



## Farklı çelik çiftinin birleştirilmesinde kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi

Ramazan Kaçar<sup>ID</sup>, Hayriye Ertek Emre\*<sup>ID</sup>, Ali Ümit İşineri<sup>ID</sup>, Asghar Najafigharehtapeh<sup>ID</sup>

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Balıklar kayası, Karabük, 78050, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- GMAK yöntemi farklı cins çelik çifti kaynaklı birleştirmesinin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir
- GMAK yöntemi ile birleştirilmiş farklı cins çelik çifti daha iyi şekillendirilebilirlik sergilemiştir
- Hardox 400–AISI 304 farklı cins çelik çifti GMAK yöntemiyle başarıyla birleştirilebilir

### Makale Bilgileri

Geliş: 26.10.2016

Kabul: 29.03.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.406797

### Anahtar Kelimeler:

Hardoks 400-AISI 304 çelik çifti,

gaz metal ark kaynağı,

elektrik ark kaynağı,

mekanik özellikler,

mikroyapı

### ÖZET

Bu çalışmada aşınmaya dirençli hardoks çeliğinin, östenitik paslanmaz çeliğe elektrik ark kaynak (EAK) ve gaz altı ark kaynak (GMAK) yöntemleri ile birleştirilebilirliği incelenmiş, kaynak yöntemi farkının birleştirmenin mekanik özelliklerine ve yapısına etkisi araştırılmıştır. Standartlara uygun kaynak ağzı açılan HARDOKS 400–AISI 304 çelik çifti EAK ve GMAK yöntemleriyle çok pasolu olarak, yerde yatayda alın alına birleştirilmiştir. Farklı cins çelik birleştirmesinin mekaniksel özellikleri; çekme, üç nokta eğme ve darbe çentik testi ile belirlenmiştir. İlave olarak birleştirmenin kesitinde sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemesi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre; GMAK yöntemi ile birleştirilmiş numunenin çekme dayanımı, kaynak metali çentik darbe tokluğunun ve şekillendirilebilirliğinin EAK ile birleştirilen numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

## Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple

### H I G H L I G H T S

- The mechanical properties of dissimilar steel couple weldment is recovered from GMAW method
- The dissimilar steel couple joined with GMAW method displayed good ductility
- Hardox 400–AISI 304 dissimilar steel couple can be joined by GMAW method successfully

### Article Info

Received: 26.10.2016

Accepted: 29.03.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.406797

### Keywords:

Hardox 400–AISI 304 steel couple,

gas metal arc welding,

electric arc welding,

mechanical properties,

microstructure

### ABSTRACT

In this study, the weldability of wear resistant hardox steel to austenitic stainless steel with shielded metal arc welding (SMAW) and gas metal arc welding (GMAW) methods was investigated and an effect of welding method on the mechanical properties and microstructure of weldment was examined. According to standard, welding groove was prepared for Hardox 400–AISI 304 steel couple that was multi pass welded in butt position by using GMAW and SMAW methods. The mechanical properties of the weldments were determined by tensile, three point bending and V-notch impact tests. In addition, hardness measurement and microstructure evaluation was carried out on the cross section of weldment. According to findings; the tensile strength, weld metal notch impact toughness and ductility of the samples joined with the GMAW method were determined higher than those joined with SMAW.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: hayriyeertek@karabuk.edu.tr / Tel: +90 370 418 7100 / 1091

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östenitik paslanmaz çelikler; mekanik özellikleri, şekil alma ve kaynak edilebilme kabiliyetlerinin iyi olması sebebiyle düşük ve yüksek sıcaklık kullanım uygulamalarında tercih edilmektedir [1, 2]. Ayrıca yüksek korozyon dirençleri nedeniyle önemli bir mühendislik malzemesidir [3]. Korozyon dirençlerinden dolayı genellikle endüstride gıda, eczacılık, kimya ve petrokimya endüstrilerinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler [4, 5]. Ergitmeli ve ergitmesiz kaynak yöntemleriyle rahatlıkla birleştirilebilen östenitik paslanmaz çelik kaynak metali mikroyapısı östenit matrikste bilhassa östenit tane sınırlarında az miktarda delta ferrit fazından meydana gelir [6, 7]. Özellikle aşınma direnci ve yüksek tokluk istenilen tanker, tır, kamyon dorsesi gibi alanlarda kullanılacak olan çelik türlerinin başında gelen hardoks çelikleri diğer yüksek dayanımlı çeliklere göre aşınmaya daha dirençli ve daha uzun ömürlü olmasından dolayı yaygın olarak kullanılır [8, 9]. Hardoks çeliklerin göze çarpan özellikleri kolay işlenebilir, şekillendirilebilir ve kaynak edilebilir olmasıdır [10, 11]. Hardoks çeliklerinin kaynağında, ana malzemenin daha yumuşak dolgu teli kullanılması önerilir. Ayrıca ana malzemenin kaynak öncesi ön ısıtmaya tabi tutulması ve pasolar arası geçiş sıcaklığının kontrolü ile çatlama riski en aza indirilebilir [12].

Üretim sektöründe, farklı malzeme çifti kullanımının artması, üretimin geliştirilmesi, parametrelerin optimizasyonu ve malzemelerin geliştirilmesi gibi geniş araştırma alanları açmıştır [13]. Mühendislik alanında yapılan akademik çalışmalar ise daha çok aynı çift malzemelerin birleştirilmesi ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu üzerinde durmaktadır [14]. Farklı iki malzemenin ergitme kaynak yöntemlerinden biri ile birleştirilmesi ve bunun için en uygun ilave kaynak metalinin seçilmesi oldukça önemli bir husustur [15]. Farklı cins malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan ilave metalle birlikte her iki ana malzemenin de önemli miktarda alaşım elementleri bulduran bir kaynak banyosu ortaya çıkar [16]. Bu sebeple farklı cins malzeme birleştirmesinde kaynak yöntemi, her iki malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak seçilir [17]. Hatalı kaynak yöntemi zaman ve malzeme kaybına neden olabileceği gibi, başarısız birleştirmeye neden olabilir. Elle yapılan elektrik ark kaynak işlemlerinde, önemli ve kontrol edilmesi gerekli parametreler (kararlı ark boyu ve kaynak ilerleme hızı) kaynak yapan kişiye göre değişmekte ve aynı kaynakçı için

bile yorgunluk durumuna göre farklılıklar göstermektedir [18, 19]. Otomasyon ve robotik uygulamalara oldukça uygun olan gaz metal ark kaynak tekniğinde ise bu parametrelerin kontrol edilmesi daha kolaydır [20, 21]. Literatür araştırmalarında, östenitik paslanmaz çeliklerin birbirleriyle ve farklı malzemelerle kaynaklanabilirliği ile ilgili birçok çalışmaya rastlanılmaktadır. Örneğin bu çalışmalardan birisinde, Lothongkum vd. [22] östenitik paslanmaz çeliklerinin birbirleriyle birleştirilebilirliğini incelemiştir. Östenitik paslanmaz çeliğin AISI4140 ve AH36 çeliğiyle kaynak edilebilirliği sırasıyla Subhash vd. [23] ile Yılmaz ve Tümer [24] tarafından araştırılmıştır. Sırasıyla östenitik paslanmaz çeliğin titanyum, alüminyum ve bakırla kaynak edilebilirliği Campo vd. [25], Manto vd. [26] ve Shaibu vd. [27] tarafından araştırılmış ve kaynaklı birleştirmelerinin özellikleri etraflıca incelenmiştir. Bir başka çalışmada Tümer ve Yılmaz [28], farklı koruyucu gaz kompozisyonu kullanılarak özlü tel ile birleştirilen östenitik paslanmaz çeliklerin tokluk ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Koruyucu gaz içerisindeki CO<sub>2</sub> miktarı artışına bağlı olarak ısı girdisinin arttığını ve mikroyapıdaki östenit alanının genişleyerek δ-ferrit fazının morfolojisinin değiştiğini rapor etmişlerdir. Kaçar ve Baylan [29], östenitik paslanmaz çelik ile ferritik paslanmaz çelik çiftini farklı cins östenitik ve dubleks elektrot kullanarak birleştirmiş ve her iki elektrotun birleştirme mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini inceleyerek birleştirme için her iki elektrotun da kullanılabilirliğini rapor etmişlerdir. Sonuç olarak; östenitik paslanmaz çeliklerin farklı çelik ve demir dışı metallerle birleştirme uygulamaları bulunmakta ve kullanılacak olan kaynak yöntemi, ilave tel ve koruyucu gaza bağlı olarak birleştirmeler farklı özellikler sergilemektedir. Ancak östenitik paslanmaz çeliklerin aşınmaya dirençli çelik birleştirmesi ile ilgili yeterli bir çalışmaya rastlanılmamaktadır. Bu amaçla çalışmada Hardoks 400-AISI 304 çelik çiftinin gaz metal ark kaynak (GMAK) ve elektrik ark kaynak (EAK) yöntemleriyle birleştirilebilirliği incelenmiştir. Kaynak yöntemi farklılıklarının farklı cins Hardoks 400-AISI 304 çelik birleştirmesi mekanik özelliklerine ve birleştirme mikroyapısına etkisi araştırılmıştır. Birleştirilen numunelerin statik ve ani kuvvetler etkisi altındaki davranışları çekme, eğme ve darbe çentik testi ile tespit edilmiştir. Aynı zamanda birleştirmenin sertliği ölçülerek sertlik dağılım profili oluşturulmuştur. Ayrıca farklı cins çelik birleştirmesinin mikroyapısı incelenerek, mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi değerlendirilmiştir.

**Tablo 1.** Ana malzeme ve kaynak ilave metali kimyasal bileşimi (% ağırlık)  
(Chemical composition of base metal and filler metal (% wt))

Malzeme	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe	Ni <sub>eş</sub>	Cr <sub>eş</sub>
HARDOKS400	0,14	0,27	1,17	0,43	0,005	0,014	0,014	Kalan	4,86	0,86
AISI304	0,03	0,37	1,42	18,6	0,27	8,64	0,34	Kalan	10,2	19,5
E310-16 EAK elektrot	0,12	0,9	2,5	26	-	20	-	Kalan	24,85	27,3
ER310 GMAK ilave tel	0,12	0,9	3,2	25	-	20,5	-	Kalan	25,7	26,3

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

### 2.1. Malzeme ve Metot (Materials and Method)

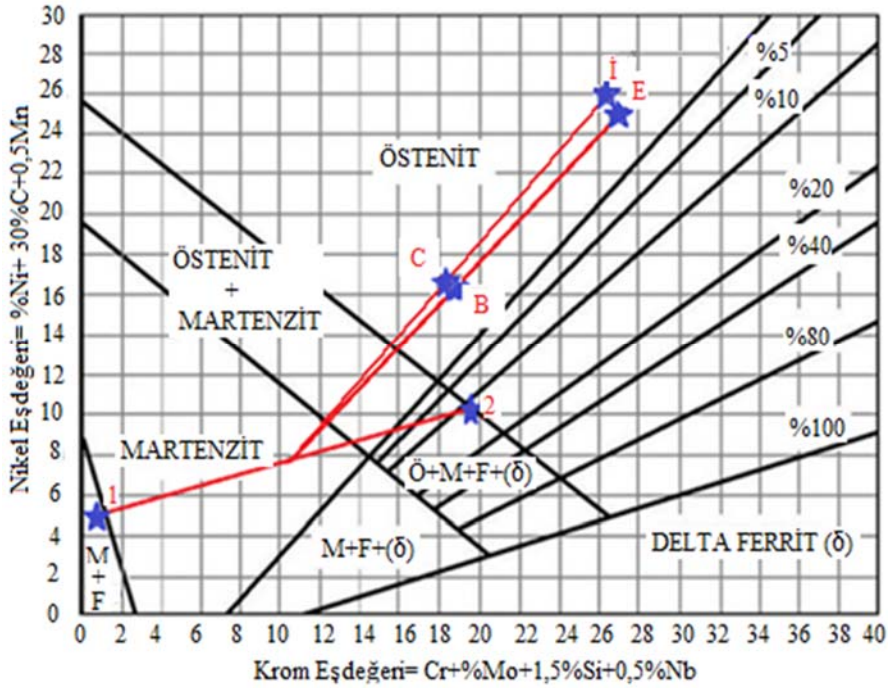
Bu çalışmada 10 mm kalınlığında Hardoks 400-AISI 304 çelik çifti, EAK yöntemi ile 3.25 mm çapında E310-16 (EN 1600-E2520R32) kaynak elektrotu ve GMAK yöntemi ile 1.2 mm çapında ER310 (GZ2520Mn) kaynak ilave teli kullanılarak birleştirilmiştir. Deneyde kullanılan Hardoks 400, AISI 304 çeliklerinin ve kullanılan ilave telin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

İlave metallerin seçiminde ve kaynak sonrasında oluşabilecek yapıyı tahmin edebilmek için Scheaffler diyagramından yararlanılmıştır. Şekil 1'de sırasıyla EAK ve GMAK yöntemleriyle birleştirilmiş farklı cins çelik çiftinin ve kaynak ilave metallerinin  $Cr_{eş}$ ,  $Ni_{eş}$  değerleri Schaeffler bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Diyagram üzerinde Hardoks 400 ana malzeme 1, AISI 304 ana

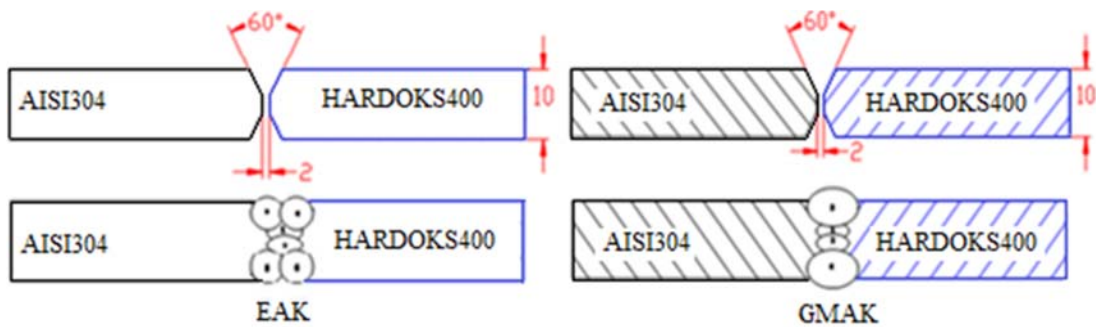
malzeme 2, elektrot ve ilave metal sırasıyla E ve İ harfleri ile belirtilmiştir. Kaynak ilave metali ve ana malzeme ergime karışım oranı %50 olduğu varsayılarak kaynak bileşimi noktası sırasıyla EAK için B, GMAK için ise C harfi ile gösterilmiştir. Şekil 1'deki diyagrama göre her iki kaynak yöntemi için de birleştirme sonrası kaynak metali yapısının östenit fazından oluşması beklenmektedir.

### 2.2. Numunelerinin Birleştirilmesi (Joining of Samples)

Deneysel çalışma için Hardoks 400-AISI 304 çelik çifti 10x250x500 mm<sup>3</sup> ebatlarında kesilerek hazırlanmıştır. Numune yüzeyleri kaynak öncesi tel fırça ile oksit, yağ vb. atıklardan temizlenmiştir. Kaynak tasarımı ve kaynak sırası Şekil 2'de gösterilmiştir. Hardoks çelikleri için tavsiye edilen ön tav sıcaklıkları kalınlığa bağlı olarak 100-175°C arası değişmekte ve pasolar arası geçiş sıcaklığı ise 150-175°C arasında ayarlanması önerilmektedir [12]. Bu sebeple çalışmada kaynak öncesi numunelere 150-200°C sıcaklıkta ön tav ısıl işlemi uygulanmış ve pasolar arası geçiş sıcaklığı



Şekil 1. Scheaffler diyagramı (Scheaffler diagram)



Şekil 2. Kaynak tasarımı ve kaynak sırası (Welding design and welding sequence)

150-175°C olacak şekilde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple çalışmada bilhassa EAK yönteminde kaynak ilerleme hızları değişkenlik arz ettiği için ısı girdisi değeri yaklaşık olarak hesap edilmiştir. GMAK birleştirmesinde dakikada 10lt gaz debisi ayarlanarak M12 (Ar + CO<sub>2</sub> karışım gazı) koruyucu gaz kullanılmıştır. Birleştirmede kullanılan kaynak parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılacak test numunelerinin çıkarılması sırasında zarar görmemesi için kesme işlemi CNC su jeti ile gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıda oluşan çarpılmayı (distorsiyon) minimize edebilmek için deney numunelerinin her iki yüzeyinden 2,5 mm taşlama ve sonrasında zımparalama yapılarak 5 mm kesit kalınlığına düşürülmüştür.

### 2.3. Mekanik Test Yöntemleri (Mechanic Test Methods)

Deney numunelerinin TS EN ISO 4136 standardına uygun çekme testi 50 kN kapasiteli SHIMAZDU marka test cihazında dakikada 5 mm çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Hataları minimize etmek için 3’er adet deney numunesi test edilmiştir. TS EN ISO 9016 standardına göre, standart altı hazırlanan çentik darbe numuneleri oda sıcaklığında, 0°C ve -50°C sıcaklıkta test edilmiştir. Her bir şart için 3 adet deney numunesi MOHR&FEDERAF AG PSW 13/15 marka darbe çentik cihazında test edilmiştir. TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin şekillendirilebilirliği üç nokta eğme deneyine tabi tutularak belirlenmiştir. Deney 10 ton kapasiteli ALŞA marka üniversal hidrolik çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir.

### 2.4. Mikroyapı İncelemesi ve Sertlik Ölçümü (Microstructure Examination and Hardness Measurement)

Metalografi numuneleri klasik metalografi yöntemleri uygulanarak hazırlanmıştır. Numuneler önce %2 nital çözeltilisinde 6 saniye dağlanarak Hardoks 400 tarafından mikroyapı görüntüsü alınmıştır. Daha sonra numune 80 ml saf su + 20 gr sodyum hidroksit solüsyonu içerisinde doğru

akımda 5V gerilim ve 2A akım şiddeti altında ortalama 15sn elektrolitik dağlanmıştır. İncelemeler optik mikroskopta ve birleştirmelerin kırılma yüzeyleri ise Zeiss Ultra Plus marka SEM mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü aynı hatta ve ana metalden kaynak metaline doğru belirli ölçüm sırası ile FV-700 SHIMADZU marka Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Batıcı uca 500 g yük uygulanmıştır.

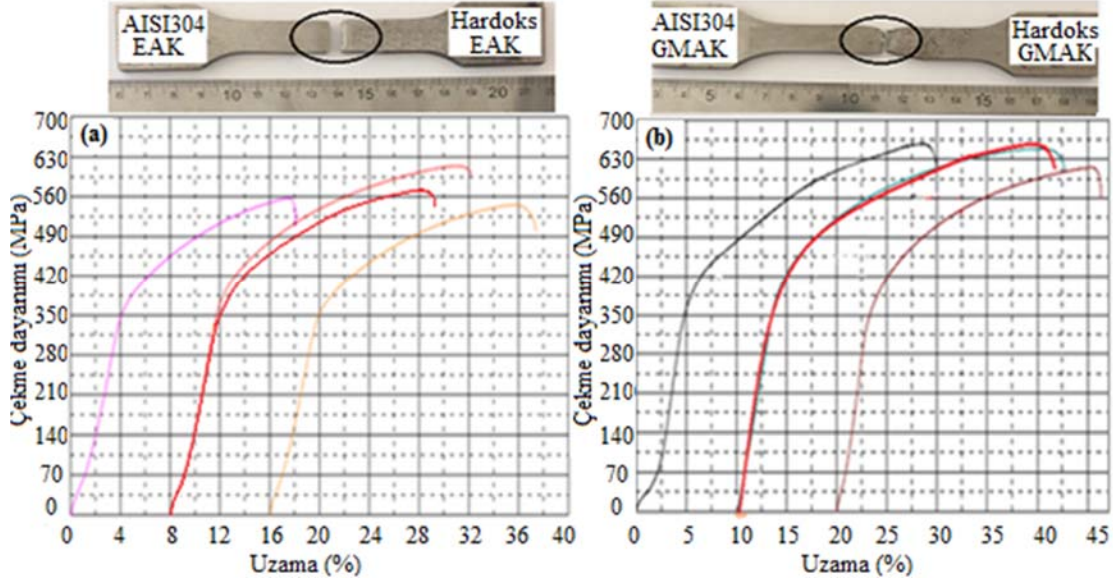
## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 3.1. Çekme Deney Sonuçları (Tensile Test Result)

Hardoks 400-AISI 304 çelik çifti EAK ve GMAK birleştirmelerinin çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ve ortalamaları (kırmızı renkli) Şekil 3a ve b’de gösterilmiştir. Şekil 3a’dan görüldüğü gibi, EAK yöntemi ile birleştirilen Hardoks 400-AISI 304 farklı çelik çiftinin ortalama çekme dayanımı 572 ±2 MPa, akma dayanımı 355±2 MPa ve yüzde uzaması %21 olarak bulunmuştur. Test sonucunda kırılma kaynak metalinden meydana gelmiştir (Şekil 3 a). Şekil 3b’ den görüldüğü gibi GMAK yöntemi ile birleştirilen Hardoks 400-AISI 304 çelik çiftinin ortalama çekme dayanımı 635±2 MPa, akma dayanımı 385±2 MPa ve uzaması ise %28 olarak bulunmuştur. GMAK yöntemi ile birleştirilen numunelerin test sonuçlarında da kırılmalar kaynak metalinden meydana gelmiştir (Şekil 3b). Her iki birleştirmenin çekme dayanımları kıyaslandığında, GMAK yöntemi uygulanan birleştirmelerin çekme dayanımının yaklaşık 63 MPa, akma dayanımının 30 MPa ve uzama değerinin ise %7 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebinin, birleştirme yönteminde kullanılan ilave tel kimyasal kompozisyonu ve kaynak yöntemi ve paso sayısındaki farklılıktan doğan ısı girdisine bağlı olarak kaynak metali mikroyapısı, tane boyutu ve delta ferrit morfolojisi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

**Tablo 2.** Kaynak parametreleri ve kaynak paso sayısı (Welding parameters and weld pass numbers)

EAK									
Paso	Yöntem	Dolgu Teli			Akım (A)	Voltaj (V)	Akım Tipi	Hız (cm/dak.)	Isı Girdisi (kJ/cm)
		Çap	Sınıf(TS EN ISO 3581-A)						
1.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	100-110	30-32	DC(+)	16-17	10,37	
2.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	100-110	30-32	DC(+)	16-17	10,37	
3.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	115-120	32-34	DC(+)	12-14	13,96	
4.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	115-120	32-34	DC(+)	12-14	13,96	
5.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	115-120	32-34	DC(+)	12-14	13,96	
6.	111	Ø3,25	E 25 20 R 32	115-120	32-34	DC(+)	12-14	13,96	
GMAK									
Paso	Yöntem	Dolgu Teli			Akım (A)	Voltaj (V)	Akım Tipi	Hız (cm/dak.)	Isı Girdisi (kJ/cm)
		Çap	Sınıf(TS EN 14343-A)						
1.	135	Ø1,2	GZ 25 20 Mn	140-150	32-33	DC(+)	68-69	3,302	
2.	135	Ø1,2	GZ 25 20 Mn	140-150	32-33	DC(+)	68-69	3,302	
3.	135	Ø1,2	GZ 25 20 Mn	160-170	33-34	DC(+)	70-71	3,763	
4.	135	Ø1,2	GZ 25 20 Mn	160-170	33-34	DC(+)	70-71	3,763	



Şekil 3. Hardoks 400-AISI 304 çelik çifti çekme test sonucu a) EAK b) GMAK  
(Tensile strength of welded sample (a) SMAW (b) GMAW)

EAK ve GMAK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri incelenmiş ve SEM kırık yüzey görüntüleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'den görüldüğü gibi EAK ve GMAK birleştirmelerin çekme numunelerinde kesit daralması ve yüzeydeki çukurcuklar kırılma karakteristiğinin sünek olduğuna işaret etmektedir. Kırılma yüzeyi çukurcukları içerisinde görülen inklüzyon veya ikincil faz parçacıkları kırılma başlangıcının kaynak metalinden meydana gelmesinin sorumlusu olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple kırık yüzey üzerindeki bu partiküller üzerinden noktasal EDS analizi alınmıştır. (1 ve 2 numaralı noktalar üzerinden EDS analizi alınmıştır) Şekil 4'ten görüldüğü gibi 1 numaralı EDS analiz sonucuna göre bunlar oksit inklüzyonlarıdır. 2 numaradan alınan diğer EDS analiz grafiği, kullanılan ilave metal ve ana malzeme farklılıklarından dolayı kaynak metali kimyasal kompozisyonun seyreltiğine işaret etmektedir.

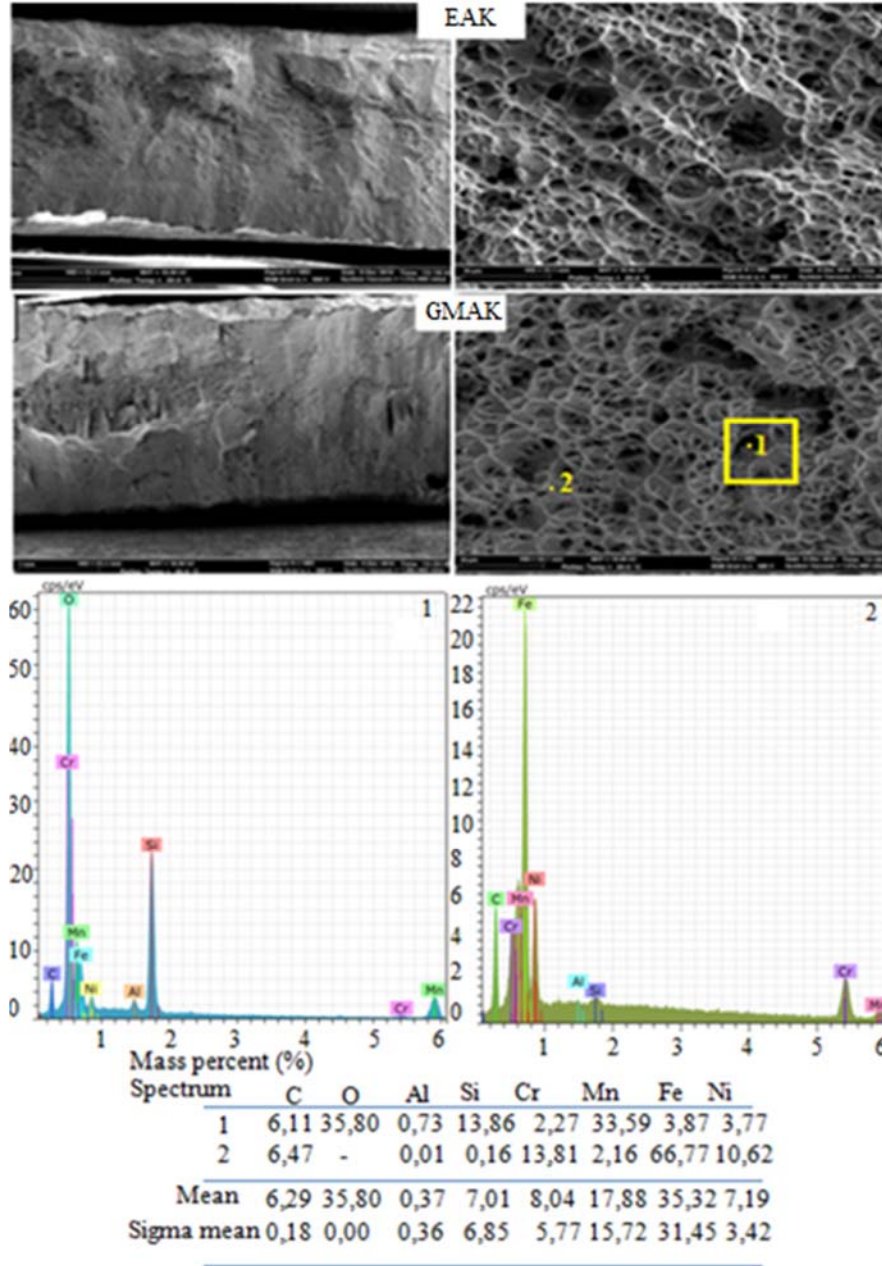
### 3.2. Birleştirmelerin Sertlik Ölçümü (Hardness Measurement of Weldment)

Birleştirmelerin sertlik ölçüm sonucu grafiksel olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Hardoks 400 çeliği sertliğinin, kaynak metali ve ITAB sertliğine oranla oldukça yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum malzemelerin yapısı ile alakalıdır. Hardoks çeliği yapısındaki martenzit fazı yüksek sertliğin sorumlusudur. Şekil 5'den görüldüğü gibi Hardoks 400 çelik ortalama sertliği 398 HV<sub>0.5</sub>, AISI 304 paslanmaz çelik ortalama sertliği ise 207 HV<sub>0.5</sub> olarak ölçülmüştür. EAK yöntemi ile birleştirilmiş numune kaynak metali sertliği ortalama 242 HV<sub>0.5</sub>, GMAK yöntemi ile birleştirilmiş numune kaynak metali sertliği ise ortalama 291 HV<sub>0.5</sub> olarak ölçülmüştür. Her iki birleştirme için en yüksek sertlik Hardoks 400 ana malzemeden elde edilmiştir. Hardoks 400 tarafı ITAB'de sertlik kaynak metaline doğru gidildikçe düşmektedir. Diğer taraftan her iki kaynak yöntemiyle yapılan birleştirmede en düşük sertlik AISI 304 ana

malzemeden elde edilmiş, AISI 304 tarafının ITAB sertliği ise kaynak metaline doğru gidildikçe artmıştır. GMAK yöntemiyle birleştirilmiş numunenin kaynak metali sertliği, EAK yöntemi ile birleştirilmiş numunenin kaynak metali sertliğinden yaklaşık 49 HV<sub>0.5</sub> daha yüksek tespit edilmiştir. Aynı durum birleştirmelerin ITAB sertlikleri için de geçerli olup, GMAK yöntemiyle birleştirilen numune ITAB sertlikleri, EAK birleştirmelerden yaklaşık 5-7 HV<sub>0.5</sub> daha yüksek bulunmuştur. Çalışmada altı pasolu elde edilen EAK birleştirmelerin ısı girdisinin dört pasolu olarak elde edilen GMAK birleştirmelerin ısı girdisine göre daha yüksek oluşu kaynak sonrası soğuma rejimini düşürerek daha iri taneli yapı oluşumuna neden olarak sertliğin daha düşük bulunmasına neden olduğu düşünülmektedir. GMAK birleştirmelerin ısı girdisinin daha düşük olması kaynak sonrası soğuma hızını arttırarak kaynak metali tane boyutunu küçültmektedir. Kaynak metalinde oluşan ince taneli yapının, kaynak metali mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Kaynak metali sertliğinin AISI 304 paslanmaz çelik ana malzeme sertliğine yakın, Hardoks 400 malzeme sertliğinden ise oldukça düşük olmasının sebebi kullanılan elektrot ve ilave telin kimyasal kompozisyonun östenitik paslanmaz çeliğe yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak metali yapısı ağırlıklı olarak östenitik dönüşüm sergileyerek, temper martenzitten oluşan Hardoks 400 malzemeye mukayese edildiğinde sertliği düşmüştür.

### 3.3. Charpy Darbe Çentik Sonuçları (Charpy Impact Notch Results)

Çalışmada standart altı hazırlanan çentik darbe numuneleri oda sıcaklığı, 0°C ve -50°C sıcaklıkta test edilmiştir. Test sonucu grafiksel olarak Şekil 6'da gösterilmiştir. Standart altı hazırlanan darbe çentik numuneleri için birim alana düşen tokluk EAK yöntemi ile birleştirilenler için oda sıcaklığında 123J/cm<sup>2</sup>, 0°C'de 110J/cm<sup>2</sup>, -50°C'de 87J/cm<sup>2</sup>

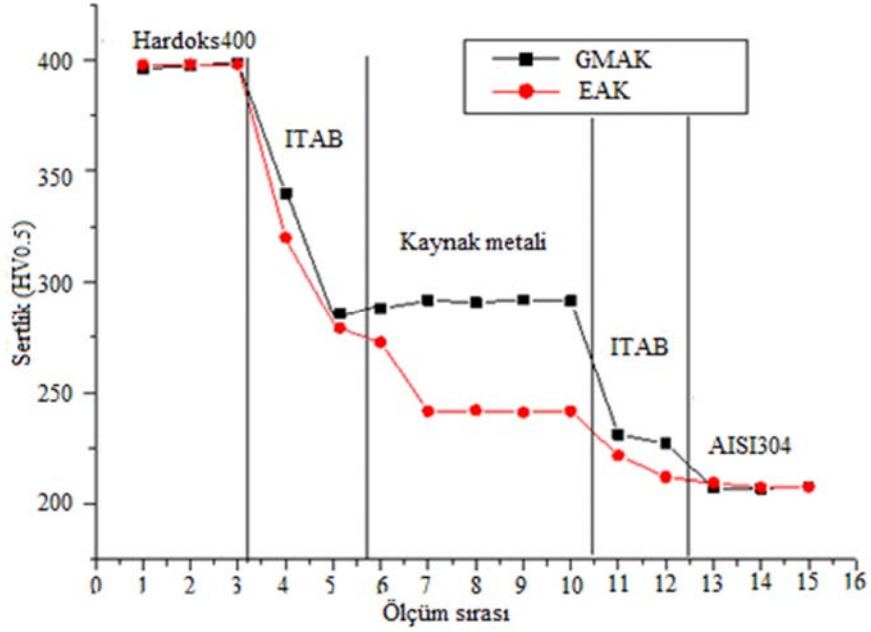


Şekil 4. Hardoks 400-AISI 304 çekme numunesi kırılma yüzeyleri (Fraction surface of tensile test samples of Hardox 400-AISI 304)

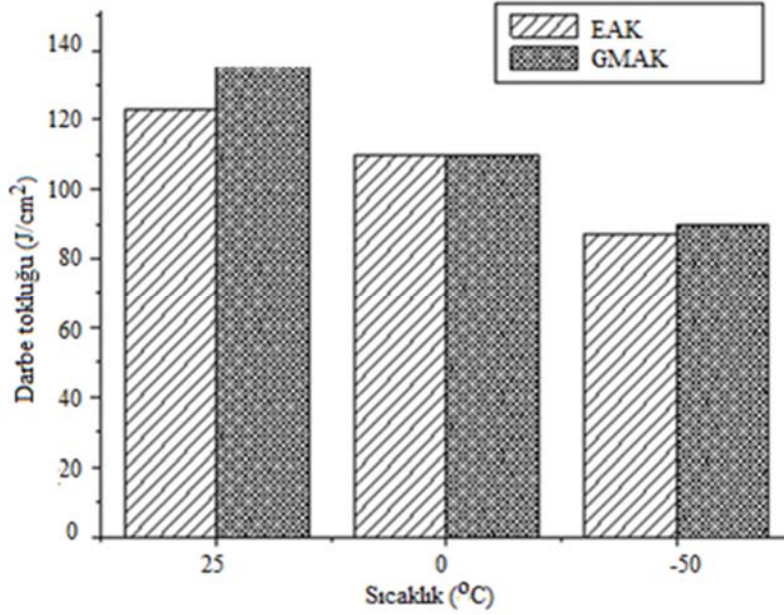
olarak tespit edilmiştir. GMAK yöntemi ile birleştirilen numunelerin toklukları oda sıcaklığında  $140\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $0^\circ\text{C}$ 'de  $110\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $-50^\circ\text{C}$ 'de  $90\text{J}/\text{cm}^2$  olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler için de azalan test sıcaklığıyla birlikte tokluğun azaldığını göstermektedir. Sıcaklık, kimyasal bileşim, malzemenin tane boyutu ve yapıda oluşan ikincil fazların morfolojisi darbe dayanımına etki eden önemli parametrelerdir. Azalan test sıcaklığı birleştirmenin tokluğunda azalmaya sebep olmuştur. Ancak birleştirme tokluğu  $-50^\circ\text{C}$ 'de sıcaklıkta bile oldukça yüksektir. Östenit fazının kristal kafes yapısının yüzey merkez kübik ve darbe tokluğunun sıcaklıktan bağımsız olması düşük sıcaklıklarda bile tokluğun yüksek olmasına neden olmuştur. Bu malzemelerin kaynak metali

içerisinde bulunan az miktardaki  $\delta$ -delta ferrit fazı (hacim merkez kübik yapı) sıcaklığa bağlı olarak tokluk değerlerinde değişim göstermekte ve düşük sıcaklıklarda gevrek davranış sergilemektedir [28]. EAK birleştirmelere kıyasla GMAK birleştirmelerin tokluğu daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun sebebi daha önce de belirtildiği gibi, ısı girdisi farkının GMAK birleştirmelerin kaynak metali tane boyutunu inceltmesi olarak düşünülmektedir.

EAK ve GMAK ile birleştirilen  $-50^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$  ve oda sıcaklığında test edilen numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiş, sonuçlar Şekil 7 'de gösterilmiştir. Şekil 7a, b ve c'de görüldüğü gibi, her iki EAK ve GMAK birleştirmelerin kaynak metali çentik darbe numuneleri



Şekil 5. Birleştirmelerin sertlik profili (Hardness profile of weldments)



Şekil 6. Darbe çentik test sonuçları (Impact notch test results)

kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılma yüzeylerinin tüm test sıcaklıkları için gözenekli (dimple) şekilde ve sünek bir yapıda olduğu söylenebilir. Ayrıca her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numune kırılma yüzeylerinde çukurcuk içlerinde çatlak başlangıcına sebep olan oksit inklüzyonu oluşumu olduğu düşünülen oluşumlara da rastlanmıştır.

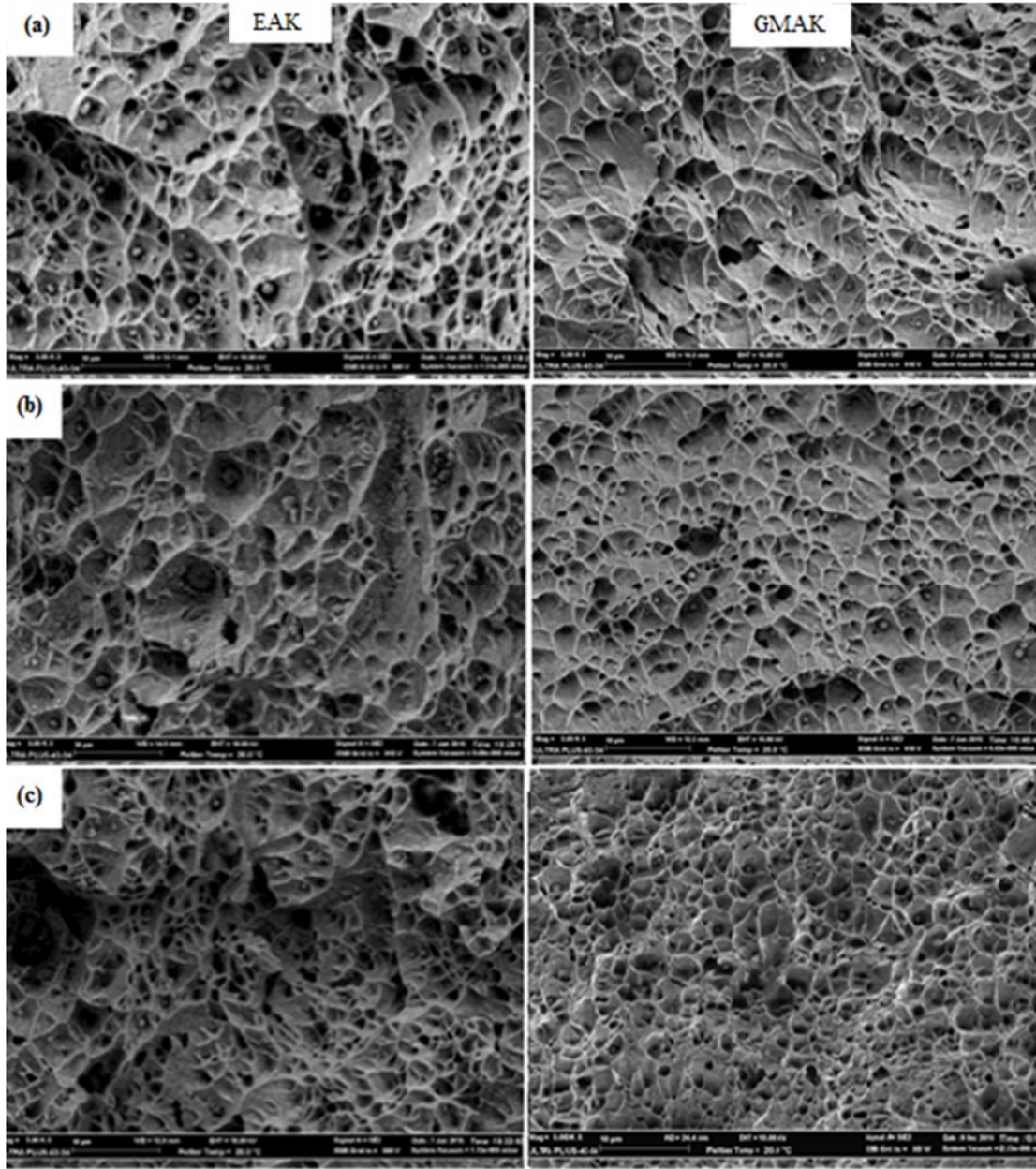
#### 3.4. Eğme Deney Sonuçları (Bending Test Results)

Birleştirmelerin şekillendirilebilirliği üç nokta eğme deneyi ile belirlenmiştir. Deney sürecinde 180° katlanan numune görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8a'da görüldüğü

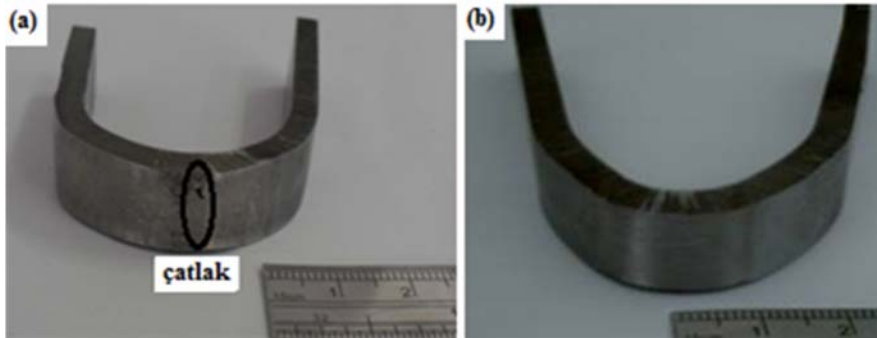
gibi EAK birleştirme kaynak kökünde 180° eğmeye bağlı olarak bir çatlak meydana gelmiştir. Ancak Şekil 8b'den görüldüğü gibi, GMAK yöntemi ile birleştirilmiş numunenin eğme deneyi sonrasında birleşme bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmamıştır. Bu durum GMAK birleştirmesinin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğuna işaret etmektedir.

#### 3.5. Birleştirmelerin Mikroyapı İncelemesi (Microstructure Evaluation of Weldments)

EAK ve GMAK birleştirmelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.

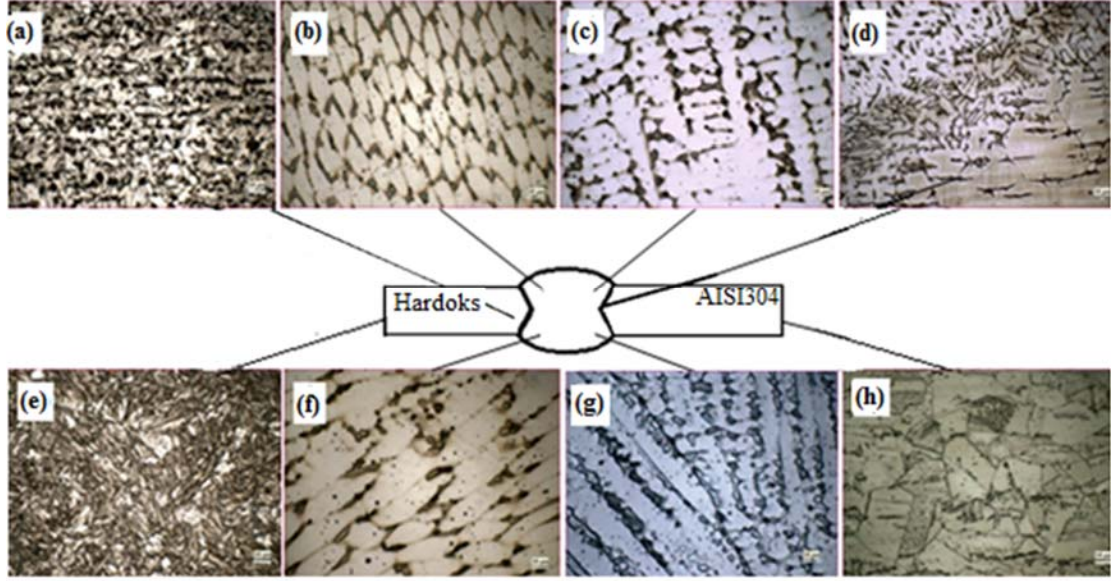


Şekil 7. EAK ve GMAK numunelerin kırılma yüzey görüntüleri a) -50°C b) 0°C c) oda sıcaklığı  
(Fracture surface images of SMAW and GMAW samples (a) -50°C (b) 0°C and (c) room temperature)

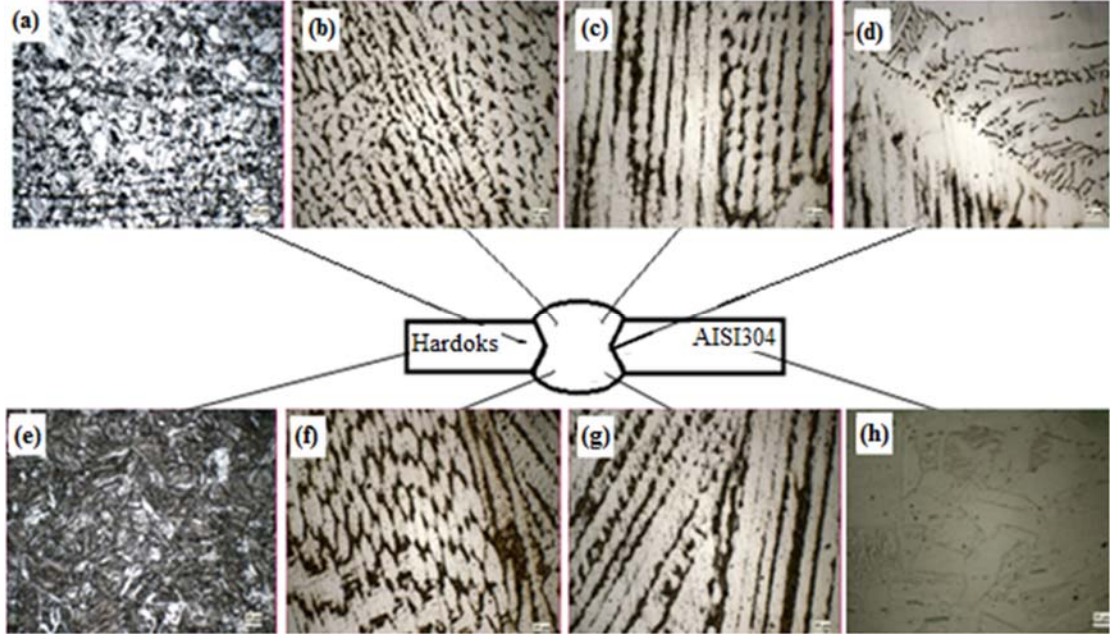


Şekil 8. Üç nokta eğme deney numunesi a) EAK b) GMAK birleştirme (Three point bending sample (a) SMAW (b) GMAW)





**Şekil 9.** EAK birleştirmenin mikroyapı görüntüleri a) Hardoks400 ITAB b, c, f, g) Kaynak metali d) Kaynak metali-AISI304 geçiş e) Hardoks400 ana malzeme h) AISI304 ana malzeme (Microstructure of SMAW samples, (a) Hardoks400 HAZ (b, c, f, g) Weld metal, (d) Weldmetal-AISI304 (e) Hardoks400 base metal (h) AISI304 base metal)



**Şekil 10.** GMAK birleştirmenin mikroyapı görüntüleri a) Hardoks400 ITAB, b, c, f, g) Kaynak metali d) Kaynak metali-AISI304 geçiş e) Hardoks400 ana malzeme h) AISI304 ana malzeme (Microstructure of GMAW samples (a) Hardoks400 HAZ (b, c, f, g) Weld metal (d) Weldmetal-AISI304 (e) Hardoks400 base metal (h) AISI304 base metal)

Şekillerden görüldüğü gibi, Hardoks 400 çeliğinin yapısı martenzit fazından oluşmaktadır. AISI 304 ana malzeme yapısını ise östenit fazının dekore ettiği görülmektedir. Her iki birleştirme kaynak bölgesinin östenitik paslanmaz ilave tel kullanıldığı için ağırlıklı olarak östenitik matrisli mikroyapıdan ve östenit tane sınırlarında delta ferrit fazından oluştuğu görülmektedir. Östenitik paslanmaz çelik kaynak metalinin katılaşma sürecinde ve katı-katı dönüşümünde, katılaşma sürecindeki soğuma hızı ve  $Cr_{eş}/Ni_{eş}$  oranının

değişimi ferrit-östenit dönüşümünü etkilemekte ve oluşacak olan delta ferrit morfolojisini değiştirdiği rapor edilmektedir [30]. Birleştirmelerin Hardoks 400 ITAB tarafı kaynak termal çevriminden etkilenerek martenzit, beynit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Şekil 9 b,c,f, g'den görüldüğü gibi, EAK yöntemi ile birleştirilen numune kaynak metali tane yapısı daha kaba iken, Şekil 10 b,c,f, g'den görüldüğü gibi GMAK birleştirmelerin kaynak metali tane yapısı daha incedir. Göze çarpan bir diğer husus da, her iki kaynak

yöntemi ile birleştirilen numunelerin AISI304 tarafı geçiş bölgesi EAK birleştirmeler için daha geniş (Şekil 9d), GMAK yöntemi ile birleştirilen numuneler için ise daha dar olmasıdır. (Şekil 10d). Geçiş bölgesinin daha dar olmasında GMAK ısı girdisinin daha düşük olmasının etkili olduğuna inanılmaktadır. AISI304 çelik ITAB tarafında kaynak termal çevriminden belirgin bir etkilenme oluşmamıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Genel olarak değerlendirildiğinde GMAK yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin dayanımlarının EAK yöntemi ile birleştirilen numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her iki birleştirme çekme dayanımları kıyaslandığında GMAK yöntemi ile yapılan birleştirme dayanımı yaklaşık 63 MPa, akma dayanımı 30MPa ve uzama değeri ise %7 daha fazla olduğu görülmektedir. Her iki birleştirme çekme testi sonrası kırılma sünek olarak kaynak bölgesinden meydana gelmiştir. EAK'lı birleştirmelere kıyasla, GMAK birleştirmelerin kaynak metali tokluğu tüm test sıcaklıkları için daha yüksek bulunmuştur. Kırılma yüzeyleri GMAK yöntemi ile birleştirilen numunelerde daha çok gözenekli ve sünek bir yapıdadır.

Bu çalışma kapsamında sertlikler değerlendirildiğinde, GMAK yöntemi ile birleştirilmiş çelik çifti kaynak metali sertliği, EAK yöntemi ile birleştirilmiş numunenin kaynak metali sertliğinden yaklaşık 49 HV<sub>0.5</sub> daha yüksek tespit edilmiştir. Aynı durum birleştirmelerin ITAB sertlikleri için de geçerli olup, GMAK yöntemi ile birleştirilen numune ITAB sertliği EAK birleştirmelerden yaklaşık 5-7 HV<sub>0.5</sub> daha yüksek bulunmuştur. Birleştirmelerin üç nokta eğme deney sonucu EAK birleştirmelerinde kaynak kökünde çatlama meydana gelirken, GMAK yöntemi ile birleştirilmiş numunede herhangi bir çatlak oluşması bu birleştirmelerin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğuna işaret etmektedir. EAK yöntemi ile birleştirilen numunelerde ısı girdisiyle ilişkili soğuma hızının daha yavaş olmasına bağlı olarak ITAB tane irileşmesine ve bölgenin daha geniş oluşmasına neden olmuştur. Her iki birleştirme kaynak metalinin mikroyapısının ağırlıklı olarak östenitik olarak katılaştığı ve östenit tane sınırlarında az miktarda delta ferrit fazlarından oluştuğu belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışma Tübitak 2209-A BİDEB öğrenci projesi olarak desteklenmiştir. Birleştirmeler kaynak mühendisi Kadir Beyenal tarafından yapılmıştır. Adı geçen kurum ve kişilere teşekkür edilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kumar S., Shahi A.S., Studies on metallurgical and impact toughness behavior of variably sensitized weld metal and heat affected zone of AISI 304L welds, *Materials & Design*, 89, 399–412, 2016.
2. Sedric A.J., Corrosion of Stainless Steels, John Wiley & Sons, 2nd ed., New York, ABD, 1996.

3. Mithilesh P., Varun D., Ajay Gopi R., Reddy K., Ramkumar D., Arivazhagan N., Narayanan S., Investigations on dissimilar weldments of inconel 625 and AISI 304, *Procedia Engineering*, 75, 66–70, 2014.
4. Li Z., Fontana G., Autogeneous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves, *J. Mater. Process. Technol.*, 74 (1-3), 174, 1998.
5. Finsgar M., Milosev I., Corrosion behavior of stainless steels in aqueous solutions of methanesulfonic acid, *Corros. Sci.*, 52 (7), 2430–2438, 2010.
6. Kahraman N., Gülenç, B., Akça, H., Mechanical properties of welding of weldment on low carbon steel welded to austenitic stainless steel by arc welding method *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 17 (2), 75-85, 2002.
7. Cui Y., Lundin C.D., Austenite-preferential corrosion attack in 316 austenitic stainless steel weld metals, *Materials & Design*, 28 (1), 324–328, 2007.
8. Uluocak M.E., Hardox 450 çeliklerinin MAG kaynak bölgesi mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
9. Metlioğlu M.R., Uzun M., Gökkaya H., Boca G.D., The effect of machining parameters on surface roughness in the drilling of Hardox 400, XXVI. MicroCAD International Scientific Conference, Hungary, 10, 29-30, 2012.
10. Metlioğlu M.R., Ermurat M., Yüksek aşınma direncine sahip malzemelerin plazma arkı yöntemi ile kesilmesinde kesme yüksekliği ve ilerleme hızı faktörlerinin kesmeye etkisinin araştırılması, Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu, Karabük, 2, 756-761, 2012.
11. NurGroup, Hardox, <http://www.nurgroupmuhendislik.com/hardox400.html>. Yayınlanma tarihi, 2011, Erişim tarihi Nisan 4, 2016.
12. Yılmaz T., Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
13. Avery R.E. Pay attention to dissimilar-metal welds: guidelines for welding dissimilar metals nickel development institute, *Chemical Engineering Progress*, 28, May, 1991.
14. Moharana B.R., Sahu S.K., Sahoo S.K., Bathe R., Experimental investigation on mechanical and microstructural properties of AISI 304 to Cu joints by CO2 laser, *Engineering Science and Technology, International Journal*, Engineering Science and Technology, 19 (2), 684-690, 2016.
15. Tümer, M., Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Özlü Tel Ark Kaynağı ile Birleştirilen Paslanmaz Çeliklerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2012.
16. Kaçar, R., Acarer, M., Microstructure–property relationship in explosively welded duplex stainless

- steel–steel, *Material Science Engineering A*, 363, 290–6, 2003.
17. Roy C., Pavanan V.V., Vishnu G., Hari P.R., Arivarasu M., Manikandan M., Ramkumar D., Arivazhagan N., Characterization of metallurgical and mechanical properties of commercially pure copper and AISI 304 dissimilar weldments, *Procedia Materials Science*, 5, 2503-2512, 2014.
  18. Akkuş N., Gürler M., Yiğit Ş., Robotik Ark Kaynak ile Manuel Ark Kaynak Üzerine bir İnceleme, I. Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, İstanbul, 3, 1235-1241, Eylül 2005.
  19. Kılınçer S., Kahraman N., MIG welding of AISI 409 and Ç1010 steel using an austenitic electrode and investigation of their mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (1) 23-31, 2009.
  20. Kurşun T., Kılık R., Çeliklerin birleştirilmesinde gaz altı kaynak tekniğinin kullanılması halinde gaz maliyeti, GEV Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu, İstanbul, 56-65, 1996.
  21. Ngo M.D., Duy V.H., Phuong, N.T., Kim H.K., Kim S.B., Development of digital gas metal arc welding system, *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 1-3, 384-391, 2007.
  22. Lothongkum G., Viyalit E., Bhandhubanyong P., Study on the effects pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate, *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 233-238, 2001.
  23. Subhash Chander G., Madhusudhan Reddy G., Venugopal Rao A., Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds, *Journal of Iron and Steel Research International*, 19 (10), 64-67, 2012.
  24. Yılmaz, R., Tümer, M., Microstructural studies and impact toughness of dissimilar weldments between AISI316L and AH36 steels by FCAW, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 5-8, 1433-1447, 2012.
  25. Campo K.N., Campanelli L.C., Bergmann L., Fernandez J.D.S., Bolfarini C., Microstructure and interface characterization of dissimilar friction stir welded lap joints between Ti–6Al–4V and AISI304, *Materials & Design*, 56, 139-145, 2014.
  26. Mahto R.P., Bhoje R., Pal S.K., Joshi H.S., Das S., A study on mechanical properties in friction stir lap welding of AA 6061-T6 and AISI 304, *Materials Science and Engineering: A*, 652, 136-144, 2016.
  27. Shaibu V.B., Sahoo S.K., Kumar A., Computational modeling of dissimilar metal CO2 laser welding: applied to copper and 304 stainless steel, *Procedia Engineering*, 127, 208-214, 2015.
  28. Tümer M., Yılmaz, R., Characterization of microstructure, chemical composition, and toughness of a multipass welded joint of austenitic stainless steel AISI316L, *Int J Adv Manuf Technol*, 87, 2567–2579, 2016.
  29. Kaçar R, Baylan O., An investigation of microstructure/property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels, *Material Design*, 25, 317–329, 2004.
  30. Köse C., Kaçar R., Effect of welding speed on the mechanical properties and microstructure of laser welded AISI 316L stainless steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 225-235, 2015.

