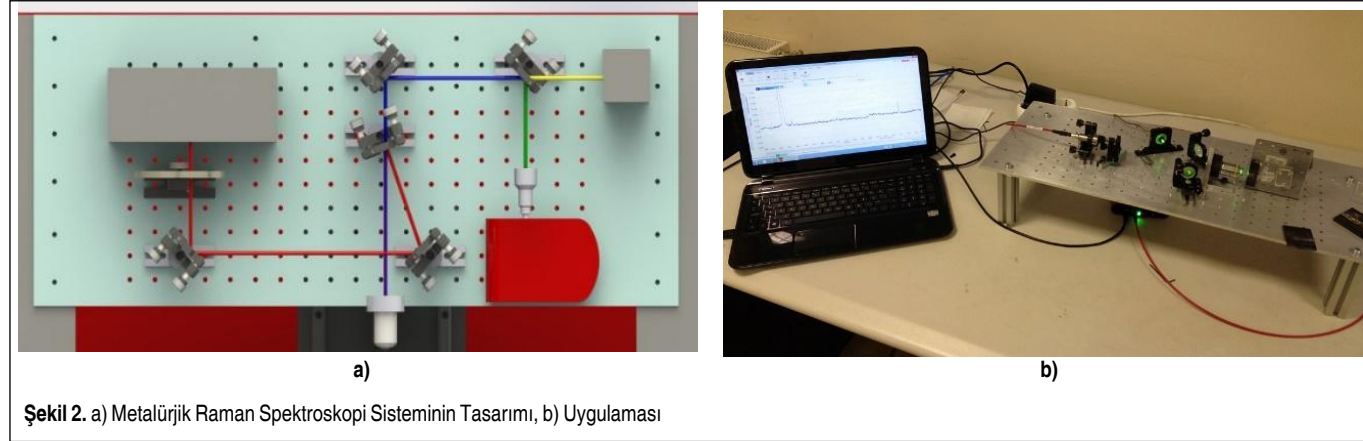
Tablo 4. Gazaltı Kaynak Parametreleri

Volaj (V)	Akım (A)	Kaynak Teli Tipi	Tel Hızı (m/dk)	Tel Çapı (mm)
33-34	190-200	ER 110 S-G	6,50	1,20

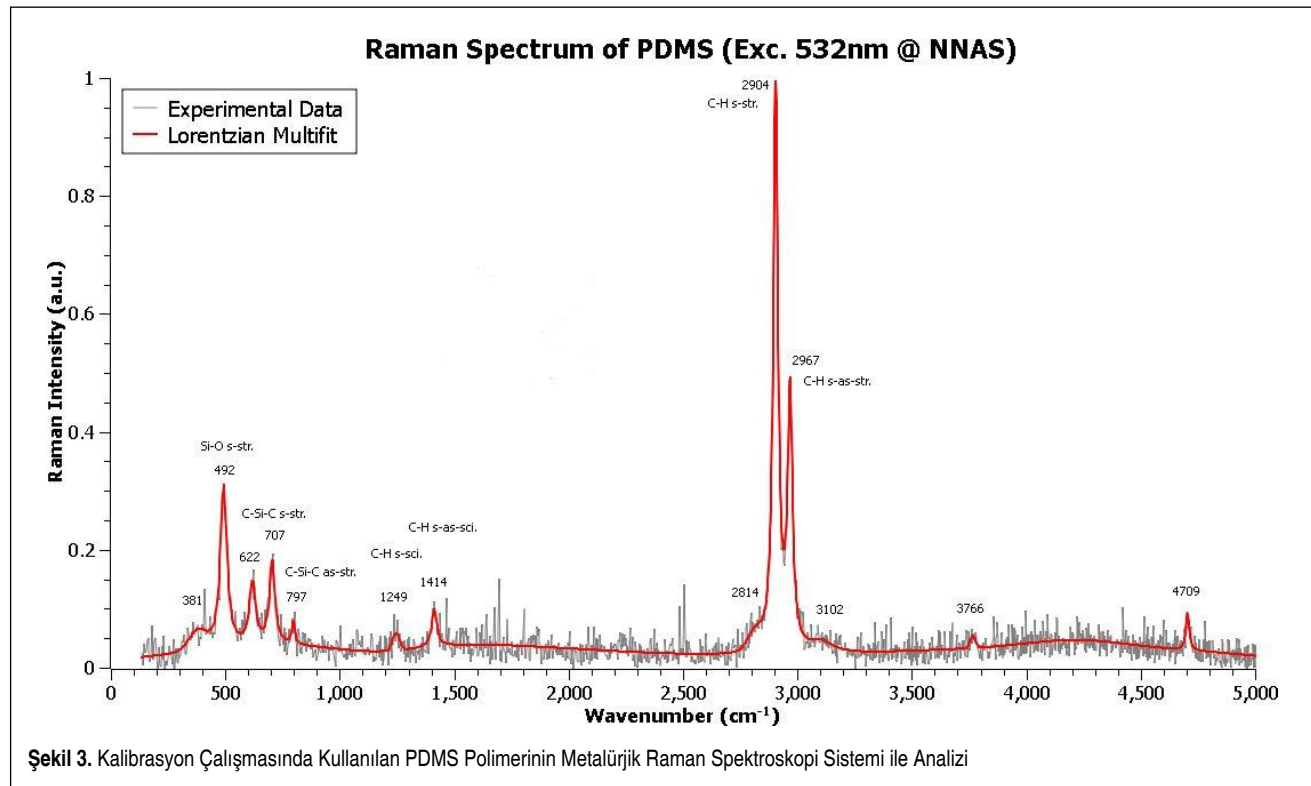
Şekil 2a'da sistemin tasarımı, Şekil 2b'de ise uygulaması gösterilmektedir. Uygulama resminde görüldüğü üzere, metalurjik Raman spektroskopi sistemi az yer kaplayan ve portatif uygulamaları mümkün kılacak bir şekilde tasarlanmıştır.

Metalurjik Raman spektroskopi sisteminde kullanılan fiber spektrometre ile 532 nm uyarımda, 500-5000 cm⁻¹ enerji aralığı, 4 cm⁻¹ spektral çözünürlükte gözlemlenmektedir. Böylece tüm katı ve organik moleküllerin Raman spektral çizgilerinin

görüntülenmesi mümkündür. Geliştirilen metalurjik Raman spektroskopi sisteminin doğrulama çalışmalarında PDMS polimeri kullanılmıştır ve elde edilen kalibrasyon sonuçları Şekil 3'te gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, PDMS malzemesinin Raman spektrumu literatürle uyumlu bir şekilde elde edilmiş ve malzemeye ait H, C, O, Si içerikli moleküler bağlar doğru spektral pozisyonlarda başarı ile tespit edilmiştir. Burada en belirgin moleküler titreşim modu, C-H simetrik



Şekil 2. a) Metalürjik Raman Spektroskopi Sisteminin Tasarımı, b) Uygulaması



Şekil 3. Kalibrasyon Çalışmasında Kullanılan PDMS Polimerinin Metalürjik Raman Spektroskopi Sistemi ile Analizi

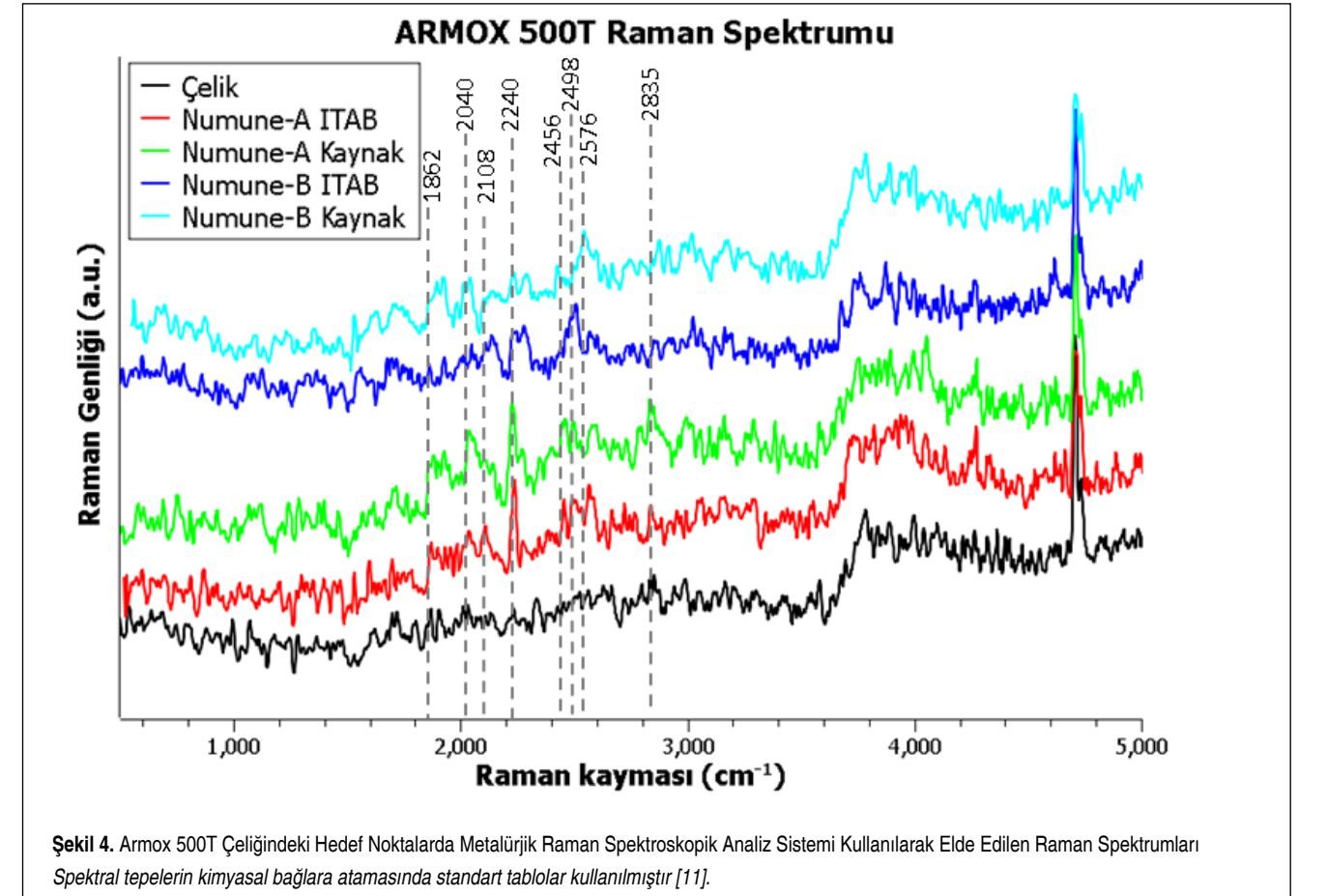
gerilim titreşimi 2904 cm^{-1} spektral pozisyonunda elde edilmiştir. Kalibrasyon testlerinin devamında hazırlanan çelik örnekleri üzerine yapılan çalışmaların sonuçları bir sonraki kısımda verilmektedir.

5. DENEY SONUÇLARI VE ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Metalürjik Raman spektroskopi sistemi ile Şekil 1c'de gösterilen ARMOX 500T üzerinde belirtilen hedef noktalarda yapılan ölçümlerinin ilk sonuçları Şekil 4'te sunulmaktadır. Üç hedef noktada elde edilen spektrumlar tek grafikte birleştirilerek üst üste getirilmiştir. Bu grafikte, sol eksen değerleri

Raman genliğine karşılık gelirken, rastgele (arbitrary) ünite de verilmektedir. Tüm spektrumlar aynı deneysel parametrelerle elde edilmiştir. Grafiğin yatay eksenine ise dalga numarası cinsinden 532 nm Raman uyarımına göre enerji kaymasını göstermektedir. Bu çalışmada, hedeflenen amaca yönelik ilgili kayma tepeleri kesikli çizgilerle belirlenmiştir. Bu tepeler $1500\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$ enerji aralığında bulunmaktadır. 3500 cm^{-1} 'in üzerindeki tepe yapıları ise henüz incelenmemiştir. Bunlar muhtemelen 3000 cm^{-1} altı tepelerin moleküler üst titreşim tonları olabilir.

Şekil 4'te ayrıca, kaynak öncesi yüzey temizleme ve ön ısıtma uygulanmış numune (Numune-A) ile kaynak öncesi ön



Şekil 4. ArmoX 500T Çeliğindeki Hedef Noktalarda Metalürjik Raman Spektroskopik Analiz Sistemi Kullanılarak Elde Edilen Raman Spektrumları. Spektral tepelerin kimyasal bağlara atamasında standart tablolar kullanılmıştır [11].

ısıtma ve yüzey temizleme işlemleri uygulanmamış numune (Numune-B) ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Elde edilen ilk sonuçlara göre, kaynak operasyonu ile çelikten kaynak bölgesine doğru kimyasal değişimler gözlemlenmektedir. Buna göre, $1862\text{-}2835 \text{ cm}^{-1}$ spektral aralığında çelik üzerinde belirli olarak görülmeyen bazı tepeler kaynak etkisi ile ortaya çıkmaktadır. İşaretlenen tepelerden ilki, 1862 cm^{-1} enerji kaymasındadır ve Numune-A'nın ITAB ve kaynak bölgesinde belirginleşmektedir. Numune-B'de, ise ITAB bölgesinde belirgin olmayan bu tepe, sadece kaynak bölgesinde, görülmektedir. Bu spektral kayma bölgesi $\text{C}=\text{O}$ moleküler bağına denk gelmektedir. Dolayısıyla, Numune-A ve Numune-B'de kaynak bölgesine doğru $\text{C}=\text{O}$ kimyasal yapılarının arttığı gözlenmektedir. Bu bağlar, Numune-A ve Numune-B'ye ait ITAB bölgelerinde ise ters tavır sergilemekte ve Numune-B'nin ITAB bölgesinde görülmemektedir. Diğer yandan, yukarı enerji seviyelerine doğru bulunan 2 tepe bölgesi ($2040, 2108 \text{ cm}^{-1}$) $\text{C}=\text{C}$ moleküler bağının gözlemlendiği bölgeye denk gelmektedir. Bir önceki gözleme benzer şekilde hem Numune-A hem Numune-B'de kaynak bölgesine doğru $\text{C}=\text{C}$ kimyasal yapılarının arttığı gözlenmektedir.

Bu artış, Numune-A'da daha da belirgindir. Kaynak etkisi ile özellikle Numune-A'da en belirgin ortaya çıkan tepelerden birisi ise 2240 cm^{-1} 'de yer almaktadır ve bu spektral bölge $\text{C}\equiv\text{N}$ moleküler bağına denk gelmektedir. Bu tepe, Numune-B'nin ITAB ve kaynak bölgesinde belirgin olarak görüldüğünden, kaynak yapılması ile çevre bölgede Karbon ve Azot üçlü bağlarının artışı göstermektedir. Hâlbuki benzer yapılanma Numune-B'de belirgin olarak ortaya çıkmamaktadır. İzleyen diğer 3 tepe ise ($2456, 2498, 2576 \text{ cm}^{-1}$) S-H moleküler bağlarının gözlemlendiği bölgeye denk gelmektedir ve ITAB, kaynak bölgelerinde gözlemlenmektedir. Buna göre kaynak yapılması ile Sülfür ve Hidrojen bağları kaynak bölgesinde artmaktadır. Bu artış özellikle Numune-B'de belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Son olarak Numune-A'nın kaynak bölgesinde en belirgin olarak görülen tepe, 2835 cm^{-1} noktasındadır. Bu Raman enerji kayması C-H bağına denk gelmektedir. Sülfür ve Hidrojen oluşumuna benzer olarak, kaynak ile birlikte Karbon Hidrojen bağı da oluşmaktadır. Fakat, S-H'den farklı olarak C-H bağı oluşumu sadece kaynak bölgesi üzerinde gözlemlenmektedir. Bu etki, Numune-B için belirgin değildir.

Metalürjik Raman analiz sistemi kullanılarak kaynaklı AR-

MOX 500T üzerinde yapılan deneylerin ilk sonuçlarına göre, kaynak yapılması ile bu bölgeye lokalize olmuş Karbon-Oksijen çiftli bağ oluşumları, ITAB bölgesinde de gözlenen Karbon-Karbon, Karbon-Nitrojen üçlü bağ ve Sülfür-Hidrojen bağ oluşumları tespit edilmektedir. Numune-A'da, Numune-B'ye göre Karbon Nitrojen üçlü bağ oluşumu yükseltgenmiştir. Numune-B'de ise S-H bağ oluşumları daha belirgin olarak gözlenmiştir. Diğer yandan, sadece Numune-A'nın kaynak bölgesinde Karbon Hidrojen bağ oluşumu belirlenmiştir. Özellikle kaynak yapılması ile S-H ve C-H bağlarının oluşumunun gözlenmesi, malzemenin içindeki Hidrojenin kimyasal faz değişimine uğraması veya dışarıdan Hidrojen karışmasına karşılık gelebilir. Bunun sebeplerini araştırmak için daha ayrıntılı çalışmalar yapılacaktır.

6. SONUÇ

Metal analizi için özel olarak geliştirilen metalurjik Raman spektroskopik analiz sistemi kullanılarak kaynaklı ARMOX 500T çeliği üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen ilk sonuçlara göre, C=O, C≡C, C≡N, S-H, C-H bağlarının kaynak bölgesindeki çevresel değişimi, kaynağın kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir. Karbon-Oksijen ve Karbon-Nitrojen bağları ön ısıtma ve yüzey temizleme uygulanmış kaynaklı numunede daha belirgin gözlenirken, S-H bağları ön ısıtma ve yüzey temizleme uygulanmamış kaynaklı numune üzerinde daha belirgindir. C-H bağları ise sadece ön ısıtma ve yüzey temizleme uygulanmış kaynaklı numunede, kaynak bölgesinde gözlenmektedir. Bu bağlardaki Hidrojen, malzemenin kaynak öncesi içeriğinde gaz veya çeşitli kimyasal bağ yapıları halinde bulunabilecekken kaynak esnasında da yapıya giriyor olabilir. Deneylerimiz göstermektedir ki, geliştirdiğimiz sistem ile malzeme içindeki Hidrojenin tespit edilmesi ve kimyasal davranışının saptanması mümkünken, çeşitli deneylerle kimyasal kompozisyonun malzeme özelliklerine etkisini araştırmak da mümkün olacaktır. Daha sonraki çalışmalarda yeni deneysel çalışmalar yapılarak buradaki bulgular tekrarlanacak ve çelik üzerinde hidrojen etkisini anlamak için ayrıntılı çalışmalara devam edilecektir. Ayrıca çelik üretim süreçleri ve kaynak süreçleri, kimyasal kompozisyon açısından incelenerek hidrojen etkisinin hangi aşamada

ve miktarlarda malzemeye dahil olduğunun araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılacaktır.

KAYNAKÇA

1. **Goo, B. C., Seo, J. W., Yang S.Y.** 2010. "Analysis of Welding Residual Stresses and Its Applications," Finite Element Analysis, D. Moratal (Ed.), InTech, Croatia.
2. **Billur, E., Çetin, B., Gürleyik, M.** 2016. "New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints," International Journal of Scientific and Technological Research vol 2, no.1, p. 50-62.
3. **Oğuz, B.** 1985. Karbonlu ve Alaşımli Çeliklerin Kaynağı, OERLIKON Yayını, online, http://www.oerlikon.com.tr/files/karbonlu_celiklerin_kaynagi.pdf, son erişim tarihi: 10.11.2015.
4. **Pokhodnya, I., K., Shvachko, V., I.** 1996. "Cold Cracks in Welded Joints of Structural Steels," Material Science, vol. 32, no. 1, p. 45-55.
5. **Dainelli, P., Maltrud, F.** 2012. "Management of Welding Operations with High Strength Steels," Soudage et Techniques Connexes, p. 37-42.
6. **Birnbaum, H. K.** 1986. "Hydrogen Embrittlement," Encyclopedia of Materials Science and Engineering, M. B. Bever, (Ed.), Pergamon Press, Oxford, p. 2240.
7. **Shirband, Z., Shishesaz, M. R., Ashrafi, A.** 2011. "Hydrogen Degradation of Steels and Its Related Parameters, A Review," Phase Transitions, vol. 84, nos. 11-12, p. 924-943.
8. **Yen, S. K., Tsai, Y. C.** 1996. "Critical Hydrogen Concentration for the Brittle Fracture of AISI 430 Stainless Steel," Journal of the Electrochemical Society, vol. 143 (9), p. 2736-2741.
9. **Ersöz, A.** (Ed.) 2010. Aletli Analiz Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, s. 114.
10. **Cetin, B., Durkaya, G., Kaplan, H.** 2015. "A New Generation, Promising Engineering Material: Cubic Boron Nitride (c-BN)," Hittite Journal of Science and Engineering, vol. 2 (1) p. 85-90.
11. <http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/Raman/bands.pdf>, son erişim tarihi: 10.11.2015.

GAZALTI KAYNAĞINDA BULANIK MANTIK KONTROLLÜ İZ TAKİP SİSTEMİNİN UYGULANMASI*

Ahmet Öztürk

Öğr. Gör.,

Artvin Çoruh Üniversitesi MYO, Artvin
ahmetozturk@artvin.edu.tr

İlhan Asiltürk**

Doç. Dr.,

Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Konya
iasilturk@yahoo.com

Hayrettin Düzcükoğlu

Prof. Dr.,

Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Konya
hayduzcukoglu@hotmail.com

Ömer Aydoğdu

Doç. Dr.,

Selçuk Üniversitesi,
Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya
oaydodu@selcuk.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, kaynak iz takibinde kullanılan iz takip sensörleri, kaynak yapılacak sistemlerde yatay ve dikey hareket ederek kaynak iz bölgesini tanımlamaktadır. Tanımlanan bu kaynak iz bölgesi, daha sonra fuzzy kontrol algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. Hazırlanan bulanık mantık kural tabloları ile yapılacak kaynak süreçleri tanımlanmıştır. Kaynak iz takibinde X ve Y koordinatlarındaki değişimler bulanık mantık kontrol algoritması sayesinde tahmin edilmektedir. Kontrol elemanlarındaki hız değişimleri veya kaynak bölgesi açısal değişimler ani olmadığından, X ve Y yönlerindeki hareketleri sağlayan kontrol elemanlarının hızları da sabit olmaktadır. Eğer kaynak izi takibinde ani olarak değişimler meydana gelirse, bulanık mantık algoritması hata değişim miktarını hesaplayıp hareket elemanlarına sinyal göndererek kontrol elemanlarının hızlarını değiştirmektedir. Bu sayede, kaynak torcunun pozisyon hareketleri kaynak izi takibiyle tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, iz takibi, bulanık mantık, lazer sensör

APPLICATIONS OF FUZZY CONTROL IN GAS SHIELDED ARC WELDING SEAM TRACKING SYSTEM

ABSTRACT

In this study welding seam tracking used seam tracking sensors in the welding systems by the horizontal and vertical welding defines the region. This defined the welding seam regions then is calculated using fuzzy control algorithm. Fuzzy rule tables prepared to be done with the welding process described. The welding seam tracking changes in the X and Y coordinates of thanks to fuzzy logic control algorithm is estimated. When the rate of change of the control elements or the welding region of the angular changes are not sudden, X and Y movements directions providing speed of the control elements is also fixed. If sudden changes occur in welding seam tracking, fuzzy logic algorithm calculates the amount of change of the error by sending a signal to adjust the speed and motion of the elements has the ability to control the elements. Thanks to this, the welding torch movements of with weld seams have been determined to be in the suitable location.

Keywords: Welding, seam tracking, fuzzy, laser sensor

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 05.02.2016

* 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 Dergimiz için makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Öztürk, A., Asiltürk, İ., Düzcükoğlu, H., Aydoğdu, Ö. 2016. "Gazaltı Kaynağında Bulanık Mantık Kontrollü İz Takip Sisteminin Uygulanması," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 674, s. 57-64.

1. GİRİŞ

Gazaltı kaynağı günümüzde yaygın olarak kullanılan imalat yöntemlerinden biridir. Bu kaynak yönteminin her türlü kaynak pozisyonunda yapılabilmesi, metal yığıma hızının yüksek olması ve yoğun bir cüruf tabakasını oluşturmaması vb. nedenlerden dolayı daha fazla tercih edilmektedir. Kaynak bağlantılarından beklenen özellikler kaynak dikiş geometrisine ve özelliklerine doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla, iyi bir kaynak dikişi için kaynak izi parametrelerin uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden, aradaki ilişkinin belirlenmesi ve kaynak izi parametre değerlerinin optimum seçilebilmesi için yapay zeka teknolojilerine başvurulmuştur.

Lazer iz takibi sistemlerinin temel amacı, kaynak boşluğu geometrisini belirleyerek kaynak torcu pozisyonunun temassız bir şekilde kontrolüdür. Ancak, robotik kontrol sistemlerinden doğru kaynak dikişi izleme doğruluğu ve tasarımı çok zordur.

Lazerli kaynak izi takibinin en büyük avantajı, yüksek hassasiyette otomatik takip ederek, yapılan kaynağın kalitesinin artırılmasıdır. Lazer sensörlü iz takip sistemi, kaynak işlemi sırasında devamlı olarak kaynak bölgesini tarayarak, kaynak torcunu kaynak profili üzerinde daima istenilen noktaya hizalanmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, kaynak işlemi diğer metotlara kıyasla çok daha olumlu sonuçlarla hedeflenen kaynak noktalarına yapılmış olur. Bu sayede, kaynak yapılan malzemede hatalar azaltılabilir ve birleşim noktasında kaynak penetrasyonunun beklenen standartlarda olmasına yardımcı olur.

Sistemin bir diğer avantajı ise kaynağın estetik görünümüne olan katkısıdır. Manüel kontrol ile yapılan uygulamalarda, kaynak pozisyonunda düzeltme yapabilmek için değişimin insan gözü ile görülebilecek bir boyutta olması gerekir. Lazer sensörlü kaynak iz takip sistemi yüksek teknolojiye sahip olduğundan dolayı çok daha yüksek hassasiyete sahiptir. İnsan gözü ile zor fark edilen oynamalarda bile, kullanılan lazer sensör sayesinde takibi yapılacak olan noktanın kaynak iz profili konumu daha hassas bir şekilde izlenebilmektedir.

Konu ile ilgili yapılan bazı literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir:

Yanling ve arkadaşları [1] çalışmalarında, gerçek zamanlı robotik gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve gaz metal ark kaynağının (GMAW) bilgisayar görüntülü uygulama teknolojisi gerçekleştirmişlerdir. Kaynak izlerini izlemek için görüntü teknikleri ve bunları doğru bir şekilde işleyebilmek için net gerçek zamanlı kaynak görüntüleri elde etmenin önemini vurgulamışlardır. Kaynak ağzını takip edebilmek hassasiyetle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca bu çalışmada, kaynak ağzı izleme doğruluğunu geliştirmek, net ve kararlı gerçek zamanlı kaynak görüntüleri elde edebilmek için özel bir izleme sistemi tasarlamışlardır. Geliştirmiş oldukları kenar tespit algoritması

ile kaynak görüntü özelliklerinin analiz edilmesi, daha doğru kaynak izlerinin algılanması ve kaynak havuzunun karakteristik parametrelerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu görüntü işleme sistemini yaptıkları hassas deneyler ile doğrulamışlardır.

He ve arkadaşları [2] çalışmalarında, otomatik çok geçişli rota planlama da robot metal aktif gaz (MAG) kaynağının kalın plakalar için önemli bir teknoloji olduğunu vurgulamışlardır. Bu araştırma, kaynak iz profil noktalarının çıkarılması özelliği için otomatik çok geçişli rota planlaması, MAG ark kaynağı sırasında her katman ve ilk kaynak pozisyonu için rehberlik etmektedir. İki aşamadan oluşmaktadır: İlki, konumlandırılmış bir görüntü sensörü aynı anda, aynı karede lazer çizgilerini ve erimiş havuzları yakalamak için kullanılır ve kaynak iz profilini oluşturan lazer şerit, çıkıntılara dayalı bir görsel model ile tespit edilmektedir. İkincisinde, kaynak iz profil noktalarını çıkarmak için polinom uydurmaya ek olarak türevlerinin bir metodolojisi önerilmektedir. Bu çalışmada önerilen modelin, tipik şablon eşleştirmeye ek olarak özel nokta çıkarma yöntemi ve lazer şeritlerinin etkinliği vurgulanarak, bu alanda klasik olanlardan daha iyi sonuç verdiğini savunmuşlardır. Son olarak, önerilen modelin, performansı farklı katmanlar ve farklı kaynak deneylerinde yakalanan farklı kaynak iz görüntülerinin üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

Wei ve Kovacevic [3] çalışmalarında, bir lazer tabanlı yapay görme sistemin, kaynak sürecini kontrol etmek ve izlemek için geliştirip ve uygulamışlardır. Sistem, üç ana modülden oluşmaktadır: Bir lazer tabanlı görüntü sensör modülü, bir görüntü işleme modülü ve çok eksenli hareket kontrol modülünden oluşmaktadır. LabVIEW platformu üzerinde geliştirilmekte ve uygulanmakta olan yeni bir görüntü işleme algoritması, görüntü işleme modülü, görüntü sensörü tarafından çekilen görüntüleri işleyerek farklı kaynak birleşim yerlerinin belirlenmesinde ve özel noktaların tespit edilmesinde kullanılmıştır. Tespit edilen özel noktalara göre, konum bilgileri, derinlik, genişlik, plakalar arasında uyumsuzluk ve enine kesit alanından kaynak bağlantılarının geometrik özellikleri elde edilebildiği gibi, gerçek zamanlı olarak da izlenebilmektedir. Kaynak birleşim yerlerinin 3D profili, kaynak işlemi sırasında, kaynak sonrası kalite kontrol amacıyla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Moradi ve arkadaşları [4] çalışmalarında, kaynak iz takip sistemini elektro-mekanik eski sistem yerine geliştirip uygulamışlardır. Kaynak ağzı izleme sisteminin doğruluğunu geliştirmek ve çevre koşullarının etkisini azaltmak için yeni bir algoritma ile kaynak ağzını ortalama çalışılmışlardır. Kaynak izi görüntüleri, bir kamera ile kaynak konumunu tespit etmek ve kaynak parametrelerini belirlemek için makine önüne konumlandırılmıştır. Gerçek endüstriyel ortamda bir dizi deneylerden sonra, bu yöntemin kaynak kalitesini iyileştirdiği görülmüştür.

Du ve arkadaşları [5] çalışmalarında, kaynak robotlarının kaynak izi izleme sistemlerinde görüntü üzerinde belirlenemeyen netlik sorununu çözmek için, bulanık Kalman filtre algoritmasına dayalı Multi-Sensör (MSDF) Veri Füzyon algoritmasını önermişlerdir.

Zou ve arkadaşları [6] çalışmalarında, spiral boruların tahribatsız muayeneyi gerçek zamanlı radyografik kaynak hata tespiti için Kalman filtrelemeye dayalı bir yöntem önermişlerdir. Görüntüdeki parazitlik ve arka plan karışıklığı çok sayıda yanlış alarm neden olmuştur. Görüntü hatalarının yörünge sürekliliği, gerçek hataların tespiti Kalman filtreleme tarafından tespit edilmiştir. Sürekli bir hareket olmadığında, potansiyel hata bölgeleri yanlış alarm olarak kabul edilerek o bölgeleri elimine etmişlerdir. Yöntemin sağlamlığını da kararsız algılama hızları altında doğrulamışlardır.

Luo ve arkadaşları [7] çalışmalarında, kaynak izinin doğrusal olmaması ve kaynak robotlarında kaynak iz değişimlerinin hızlı olması nedeniyle yüksek hassasiyetli lazer kaynak robotlarında gözlenen hataları telafi etmek için endüstriyel robotlar ve hazır sensörler kullanarak yeni bir mimariye sahip robotik kaynak izi takip sistemini geliştirmişlerdir. Kaynak robotlarında yapılan deneylerde geliştirilen kaynak iz takip sistemi kullanılarak TCP yöntemiyle, ± 0.1 mm yanılma payıyla, 100 mm/s yüksek hızda hem doğrusal hem de doğrusal olmayan uzun kaynak izleriyle kaynak yapılabildiğini gözlemlemişlerdir.

Braunreuther ve arkadaşları [8] çalışmalarında, teorik kaynak yolu ve iş parçasının gerçek hatları arasındaki sapmalar nedeniyle, kaynak sonuçlarının genellikle kalite gereksinimlerini karşılayamadığını vurgulamışlardır. Bu sorunu endüstriyel görüntüleme kullanarak çözebilmişlerdir. İş parçası hakkında bilgiyi, kameraya bağlı lazer ışını ile aynı optik yolu kullanan lazer tarayıcı ile elde etmişlerdir.

Huang ve arkadaşları [9] çalışmalarında, kaynak izi takip yeteneğinin otomatik lazer kaynak sistemleri için kilit bir nokta olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, lazer sensörlü kaynak ağzı izleme teknolojisinin durumunu anlatmışlardır. Otomatik lazer kaynağa kullanılan sensörlerin, özellikle izleme sensörlerinin çalışma prensiplerini ve özelliklerini analiz etmişlerdir. Otomatik lazer kaynak izi takip sistemlerinin kontrol algoritmalarını da tartışmışlardır.

Heber ve arkadaşları [10] çalışmalarında, geleneksel kaynak işlemlerinde kalite kontrolü görsel olmayan bilgilere dayanarak otomatik ve özellikle off-line yapmışlardır. Bu çalışmada, kaynak işlemi on-line izleme yeteneğine sahip görüntü alma sistemi, kaynak işlemi sırasında sürekli yüksek kaliteli görüntü bilgilerini elde etmektedir. Ayrıca daha yoğun kaynak dumanı ve gaz etkileri altındaki görüntülerden kaynak iz konumunun nasıl otomatik takip edileceğini bu görüntü bilgilerini kullanarak göstermişlerdir. Kaynak dikişinde etkin ve kusur-

suz bir görüntü elde edebilmek için optik olarak birbirini takip eden karelerden yüksek bilgiler alınmasıyla, duman, kıvılcım vb. gibi olumsuzlukların etkilerini ortadan kaldırmışlardır.

Xiong ve arkadaşları [11] çalışmalarında, görüntü sensörünü, izleme ve otomatik kaynak kontrol işlemi için kullanılan en güçlü temassız algılama teknolojilerinden biri olarak tanımlamışlardır. Görüntü sensörünün kaynak iz takibinde başarılı olabilmesi için görüntü işleme etkinliği temel oluşturmaktadır. Bu çalışmada, bir görüntü toplama ünitesi, bir görüntü işleme sistemi içeren ve kaynak izini takip edebilen bir ark kaynak robotunu tasarlamışlardır. Bulanık mantık teorisine dayanan bir görüntü işleme algoritması detaylı olarak uygulanmıştır. Bu yöntemle yapılan deneyin sonuçları kaynak ağzı kenarlarının doğru bir şekilde saptanabildiğini göstermiştir.

Bracun ve Sluga [12] çalışmalarında, kaynak yolu ölçüm sistemini (WPMS), çok geçişli ve onarım kaynağında veya kritik bölge kaynaklarının yapılabilmesinin daha iyi sonuç vermesini sağlamak amacıyla geliştirmişlerdir. Gelişmiş WPMS sistemi, 3D alanında stereo görüş ilkesine göre ark konumunu ölçmektedir. Bir 3D kaynak yolu, ark pozisyonlarının zaman dizisini anında gösterir. Bu da kaynak veya kaynak havuzu hakkındaki bilginin taşındığına işaret eder. Test kaynağı geliştirilen bu sistemi doğrulamak için, kanal şeklindeki kaynak yolunda yer alan torç hareketi ve bozuklukları simule edilmiş ve bunun nasıl olduğu gösterilmiştir. Simule edilmiş düzensizlikleri kaynak yolunun anormallikleri olarak tanımlamışlardır.

Xu ve arkadaşları [13] çalışmalarında, gaz tungsten ark kaynak işlemi esnasında, kaynak robotlarının kaynak izi izleme kontrolünü öğrenme ve geri besleme gibi eksiklerinin üstesinden gelebilmek için gerçek zamanlı kaynak ağzı izleme teknolojisi hakkında bilgi vermişlerdir. Kaynak robotları için bir takım görüntü işleme sistemleri, net ve kararlı kaynak görüntüleri elde edebilmek için tasarlanmıştır. Canny algoritması, kaynak görüntülerinin özelliklerini analiz etmek, kaynak izlerini ve havuz kenarlarını algılamak, kaynak görüntülerinin karakteristik parametrelerini elde etmek için geliştirilmiştir.

2. ROBOTİK MIG KAYNAK İŞLEMİ

MIG kaynağında ergiyen metal elektrot, hem kaynak dolgu malzemesi hem de elektrik arkının taşıyıcısıdır. "Sonsuz" kaynak teli iki veya dört tahrik makarası üzerinden torcun içine ulaşır ve kontak memesinde akım geçişi meydana gelir. Serbest tel ucunun etrafı bir gaz nozulu tarafından eş merkezli olarak sarılır. Yayılan koruyucu gaz, sıcak iş parçası yüzeyinin etraftaki hava ile kimyasal tepkimelere girmesini önler. Kaynatılmış metalin sağlamlığı ve dayanıklılığı bu şekilde korunmuş olur. Neredeyse tüm metallerin kaynağında ve her pozisyonda etkili olabilmektedir. Diğer geleneksel süreçler için daha az operatör becerisi gerektirmektedir. Bu nedenler-

den dolayı robotik kaynak işlemlerine kolayca adapte edilebilmektedir.

Sağlık ve Güvenlik

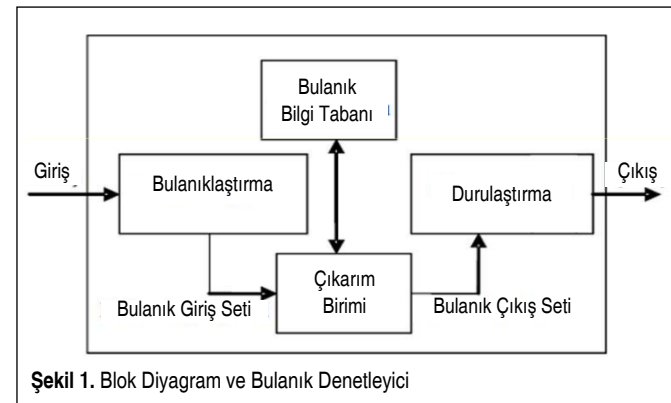
Ark kaynak işlemlerinde karşılaşılan potansiyel tehlikeler, yüksek elektrik gerilimi, sağlık için tehlikeli olan duman ve gazlar, gürültüden dolayı işitme bozukluğu, elektrik ark radyasyonu gözlere zarar vererek cildi yakabilir, çalışanların ölümüne ve yaralanmasına neden olabilmektedir. Yüksek güç kaynaklarının devre voltajı, tehlikeli elektrik çarpmalarına neden olabilir. Bunlar, tüm elektrikli ekipman ve çalışma bağlantı parçalarının topraklanması ile önenebilir. Tüm elektrik kabloları maksimum akıma uygun olmalı ve yalıtımlı ve kuru kalmalıdır.

3. BULANIK KONTROL SİSTEMİ

Kaynak yörüngeleri takibi için kontrol sistemleri daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaynak izi takip işlemleri daha karmaşık ve sağlam kontrollere ile kontrol edilmektedir. Kontrolörün amacı, kaynak yapılması için bir robot kolunun koordinatlarındaki hareketini kontrol ederek kaynak izinde meydana gelen değişimleri telafi etmek ve kaynak yörüngesini düzeltmektir.

Bulanık Sistem

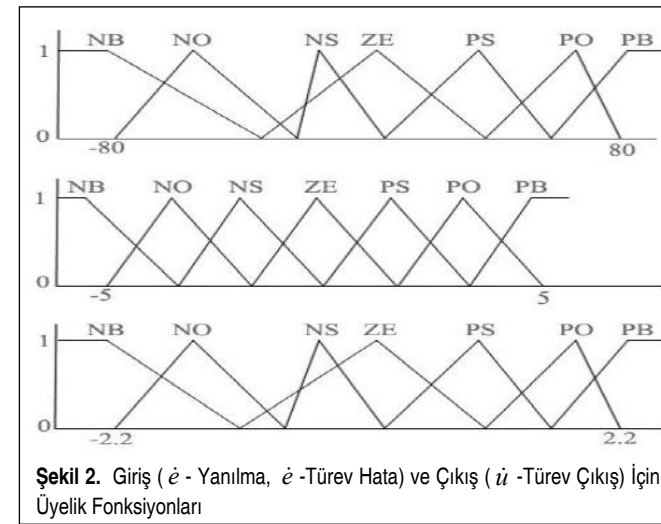
Bulanık mantık kontrolü kullanarak bu uygulamayı oluşturmak için aşağıdaki temel adımların takibi gerekmektedir: Bunlar normalleştirme, bulanıklaştırma, bulanık kurallar, durulaştırma ve de-normalleştirme'dir [14]. İlk adım, bir sensör tarafından sağlanan bilgidir. Okunan değer de gerçek bir değerdir. Normalleştirme denilen bir işlemin kullanılması nedeniyle, veri kontrolörü doğası gereği bir ve sıfır gibi bir dizi giriş kodlarıyla kodlanmalıdır. Bulanıklaştırma olarak bilinen sonraki adım da bir veri sistemi bulunur ki bu da bulanık verileri oluşturmaktadır. Veriyi bulanık verilere dönüştürmek, bulanık kümelerin bir dizi karşı üyelik derecesini veya sahiplik değerlerini hesaplamak için yapılmaktadır. Bulanık veriler, bu bulanık kuralları oluşturmak için kullanılmıştır. Bu kurallar bizim



Şekil 1. Blok Diyagram ve Bulanık Denetleyici

sistem ihtiyaçlarına göre inşa edilir. Değerlendirildikten sonra, çıkışta her birinin üyeliğinin ne derece olduğu bilinmektedir. Son olarak, gerçek sayılar kümesi bizim verilerimizi dönüştürerek robot için gerekli olan yeni çıkış koordinatlarını vermektedir. Elde edilen veriler durulaştırma işlemine tabi tutulduktan sonra, normalleştirme işlemleri doğru kaynak yolunu bize vermektedir. Sistemimize ait olan blok diyagram ve bulanık denetleyici Şekil 1'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Mamdani tipi bulanık model kullanılmıştır. Kullanılan modelin üyelik fonksiyonları Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada, normalleştirme, bulanıklaştırıcı, bilgi tabanı çıkarım sistemi, durulaştırma ve de-normalizasyon bloğundan oluşan bilgi bankası kullanılmıştır. Bulanık denetleyici, iki girişi (\dot{e} - yanılma, \dot{e} - türev hata) ve tek çıkış (\dot{u} - türev çıkış) için dizayn edilmiştir.

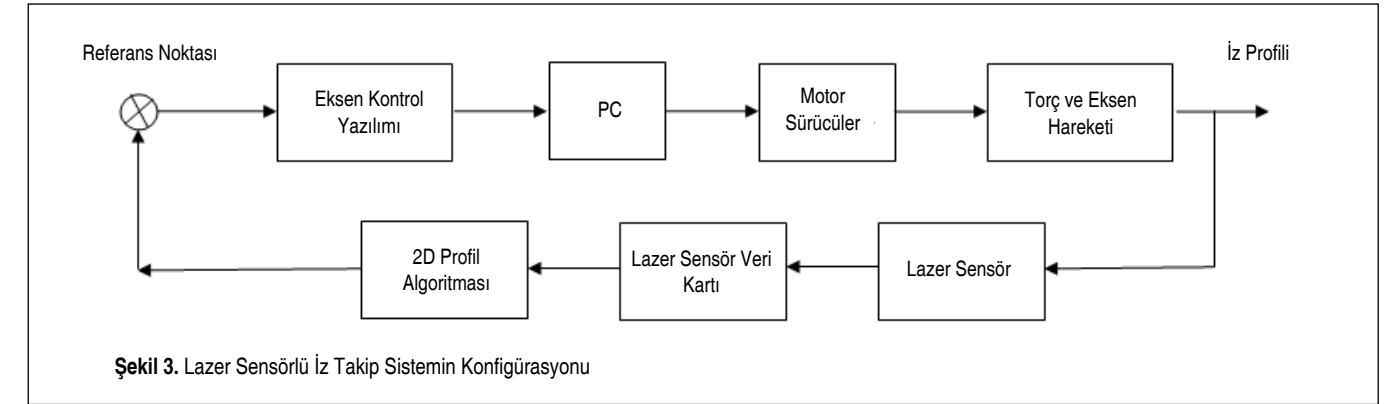


Şekil 2. Giriş (\dot{e} - Yanılma, \dot{e} - Türev Hata) ve Çıkış (\dot{u} - Türev Çıkış) için Üyelik Fonksiyonları

4. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada, kaynağın düzgün yapılabilmesi, torcun belirlenen kaynak ağız pozisyonunda ilerlemesini sağlamak için bulanık mantık kontrollü lazer sensörlü iz takip sistemi geliştirilmiştir. Lazer sensörlü iz takip sisteminin konfigürasyonu Şekil 3'te verilmiştir. Kaynak izi takibinde, özellikle doğrusal olmayan kaynak izi takiplerinde günümüzde bazı zorluklar oluşmaktadır. Aynı zamanda kaynak iz takibinin yeterli olmaması ve kaynak ağızının standartlara göre açılmaması durumunda kaynak kusurları oluşmaktadır [15]. Özellikle yüksek basınçlı kaplarda sızdırmazlık ve hatalar beklenmeyen zamanlarda, çalışma esnasında meydana gelebilir.

Yüksek basınçlı kap uygulamalarında çift lazer sensör iz takip sistemi uygulanmaktadır. Sistemde uygulanan çift lazer sensörlü kaynak izi takip sistem uygulama örneği Şekil 4'te gösterilmektedir. İş parçası gövdesine puntalanan kapaklar bir ayna punta arasına yerleştirilir. Daha sonra, bu iş parçasına iz takibi yapacak olan lazerli iz takip sensörleri konumlandırılır.



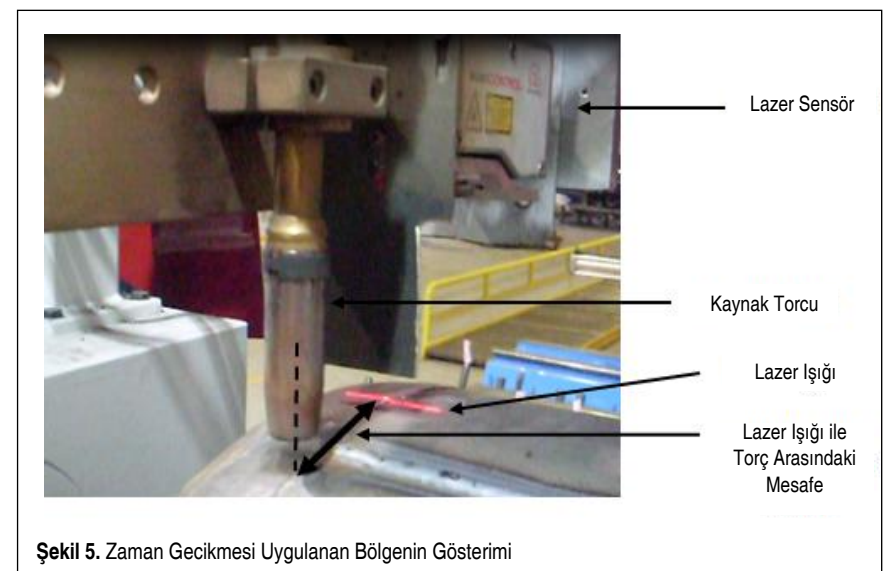
Şekil 3. Lazer Sensörlü İz Takip Sistemin Konfigürasyonu



Şekil 4. Basınçlı Kaplarda Çift Lazer Sensörlü Kaynak İzi Takip Sistem Uygulaması

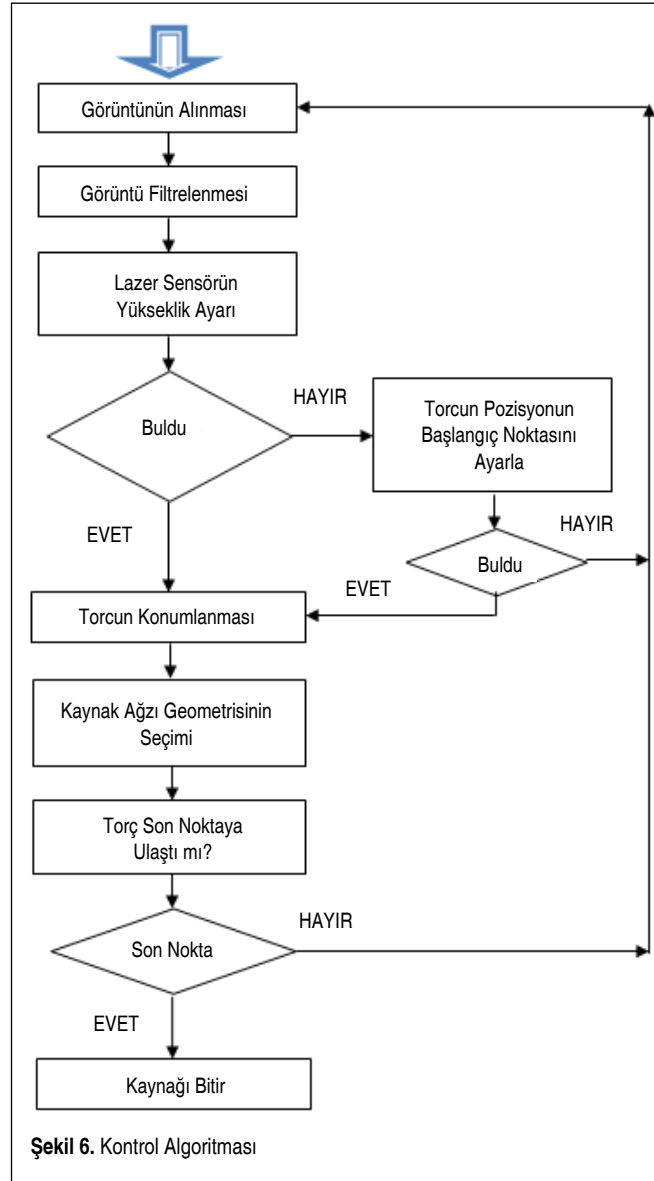
Sisteme ilave edilen bir encoder (kodlayıcı) yardımıyla, ayna punta arasına bağlanan iş parçasının kaç derece döndürüldüğü hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaların amacı, son kaynak noktasını kaynak başlangıç noktası üzerine bindirmektir. İş parçasına yükseklik ve eksenel olarak konumlanan lazer iz takip sensörleri, iş parçasının harekete başlamasıyla, lazer sensörden aldıkları eksen ve yükseklik verilerini kontrol ünitesine göndermeye başlar. İz takip sisteminden gelen veriler hazırlanan bulanık mantık algoritmasında değerlendirildikten sonra, hesaplanan eksen ve yükseklik verileri elde edilen hız aralıklarına göre motor sürücülerine gönderilerek motorlara hareket verilmektedir.

Lazer sensör iz takip noktası ile kaynak torcunun arasında belirli bir mesafe olması gerektiğinden dolayı, sistem algoritması sensörden gelen ve işlenen verileri hesaplanan zamana göre gecikmeli olarak uygulamaktadır. Gecikme uygulama bölgesi Şekil 5'te gös-



Şekil 5. Zaman Gecikmesi Uygulanan Bölgenin Gösterimi

terilmiştir. Bu gecikme, zaman olarak uygulanabildiği gibi, sistemimizde mevcut olan encoder sayesinde açılabilir olarak da sağlanabilmektedir.



Bu çalışma çerçevesinde, özellikle kaynak izinin lazer sensör ile iz takibini sağlamak için bulanık mantık kontrol algoritması kullanılarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanan bilgisayar programının kontrol algoritması Şekil 6'da gösterilmiştir.

Kaynak iz takibinde X ve Y koordinatlarındaki değişimler bulanık mantık kontrol algoritması sayesinde tahmin edilmektedir. Bu hız değişim yönleri veya açısal değişimler ani olmadığında, X ve Y yönlerindeki hareketleri sağlayan step motorlarının hızları sabit olmaktadır. Eğer kaynak izi değişimleri ani olarak değiştiği zaman, bulanık mantık algoritması hata değişim miktarının yardımı ile step motorlara sinyal göndererek hızlarını değiştirir. Bu sayede, kaynak torcunun takibi kaynak izi ile aynı konumda olmaktadır.

Bu çalışmada, kullanılan lazer iz takip sensörünün genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

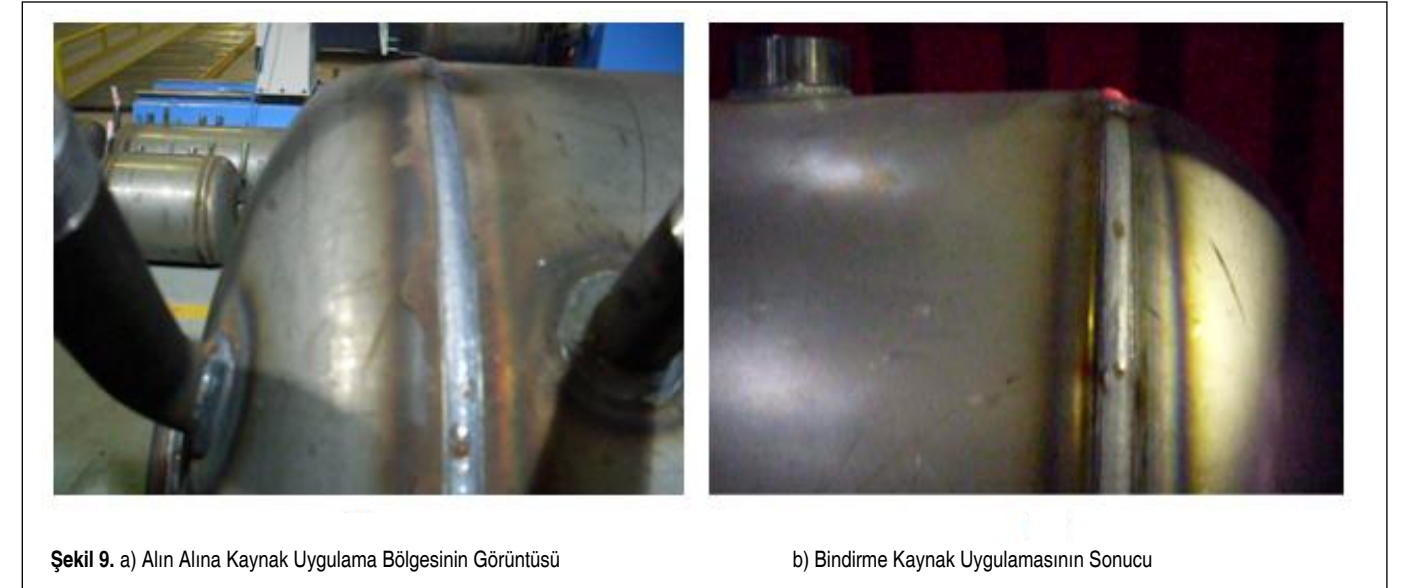
Boyer kazan kaynaklarında kaynak yapılacak kazanların boylarına göre kaynak torçlarının konumları değişmektedir. Çünkü küçük boylu kazanlarda alın kaynağı yapılırken boyları uzun kazanlarda bindirme kaynağı yapılmaktadır. Bindirme kaynağında dikişin çekileceği bölge yönünden, üst üste konulan parçalar köşe oluşturduğundan dolayı köşe kaynağına benzerdir. Çalışma açısı olarak kaynak torcu 45° ile 60° açı ile konumlandırılmaktadır. Bindirme ve alın alına kaynak uygulamalarında torçların konumlandırılmaları Şekil 8'de gösterilmiştir. Uygulanan bu iki kaynak birleştirme yönteminde elde edilen kaynak bölgesinin görüntüleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

Boyer kazanlarında yapılan uygulamalardan sonra, boyler kazanlarına hem basınç testi hem de sızdırmazlık testi uygulanmıştır. Testlerin sonuçları istenilen değerler arasında çıkmıştır. Ayrıca yapılan kaynaklarda estetik bir görüntü sağlanmıştır. Uygulama yapılan bazı Boyler kazanlarının kaynak sonrası görüntüleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Tablo 1. Lazer İz Takip Sensörünün Teknik Özellikleri (Scancontrol 2700-25)

Özellik	LLT27x0-25
Z Eksen Ölçüm Aralığı	25 mm
Ölçme Başlama Aralığı	90 mm
Ölçme Bitiş Aralığı	115 mm
Genişletilmiş Yaklaşık Ölçüm Aralık Başlangıcı	85 mm
Genişletilmiş Yaklaşık Ölçüm Aralık Bitişi	125 mm
Orta Mesafeli Satır Uzunluğu, X Eksen	25 mm
Doğruluk	$\pm 0.2\%$ FSO (3σ)
X Eksen Çözünürlüğü	640 nokta/ profil
Profil Frekansı	100 Hz
Koruma Sınıfı	IP 64



5. SONUÇ

Lazerli iz takip sisteminden faydalanabilmek için ihtiyaçlar ve beklentiler dikkatlice tespit edilmelidir. Kaynak işleminin yapılacağı çevre şartları ve elemanları konumlandırma olanakları, istenilen üretim hızı, gerekli kalite seviyesi ve kaynak edilecek parçaların çeşitliliği öncelikle belirlenmelidir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda öncelikle, uygulanacak kaynak yöntemi belirlenmelidir.

Çalışma sırasında karşılaşılan sıkıntılar ise kaynak bölgesi ve kaynak esnasında meydana gelen sıcaklığın, kullandığımız lazer sensörü olumsuz yönde etkilemesidir. Bu problemi azaltmak için sensörlerimize hava soğutması uygulanmıştır. Çalışma sonunda iyi bir kaynak kalitesi ve kaynak yapılan bölgede estetik bir görüntü elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, otomasyon sistemleri sayesinde birim zamanda gerçekleşen imalatta ve toplam üretimde artışlar görülürken, kusurlu çıkan malzeme sayılarında kayda değer azalmalar olmuştur.

KAYNAKÇA

1. **Yanling, X., Gu, F., Shanben, C., Jujia, Z.** 2015. "Computer Vision Technology for Seam Tracking in Robotic GTAW and GMAW," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 32, p. 25-36.
2. **He, Y., Xe, Y., Chen, Y., Chen, H., Chen, S.** 2015. "Weld Seam Profile Detection and Feature Point Extraction for Multi-Pass Rout Eplanning Based on Visual Attention Model," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 37, p. 251-261.
3. **Wei, H., Radovan, K.** 2012. "Development of a Real-Time Laser-Based Machine Vision System," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology Journal*, vol. 63, p. 235-248.
4. **Moradi, N., Dezfulli, B., Mashalah, A., Alavi, C.** 2013. "Development a Vision Based Seam Tracking System for None Destructive Testing Machines," *International Journal of Computer Science & Network Solutions*, vol. 1, p. 45-56.
5. **Du, J., Hua, L., Ge, S., Gu, P.** 2012. "Weighted Multi-Sensor Data Fusion Based on Fuzzy Kalman Filter for Seam Tracking of the Welding Robots," *2nd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT 2012)*, July 6-8, 2012, China, p. 800-805.
6. **Zou, Y., Du, D., Chang, B., Ji, L., Pan, J.** 2015. "Automatic Weld Defect Detection Method Based on Kalman Filtering for Real-Time Radiographic Inspection of Spiral Pipe," *NDT&E*, vol. 72, p. 1-9.
7. **Luo, Z., Dai, J. S., Wang, C., Wang, F., Tian, Y., Zhao, M.** 2012. "Predictive Seam Tracking with Iteratively Learned Feedforward Compensation for High-Precision Robotic Laser Welding," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 31, issue 1, p. 2-7.
8. **Braunreuther, S., Hammerstingl, V., Schweier, M., Theodossiadis, G., Reinhart, G., Zaeh, M.** 2015. "Welding Joint Detection by Calibrated Mosaicking with Laser Scanner Systems," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 10, p. 16-23.
9. **Huang, Y., Gao, X., You, D., Li, Z.** 2012. "Investigation of Laser Welding Seam Tracking Based on Visual Sensing," *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, p. 1197- 1200.
10. **Heber, M., Lenz, M., Rütke, R., Bischof, H., Fronthaler, H., Croonen, G.** 2013. "Weld Seam Tracking and Panorama Image Generation for on-Line Quality Assurance," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, issue 9, p. 1371-1382.
11. **Xiong, Z., Wan, W., Pan, J.** 2011. "Application of Fuzzy Edge Detection in Weld Seam Tracking System. Robotic Welding," *Intelligence and Automation Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 88, p. 323-330.
12. **Bracun, D., Sluga, A.** 2015. "Stereo Vision Based Measuring System for Online Welding Path Inspection," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 223, p. 28-336.
13. **Xu, Y., Yu, H., Zhong, J., Lin, T., Shanben, C.** 2012. "Real-Time Seam Tracking Control Technology During Welding Robot Gtaw Process Based on Passive Vision Sensor," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, issue 8, p. 1654-1662.
14. **Davila-Rios, I., Lopez-Juarez, I., Navarro-Gonzalez, L.** 2010. "Welding Seam Tracking Controller Simulation Using Fuzzy Logic," *1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences*, 26th-29th October 2010, Mexico.
15. **Öztürk, A.** 2011. "Bulanık Mantık Kontrollü Kaynak Ağzı İzleyen kaynak Robotunun Tasarımı ve İmalatı," *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya*.

İNCE PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARIN FİBER LAZER İLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ*

Cansu Kökey

Celal Bayar Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Manisa
cansukokey@gmail.com

Seçkin Sezgin

Vestel Beyaz Eşya San. ve Tic. A.Ş., Manisa
seckin.sezgin@vestel.com.tr

Niyazi Çavuşoğlu**

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

Simge Gençalp İrizalp

Dr.,
Celal Bayar Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Manisa
simge.gencalp@cbu.edu.tr

İbrahim Etem Saklakoğlu

Doç. Dr.,
Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği
Bölümü, İzmir
i.e.saklakoglu@ege.edu.tr

ÖZ

Lazer kaynağı, geleneksel kaynak yöntemlerine göre birçok avantajı olan yüksek enerji yoğunluklu, düşük ısı girdili bir kaynak yöntemidir. Bugün sanayinin birçok alanında endüstriyel olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda ince malzemelerin kaynağında da lazer teknolojisinin kullanımı artmıştır. Bu çalışmada, 0,6 mm kalınlığında ferritik 430 kalite paslanmaz çelik malzemelerin alın kaynak kabiliyeti incelenmiştir. Paslanmaz çelik levhalar darbeli fiber lazer kaynak makinası ile çeşitli kaynak parametreleri (ışın çapı, darbe enerjisi, darbe süresi, darbe frekansı) değiştirilerek kaynak edilmiştir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri uygulanmıştır. Ayrıca metalurjik özelliklerini değerlendirmek için optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Kaynak bölgesinin korozyon özellikleri incelenmiş ve taneler arası korozyon ve pitting oluşumunun meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ferritik paslanmaz çelik, lazer kaynağı, korozyon

INVESTIGATION OF THE WELDABILITY OF THIN STAINLESS STEEL SHEET BY FIBER LASER

ABSTRACT

Laser welding is a high energy density-low heat input technique which has many advantages according to the classical welding techniques. Nowadays laser welding technique is being used widely in many industrial applications. In recent years, for welding of thin metals laser technology is growing up. This research includes, butt welding of 0,6 mm thick ferrite 430 quality stainless steel. Stainless steel thin work pieces have been welded by use of fiber laser welding machine with different parameters (pulse diameter, pulse energy, pulse time, pulse frequency) to achieve better mechanical properties than original material at the weld area. Micro structure, stress tests have been applied to determine and compare the mechanical properties. Optical microscope has been used to examine the micro structure. The corrosion properties of the welds were examined and it was seen that intergranular corrosion and pitting occurred in the weld zone.

Keywords: Ferritic stainless steel, laser welding, corrosion

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 30.01.2016

Kabul tarihi : 05.02.2016

* 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 Dergimiz için makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Kökey, C., Sezgin, S., Çavuşoğlu, N., Gençalp-İrizalp, S., Saklakoğlu, İ. E. 2016. "İnce Paslanmaz Çelik Sacların Fiber Lazer ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 674, s. 65-72.

1. GİRİŞ

Ferritik paslanmaz çelikler sertleştirilmeyen Fe-Cr alaşımlarıdır. Bunların en çok kullanılan tipi, düşük karbonlu, %17 Cr içeren AISI 430'dur. 430 kalite paslanmaz çelikler nikel ve molibden içermedikleri için 300 serisi paslanmaz çeliklere oranla fiyat açısından daha uygundur. 430 kalite paslanmaz çelik, 1.4016 paslanmaz çelik olarak da adlandırılmaktadır [1]. Ferritik paslanmaz çelikler, kolayca şekillendirilebilir ve atmosferik korozyona direnç gösterirler. Bu özellikleri sayesinde, mimari, iç ve dış dekorasyon, mutfak eşyaları, çamaşır makinesi tamburları ve kurutma makineleri, gıda sanayi, otomotiv endüstrisi, kimya ve petrokimya gibi endüstri uygulamalarında geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir [2].

Ferritik paslanmaz çelikler, iki tipik ve son derece zorlu uygulama olan otomotiv egzoz sistemleri ve çamaşır makinesi tamburlarında başarıyla kullanılmaktadır. Egzoz sistemleri yüksek sıcaklıklara ve paslandırıcı ortam koşullarına maruz kalırlar. Çamaşır makinesi tamburları, deterjanlara ve neredeyse her zaman nemli olan ortamlara dayanıklı olmalıdır. Buna karşın, lokal korozyona hiçbir şekilde müsaade edilemez. Çamaşır makinesi tamburları ve egzoz sistemleri gibi önemli uygulamalarda başarılı şekilde kullanılan ferritik paslanmaz çelikler aslında birçok alanda çok daha geniş uygulama potansiyeline sahiptir [3].

Bununla birlikte, ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağıyla ilgili bir takım sorunlar vardır. Çelik yeteri kadar yüksek bir sıcaklıkta ısıtılırsa, süneklik ve tokluğunda azalmayla sonuçlanan çok hızlı tane büyümesi oluşabilir [4]. Normal halde ferritik paslanmaz çelikler, çok ince taneli sünek ve ferritik bir yapıya sahiptir. Ferritik paslanmaz çelikler, kaynak veya kaynak sonrası ısıtma işlemi sırasında yaşanan termal döngülerin sonucu olarak hassaslaşması yüzünden taneler arası korozyona karşı hassastır. Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri durumunda, ITAB'da 950 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, taneler arası krom karbür çökelmekte ve taneler arası korozyon meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalışmaya bağlı olarak, birleşme bölgesinde tane irileşmesi meydana gelmektedir. Tane irileşmesi ve taneler arası karbür çökelmeleri kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini olumsuz etkiler [5, 6]. Ferritik paslanmaz çeliklerin füzyon kaynağında düşük tokluk ve süneklikle sonuçlanan, ısıdan etkilenen bölgede ve bağlantının füzyon bölgesinde istenmeyen tane büyümesi ve zararlı ikincil fazların, özellikle sigma fazının çökmesiyle karşılaşılır. Sigma fazının oluşumu ve tane büyümesi, lazer ışın kaynağı, darbeleri akım gaz tungsten ark kaynağı ve katı hal kaynak yöntemleri gibi düşük ısı girişi içeren yöntemler uygulanarak kontrol edilebilir [7, 8].

Lazer kaynağı, farklı bağlantı tiplerinde, yeni malzemeler veya özellikleri geliştirilmiş malzemelerin mevcut ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edilmesinde karşılaşılan prob-

lemleri ortadan kaldırdığı ya da minimize ettiği için son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Lazer kaynak işleminde lazer üreticilerine bağlı olarak lazer ışınları sürekli ya da darbeleri modda olabilir. Sürekli veya darbeleri bir lazer ışını, endüstride farklı ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı için, ısıdan etkilenmiş bölgenin çok küçük ya da yok denecek kadar az olmasının dışında, diğer füzyon kaynak işlemlerindeki aynı metalurjik hususlar geçerlidir. Örneğin karbür çökmesi, yüksek hız ve düşük ısı girdisinden dolayı lazer kaynağında meydana gelmez. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ile 10^2-10^4 W/cm² aralığında güç yoğunluğu elde edilirken, lazer ışını odak noktasında 10^6-10^8 W/cm² aralığında güç yoğunluğu sağlar. Buna ek olarak, gaz tungsten ark kaynakları düşük oranlarda, genellikle, 10^0-10^1 K/s soğurken, lazer kaynaklarında ise ısıtma ve soğutma 10^5 K/s gibi çok yüksek oranlarda gerçekleşir. Lazer kaynağında düşük ısı girişi, hızlı ısıtma ve soğutma oranları, ferritik paslanmaz çelik kaynak bağlantılarında tane irileşmesi üzerinde daha fazla kontrol imkânı sağlar [9-11]. Kaynaklı birleştirmelerde en önemli sorun, kaynak dikişi ve çevresinde korozyon dayanımını koruyabilmektir. Bu bölgelerde malzeme, taneler arası korozyona duyarlı hale gelebilir. Bunu önlemek için bileşimi ve kaynak koşullarını çok iyi kontrol etmek gerekir. Bazen de kaynak sonrası işlemler gerekebilir.

Bütün çelikler farklı seviyelerde korozyona maruz kalır. Paslanmaz çelikler içerdikleri krom sayesinde diğer çeliklere göre daha iyi korozyon direncine sahiptir. Krom azalmasıyla ferritik paslanmaz çeliklerin taneler arası korozyona duyarlaşması, tane sınırlarında krom karbür ve nitritlerin oluşması nedeniyle olur. Karbon ve azotun ferrit içinde düşük çözünürlüğü ve daha yüksek difüzyon hızı sonucu ferritik çeliklerin kaynağında, kaynak bölgesinde ve komşu bölgede hassas alan oluşur. Taneler arası korozyonu önlemek için karbon oranını azaltmak veya çelik bileşimine titanyum, niyobyum ekleyerek karbon ve azotu bağlamak gereklidir [12].

Bu çalışmada, çamaşır makinesi tamburu yapımında kullanılan 430 tip ferritik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı ile kaynaklanması sonrası mekanik özellikleri, korozyon davranışı ve mikroyapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, 345x140x0,6 mm ölçülerinde AISI 430 (1.4016) ferritik paslanmaz çelik levhalar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de, oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri de Tablo 2'de gösterilmiştir.

Kaynak işlemleri, saf argon gaz ortamında alın altına fiber lazer kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak

Tablo 1. Ana Malzemenin Kimyasal Bileşim Oranları

Kimyasal Bileşim (%)						
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0,12 maks	1,00	0,045 maks	0,03 maks	1,00 maks	16-18 arası	0,75 maks

Tablo 2. Ana Malzemenin Oda Sıcaklığında Mekanik Özellikleri

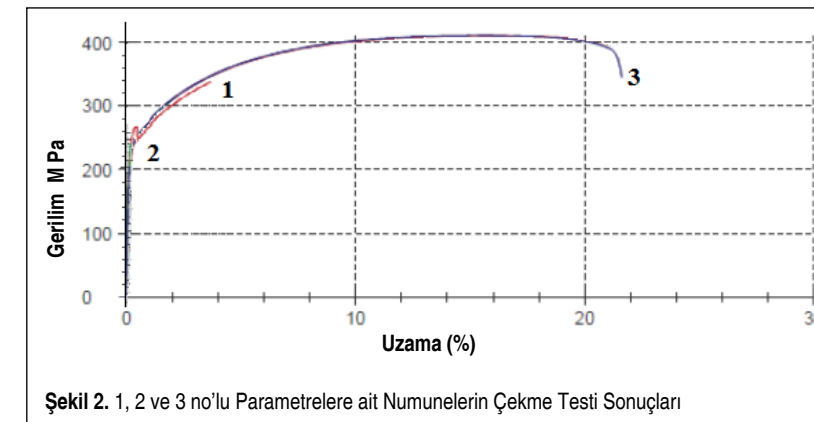
Çekme Dayanımı	415 MPa
Akma Sınırı (% 0,2)	250 MPa
Sertlik (Rockwell B)	82

Tablo 3. Kaynak Parametreleri

	Power (kW)	Işın Çapı (mm)	Darbe Enerjisi (J)	Darbe Frekansı (Hz)	Gerilim (V)
1. Parametre	0,05	0,6	6,4	7,9	253
2. Parametre	0,20	0,7	7,6	7,9	266
3. Parametre	0,40	0,7	12	7,9	278



Şekil 1. Kaynaklı Parçaların Giyotinle Kesilmiş Görüntüleri



Şekil 2. 1, 2 ve 3 no'lu Parametrelere ait Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

edilen numunelere çekme ve korozyon testleri uygulanmış ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Tablo 3'te belirtilen kay-

nak parametreleriyle kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.1 Çekme Testleri

Kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyleri EN ISO 6892-1 Standardı'na uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri kaynak yönüne dik gelecek konumda giyotin ile kesilmiştir (Şekil 1).

2.2 Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemesi için numuneler sırasıyla, kaba zımparalama, ince zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde 120, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200 meshlik zımpara kağıtları kullanılmıştır. Parlatma kademesi 3 mikronluk ve 1 mikronluk elmas süspansiyon ile gerçekleştirilmiştir. Dağlama sıvısı olarak 1 M %60 HCl, %40 saf su oranlarından oluşan dağlama sıvısı kullanılmıştır. İşlemler tamamlandıktan sonra her numune için kaynak metali, geçiş bölgesi ve ana metalden mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

2.3 Korozyon Testleri

Korozyon testleri EN ISO 3651-1 Standardı'na göre gerçekleştirilmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyleri kapsamında, korozyon gelişimini metal mikroskopuyla tespit etmek için bir adet bakalitli numune ile ağırlık kaybını belirlemek için bir adet bakalitsiz numune çözelti içerisine alınmıştır. Korozyon ortam için oda sıcaklığında 1M HCl çözeltisi kullanılmıştır. Korozyon öncesi numunenin kütle ölçümü yapılmış ve başlangıç kütlesi, $m_1 = 0,522$ g olarak tespit edilmiştir.

Bakalitli ve bakalitsiz numune ayrı ayrı korozyon çözeltiye bırakılmış olup, belirli periyotlarla bakalitli numuneden mikroyapı fotoğrafları, bakalitsiz numuneden ise kütle kaybı değerleri alınmıştır. Her iki numune de toplam 119 saat korozyon çözelti içinde kalmıştır. Numuneler çözeltiye bırakıldıktan sonra mikroyapı fotoğrafları ve ağırlık kaybı sonuçları birinci, ikinci, üçüncü, dördüncü, beşinci, yirincinci, doksan altıncı ve yüz on dokuzuncu saatin sonlarında alınmıştır. 119. saatin sonunda bakalitsiz numunede kaynak bölgesinden kopma gözlenmiştir.

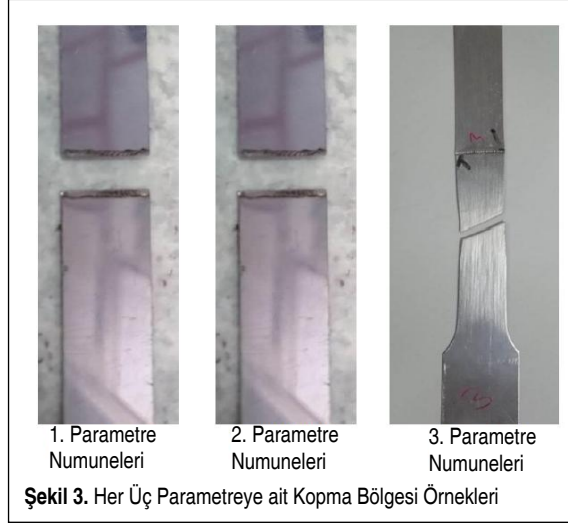
3. SONUÇLAR

3.1 Çekme Testi Sonuçları

Her bir parametre için kaynak edilmiş parçalar-

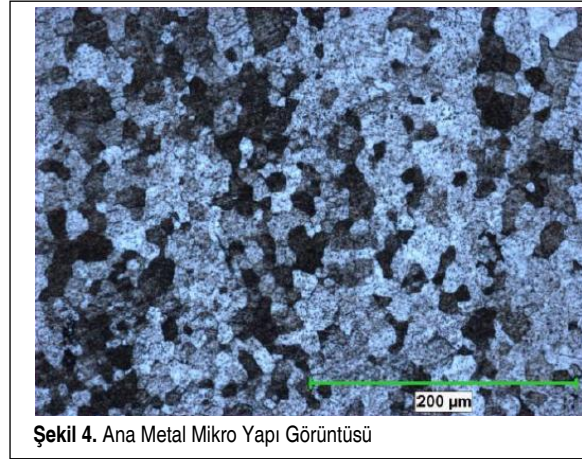
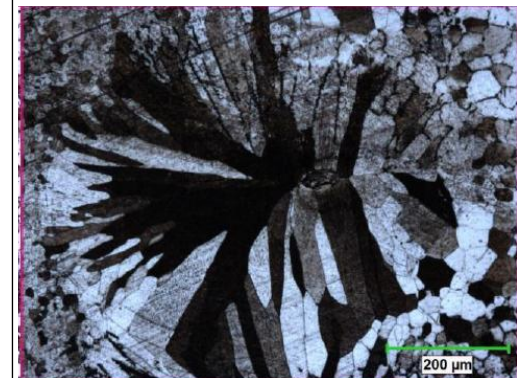
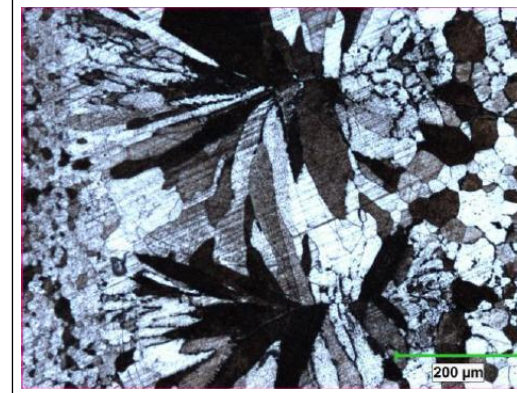
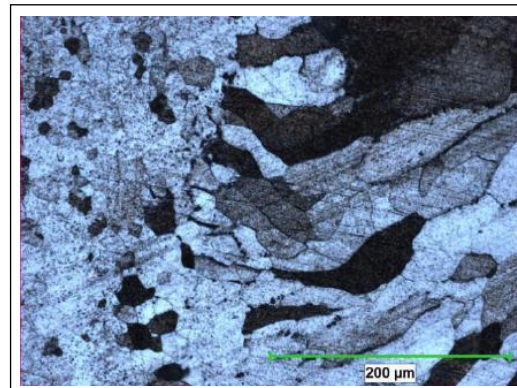
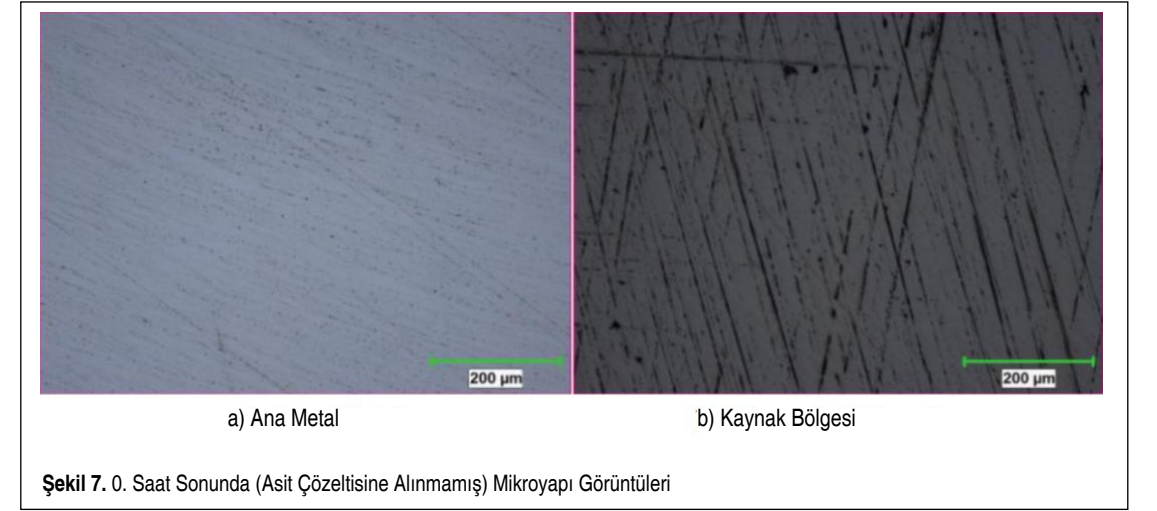
Tablo 4. 1, 2 ve 3 no'lu Parametrelere ait Numunelerin Çekme Dayanımlarının Ortalaması

Parametre No	Ortalama $R_{p0.2}$ (MPa)	Ortalama R_m (MPa)
1	223	296
2	214	236
3	249	410

**Şekil 3.** Her Üç Parametreye ait Kopma Bölgesi Örnekleri

dan çıkarılan numunelere ait çekme testi sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Çekme testi sonuçlarından elde edilen verilere bağlı olarak her bir parametrenin ortalama çekme dayanımı değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Şekil 2'deki 1 no'lu çizim, 0,6 mm ışın çapı, 6,4 joule darbe enerjisiyle kaynatılan numunenin çekme testi sonucudur. Ortalama çekme dayanımı değeri 296 MPa olarak hesaplanmıştır. Kopma, kaynak bölgesinden gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, kaynak bölgesinin çekme dayanımının ana malzemeden düşük olduğu açıktır. 2 no'lu çizim, 0,6 mm darbe çapında, 7,6 joule darbe enerjisiyle kaynatılan numunenin çekme testi sonucudur. Ortalama çekme dayanımı değeri 236 MPa olarak hesaplanmıştır. Kopma, kaynak bölgesinden gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, kaynak bölgesinin çekme dayanımının ana malzemeden düşük olduğu açıktır. 3 no'lu çizim, 0,7 mm darbe çapında, 12,0 joule darbe enerjisiyle kaynatılan numunenin çekme testi sonucudur. Ortalama çekme dayanımı değeri 410 MPa olarak hesaplanmıştır. Çekme testi sonucunda kopma, ana malzemeden gerçekleşmiştir. Buna göre, 3 no'lu kaynak parametresi ile birleştirilmiş 430 kalite paslanmaz çelik numunenin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Şekil 3'te, çekme numunelerinde her parametre için kaynak bölgesinden ve ana malzemeden kopan numunelere ait bir örnek görülmektedir.

**Şekil 4.** Ana Metal Mikro Yapı Görüntüsü**Şekil 5.** Kaynak Bölgesi Mikroyapı Görüntüleri**Şekil 6.** Geçiş Bölgesi Mikroyapı Görüntüsü**Şekil 7.** 0. Saat Sonunda (Asit Çözeltisine Alınmamış) Mikroyapı Görüntüleri

3.2 Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 4'te, 430 kalite ferritik paslanmaz çelik malzemesinin mikroyapı fotoğrafı görülmektedir.

Şekil 5'te, kaynak sonrası mikroyapı incelemeleri verilmiştir. Burada, lazer atış noktaları ve ergimenin başlayıp ısının dağılma yönü belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Lazer atış noktası mesafesi azaldığında, lazer atışı sonucu ergiyip katılan bölgenin kısmen küçüldüğü tespit edilmiştir. Bu küçülmenin kaynak geriliminin, darbe enerjisinin, darbe süresinin değişkenlik göstermesi sonucunda meydana gelebileceği düşünülmektedir.

Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB) neredeyse yok denilecek kadar dar bir alandadır (Şekil 6). Bu durum, lazer kaynağının küçük odak çapı sağlama ve çok hızlı soğuma özelliklerine bağlı olarak gelişmiştir.

3.3 Hızlandırılmış Korozyon Sonucunda Meydana Gelen Mikroyapılar

Hızlandırılmış korozyon testi kapsamında numuneler, asit çözeltisine bırakılmadan önce parlatma işlemine tabi tutulmuş olup, mikroyapı fotoğrafları Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 8'de, 1. saat, 2. saat, 3. saat ve 4. saatin sonundaki mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Birinci saatin sonunda numunenin tüm yüzeyinde pitting oluşumunun başladığı görülmüştür. Kaynak bölgesinde ise tane sınırlarında çökelti oluşumu belirgin hale geldiğinden, bu bölgede taneler arası korozyonun daha etkili olduğu görülmektedir (Şekil 8a ve 8b). İkinci saatin sonunda pitting oluşumunda belirgin bir artış gözlenmemiştir. Bununla birlikte, kaynak bölgesinde taneler arası korozyonda dramatik bir artış vardır (Şekil 8c ve 8d). Üçüncü saatin sonunda, pitting oluşum hızında belirgin bir artış olmamakla beraber, tanelerarası korozyon ikinci sa-

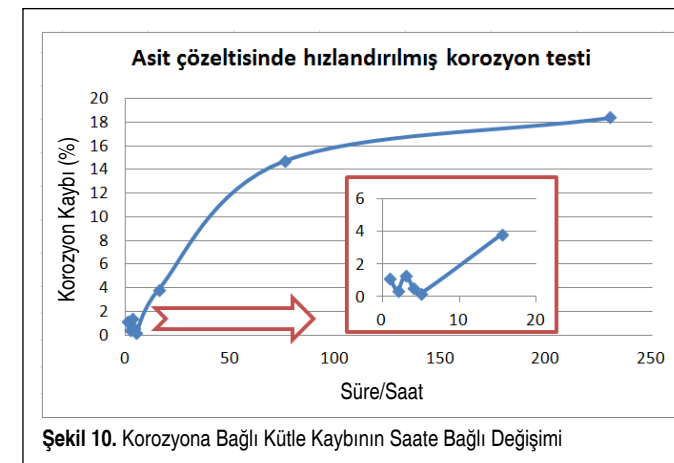
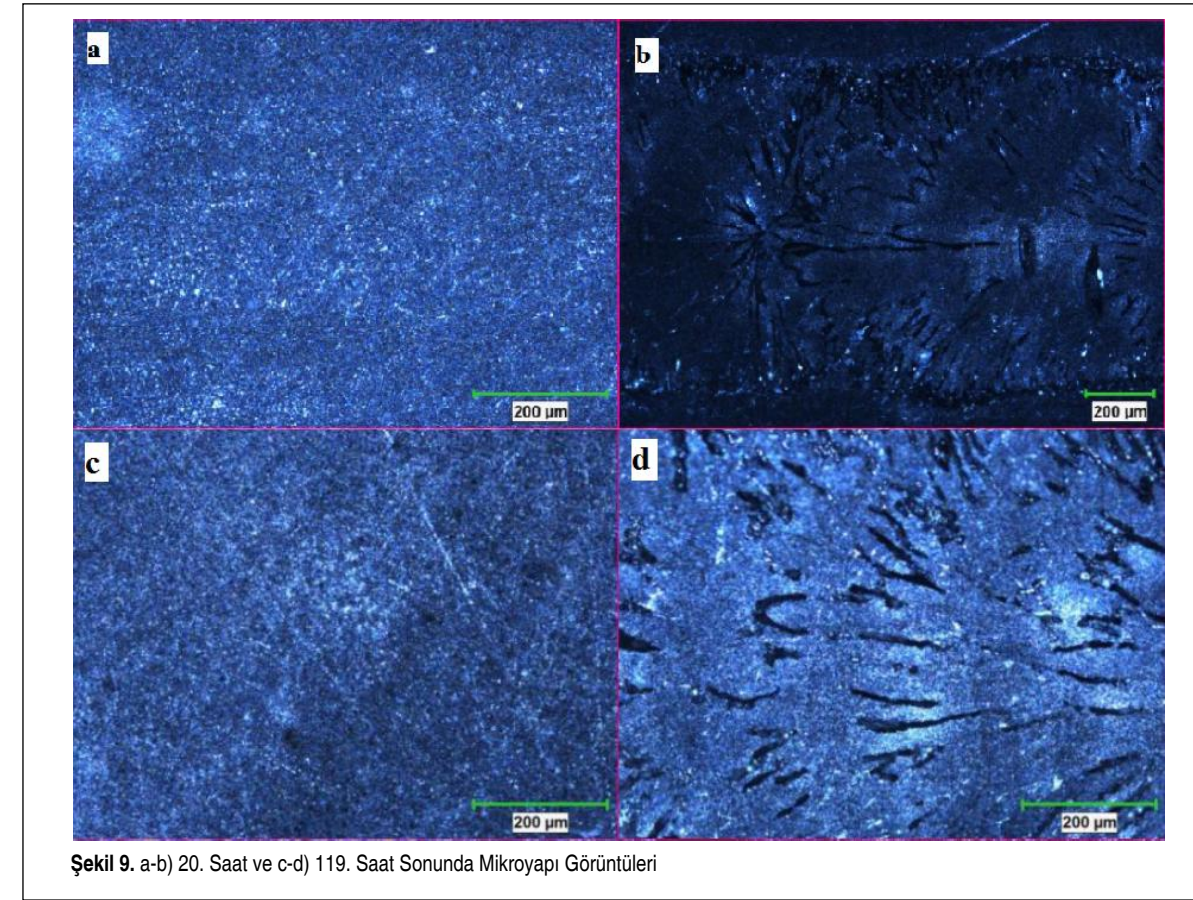
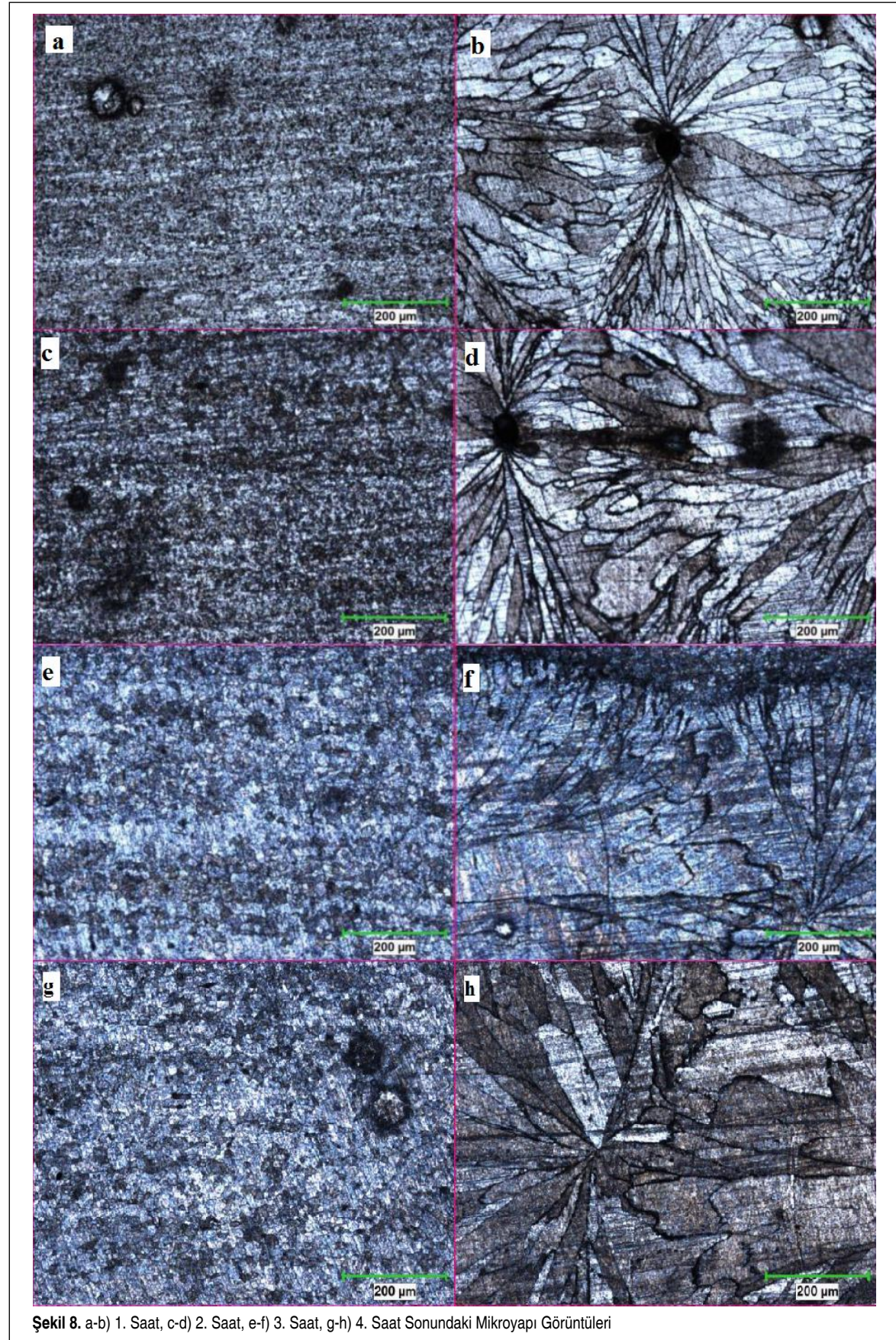
ate göre hem ana metal hem de kaynak bölgesinde artmıştır (Şekil 8e ve 8f). Dördüncü saatin sonunda, tanelerarası korozyonun daha çok arttığı ve ayrıca kaynak ile ana metal arasındaki bölgede tanelerarası korozyonun etkili olmaya başladığı tespit edilmiştir (Şekil 8g ve 8h).

Şekil 9'da, 20 ve 119. saat sonunda yüzeyin durumu görülmektedir. Yirminci saatin sonunda, yüzeyde aşırı oksitlenme meydana gelmiş, ana metal bölgesinin bu oksit tabaka ile kapandığı gözlemlenmiştir. Yüksek büyütmelede yüzeyin delikli/gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülebilmektedir. Bununla birlikte, kaynak bölgesindeki taneler arası korozyonun çatlak boyutuna ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 9a ve 9b). Yüz on dokuzuncu saatin sonunda, ana metalin, özellikle yüksek büyütmelede aşırı delikli/gözenekli bir yapıya ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesindeki taneler arası korozyonda yirminci saate göre belirgin bir artış gözlenmiştir (Şekil 9c ve 9d).

3.4 Hızlandırılmış Korozyon Sonucunda Meydana Gelen Kütle Kayıpları

Belirli periyotlarda kütle ölçümü alınarak hesaplanan korozyon kaybı sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 10'da, ilk 5 saatte korozyon hızının çok düşük olduğu, ayrıca korozyon kaybının değişken olduğu göze çarpmaktadır. Korozyonun neden olduğu kütle kaybı ile oksitlenmenin neden olduğu kütle artışının bu değişkenliğe yol açtığı düşünülmektedir. 20. saatten sonra kütle kaybı daha etkili olmuş ve korozyon hızında artan bir eğilim meydana gelmiştir. Her ne kadar korozyon kaybı ağırlıkça ilk 5 saatte çok düşük gerçekleşmiş olsa da 1. saatten itibaren taneler arası korozyon etkili hale gelmeye başlamıştır. Bu durum, korozyonun malzeme ağırlığında önemli bir kayba yol açmasa da malzeme özelliklerini önemli oranda etkileyebilen bir proses olduğunu ortaya koymaktadır.



4. SONUÇ

Bu çalışmada, çamaşır makinesi tamburu olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzeme, darbeli lazer kaynağıyla kaynak edilmiştir. Kaynak parametrelerinin dayanım, mikroyapı ve korozyon özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Kaynak gücünün artmasıyla dayanımın arttığı görülmüştür.

- 3. parametre değerlerinde 0,7 mm darbe çapında, 12 joule darbe enerjisiyle kaynak edilen numunelerde kopma, ana malzemeden gerçekleşmiştir.
- Lazer darbe noktaları ve ergimenin başlayıp ısının dağıldığı yön belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Lazer darbe noktası mesafesi azaldığında, darbe sonucu ergiyip katlaşılan bölgenin kısmen küçüldüğü tespit edilmiştir.
- Kaynak bölgesinde ısının akışı yönünde tanelerin yönlenecek kolonsal bir yapı oluşturduğu ve katlaşmanın tamamlandığı nokta da krater oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Birinci saatin sonunda numunenin tüm yüzeyinde pitting oluşumunun başladığı görülmüştür. İkinci saatten itibaren taneler arası korozyon daha etkili olmuştur.
- Yirminci saatin sonunda, tüm yüzeyin gözenekli oksit tabakası ile kaplandığı, kaynak bölgesindeki taneler arası korozyonun ise çatlak boyutuna ulaştığı tespit edilmiştir. Yüz on dokuzuncu saatin sonunda kaynak bölgesinden kopma gözlenmiştir.

KAYNAKÇA

1. <http://www.yildizaypaslanmaz.com.tr/430-paslanmaz-celik.html>, son erişim tarihi: 29.1.2016.

- Arun, M. A., Senthil, K. T., Chandrasekar, M.** 2015. "Mechanical and Metallurgical Properties of Dissimilar Welded Components (AISI 430 Ferritic-AISI 304 Austenitic Stainless Steels) by CO2 Laser Beam Welding (LBW)," Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, issue 6, p. 335.
- Snelgrove, P.** 2007. Ferritik Paslanmaz Çeliklerle İlgili Temel Kılavuz, ISBN 2-930069-51-1, PASDER (Paslanmaz Çelik Derneği).
- <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-ferritic-martensitic-stainless-steels-101/>, son erişim tarihi: 29.1.2016.
- Taşkın, M., Çalgülü, U.** 2009. "AISI 430/1010 Çelik Çiftinin Lazer Kaynağında Kaynak Gücünün Birleşmeye Etkisi," Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, sayı 21 (1), s. 11-22.
- Khorrani, M. S., Mostafaei, M. A., Pouraliakbar, H., Kokabi, A. H.** 2014. "Study on Microstructure and Mechanical Characteristics of Low-Carbon Steel and Ferritic Stainless Steel Joints," Materials Science&Engineering A, vol. 608, p. 35-45.
- Alizadeh-Sh, M., Marashi, S. P. H., Pouranvari, M.** 2014. "Resistance Spot Welding of AISI 430 Ferritic Stainless Steel: Phase Transformations and Mechanical Properties," Materials and Design, vol. 56, p. 258-263.
- Gurrana, M., Adepub, K., Pinnitic, R. R., Gankidid, M. R.** 2013. "Effect of Copper and Aluminium Addition on Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of AISI 430 Ferritic Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welds," J Mater Res. Technology, vol. 2 (3), p. 238-249.
- Hensley, W. E.** 1997. "Welding Stainless Steel," In Handbook of Stainless Steels, (Ed. Peckner, D., Bernstein, I. M.) McGraw Hill Book Inc., New York.
- Steen, W. M.** 1998. Laser Material Processing, Springer-Verlag Ltd., London, vol. 148, p. 207-216.
- Rakesh, K., Ganesh, P., Tripathi, P., Nandedkar, R. V., Nath, A. K.** 2006. "Comparison of Laser and Gas Tungsten Arc Weldments of Stabilized 17 wt % Cr Ferritic Stainless Steel," Materials and Manufacturing Processes, vol. 18, issue 4.
- Villaret, V., Deschaux, B. F., Bordreuil, C., Fras, G., Choivet, C., Petit, B., Faivre, L.** 2013. "Characterization of Gas Metal Arc Welding Welds Obtained with New High Cr-Mo Ferritic Stainless Steel Filler Wires," Materials and Design, vol. 51, p. 474-483.

<http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina/>

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Mühendis ve Makina Dergisi

Online Makale Yönetimi

ANA SAYFA (GİRİŞ SAYFASI) | YAZAR | HAKEM | EDITÖR

» HOŞGELDİNİZ

YAZAR GİRİŞİ

e-Posta :

Şifre :

[Yeni Kullanıcı](#) | [Şifremi Unuttum](#)

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ'ne makale gönderebilmek için sisteme kayıt olmanız gerekmektedir. Kayıt olabilmek için sol kısımda yer alan [Yeni Kullanıcı] bağlantısına tıklayınız.

Daha önce kayıt olduysanız, e-posta adresiniz ve şifrenizi girmeniz yeterlidir.

Şifrenizi hatırlamıyorsanız, şifrenizin e-posta adresinize gönderilebilmesi için [Şifremi Unuttum] bağlantısına tıklayınız.

Sistemle ilgili sorularınızı yayin@mmo.org.tr e-posta adresine gönderebilirsiniz.

makalelerinizi online sistem üzerinden ulaştırabilirsiniz