



# Sualtıta Birleştirilen AH36 Gemi Sacının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Nur Benuş Yıldız<sup>1</sup>, Uğur Gürol<sup>2</sup>, Hakan Baykal<sup>3</sup>, Mustafa Koçak<sup>4</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada, örtülü elektrot ark kaynağı yöntemi ile yerli E6013 rutil elektrotlar (GeKaTec UW E6013) kullanılarak gemi imalat sektöründe; gemilerin gövdesinde ve tankların yapımında yaygın olarak kullanılan AH36 çelik plakaları su altında alın altına birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri gerçek deniz ortamında 4 metrelik bir derinlikte uzman sanayi dalgıçları tarafından gerçekleştirilmiştir. Plakalar ilk olarak AWS D3.6 standardının gerekliliklerine uygun olarak tahribatsız muayene testlerine tabi tutulmuştur. Daha sonra su altında birleştirilen kaynaklı plakaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik, çentik darbe, eğme ve çekme testleri uygulanmış olup, sonuçlar kaynak bölgesinde meydana gelen mikro yapısal dönüşümlerle birlikte yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Islak sualtı kaynağı, sualtı kaynak elektrotu, AH36 gemi sacı, mekanik test, mikro yapı incelemesi

## Investigation of The Microstructural and Mechanical Properties of AH36 Sheet Metal Joined By Underwater Welding

### ABSTRACT

In this study, AH36 steel plates, commonly used in the hull of ships and the construction of tanks in the marine industry, were butt welded underwater using the shielded metal arc welding method and E6013 (GeKaTec UW E6013) rutile electrodes. Welding operations were carried out by expert industrial divers at a depth of 4 meters in a real sea environment. The plates were first subjected to non-destructive testing tests by the requirements of the AWS D3.6 standard. Then, hardness, Charpy impact, bending, and tensile tests were performed to determine the mechanical properties of the welded plates joined underwater. Finally, the results were interpreted together with the microstructural transformations in the weld area.

**Keywords:** Underwater wet welding, underwater welding electrode, AH36 ship steel, mechanical test, microstructural characterization

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 24.11.2021  
Kabul/Accepted : 06.06.2022

<sup>1</sup> Gedik Kaynak A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul, nyildiz@gedik.com.tr ORCID: 0000-0001-5171-2495

<sup>2</sup> Gedik Kaynak A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul, İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul- uguro@gedik.com.tr, ORCID: 0000-0002-3205-7226

<sup>3</sup> Gedik Kaynak A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul hbaykal@gedik.com.tr, ORCID: 0000-0002-8007-408X

<sup>4</sup> İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul mkocak@gedik.com.tr, ORCID: 0000-0001-9193-7277



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction/Background

Underwater welding is mainly used in the rescue operations of ships, maintenance of underwater pipelines, and manufacture of large ships and offshore structures that cannot be taken to the shipyard. Underwater welding technology can be roughly classified into three types: dry welding, local cavity welding, and wet welding. The wet welding process is preferred because of the flexible and easy-to-use equipment that allows the diver to perform the welding process in the sea water (Rowe and Liu, 2001; Garašić). The most used wet welding technique is shielded metal arc welding (SMAW) due to its cost effectiveness and easily accessible consumables (Fydrych, Labanowski and Rogalski, 2013; Labanowski, 2011; Winarto, Purnama and Churniawan, 2018). Different types of electrodes can be used for SMAW techniques. However, rutile-based electrodes show better arc stability, weld seam appearance and weld quality (Rowe and Liu, 2001).

On the other hand, AH36 steel plates are commonly used in constructing ship's hulls and tanks due to their high fatigue and impact resistance properties compared to C-Mn steel plates. Therefore, the welding capabilities of these steels are the most important criteria as the main material properties. Thus, with the increase in the number of underwater applications in our country, the development of domestic underwater electrodes, the preparation of welding procedure specifications (WPS), and guidance documents for underwater welding applications have gained importance.

### Objectives/ Research Purpose

In this study, AH36 steel plates commonly used in the hull of ships and the construction of tanks in the marine industry were underwater butt welded using the shielded metal arc welding method. It was aimed to reveal the destructive and non-destructive test results of the welds performed with locally developed GeKaTec UW E6013 underwater electrodes and to share numerical data for the user and design offices that can be used during the construction and repair welding of underwater operation.

### Methods/Methodology

AH36 Grade A steel plates with the dimensions of 12x150x400 mm were joined using the Ø4 mm rutile-based electrodes classified by AWS A 5.35 (Specification for Covered Electrodes for Underwater Wet Shielded Metal Arc Welding) standard. The developed electrodes were coated with a special paraffin-based insulating material before the welding. Welding operations were carried out by expert industrial divers at a depth of 4 meters in a real sea environment, İstanbul, Turkey. The plates were subjected to non-destructive and destructive tests by the requirements of the AWS D3.6 standard. The results were interpreted together with the microstructural transformations in the weld area.

### Discussion and Conclusions

No linear indication was found by visual and radiographic inspection of the plate joined underwater. Only some small porosities and slag inclusions that do not exceed the acceptance criteria of AWS D3.6 Class B Welds were found in the 20 to 30 cm weld region of the radiographic film images.

The microstructural investigation showed that columnar zone in weld metal consists of acicular ferrite, grain boundary ferrite, and Widmanstätten ferrite. In contrast, the reheated regions are dominated by polygonal ferrite with a small amount of grain boundary pearlite. Moreover, due to rapid cooling, the HAZ is characterized by martensitic and bainitic microstructure. Transverse hardness tests confirmed microstructural results, and it was observed that the highest hardness was found in the HAZ region (Avr. 391 HV). In contrast, the lowest hardness was obtained in the base metal and reheated



regions of the weld (180-190 HV). However, the Vickers hardness measurements of the underwater welds shall not exceed 375 HV for the AWS D3.6 Class B Welds. Therefore, heat input optimization is the most important criterion for underwater welds. Gao, Wang, Cheng, Deng and Xu (2016) reported that an increase in heat input decreased the hardness of HAZ and Charpy impact toughness values due to grain coarsening effect and increased diffusible hydrogen content.

The fracture of tensile specimens occurred in the base metal. This revealed that the load-bearing capacity of the underwater weld was found to be higher than the base metal (overmatching). This showed that the performance expected from successful atmospheric welding was also achieved in underwater welding. Moreover, the % elongation of welded joint was found to be 47% lower than AH36 base metal, while yield and tensile results showed similar values. Because the hard phases and overmatching condition in the welded area prevented the deformation and caused it to occur outside the weld (Kahraman, Gülenç ve Durgutlu, 2005). The face and root bending specimens were fractured at approximately 40° and 50°. This was associated with the presence of hard phases formed in the weld metal and HAZ region due to rapid cooling under water and possibly the presence of slag inclusion in the internal structure. The most important finding of this study is that the Charpy impact test result met the minimum requirements of AWS D3.6 Class B welds (>27J), and the impact toughness results of HAZ were found to be 50 J higher than weld metal. This was associated with the crack starting from the HAZ and progressing to the reheated region of the weld, which has low hardness and lower yield strength.



## 1. GİRİŞ

Sualtı kaynağı, su yüzeyinin altında belirli bir derinlikte, kuru veya ıslak bir ortamda yapılan kaynaktır. Sualtı ıslak kaynağı, dalgıcın sudaki kaynak işlemini gerçekleştirmesine izin veren esnek ve kullanımı kolay ekipmanlar nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (Rowe and Liu, 2001; Garašić). Gemilerin bakımı, onarımı ve su altı boru hatları uygulamalarında işlem süresi ve maliyetleri düşürmek için su altı kaynak teknolojilerinde farklı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Islak sualtı kaynağında; Örtülü Elektrot Ark Kaynağı (SMAW) yöntemi ekonomik maliyeti ve kolaylıkla ulaşılabılır sarf malzemeleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Fydrych, Labanowski and Rogalski, 2013; Labanowski, 2011; Winarto, Purnama and Churniawan, 2018). Rutil örtülü elektrotlar, su altı ıslak kaynak için en yaygın kullanılan sarf malzemesi olup, literatürde rutil tip elektrotların su altında ark kararlılığı ve kaynak dikişi görünümü açısından daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır (Rowe and Liu, 2001). Su altı kaynaklarının kalitesi, benzer atmosferik kaynaklardan önemli ölçüde daha düşüktür. Bununla ilgili olarak literatürde atmosferik ortamda gerçekleştirilen kaynakların su altında gerçekleştirilen kaynaklara nazaran %50 daha yüksek çentik darbe tokluğu verdiği raporlanmıştır (Çolak, Ayan ve Kahraman, 2020). Yine bir başka çalışmada su altında birleştirilen kaynaklı plakaların uzama değerinin atmosferik kaynaklara kıyasla ~%48 oranında daha düşük olduğu bildirilmiştir (Gürol ve diğ., 2022). Ancak bu değerlere rağmen su altı kaynak işlemleri geçici onarım kaynakları ve kurtarma uygulamaları için; yöntem kolaylığı ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Brown and Masubuchi, 1975; Tomkow, Fydrych and Wilk, 2020a).

Gemilerin gövdesi ve tankların yapımında yaygın olarak; ASTM A131/A çeliğinin bir kalitesi olan AH36 çelikleri kullanılmaktadır. AH36 çelikleri tavlamadan hemen sonra su veya havada soğutulur. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ve sıcak hadelenmiş AH36 çelikleri, karbon çeliklerine kıyasla; daha yüksek yorulma ve darbe dayanımı, bombe ve sehim gerilmelerine karşı daha yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle daha ince ve daha düşük ağırlıkta tercih sebebi olarak kullanılan saclardır (Winarto et al., 2018; Alajmi and Alqenaeci, 2017; Boutsali, 2016, Balık, 2008). Fakat, bu çeliklerin ana malzeme özellikleri kadar kaynak kabiliyetleri de çok önemlidir. Tüm dünyada sualtı bakım onarım kaynaklarında ve askeri uygulamalarda en çok AWS A5.35 standardına göre E6013 rutil karakterli elektrotların tercih edildiği bilinmektedir (İmdat, Kaya ve Kahraman, 2018). Bu motivasyon ile gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda yerli olarak geliştirilen GeKaTec UW E6013 elektrotları kullanılarak gemi inşa sektöründe yaygın olarak kullanılan AH36 kaliteye sahip plakalar alın altına (butt-weld) birleştirilmiş ve kaynaklı plakanın mikro yapı & mekanik özellikleri arasındaki ilişki yorumlanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Tablo 1’de kimyasal bileşimi ve Tablo 2’de mekanik özellikleri verilen 12x150x400mm boyutlarındaki AH36 kalite plakalar örtülü elektrot ark kaynağı ile su altında birleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Ana Malzemenin Kimyasal Bileşimi (% ağırlıkça) ve Karbon Eşdeğeri

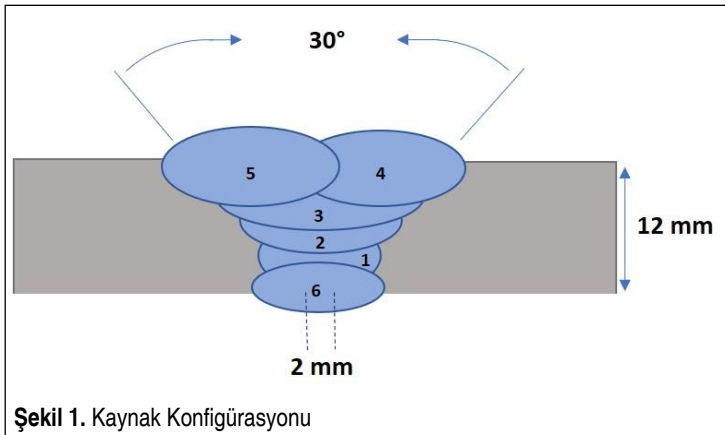
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ce <sub>IHW</sub> <sup>1</sup>
AH36	0,11	0,19	1,27	0,016	0,007	0,082	0,083	0,012	0,052	0,36

<sup>1</sup> Uluslararası Kaynak Enstitüsüne (IIW) göre karbon eş değeri

**Tablo 2.** Ana Malzeme Mekanik Özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı, R <sub>e</sub> (MPa)	Çekme Dayanımı, R <sub>m</sub> (MPa)	Uzama, (%)	Darbe Tokluğu (0°C) (J)
AH36	445	573	31,6	141 boyuna

Kaynak konfigürasyonu Şekil 1’de görüldüğü gibi 30° V kaynak ağızı açılmış parçada 6 pasolu (3 dolgu pasosu, 2 kapak pasosu ve 1 kök pasosu) olarak tasarlanmıştır. Kaynak işlemi; AWS D3.6 standardına göre; İstanbul Gedik Üniversitesi Su Altı Teknolojileri bölümüne ait 4 metre derinliğe sahip sualtı kaynak sahasında gerçekleştirilmiştir. İlave kaynak metali olarak; 4,00 mm çapına sahip parafin bazlı özel yalıtım malzemesi ile kaplı GeKaTec UW E6013 su altı elektrotları kullanılmıştır. Tomkow ve diğ. (2020a) parafin kaplamanın elektrotların yayılabilir hidrojen oranını farklı tür su altı elektrotlarına kıyasla %24, elektrot örtüsü dışında ilave bir kaplaması olmayan elektrotlara göre ise %35 oranında azalttığını raporlamıştır.



Kaynak işlem esnasında kaydedilen proses parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Nominal ısı girdisi 1,41 kJ/mm olarak hesaplanmıştır. Kaynaklı birleştirme sonrası kapak ve kök pasolarındaki cüruf ve sıçrıntı temizlendikten sonra; AWS D3.6 Class B standardına uygun olarak görsel muayene, manyetik muayene ve radyografik muayeneleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra soğutma sıvısı kullanarak şerit testere tezgahında mekanik testler ve mikro yapı incelemeleri için numune çıkartma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminde kaynaklı plakanın başlangıç ve bitiş noktalarından 25 mm'lik kısımlar kesilerek ayrılmıştır. Kalan plakadan kaynak yönü takip edilerek; EN ISO 15614-1 standardına uygun olarak 2 adet çekme, 4 adet eğme, 3 set standart Charpy-V çentik ve 1 adet makro ve sertlik numuneleri çıkartılmıştır.

**Tablo 3.** Kaynak Parametreleri

Akım (A)	Voltaj (V)	Hız (cm/dk)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Derinlik (m)	Isı Girdisi (kJ/mm)
170	36	26	18	4	1,41

Mikro yapı ve sertlik incelemeleri için kullanılacak olan makro yapı numunesi klasik metalografik numune hazırlama işlemleri (zımparalama ve parlatma) tamamlandıktan sonra %5'lik Pikral çözeltisi içerisine daldırılarak 2 dk süreyle dağlanmıştır. Dağlama sonrası su ile yıkanıp, etil alkol ile temizlendikten sonra sıcak hava üflecisi ile kurutulmuştur. Makro yapı görüntüleri; Nikon SMZ745T marka/model stereo mikroskop ile, mikro yapı görüntüleri LEICA DMi8 marka/model optik mikroskop ile görüntülenmiş; sertlik ölçümleri, DuraScan-70 G5 model tam otomatik sertlik cihazı kullanılarak Vickers (HV) metoduyla 1 kgf'lik yük altında yapılmıştır. Kaynaklı plakanın sertlik dağılımının incelenmesi için yüzeyin 2 mm altından ve kaynak merkezinden dikeyde 1 mm aralıklarla, 3 sıra, 31 adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Çentik darbe testleri oda sıcaklığında -2°C de Zwick RKP 300 marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir bölge için (ana metal, kaynak metali ve ITAB) TS EN ISO 9016 standardına göre 10x10x55 mm ebatlarında 3'er adet numune çıkarılmış ve TS EN ISO 148-1'e standardına göre test edilmiştir. Sonuç olarak da bu 3 numunenin ortalaması baz alınmıştır. Çekme testleri ve eğme testleri oda sıcaklığında Zwick Roell 600E marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

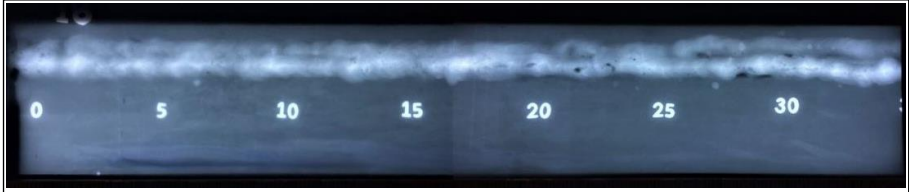
AWS D3.6:2017 standardı sualtı kaynaklarını A ve B sınıf olmak üzere iki sınıfa ayırmaktadır. Islak sualtı kaynak işlemlerinde kullanım amacı olarak; sınırlı yapısal kaliteye sahip tamir kaynakları için, A tipi kaynaklara göre daha esnek kabul kriterleri olan B tipi kaynaklar kalite seviyesi olarak baz alınmaktadır (Pessoa et al., 2013). Şekil 2'de sualtında UW E6013 elektrotlarla birleştirilen AH36 plakanın kaynak di-

kişi görüntüsü verilmiştir. Kaynak dikiş görüntüsü genel itibariyle atmosferik ortamda yapılan kaynaklara göre farklılık göstermektedir. Bu durum kaynak esnasında ark etrafında oluşan hava kabarcıkları nedeniyle kaynakçı görüşünün kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır. Fakat çalışmamızda kullanılan kaynaklı plakanın görsel muayeneleri sonucunda AWS D3.6M Class B ye göre; fazla/eksik kaynak kepi, porozite ve yüzeysel çatlaklar gibi standart kriterlerini aşan herhangi bir süreksizlik tespit edilmiştir. Bu bağlamda görsel olarak başarılı bir kaynak elde edilmiştir.



**Şekil 2.** Su Altında Kaynatılan 400 mm Uzunluğundaki Plakanın Kaynak Dikiş Görüntüsü

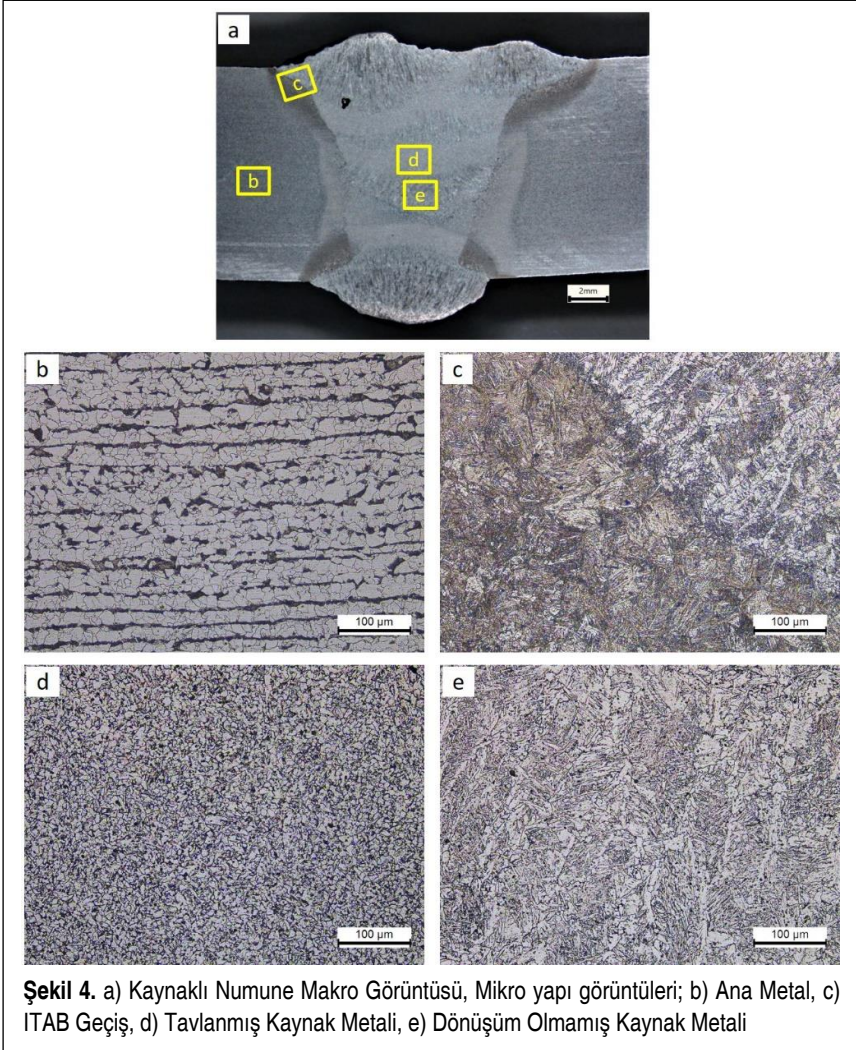
Şekil 3'te birleştirilen plakanın radyografik film görüntüsü verilmiştir. 0-20 mm aralığında nispeten temiz bir kaynak dikişi elde edilirken, 20-30cm aralığındaki bölgelerde AWS D3.6 standardı B sınıfı kaynaklar için belirtilen kriterleri aşmayan izole ve kümülatif gözenek ve cüruf kalıntıları tespit edilmiştir.



**Şekil 3.** Su Altında Kaynatılan Plakanın Radyografik Film Görüntüsü

Kaynaklı parçanın pasolar arası geçişi ve ITAB genişliğini değerlendirmek için alınan makro yapı görüntüsü Şekil 4a'da verilmiştir. Kök ve kapak pasoların kolonsal katılaşma sergiledikleri görülmektedir. Ara pasoların ise kaynak işlemi esnasında oluşan termal döngüler nedeniyle tavlandığı ve bu sebeple de kaynak metalindeki kolonsal yönelmenin yerini daha küçük eş eksenli tanelere bıraktığı görülmektedir. Ayrıca, üst kapak pasoda AWS D3.6 standardı kabul kriterleri içerisinde olan cüruf kalıntısı tespit edilmiştir. Daha detaylı incelemeler için Şekil 4a'da gösterilen farklı bölgelerden mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Şekil 4b'de, ana malzeme yapısının hadde yönü boyunca dağılmış eş eksenel ferrit (açık renkli bölgeler) ve perlitik yapıdan (koyu renkli bölgeler) oluştuğu görülmektedir. ITAB bölgesinde hızlı soğumaya bağlı olarak kaba taneli martenzitik+beynitik yapının oluştuğu Şekil 4c'de net bir şekilde görülmektedir. Öte yandan çoklu paso kaynak işleminin doğası gereği termal döngüler nedeniyle kaynak bölgesinde ısıdan etkilenmiş ve etkilenmemiş bölgeler oluştuğu görülmüştür. Şekil 4d'de kendinden sonraki pasolar tarafından





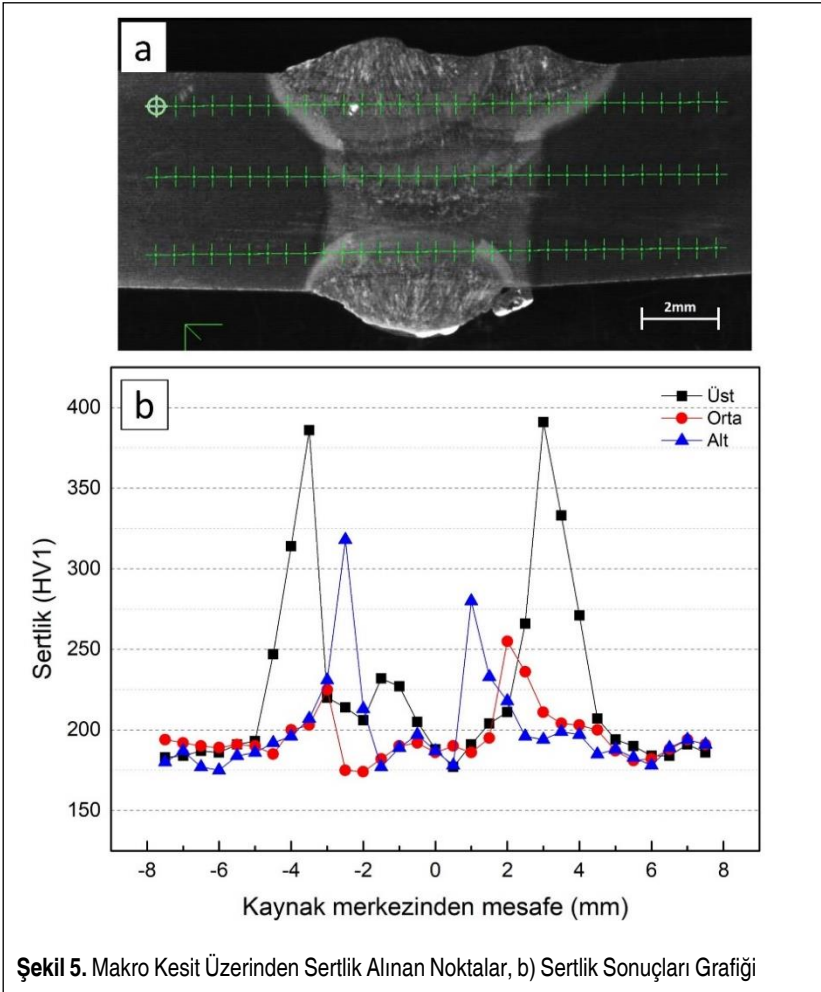
**Şekil 4.** a) Kaynaklı Numune Makro Görüntüsü, Mikro yapı görüntüleri; b) Ana Metal, c) ITAB Geçiş, d) Tavllanmış Kaynak Metali, e) Dönüşüm Olmamış Kaynak Metali

tavllanmış bölgenin mikro yapısı, Şekil 4e’de ise nispeten ısıdan etkilenmemiş ve kolonsal yönelmenin olduğu bölgenin mikro yapısı gösterilmektedir. Tavllanmış bölge oldukça küçük tane boyutuna sahip poligonol ferrit yapısı ile tane sınırları boyunca çökelmiş perlit fazından oluşmaktadır. Kolonsal kaynak metali ise asiküler ferrit, tane sınırı ferrit ve Widmanstatten ferrit yapısından oluşmaktadır.

Şekil 5a’da sertlik test bölgeleri, Şekil 5b’de ise sertlik test sonuçları gösterilmektedir. Sertlik incelemeleri yüzeyin 2mm altından, kaynağın orta bölgesinden ve alt yüzeyin 2 mm üzerinden gerçekleştirilmiştir. Su altı kaynak testlerinin gerçekleştirildiği AWS D3.6M: 2010 standardına göre B sınıfı kaynaklar için maksimum sertlik değeri 375



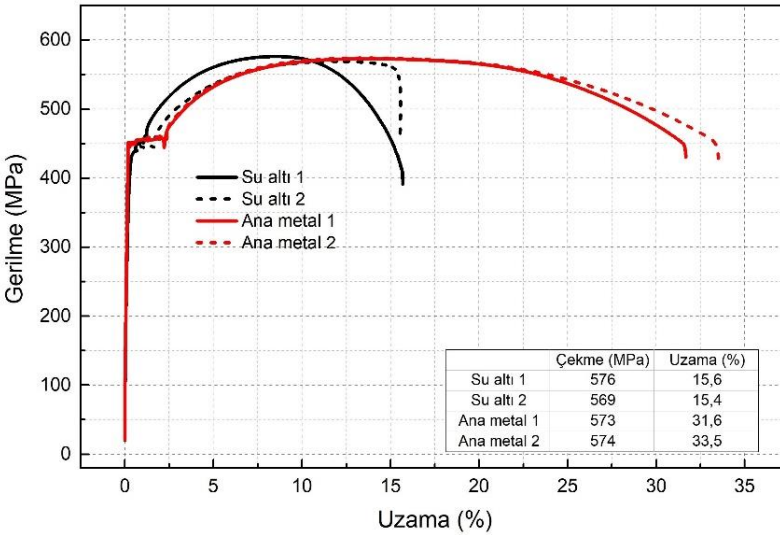
HV olması gerekmektedir. Çalışmamızda en yüksek sertlik değeri üst kapak pasonun ITAB bölgesinde 391HV olarak ölçülmesine rağmen dolgu pasolarının ITAB bölgelerinde sertlik değerinin 250HV civarlarına kadar düştüğü gözlenmiştir. ITAB'ı takiben kaynak bölgesindeki tavlınmamış bölgelerin sertliğinin maksimum 230 HV olduğu ve ana metalinde 180-190 HV sertlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Burada ısı girdisinin kontrolü oldukça önem arz etmektedir. Gao ve diğ. (2016) S355 kalite plakaları E7014 elektrodu kullanarak üç farklı ısı girdisi ile birleştirdikleri çalışmalarında artan ısı girdisiyle ITAB bölgesindeki sertliğin azaldığını; aynı şekilde çentik darbe direncinin de benzer oranlarda düşüş gösterdiğini raporlamışlardır. Bu durumun artan ısı girdisiyle tanelerin irileşmesinden ve yayılabilir hidrojen oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine aynı çalışmada bizim çalışmamıza benzer



oranda 1.5kj/mm lik ısı girdisiyle yapılan kaynaklarda ortalama 395 HV sertlik değeri elde edildiği belirtilmiştir.

Ana malzeme ve kaynaklı parçaya ait çekme test grafikleri Şekil 6’de verilmiştir. Kaynak bölgesindeki yüksek sertlik değerleri bölgesel olarak çekme değerini yüksek kıldığından kaynak metalinin çekme dayanımını yükseltmiştir (Overmatching). Buna bağlı olarak da Şekil 7’de gösterildiği üzere kopma ana metalden gerçekleşmiştir -ki bu kaynaklı birleştirmelerden istenen mekanik performanstır. Diğer bir deyişle, kaynak bölgesinin yük taşıma kapasitesinin ana malzemeden daha yüksek olması beklenir. Öte yandan, kaynaklı numunelerin akma ve çekme değerlerinin ana malzeme ile benzer olduğu görülmektedir. Fakat, su altında kaynatılan plakaların % uzama değerleri ana malzeme % uzama değerlerine göre %47 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin yüksek mukavemeti nedeni ile plastik deformasyonu engellemesi gösterilebilir (Kahraman ve diğ., 2005). Dolayısıyla, kopma ana malzemeden olsa bile, kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasından dolayı kaynak genişliği ile aynı oranda % uzama değerlerinin düşük olması beklenmektedir. Buradaki en önemli nokta kaynak metalindeki uzama kapasitesinin %15 civarında değerlere sahip olması ki bu uzama sualtı ıslak kaynak metalinin mekanik değerleri için oldukça iyi değerler olarak değerlendirilmektedir.

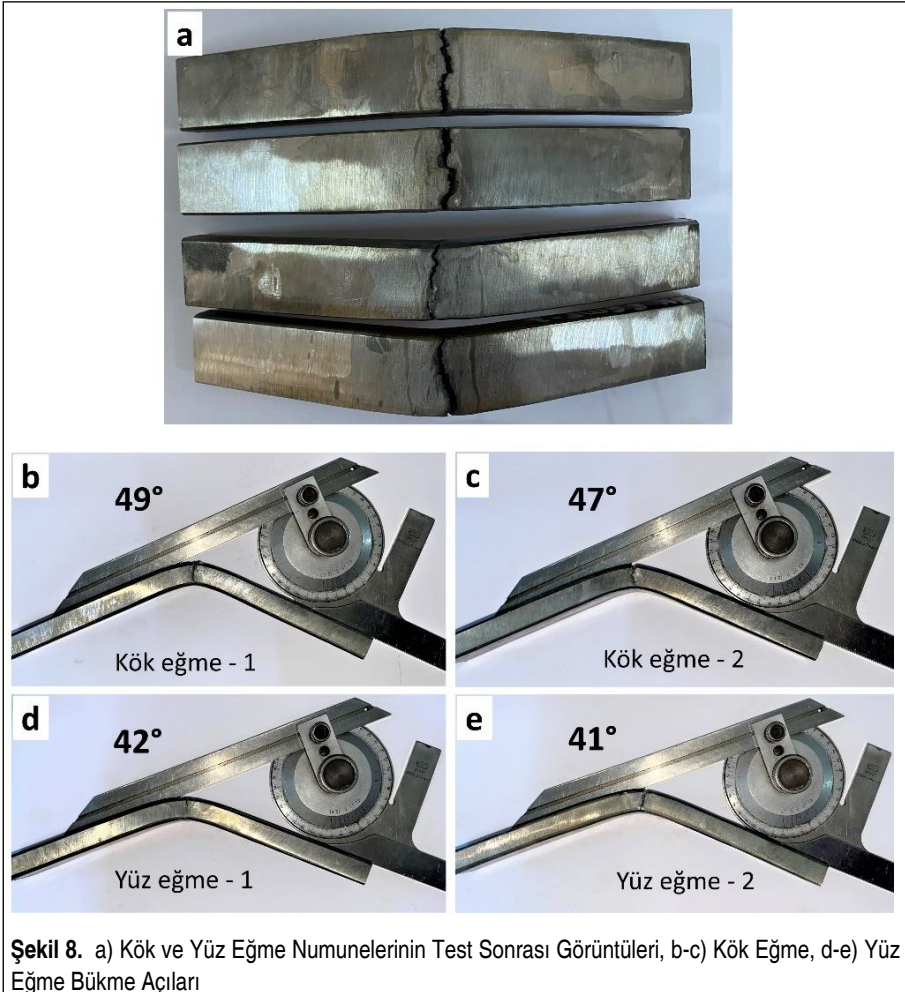
Kaynaklı numunelere TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak 2 adet kök ve 2 adet yüz testi gerçekleştirilmiş olup numunelerin test sonrası kırılma görüntüleri ve



Şekil 6. Çekme Test Sonuçları

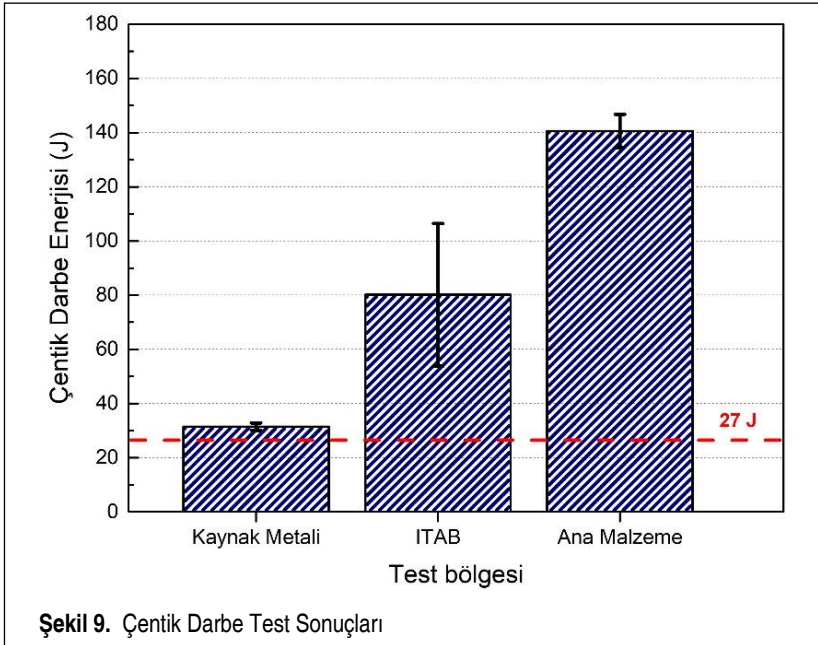


kırılma açıları Şekil 8’de verilmiştir. Tüm numunelerde; sertlik sonuçlarını doğrular şekilde ana malzemeye göre daha sert ve gevrek davranış sergileyen kaynak ve ITAB bölgelerinden kırılmalar görülmüştür. Bu bağlamda kök eğme numuneleri yaklaşık

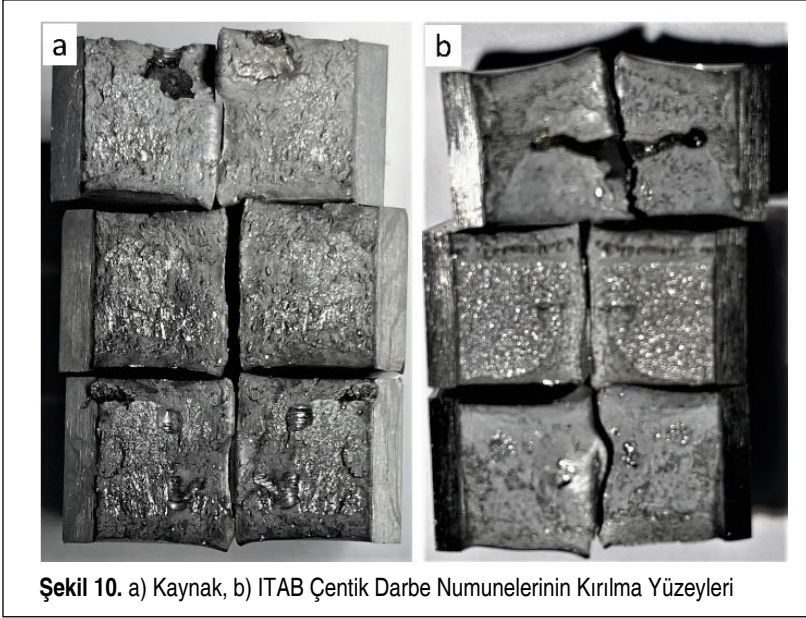


50°'de hasara uğrarken, yüz eğme numunelerinde ise yaklaşık 40°'lerde hasara uğramıştır. Eğme testleri sonrasında kırık yüzeyler incelendiğinde pasolar arasında cüruf kalıntılarının olduğu görülmüştür. Kırılmalara ayrıca kaynak metalindeki pasolar arasında kalan cüruf kalıntılarının da sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Literatürde, TTomkow, Janeczek, Rogalski ve Wolski (2020b) S460N kalite çeliklerin G 46 4 M21 4Si1 ilave metali kullanılarak gaz altı kaynak yöntemi ile su altında ıslak ortamda ve atmosferik ortamda birleştirdikleri çalışmalarında atmosferik ortamda ve su altında birleştirilen numunelerin çekme test sonuçlarının birbirlerine yakın sonuçlar vermesine rağmen eğme test sonuçlarının bariz farklı olduğu raporlanmıştır. Aynı çalışmada kaynaklı numunelere uygulanan kök ve yüz eğme testleri sonucunda atmosferik ortamda birleştirilen plakalarda bükme açısının makro bir kusur olmaması durumunda 180°'ye kadar ulaşıldığı, fakat su altında birleştirilen numunelerde 10° ile 60° arasında bir bükme açısı elde edildiği belirtilmiştir. Bu da elde edilen sonuçlarımızın literatür ile benzer olduğunu göstermektedir.

AWS D.3.6 standardında A sınıfı ve B sınıfı kaynakların her ikisi içinde çentik darbe enerjilerinin minimum 27J olması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışmamızda kaynaklı parçanın, ana malzeme, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) bölgelerinden -2°C'de 3'er adet çentik darbe testi yapılmıştır. Çentik darbe test sonuçları Şekil 9'da; test sonrası numune yüzey görüntüleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Kaynak ve ITAB numunelerinde cüruf hatalarının varlığı net bir şekilde görülmek-

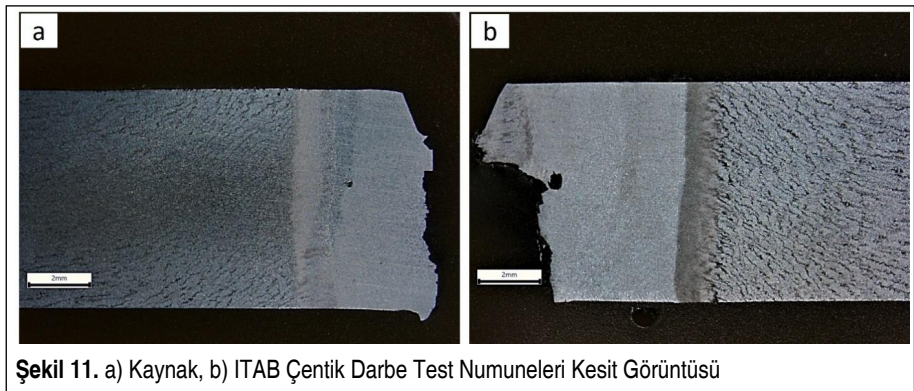






tedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sertlik sonuçları ile doğru orantılı olarak en yüksek çentik darbe dayanımı ortalama 141J ile ana malzemede tespit edilmiştir. Kaynak metali ise AWS D3.6 standardında belirtilen min. 27J değerinin hemen üzerinde 31J olarak ölçülmüştür. Fakat, en yüksek sertlik değerinin ITAB bölgesinde elde edilmesine rağmen ITAB bölgesinin çentik darbe direnci kaynak metalinden ortalama 50J daha yüksek çıktığı görülmüştür.

ITAB bölgesindeki çentik artışının sebebini anlamak ve kaynak bölgesi ile kıyaslayabilmek için çentik numuneleri çentik yönüne dik olarak frezelenmiş ve metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Burada amaç dinamik yükleme altın-





da var olan bir çatlakın ilerleme yönünü inceleme ve darbe tokluğu/çentik bölgesi arasındaki ilişkiyi anlamaktır. Numunelere ait makro görüntüler Şekil 11’de verilmiştir. İki numunede de cüruf kalıntılarının varlığı dikkat çekmektedir. Kaynak bölgesinden yapılan çentik testinde çatlak çentik ucundan çok fazla sapmadan lineer bir ilerleme göstermiştir. Fakat, Şekil 11b’de net bir şekilde görüldüğü üzere ITAB bölgesi çentikli numunede, çatlak ilerlemesi kaynak esnasında oluşan termal döngüler nedeniyle sertliği yani akma dayanımı düşük olan kaynak metali bölgesine doğru gerçekleşmektedir. Bu da ITAB bölgesinin tokluğunun yükselmesine sebebiyet vermiştir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gemi imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan AH36 çelik plakalarının örtülü elektrot ark kaynağı ile yerli GeKaTec UW E6013 Rutil elektrotları kullanılarak su altında alın altına birleştirildiği bu çalışmada;

- Kaynaklı plakaya uygulanan tahribatsız muayeneler sonucunda herhangi bir lineer hata tespit edilmemiş olup, radyografik film görüntüsünde 20 ile 30’uncu cm aralığındaki bölgelerde gözenek ve cüruf kalıntıları tespit edilmiştir. Bu hataların AWS D3.6 standardı B sınıfı kaynaklar için belirtilen kriterlere kıyasla çok küçük olmaları nedeniyle literatürdeki birçok çalışmaya nazaran oldukça başarılı bir kaynak dikişi elde edildiği söylenebilir.
- Ana metal yapısının hadde yönünde dağılmış ferritik ve perlitik yapıdan oluştuğu, kolonsal kaynak bölgesinin asiküler ferrit, tane sınırı ferritleri ve Widmanstatten ferrit yapısı içerdiği, ITAB bölgesinin ise martenzitik+beynitik yapıdan oluştuğu görülmüştür. Mikro yapı sonuçları sertlik testi ile doğrulanmış ve en yüksek sertlik değerinin ITAB bölgesinde (ort. 391 HV) olduğu, buna karşında en düşük sertliğin ana metal ile kendinden sonraki pasolar tarafından tavlanan kaynaklı bölgelerden elde edildiği görülmüştür (180-190 HV).
- Çekme testi sonucunda kaynak bölgesinin yük taşıma kapasitesinin ana malzmeden daha yüksek olması nedeniyle tüm numunelerde kopma ana malzmeden gerçekleşmiştir. Bu da başarılı bir atmosferik kaynaktan beklenen performansın sualtı kaynağında da elde edildiğini göstermektedir.
- Kaynaklı plakanın akma ve çekme değerlerinin ana malzeme ile benzer değerler verdiği, fakat % uzama değerlerinde AH36 malzemeye göre %47 oranında daha düşük uzama sağlandığı tespit edilmiştir. Bu duruma sebep olarak çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi ve buna bağlı olarak da deformasyonun kaynak bölgesi dışında gerçekleşmesi gösterilmiştir.
- Kök eğme numunelerinin yaklaşık 50°’de, yüz eğme numunelerinin ise yaklaşık 40°’lerde hasara uğradığı tespit edilmiştir. Bu durum su altında hızlı soğumaya





bağlı olarak kaynak metalinde ve ITAB bölgesinde oluşan sert fazların varlığı ve iç yapıdaki cüruf kalıntıları ile ilişkilendirilmiştir.

- Su altında kaynaklı birleştirilmiş parçanın tokluk değerlerinin AWS D3.6 Class B kaynaklarını karşıladığı (>27J), ITAB bölgesinin çentik darbe direncinin kaynak bölgesine nazaran 50 J daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum çatlağın ITAB bölgesinden başlayıp kaynağın düşük akma mukavemetine sahip olan tavllanmış bölgelerine ilerlemesi ile ilişkilendirilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı (TÜBİTAK 1501) kapsamında “3180212” no’lu proje ile desteklenmiştir. Su altı kaynaklarının gerçekleştirilmesi sürecindeki değerli destekleri için İstanbul Gedik Üniversitesi Gedik Meslek Yüksekokulu Su Altı Teknolojisi Programı akademisyenlerinden Öğr. Gör. Güvenç Sorarlı’ya, Öğr. Gör. Ata Aksu’ya, Öğr. Gör. Hayati Yağlı’ya ve Gedik Kaynak A.Ş. Teknik Pazarcılık Müdürü sayın Ömür Danışkan’a teşekkür ederiz.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## KAYNAKÇA

- Alajmi, E.F., Alqenaeci, A.A. (2017). Underwater welding techniques, *International Journal of Engineering Research and Application*, 7 (2), 14-17.
- Balık, B.E. (2008). *Gemi inşaatında kaynak sırası yöntem ilişkisi ve kaynak muayene planlarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Brown, R.T. & Masubuchi, K. (1975). Fundamental research on underwater welding, *Welding Research Supplement*, June, 178-188. Retrieved from [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1975\\_06\\_s178.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1975_06_s178.pdf)
- Boutsali, V.G. (2016). Study of microstructure and corrosion behavior of AH36 FSW welds and HSLA S690 ARC welds (Master Thesis), National Technical University of Athens, Athens.
- Çolak, Z., Ayan, Y. ve Kahraman, N. (2020). Gerçek deniz ortamında su altı kaynağı ile birleştirilen Grade AH36 gemi sacının kaynak bölgesinin karakterizasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 775-785, Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.519055>
- Fydrych, D., Labanowski, J. & Rogalski, G. (2013). Weldability of high strength steels in



- wet welding conditions, *Polish Maritime Research*, 20(2), 67-73. Doi: <https://doi.org/10.2478/pomr-2013-0018>
- Garašić, I., Underwater welding, *Welding engineering and technology*. Erişim adresi : <https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-171-08.pdf>
- Gao, W., Wang, D., Cheng, F., Di, X., Deng, C. & Xu, W. (2016). Microstructural and mechanical performance of underwater wetwelded S355 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 333-340. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.039>
- Gürol, U., Baykal, H., Yıldız N.B., Yılmaz, C., Danişkan, Ö., Koçak, M. (2022). Investigation of the microstructural and mechanical properties of welding joints made with underwater electrodes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4), 2211-2223. Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.990465>
- İmdat, K., Kaya, Y. ve Kahraman, N. (2018). Grade A gemi sacının örtülü elektrod ark kaynak yöntemi ile sualtı ve atmosferik şartlarda birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 21(3), 543-552. Doi: <https://doi.org/10.2339/politeknik.428975>
- Kahraman, N., Gülenç, B. & Durgutlu, A. (2005). Investigation of the effect of electrode extension distance on microstructural and mechanical properties of low carbon steel welded with submerged arc welding, *Gazi University Journal of Science*, 18(3) 473-480.
- Labanowski, J. (2011). Development of under-water welding techniques, *Welding International*, 25(12), 933-937, Doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.540847>
- Pessoa, E., Bracarense, A., Santos, V., Asunçao, F., Monteiro, M., Marinho, R., Vieira, L. & Siva, D. (2013). Wet welding field trials in shallow waters for structural repairs in floating oil production units, *Proceedings of the ASME 2013 32<sup>nd</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, France. Doi: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10097>
- Rowe, M. & Liu, S. (2001). Recent developments in underwater wet welding. *Science And Technology of Welding and Joining*, 6(6), 387-396. Doi: <https://doi.org/10.1179/stw.2001.6.6.387>
- Tomkow, J., Fydrych, D. & Wilk, K. (2020a). Effect of electrode waterproof coating on quality of underwater wet welded joints, *Materials*, 13, 2947,1-15. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma13132947>
- Tomkow, J., Janeczek, A., Rogalski, G. And Wolski, A. (2020b). Underwater local cavity welding of S460N steel, *Materials*, 13, 5535. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma13235535>
- Winarto, W., Purnama, D. & Churniawan, I. (2018). The effect of different rutile electrodes on mechanical properties of underwater wet welded AH-36 steel plates”, *AIP Conference Proceedings* 1945, 020048, Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5030270>