



Investigation of the microstructural and mechanical properties of welding joints made with underwater electrodes

Uğur Gürol^{1,2,*} , Hakan Baykal¹ , N. Benuşe Yıldız¹ , Can Yılmaz¹ , Ömür Danişkan¹ , Mustafa Koçak^{1,3} 

¹Gedik Welding Company, Research and Development Center, 34906, Pendik, Istanbul, Turkey

²Istanbul Gedik University, Engineering Faculty, Metallurgical and Material Engineering Department, 34876, Kartal, Istanbul, Turkey

³Istanbul Gedik University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 34876, Kartal, Istanbul, Turkey

Highlights:

- Development of rutile-based underwater electrode in accordance with AWS A5.35
- Welding in real underwater conditions
- Microstructural and mechanical characterization of all-weld metal

Keywords:

- Underwater welding
- Shielded metal arc welding
- Rutile-based electrodes
- All-weld metal test
- Characterization

Graphical/Tabular Abstract

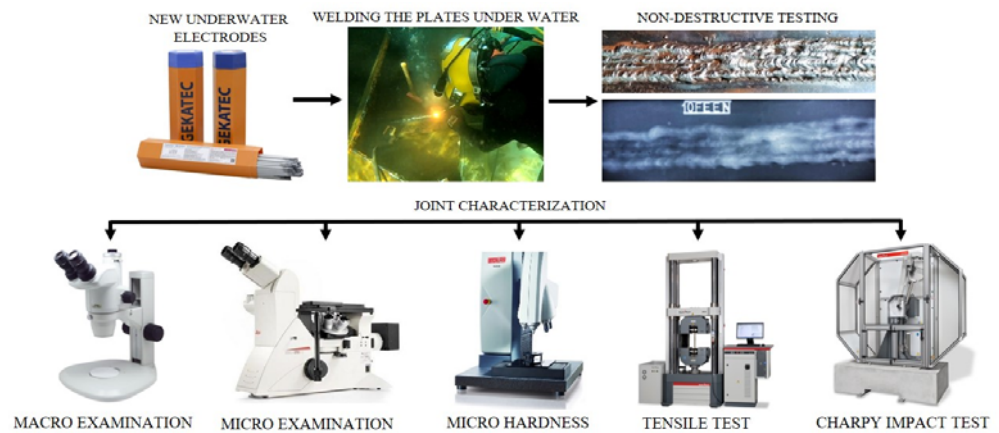


Figure A. Flowchart of the study

Purpose: In this study, the microstructure and mechanical properties of the underwater welding electrodes, which was developed for the first time in Turkey in accordance with the AWS A5.35 standard, were investigated by performing the all-weld-metal tests in atmospheric and real underwater conditions.

Theory and Methods:

Low alloyed S355J2+N plates with the dimensions of 20x150x400mm were joined at atmospheric and real underwater condition using the Ø4 mm rutile based electrodes classified in accordance with AWS A5.1 and AWS A5.35 standards. The underwater welds were performed in real sea atmosphere at the depth of 4 m in İstanbul, Turkey. The plates joined in both under water and atmosphere were subjected to the destructive tests (microstructure, microhardness, Charpy impact and tensile) and non-destructive tests (visual and radiographic tests) specified in accordance to AWS A5.35 standard and the results were compared.

Results:

No indication was found as a result of visual and radiographic inspection of the atmospheric welds, however, some porosity and slag inclusions which are not exceeding the acceptance criteria of AWS D3.6 were found in the plate joined underwater. Compared to atmospheric welds, It was found that the volume fraction of the annealed areas in the plate joined underwater were less and accordingly, the columnar zone are more. The width of HAZ for underwater welds was observed two times less than atmospheric welds. The hardness values of underwater welds were found to be 6-8% higher than atmospheric welds. Moreover, there was no significant change in the yield and tensile strenght of plates joined in both condition. However, % elongation for underwater welds were found %48 less than atmospheric welds. Likewise, the Charpy impact values of underwater welds performed at -2°C and -20°C were found to be 22% and 14% lower than atmospheric welds, respectively.

Conclusion:

Although welds made with the speacial coated rutile-based underwater electrodes developed for the first time in Turkey have lower ductility compared to atmospheric welds, it has been observed that they met with the min requirements of AWS A5.35 Level 1.

Article Info:

Research Article

Received: 03.09.2021

Accepted: 14.12.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.990465

Acknowledgement:

This study was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (Project number: 3180212).

Correspondence:

Author: Uğur Gürol
e-mail: uguro@gedik.com.tr
phone: +90 544 424 2626



Su altı elektrotları ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Uğur Gürol^{1,2*}, Hakan Baykal¹, N. Benuşe Yıldız¹, Can Yılmaz¹, Ömür Danışkan¹, Mustafa Koçak^{1,3}

¹Gedik Kaynak A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Merkezi, 34906 Pendik, İstanbul, Türkiye

²Istanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34876 Kartal, İstanbul, Türkiye

³Istanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34876 Kartal, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- AWS A5.35 standartına uygun rutil su altı elektrodu geliştirme
- Gerçek su altı koşullarında kaynak işlemi
- Saf kaynak metali mikro yapı ve mekanik özellik incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.09.2021

Kabul: 14.12.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.990465

Anahtar Kelimeler:

Su altı kaynağı,
örtülü elektrod ark kaynağı,
rutil elektrod,
saf kaynak metali,
karakterizasyon

ÖZ

Bu çalışmada, rutil karakterli kaynak elektrotları ile düşük alaşımlı S355J2+N çelik plakaları kullanılarak su altı ve atmosferik ortam şartlarında saf kaynak metalinin metalürjik özellikleri incelenmiştir. Su altı kaynakları, Türkiye’de ilk defa AWS A5.35 standardına göre özel olarak geliştirilen parafin kaplı GeKaTec UW E7014 su altı elektrotları kullanılarak açık denizde 4 metrelik bir derinlikte gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kaynaklı plakaların AWS A5.35 standardının gerekliliklerine göre tahribatsız muayeneleri yapılmıştır. Daha sonra mekanik özellikleri belirlemek ve deniz suyunun mikro yapısal dönüşüm üzerindeki etkilerini belirlemek için çekme testi, Charpy-V darbe testi, sertlik testi ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Her iki ortamda gerçekleştirilen kaynakların akma ve çekme mukavemetlerinde önemli derecede bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Atmosferik şartlarda gerçekleştirilen kaynaklara kıyasla su altında gerçekleştirilen kaynakların %6-8 oranında daha yüksek sertliğe sahip olduğu, % uzama değerleri ile -2°C’de elde edilen çentik darbe değerlerinin ise sırasıyla %48 ve %22 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; su altında birleştirilen plakadan elde edilen değerlerin AWS A5.35 standardı Seviye 1 kalite gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür.

Investigation of the micro-structural and mechanical properties of welding joints made with underwater electrodes

H I G H L I G H T S

- Development of rutil-based underwater electrode in accordance with AWS A5.35
- Welding in real underwater conditions
- Microstructural and mechanical characterization of all-weld-metal

Article Info

Research Article

Received: 03.09.2021

Accepted: 14.12.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.990465

Keywords:

Underwater welding,
shielded metal arc welding,
rutil-based electrodes,
all-weld-metal,
characterization

ABSTRACT

In this study, the metallurgical properties of all-weld-metal, which welded underwater and atmospheric conditions by using rutil-based electrodes and low alloy S355J2+N steel plates, were investigated. Underwater welding process were performed at a depth of 4 meters in the open sea with paraffin coated GeKaTec UW E7014 underwater electrodes that specially developed according to the AWS A5.35 standard for the first time in Turkey. The welded plates were firstly subjected to non-destructive tests according to the AWS A5.35 standard. Then, tensile test, Charpy-V impact test, hardness test and microstructure examinations were carried out to determine the mechanical properties and to identify the effects of sea water on the microstructural transformation. The results showed that there was no significant change in the yield and tensile strengths of the welds performed in both environments. However, compared to the welds performed at atmospheric conditions, it was observed that the welds performed underwater were 6-8% harder and the Charpy impact values obtained at -2°C together with the % elongation values were lower by 48% and 22%, respectively. As a result, it has been observed that welds made underwater met with the requirements of AWS A5.35 standard quality Level 1.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su altı boru hatlarının, gemilerin ve diğer su altı mühendisliği yapılarının onarımı ve bakımı için su altı kaynağı teknolojisinin kullanımı, I. Dünya Savaşı sırasında İngiliz donanmasının gemilerinde örtülü elektrod ark kaynağı ile başlamıştır [1, 2]. Bu dönemde yapılan kaynaklar; ıslak su altı kaynağı olarak bazı su yalıtım malzemeleri ile sarılmış, çıplak örtülü elektrodlar kullanılarak yapılmıştır [1, 3]. Su altı kaynağı günümüzde halen inşaat ve bakım çalışmaları için kullanılsa da daha çok gemilerin hasar alması sonucu su almasını engellemek için kurtarma operasyonlarında tamir kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca korozyon etkisinden korunmak için gemi gövdesinin su altında kalan bölgelerine tuya bloklarının kaynak edilmesinde, tersaneye alınamayan büyük gemilerin ve açık deniz yapılarının imalatında, su altı boru hatlarının kurulumlarında ve bakımında da su altı kaynağı uygulanmaktadır [4]. Son yıllarda bulunan petrol yataklarının ve kurulan doğalgaz hatlarının giderek artan bir şekilde deniz altında yer almaya başlaması; denizleri ve maden kaynaklarını geliştirmek ve kullanmak için uluslararası rekabet nedeniyle de su altı teknolojilerinin gelişimini oldukça arttırmıştır.

Su altı kaynakları kuru ve ıslak ortam olarak ikiye ayrılmaktadır. Kuru ortam su altı kaynağında, mekanik bariyerler ile suyun kaynak banyosuna doğrudan teması engellenir. Kuru ortam; su derinliğine, kaynak yapılacak parçaya ya da bölgenin şekline, alanına veya türüne bağlı olarak atmosferik (izobarik kaynak) veya su derinliğinden kaynaklanan yüksek bir basınç (hiperbarik kaynak) altında sağlanır. Islak su altı kaynağı ise; suyun kaynak banyosuna doğrudan temasıyla ve ortam basıncında gerçekleştirildiğini ifade eder [3, 5]. Islak su altı kaynağı proses ekipmanlarına göre çok daha düşük maliyetli ve karmaşık olmayan bir prosestir. Bu nedenle çoğu zaman ıslak su altı kaynağı; basitliği ve maliyet açısından önemli avantajlar sunarak; su altı yapılarının, gemilerin bakımı ve onarımı için kullanılacak uygun teknolojidir. Ancak, hızlı soğuma ve kaynak mikro yapısının kontrol edilememesi ve mekanik özelliklerin daha düşük olması sebebiyle kaynak dikişinin mekanik ve morfolojik özellikleri önem taşımaktadır. İlave metalin, yani kaynak elektrodlarının kimyasal ve mikro-mekanik özellikleri bu noktada doğru tercih edilmelidir [5-8].

Gemi yapım ve su altı boru hatları uygulamalarında istenilen mekanik özelliklere zarar vermeden, işlem süresi ve maliyetleri azaltmak için su altı kaynak teknolojilerinde farklı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürde; yaygın olarak örtülü elektrod ark kaynağı (SMAW) [9], özlü tel kaynağı (FCAW) [10] ve gaz metal ark kaynağı (GMAW) [11] yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak uygulama kolaylığı açısından en sık örtülü elektrod ark kaynağı tercih edilmektedir. Bu yöntem ile yapılan su altı kaynaklı birleştirmelerde metalurjik sonuçlar, elektrod sınıfına ve proses parametrelerine doğrudan bağlıdır. İyi bir

su altı elektrodundan beklenen başlıca özellikler derin nüfuziyet, az sıçrıntı, kolay cüruf kaldırma özelliği, iyi bir kaynak dikiş görünümü ve yeniden tutuşturma kolaylığı şeklindedir [12-14]. Örtülü elektrod kaynağında bazik, selülozik, rutil ve demir tozlu örtülü elektrodlar kullanılmaktadır. Bazik elektrodların atmosferik ortamda koruma gazı oluşturan karbonatlı bileşiklerinin, su altı kaynağında gözenek oluşumunu arttırması sebebiyle kullanımı tercih edilmez. Selülozik elektrodlar, örtü karakteri gereği yoğun duman oluşturacağından, kaynak metalinde gözenekliliğe sebebiyet verebileceğinden ve yığılma oranı düşük olduğundan tercih edilmez. Rutil karakterli örtülü elektrodlar mükemmel ark kararlılığı ve daha iyi dikiş görüntüsüyle en yaygın kullanılan elektrodlardır. Demir tozlu elektrodlar ise daha düşük yayılabilir hidrojen ile rutil örtülü elektrodlara alternatif olmuştur. Bu sebeple oksit ve rutil örtülü elektrodlar tercih edilir [3, 15].

Su altı kaynağı; yüksek kaynak becerilerinin, teknolojinin ve iş güvenliğinin birlikte sürdürülmesini gerektiren özel bir prosestir. Normal koşullar olarak kabul edilen fiziksel olaylar su altında çok farklı etkileşimler yaratabilmektedir. Bu durum kaynak kalitesi için risk yaratabileceği gibi kaynakçı için de hayati tehlike oluşturmaktadır. Yüksek güvenlik riskleri olması sebebiyle su altı kaynakçılarının ve yüzeydeki ekibin, su altı kaynaklı birleştirmelerinin gerçekleştirilmesinde sorumlulukları vardır. Bu nedenle kaynakçıların ve ekibinin; eğitimi ve tecrübeli olmaları, koordineli çalışmaları önem taşımaktadır. Çünkü kaynak esnasında karşılaşılabilecek sorunlar derinlikle orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple derinlik; ıslak su altı kaynak prosedürlerinde sınırlayıcı bir faktör olarak yer almaktadır. Yohanes ve arkadaşları [16]; SS400 çeliğini kullanarak 2,5 m, 5 m ve 10 m derinlikte yapmış oldukları kaynaklarda derinliğin artması ile kaynak sertliğinin arttığını fakat oluşan kaynak hataları nedeniyle çekme mukavemetlerinin azaldığını raporlamışlardır. Yine Çolak ve arkadaşları [9] tarafından yapılan bir başka çalışmada; atmosferik şartlarda ve 4 m, 8 m ve 16 m derinlikte yapılan su altı kaynaklı birleştirmelerde artan derinlikle ısıdan etkilenmiş (ITAB) bölge genişliğinin ciddi oranda azaldığı belirtilmiştir. Bir başka çalışmada Klett ve ekibi [17]; su altı elektrod kaynaklarındaki derinliğin (5, 20, 40 ve 60 m) yayılabilir ve artık depolanmış hidrojen içeriğine etkisini incelemiş; artan su derinliği ile birleşme bölgesinde, yayılabilir hidrojen önemli bir azalma ve artık hidrojen bir artış olduğunu raporlamışlardır.

Bu kapsamda geçmişten günümüze kadar; farklı kaynak yöntemleri, farklı sarf malzemeleri ve farklı kaynak konfigürasyonları kullanılarak su altında birleştirilen kaynaklı yapıların mikro yapı ve mekanik özellik ilişkisi incelenmiştir. Fakat bu çalışmaların neredeyse tamamı basınçlı kap ve simüle edilmiş ortamlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yine literatür araştırmalarına bakıldığında; su altında gerçekleştirilen tüm bu çalışmaların hepsinde alın kaynakları ile kaynaklı bağlantıların mikro

yapı ve mekanik özelliklerinin incelendiği görülmüştür. Fakat kaynaklı bağlantılarda uygun sarf malzemelerinin seçilebilmesi için öncelikle kullanılan sarf malzemelerinin AWS A5.35 standardına göre saf kaynak metali testlerinin gerçekleştirilmesi ve uygunluk alması oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada; AWS A5.35 standardına göre özel olarak geliştirilen GeKaTec UW E7014 su altı kaynak elektrodları kullanılarak saf kaynak metalinin mikro yapı ve mekanik özellik karakterizasyonunun yapılması ve buna bağlı olarak da su altı petrol boru hatlarının ve gemi inşaat sektörlerinin kullanabileceği deneysel verilerin deniz altında yapılan kaynaklarla elde edilmesi hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu çalışmada AWS A5.35 (Specification for Covered Electrodes for Underwater Wet Shielded Metal Arc Welding) standardına uygun olarak geliştirilen su altı kaynak elektrodlarının atmosferik ve su altı şartlarındaki saf kaynak metali testleri gerçekleştirilerek mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak testlerinde Tablo 1’de verilen EN10025-2 standardına uygun 20x150x400 mm boyutlarında düşük alaşımlı S355J2+N plakalar kullanılmış olup, plakaların sertifika değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 3’te ise AWS A5.1 standardına göre E7014 elektrodları için belirlenen kimyasal analiz üst limit değerleri ile çalışma kapsamında geliştirilen GeKaTec UW E7014 elektrodlarının kaynak dikişi analizi verilmiştir.

Kaynak sarf malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla saf kaynak metali (all-weld-metal) birleştirmelerinde kullanılan ana malzemenin kimyasal bileşimi; kaynaklı parçaların birleşim (kaynak ağzı) şekline bağlı olarak oldukça önem arz etmektedir [18]. Çünkü ergime bölgesi kaynak metali ve ana metalin karışımından

meydana gelmektedir. Tek pasolu kaynak dikişlerinde, bu bölgede ana metal ve kaynak metali, kaynak bölgesindeki şiddetli türbülans dolayısıyla iyice karıştığından oldukça homojen bir yapı oluşmaktadır. Fakat çok pasolu kaynaklarda, her pasodaki kaynak parametrelerine bağlı olarak karışım yani seyrelme oranı farklılık göstermektedir. Bu nedenle, ana malzemenin kaynak metaline geçiş miktarını belirleyen seyrelme oranının azaltılması ve yeterince geniş kaynak ağzı ve ağız açıklığı sağlanabilmesi adına AWS A5.35 standardına göre hazırlanan plakaların ölçüleri Şekil 1’de verilmiştir.

Kaynaklı birleştirmeler, AWS D3.6 standardına göre sertifikalı sanayi dalgıçları tarafından, İstanbul Gedik Üniversitesi Su Altı Teknolojileri bölümüne ait Pendik Marina’da bulunan 4 m derinliğe sahip, Şekil 2’de gösterilen açık deniz ortamında gerçekleştirilmiştir. Atmosferik ortamda gerçekleştirilen kaynaklarda E7014 normunda Ø4,00 mm çapında rutil elektrod kullanılırken, su altında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde bu çalışma kapsamında ülkemizde ilk defa yerli olarak üretilen Ø4,00 mm çapındaki rutil karakterli GeKaTec UW E7014 su altı elektrodları kullanılmıştır. Elektrod çekirdek çapı ve örtü kalınlığından bağımsız olarak su altı elektrodları; mutlaka su geçirmez yalıtkan malzeme ile kaplanmalı ve elektrod örtüsü ile ortam arasında bariyer (izolasyon) oluşturmalıdır. Tomkow ve arkadaşları [6] wax kaplamanın, su geçirmez kaplamaya sahip olmayan elektrodlara kıyasla kaynak metalindeki yayılabilir hidrojen içeriğini %35 ve su altı kaynağı için kullanılan diğer hidrofobik kaplamalı elektrodlara kıyasla %24 oranında azalttığını raporlamıştır. Çalışmamızda kullanılan GeKaTec UW E7014 su altı kaynak elektrodları; kaynak metalindeki yayılabilir hidrojen içeriğini azaltmak ve su altında elektrik akımının getireceği olumsuzlukları önlemek için parafin bazlı ve özel katkılı yalıtım malzemesi kullanılarak kaplanmıştır.

Tablo 1. Ana malzemenin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça, %) ve karbon eşdeğeri (Chemical composition of the base metal (wt. %) and the carbon equivalent)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cu	C _{eq}
S355J2+N	0,16	0,21	1,36	0,016	0,001	0,03	0,39

Tablo 2. Ana malzeme için sertifika değerleri (The certificate values of base metal)

Malzeme	Akma Dayanımı, R _e (MPa)	Çekme Dayanımı, R _m (MPa)	Uzama, A ₅ (%)	Darbe Tokluğu (J)
S355J2+N	355	470-630	>22	27

Tablo 3. E7014 elektrodu için kimyasal analiz üst limitleri ve GeKaTec UW E7014 elektrodunun kimyasal analizi (Ağırlıkça %)

(The upper limits for E7014 electrode chemical composition (wt. %) and chemical composition (wt.%) of GeKaTec UW E7014 electrode)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Mn+Ni+Cr +Mo+V
AWS A5.1 E7014 (maks.)	0,15	0,90	1,25	0,035	0,035	0,20	0,30	0,30	0,08	1,5
GeKaTec UW E7014	0,08	0,44	0,55	0,024	0,005	0,019	0,29	0,01	0,02	0,89

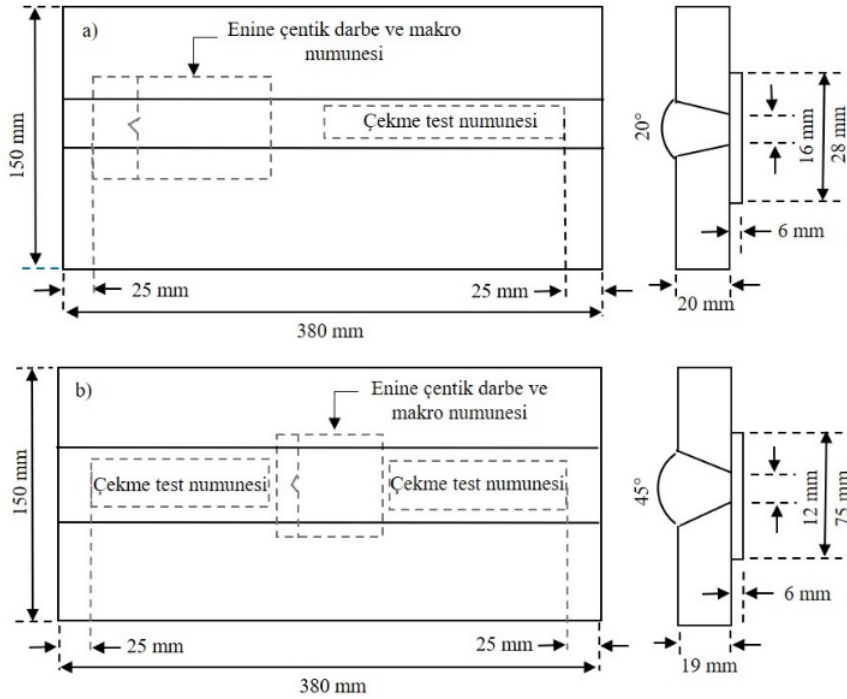


Şekil 2. İstanbul Gedik Üniversitesi, Su Altı Teknolojisi Programı, Pendik Marina Su Altı Kaynak Sahası
(Istanbul Gedik University, Underwater Technology Program, Underwater Welding Area, Pendik Marina)

Çalışma boyunca gerçekleştirilen çok pasolu atmosferik ve su altı kaynak birleştirmelerinde akım, voltaj ve kaynak hızlarına bağlı olarak nominal ısı girdisi ortalama 1,40-1,47 kJ/mm aralığında hesaplanmıştır. Kaynak parametreleri Tablo 4'te gösterilmektedir. Atmosferik ortamda gerçekleştirilen kaynaklarda; pasolar arası sıcaklık 150°C

dereceyi geçmeyecek şekilde belirlenmiş ve kaynak sonrası plaka havada soğumaya bırakılmıştır. Ayrıca, her paso sonrasında çekiç ve tel fırça ile detaylı cüruf temizliği yapılarak yeni pasoya geçilmiştir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra atmosferik ortamda gerçekleştirilen plakalar TS EN ISO 17637 standardına göre görsel muayene işlemine ve TS EN ISO 17636-1 standardına göre de radyografik muayeneye tabi tutulmuştur. Su altında kaynakları yapılan plakalar ise AWS D3.6 Class B'ye göre görsel muayene, MIL-STD-2035 A Class 2'ye göre manyetik parçacık muayenesine ve MIL-STD-2035 A Class 3'e göre de radyografik muayene işlemine tabi tutulmuştur. Tahribatsız muayene işlemleri tamamlandıktan sonra şerit testere tezgahında soğutma sıvısı kullanılarak kaynaklı plakalardan mikro yapı ve mekanik testler için numune çıkartma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminde kaynaklı plakaların başlangıç ve bitiş noktalarından 25 mm'lik kısımlar standart gereği kesilerek atılmıştır. Kalan plakalardan Şekil 1'de gösterildiği üzere 2 adet çekme, 2 set (10 adet) standart Charpy-V çentik ve 1 adet de sertlik numunesi çıkartılmıştır.

Sertlik testi için alınan kaynaklı numuneler; klasik metalografik numune hazırlama işlemine (zımparalama ve



Şekil 1. Plaka ölçüleri ve numune konumları a) atmosferik b) su altı kaynağı
(Test plate dimensions and sample locations a) atmospheric b) underwater welding)

Tablo 4. Kaynak parametreleri (Welding parameters)

	Akım (A)	Voltaj (V)	Hız (cm/dak)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Derinlik (m)	Isı Girdisi (kJ/mm)
Atmosferik	160	35	24	24	-	1,40
Su altı	170	36	25	15	4	1,47

parlatma) tabii tutulduktan sonra %4'lük nital çözeltisi içerisine daldırılmış ve 10 sn boyunca dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrası numuneler su ile yıkanıp, etil alkol ile temizlendikten sonra sıcak hava üfleci ile kurutulmuştur. Daha sonra makro yapı görüntüleri; Nikon SMZ745T marka/model stereo mikroskop ile, mikro yapı görüntüleri ise Leica DMI8 marka/model optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Sertlik ölçümleri; DuraScan-70 G5 model tam otomatik sertlik cihazı kullanılarak Vickers (HV) 5 kgf'lik yük altında yapılmıştır. Kaynaklı plakanın sertlik dağılımının incelenmesi için yüzeyin 5 mm altından ve kaynak merkezinden dikeyde 0,5 mm aralıklarla 20 adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Ayrıca, ana malzemeden kaynak metaline doğru değişimi de incelemek amacıyla yatay eksende kaynaklı plakanın tam ortasından yine 0,5 mm aralıklarla sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çentik darbe deneyleri 2 farklı sıcaklık için EN ISO 9016 standardına göre 10x10x55 mm ebatlarında 5'er adet numune çıkartılmış ve EN ISO 148-1 standardına göre Zwick RKP 300 cihazıyla 2°C ve -20°C de test edilmiştir. Sonuç olarak da en yüksek değer ile en düşük değer değerlendirme dışı bırakılarak geriye kalan üç numunenin ortalama değeri alınmıştır. Kaynak bölgesinden işlenmiş çekme numuneleri Zwick Roell 600E çekme cihazında test edilmiştir. Ana metalin ve kaynak metalinin kimyasal analizleri ARL OES 8860 marka optik emisyon spektrometresi ile yapılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şekil 3'te su altı ortamında kaynakları gerçekleştirilen plakanın kaynak dikişi görüntüsü verilmiştir. Genellikle su

altı kaynak işlemlerinde; kaynak esnasında ark etrafında oluşan hava kabarcıkları nedeniyle kaynakçının görüşü kısıtlanmaktadır. Bu da kaynak dikişinin görüntüsünün atmosferik ortamda yapılan kaynaklara göre farklı olmasına sebebiyet vermektedir. Buna rağmen su altında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin görsel muayeneleri sonucunda AWS D3.6M Class B'ye göre fazla/eksik kaynak kepi, eksen kaçıklığı ve yüzeysel çatlaklar gibi hatalar ile karşılaşılmamıştır. Sadece bazı bölgelerde AWS D3.6M kalite seviyesi B kriterine göre geçer ölçüde yanma oluşu hataları görülmüştür. Şekil 4'te su altında birleştirilen kaynaklı plakanın radyografik film görüntüsü verilmiştir. Parçada MIL-STD-2035A Class 3 kriterlerini aşan herhangi bir gözenek, çatlak veya nüfuziyetsizlik hatası tespit edilmemiştir. Ergime esnasında seyrelme miktarına bağlı olarak, ilave metalin kimyasal içeriğinin birleştirilen kaynak metali bileşimine yapacağı etki göz önünde bulundurulduğu için çekme çubuklarının kesit yüzeyinden kimyasal analiz testi gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te AWS A5.1 standardına göre üretilen GeKaTec UW E7014 elektrodu ile kaynak edilen plakaların saf kaynak metali kimyasal analizleri verilmiştir. Şekil 5'te kaynak işleminde kullanılan düşük karbonlu çelik malzemenin (ana metal) mikro yapısı gösterilmektedir. Genel itibarıyla mikro yapı birbirine yakın büyüklükteki ferrit (beyaz renkli) taneleriyle birlikte hadde yönü boyunca uzamış perlit fazından (siyah renkli) oluşmaktadır.

Kaynaklı plakaların kaynak bölgelerindeki metalurjik değişimleri değerlendirmek amacıyla, atmosferik ortamda kaynak edilen plakanın makro yapı görüntüsü Şekil 6'da



Şekil 3. Su altında kaynak edilen plakanın kaynak dikişi görüntüsü (The weld seam of plate welded underwater)



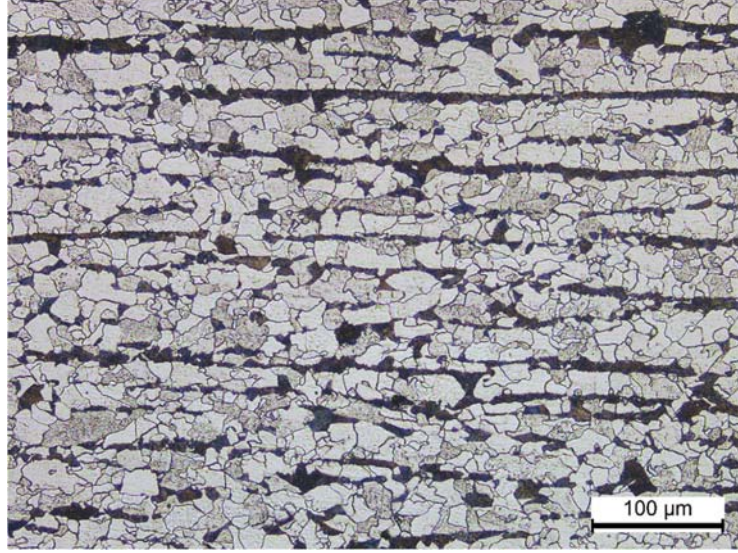
Şekil 4. Su altında kaynak edilen plakanın radyografik film görüntüsü (Radiographic film image of the plate welded underwater)

Tablo 5. Saf kaynak metali kimyasal analiz sonuçları (Ağırlıkça %) (Chemical composition (wt. %) of all-weld-metal)

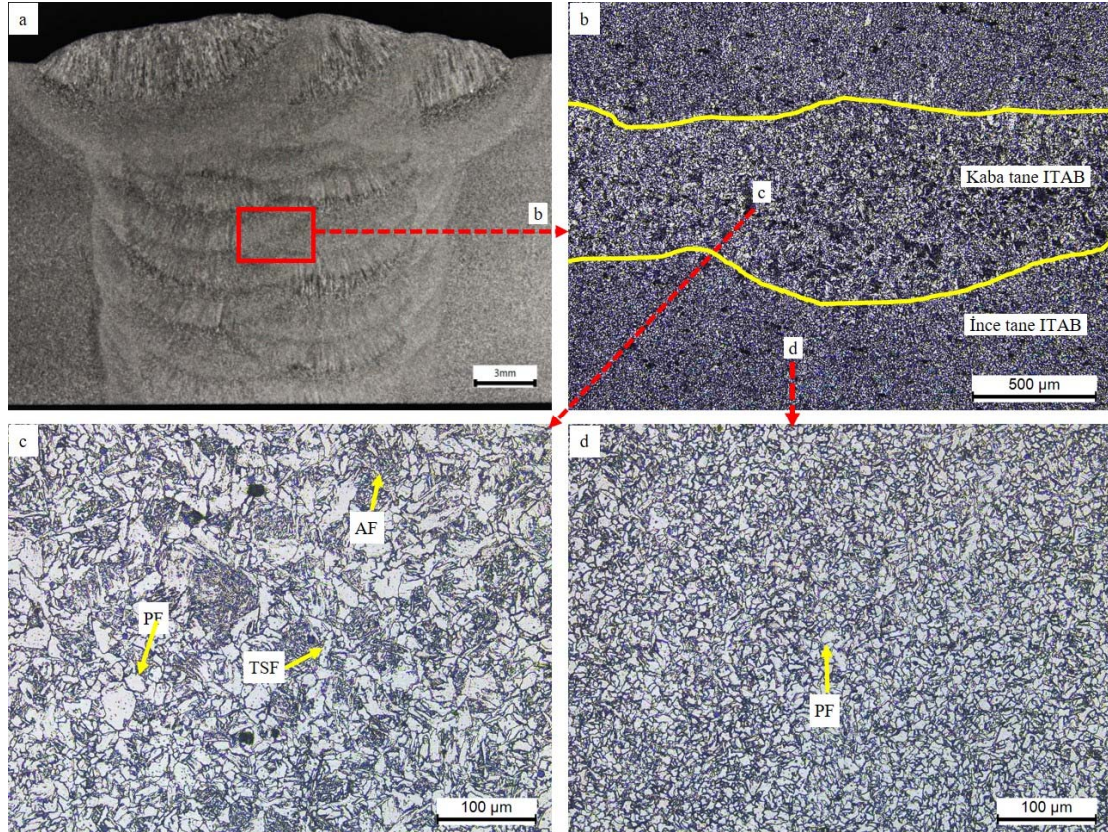
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Atmosferik	0,057	0,499	0,550	0,030	0,006	0,031	0,30	0,001	0,015
Su altı	0,052	0,385	0,442	0,028	0,006	0,026	0,30	0,002	0,011

verilmiştir. Kök ve ara pasolardaki görünümünden farklı olarak kapak pasosundaki kolonsal büyüme net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, ara pasolarda yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen ısı etkileşimi nedeniyle; kaynak metalindeki yönlenmenin kaybolduğu, tanelerin küçüldüğü net bir şekilde görülmektedir. Çünkü çok pasolu kaynağın doğası

gereğince, bazı pasolar çoklu termal döngü nedeniyle birçok kez faz dönüşümüne maruz kalmaktadır. Burada sonradan uygulanan ikinci paso tavlama görevi görmektedir. Bu nedenle yeniden ergitilen kaynak metalinin ısı tesiri altında kalan bölgesinde; aşırı ısınmış bölge, normalize olmuş bölge, kısmen dönüşmüş bölge ve iç yapı değişikliğine uğramamış



Şekil 5. Ana metal mikro yapısı (The microstructure of base metal)



Şekil 6. Atmosferik ortamda kaynak edilen plakanın a) makro yapısı, b) pasolar arası geçiş bölgesi, c) kaba tane ITAB bölgesi, d) ince tane ITAB bölgesine ait mikro yapı görüntüleri

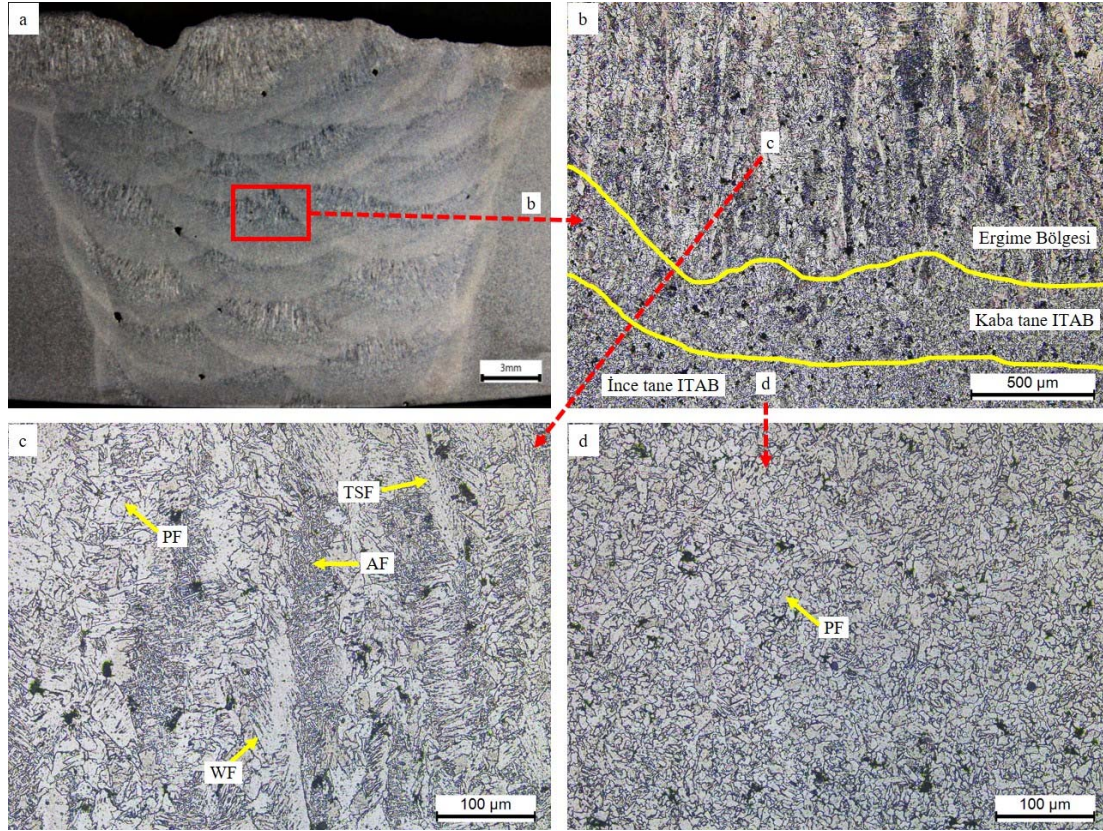
a) The macrostructure b) interpass layer, c) coarsened grained HAZ, d) fine grained HAZ microstructures of the plate welded at atmospheric condition

bölgeler meydana gelmektedir. Şekil 6b'de saf kaynak metalinin tam orta bölgesinden alınan pasolar arası geçiş bölgesini; Şekil 6c'de aynı bölgenin aşırı ısınma nedeniyle iri tane bölgesini; Şekil 6d'de ise normalize sebebiyle oluşmuş ince taneli kaynak bölgesinin mikro yapıları görülmektedir. Şekil 6b'de ergime çizgisine bitişik olan bölgenin solidüs eğrisine yakın bir sıcaklığa ulaşmasından dolayı tane irileşmesi görülmektedir. Bu bölge kaynak metalinin hemen altında bulunan ve kaynak esnasında 1450-1200°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalan iri taneli bölge olarak adlandırılmaktadır [19]. Bu bölgenin daha detaylı incelemesi yapıldığında (Şekil 6c), yapının iri taneli poligonal ferrit (PF) yapısıyla beraber asiküler ferrit (AF) ve tane sınırı ferritlerinden (TSF) oluştuğu görülmektedir. Asiküler ferrit kaynak metalinin sünekliğini ve tokluğunu arttırdığından kaynak metalinde oluşması istenen bir yapıdır [20, 21]. Şekil 6d'de bir sonraki paso tarafından tavlanan ince taneli yapı görülmektedir. Mikro yapı bakımından iri taneli bölgenin devamı çoğunlukla poligonal ferrit (PF) yapısından oluşmaktadır.

Şekil 7a'da su altında gerçekleştirilen kaynak işlemine ait makro yapı görüntüsü verilmiştir. Atmosferik ortamda birleştirilen kaynağa kıyasla orta bölgelerdeki ara pasoların ani soğuma nedeniyle bir üst pasonun ısısından yeterince etkilenmediği ve bu nedenle de kolonsal yapıya sahip

bölgelerin miktarının arttığı Şekil 7b'de görülmektedir. Şekil 7c'de ise kolonsal yapıya sahip ergime bölgesinin detay görüntüsü verilmiştir. Atmosferik ortama kıyasla bu bölgede Widmanstätten ferrit (WF) yapısı görülmektedir. Benzer şekilde, Gaoa ve arkadaşları [22] tarafından S355 malzemenin farklı kaynak ağzı birleşimi ile E7014 elektrodu kullanılarak gerçekleştirilen su altı kaynak çalışmasında; kaynak metalinin mikro yapısında tane sınırı ferrit (TSF), Widmanstätten ferrit (WF) asiküler ferrit (AF) ve poligonal ferrit (PF) oluştuğu raporlanmıştır. Son olarak; Şekil 7d'de bir önceki paso nedeniyle normalize olmuş ince taneli kaynak bölgesinin mikro yapısı görülmektedir. Atmosferik ortamda birleştirilen plakanın aynı bölgesi ile kıyaslandığında su altında birleştirilen plakada daha ince taneli poligonal ferrit yapısı oluşmuştur. Bu durum, her ne kadar benzer ısı girdisiyle birleştirilmiş olsalar da su altındaki plakaların atmosferik ortama göre daha hızlı soğumasından kaynaklanmaktadır.

Literatürde ısı tesiri altında kalan bölge, ergiyen bölgenin esas metal ile birleştiği kısımdan itibaren yaklaşık olarak 1450°C ile 700°C arasındaki bir sıcaklığa maruz kalan bölge olarak tanımlanmaktadır [19]. Şekil 8'de atmosferik ve su altında yapılmış kaynaklarda; kaynak bölgesi-ITAB-ana malzeme bölgeleri kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Su altında birleştirilen plakanın kaynak bölgesinde tanelerin ısı akışına doğru kolonsal olarak yöneldiği görülmektedir.



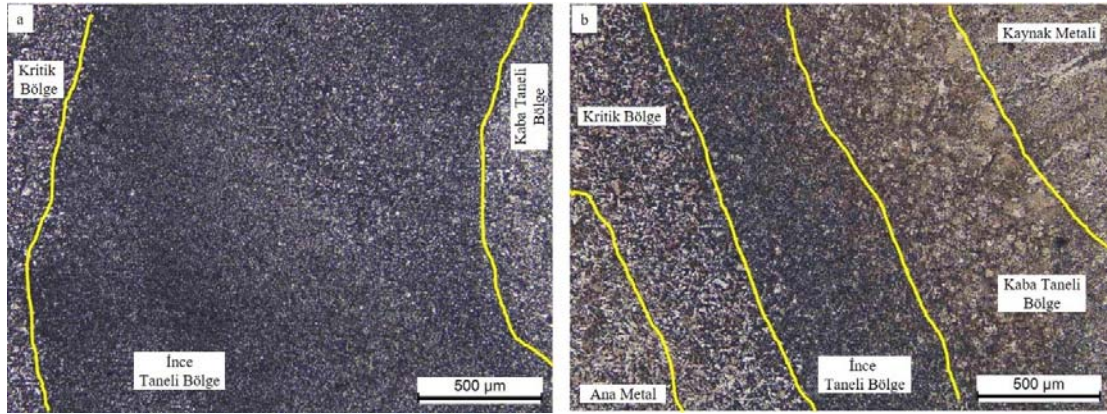
Şekil 7. Su altında kaynak edilen plakanın a) makro yapısı, b) pasolar arası geçiş bölgesi, c) kolonsal yapıya sahip ergime bölgesi, d) ince tane ITAB bölgesine ait mikro yapı görüntüleri

a) The macrostructure b) interpass layer, c) melting zone with columnar structure d) fine grained HAZ microstructure of the plate welded at atmospheric condition

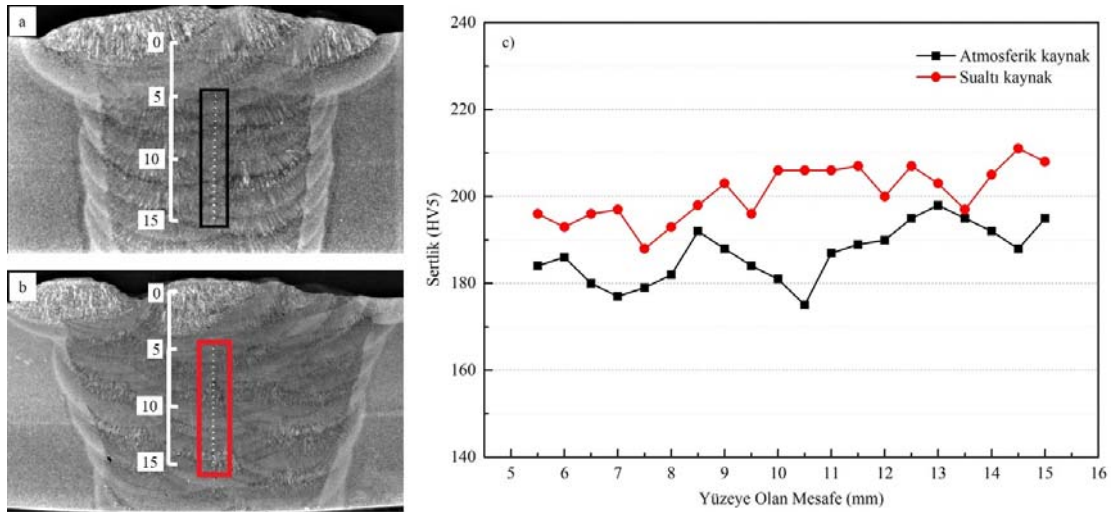
Ayrıca, atmosferik ortamda gerçekleştirilen kaynağa göre su altı kaynağında hızlı soğuma nedeniyle yaklaşık iki kat daha dar bir ITAB oluşumu söz konusudur. Çünkü ITAB bölgesinin genişliği kaynak işleminde malzemeye uygulanan ısı girdisine ve parçanın kaynak sonrası soğuma hızına bağlıdır. Şekil 8a'da atmosferik ortamda birleştirilen plakaların yavaş soğuma hızı sebebiyle; sonraki pasoların sürekli önceki pasoları tavlama nedeniyle, ince taneli yapının daha büyük bir alan kapladığı görülmektedir. Şekil 8b'de ince taneli bölgeden kaynak metaline doğru gidildikçe kaynak metaline ile iri taneli bölge keskin bir biçimde ayrılmakta olup geçiş bölgesinin ergime bölgesine yakın kısımda iri tanelerde küçülmenin başladığı ve kaynak metaline doğru kolonsal taneler oluştuğu görülmektedir.

Çok pasolu kaynaklarda sürekli yığılan pasolar, nüfuziyet bölgesindeki mikro yapıları ve önceki pasolardaki ısıdan etkilenmiş bölgeyi tekrar ısıtmakta, mikro yapı ve mekanik özellikleri değiştirmektedir. Genel olarak, poligonallı ferrit fazının baskınlığı, tane boyutunun küçülmesi veya sonraki

pasoların tavlama etkileri nedeniyle yeniden kristalleşmiş bölgenin oranı arttığında sertlik düşüşüyle beraber darbe tokluğu da artar [23, 24]. Fakat, tavlama kaynağı metalindeki daha küçük eş eksenli östenit taneleri nedeniyle asiküler ferrit oranında azalma olabileceği ve bununda tokluk değerlerini olumsuz etkileyeceği daha önceki çalışmalarda raporlanmıştır [25, 26]. Öte yandan; su altı kaynak testlerinin gerçekleştirildiği AWS D3.6M: 2017 standardına göre; kaynak sertliğinin A sınıfı kaynaklar için maksimum 325 HV, B sınıfı kaynaklar için ise maksimum 375 HV olması gerektiği belirtilmektedir. Bu sebeple detaylı bir inceleme yapabilmek adına çoklu pasolar olarak gerçekleştirilen su altı ve atmosferik kaynakların sertlik ölçümleri hem yatay (ana metal, ITAB ve kaynak metalini kapsayacak şekilde) hem de kaynak metalinin çentik darbe numunesi çıkartılan bölgesini temsil edecek şekilde kepen köke doğru dikey olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 9a ve Şekil 9b'de sırasıyla atmosferik ve su altı kaynaklarına ait dikey eksende 0,5 mm aralıklarla gerçekleştirilen sertlik test bölgeleri, Şekil 9c'de ise test sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 8. ITAB geçiş bölgesi; a) Atmosferik kaynak, b) Su altı kaynağı
(The HAZ interface area; a) atmospheric welding, b) underwater welding)

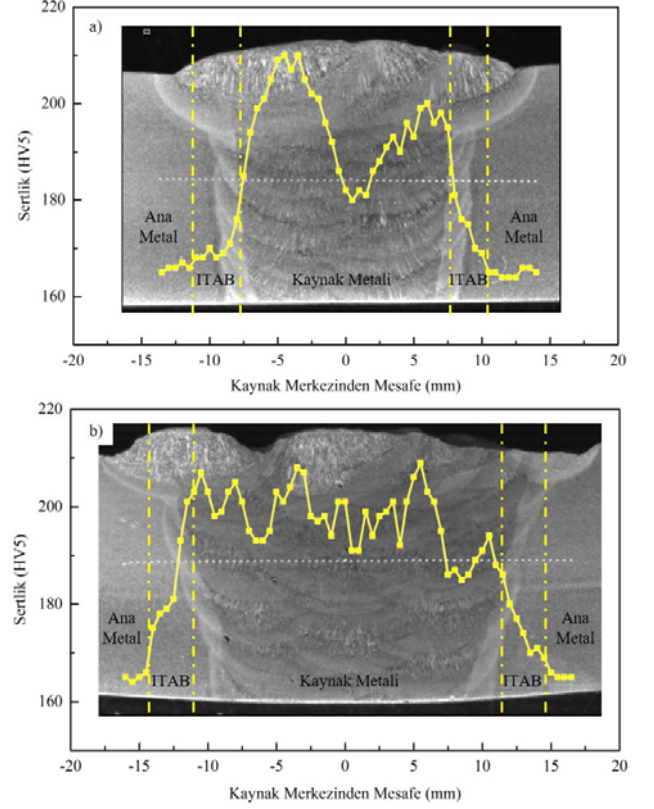


Şekil 9. Dikey eksen boyunca sertlik test bölgeleri; a) atmosferik, b) su altı kaynakları ve c) sertlik test sonuçları
(The hardness test locations along the vertical axis for a) atmospheric, b) underwater welding and c) hardness test results)

Atmosferik ortamda gerçekleştirilen kaynakta sertlik değerleri 177-198 HV arasında değişiklik gösterirken su altında gerçekleştirilen kaynakta artan soğuma hızı nedeniyle sertlik değerleri 188-211 HV aralığında ölçülmüştür. Aynı şekilde, İmdat ve arkadaşları [27] tarafından yapılan çalışmalarda da su altında yapılan kaynaklı birleştirmelerin sertliklerinin atmosferik ortamda yapılanlara nazaran sert olduğu raporlanmıştır. Şekil 10'da ise ana metalden kaynak metaline doğru 0,5 mm aralıklarla yatay eksende gerçekleştirilen sertlik test sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde her iki kaynak içinde en düşük sertlik değerlerinin ana malzemede sonra sırasıyla ITAB ve kaynak metalinde olduğu görülmüştür. Öte yandan atmosferik ortamda kaynak edilen plakanın orta bölgelerine doğru poligon ferrit miktarının arttığı ve buna bağlı olarak da sertlik değerlerinin 210 HV'den 180 HV'ye düştüğü görülmektedir. Fakat bir sonraki pasoya doğru gidildikçe tavlama etkisinin kaybolması nedeniyle sertlik değeri ergime sınırına doğru tekrardan artış gösterdiği görülmektedir. Su altında birleştirilen plakada ise bir sırada 2 paso yerine 3 paso olmasından dolayı orta bölgeye gidildikçe sürekli bir düşüşten ziyade, pasolar arası geçişlerde ölçüm yapılan bölgelerin ferrit morfolojisine ve dağılımına bağlı olarak kaynak metalinin sertlik değerinin 190-210 HV arasında değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak her iki kaynaklı plakanın da mikro yapı oluşumları sertlik değerleri ile doğrulanmış ve su altı kaynağında sertlik değerleri açısından A sınıfı kaynak dikişinin elde edildiği görülmüştür.

AWS A5.35 standardının farklı kabul kriterlerine göre su altı elektrodunun sahip olması gereken minimum mukavemet değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu bağlamda, atmosferik ortamda ve su altında birleştirilen plakaların çekme testi sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde gerilme-uzama diyagramlarının hepsinde testere dişi davranışı ve belirgin akma noktaları net bir şekilde görülmektedir. Öte yandan, atmosferik ortamda yapılan kaynaklı parçanın çekme mukavemeti ile su altında yapılan kaynaklı parçanın çekme mukavemeti arasında bariz bir fark görülmemiştir. Fakat, su altında yapılan kaynaklı parçanın % uzama değerlerinin, atmosferik ortamda kaynak edilmiş parçaya göre %48 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Buna göre aynı elektrod ile yapılmış kaynaklarda atmosferik ortamda yapılan kaynağın, su altında yapılan kaynağa göre daha yüksek sünekliğe sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun nedeni de su altı kaynaklı birleştirmelerinde aşırı hızlı soğuma ve buna bağlı olarak da

mikro yapıdaki değişim gösterilmektedir. Buna rağmen akma ve çekme değerleri su altı kaynaklı birleştirmelerinde, başarılı bir şekilde atmosferik şartlardaki kaynak metalinin özelliklerine ulaşmıştır. Aynı şekilde su altında elde edilen değerler AWS A5.35 standardının Seviye 1 kalite gerekliliklerini karşılamıştır.

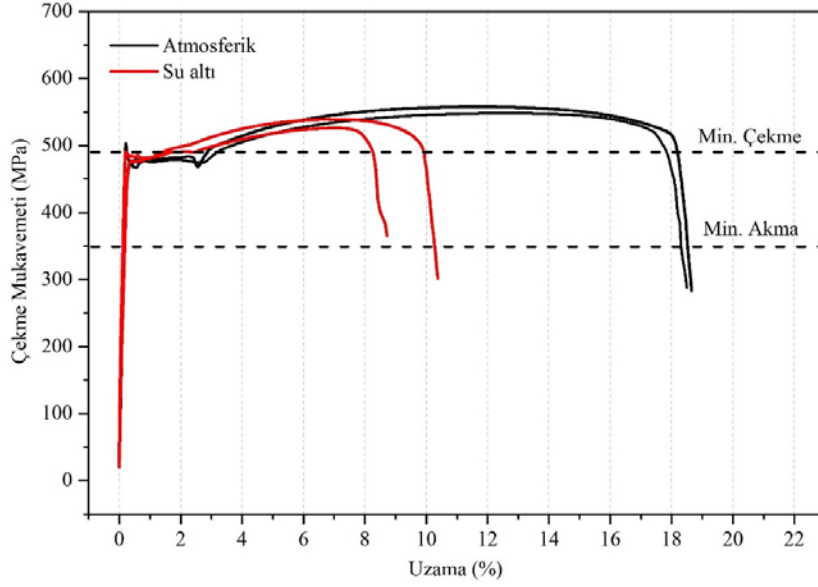


Şekil 10. Yatay eksen boyunca sertlik test sonuçları; a) Atmosferik b) Su altı
(The hardness test results along the horizontal axis; a) atmospheric b) underwater)

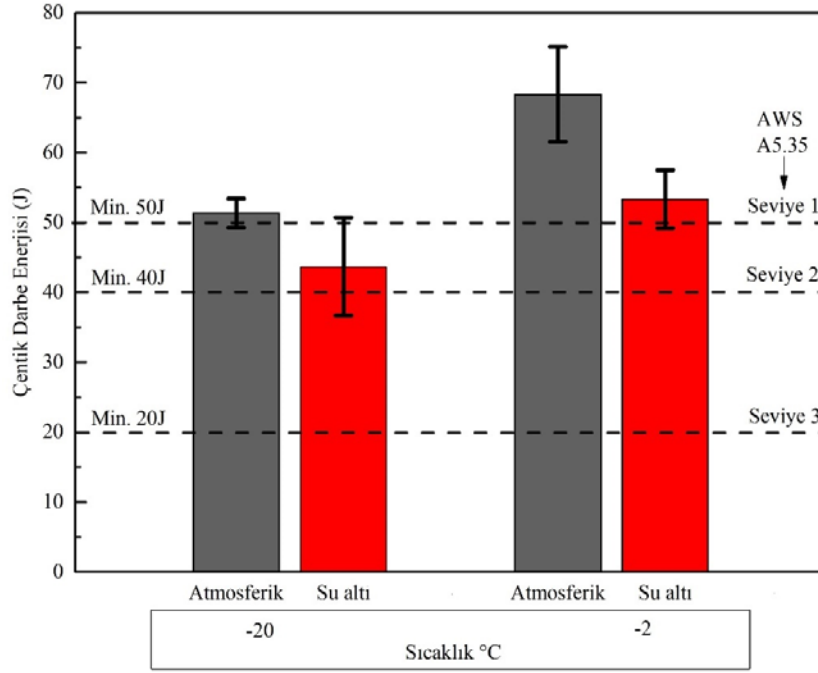
AWS A5.35 standardının test ve muayene kabul kriterlerine göre kullanılan su altı elektrodunun çentik darbe tokluk değerleri -2°C 'de ortalama Seviye 1 için min. 50J, Seviye 2 için min. 40J, Seviye 3 için min. 20J olmalıdır. Ayrıca, literatür çalışmaları incelendiğinde bazı çalışmalarda 20°C 'de çentik darbe dayanım testlerinin yapıldığının görüldüğü üzere, GeKaTec UW E7014 elektrodlarıyla da 20°C 'de çentik darbe dayanım testleri yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlerin sonuçları Şekil 12'de

Tablo 6. AWS A5.35 standardına göre minimum gereklilikler (The minimum requirements acc. to AWS A5.35)

	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Çentik Darbe Enerjisi (J/ -2°C)
Seviye 1	Min. 350		Min. 8	Min. 50
Seviye 2	Min. 320	Min. 490	Min. 6	Min. 40
Seviye 3	Min. 320		Min. 4	Min. 20



Şekil 11. Farklı ortamlarda kaynak edilmiş plakaların gerilme- uzama diyagramları (Tensile stress-strain curves of the plates welded in different environment)



Şekil 12. Çentik darbe test sonuçları (Charpy impact test results)

verilmiştir. Buna göre su altında birleştirilen plakalardan elde edilen sonuçlar, çalışma kapsamında özel olarak geliştirilen GeKaTec UW E7014 elektrodunun Charpy-V darbe dayanımı değerlerinin standardın belirttiği Seviye 1 değerlerini karşıladığını göstermektedir. Test sıcaklığının standardın sınıflandırma için belirttiği -2°C 'den -20°C 'ye düşmesi ile çentik darbe enerjisi yaklaşık olarak %17 oranında azalma göstermiştir. Ayrıca, su altında birleştirilen plakaların -2°C ve -20°C 'de gerçekleştirilen çentik darbe testlerinde, atmosferik ortamda birleştirilmiş kaynaklara

göre sırasıyla %22 ve %14 oranında daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada su altı elektrodlarının sınıflandırılmasında kullanılan AWS A5.35 standardına uygun ve bu standardın gerekliliklerini karşılamak üzere geliştirilen GeKaTec UW E7014 Rutil elektrodları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar AWS A5.1 E7014 normuna sahip elektrodlarla atmosferik

ortamda yapılan kaynağın mikro yapı ve mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak;

- Atmosferik ortamda birleştirilen plakanın görsel ve radyografik muayenelerinde herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiş olup, su altında birleştirilen plakada ilgili standardın kabul kriterleri içerisinde olan gözenek ve cüruf hatası tespit edilmiştir.
- Atmosferik ortamda birleştirilen plakaya kıyasla, su altında birleştirilen plakanın mikro yapısında hızlı soğumaya bağlı olarak; kaynak metalindeki tavllanmış bölgelerin daha az olduğu ve buna bağlı olarak da kolonsal bölgelerin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, su altında birleştirilen plakanın ITAB genişliğinin atmosferik ortama kıyasla yaklaşık 2 kat daha dar olduğu görülmüştür.
- Yatay ve dikey ekseninde yapılan sertlik ölçümlerine göre su altı sertlik değerlerinin atmosferik sertlik değerlerine kıyasla %6-8 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki ortamda da en düşük sertlik değerleri pasolar arası geçiş bölgelerinde yani tavllanmış bölgelerde tespit edilirken, en yüksek sertlik değerlerinin de ısıdan etkilenmeyen saf kaynak metalinde olduğu görülmüştür.
- Su altında birleştirilen kaynaklı plakaların akma ve çekme mukavemetlerinde atmosferik ortama kıyasla önemli bir değişiklik görülmemiştir. Fakat, su altında birleştirilen kaynaklı plakaların % uzama değerinin atmosferik kaynaklara kıyasla yaklaşık %48 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.
- Atmosferik ortama kıyasla su altında birleştirilen kaynaklı plakanın -2°C'de ve -20°C'deki darbe çentik değerleri sırasıyla %22 ve %14 oranında düşük çıkmıştır. Elde edilen bu değerler ile geliştirilen elektrodların AWS A5.35, Seviye 1 gerekliliklerini sağladığı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmayı “TÜBİTAK 1501- Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” kapsamında “3180212” numaralı ve “Savunma Sanayi Hedefli Su Altı Kaynak ve Teknoloji Ürünlerinin Geliştirilmesi” isimli proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Brown, R. T., Masubuchi, K., Fundamental Research on Underwater Welding, Welding Research Supplement, June, 178-188, 1975.
2. Çolak, Z., Destructive and Non-destructive Testing of the Low Carbon Steels Joined by Underwater Welding, Master Thesis, Karabük University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Karabük, 2018.
3. Rowe, M., Liu, S., Recent Developments in Underwater Wet Welding, Science and Technology of Welding and Joining, 6 (6), 387-396, 2001.
4. Layus, P., Kah, P., Martikainen, J., Underwater Welding for Arctic Offshore Structures and Shipbuilding, Conference Proceeding of the Annual Conference of Young Scientists and Specialists, Saint-Petersburg, Russia, 11-18, 19-21 June 2013.
5. Garašić I., and Kožuh Z., Underwater Welding and Cutting, Authorized Materials for Elective Course, 2013-2014. (<https://pdfcoffee.com/underwater-welding-and-cutting-pdf-free.html> Erişim Tarihi: 30.08.2021)
6. Tomkow, J., Fydrych, D., Wilk, K., Effect of Electrode Waterproof Coating on Quality of Underwater Wet Welded Joints, Materials (Basel), 13, 2947,1-15, 2020.
7. Çolak, Z., Ayan, Y., Kahraman, N., Weld Morphology and Mechanical Performance of Marine Structural Steel Welded Underwater in a Real Marine Environment, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109, 491–501, 2020.
8. Alajmi, E.F., Alqenaeci, A.A., Underwater Welding Techniques, International Journal of Engineering Research and Application, 7 (2), 14-17, 2017.
9. Çolak Z., Ayan Y., Kahraman N., Characterization of the Weld Zone of Grade AH36 Steel Ship Plate Joined at The Real Marine Conditions Through Underwater Welding, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 775-785, 2020.
10. Guo, N., Zhang, X., Xu, C., Chen, H., Fu, Y., Cheng, Q., Effect of Parameters Change on the Weld Appearance in Stainless Steel Underwater Wet Welding With Flux-Cored Wire, Metals, 9 (9), 951, 2019.
11. Badogiannis E., Tsiourva D., Papazoglou V.J., Pantelis D.I, Tsouvalis N.G., Corrosion and Its Effects on the Mechanical Properties of AH36 Steel Welds, 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, Varna-Bulgaria, 145-151, 2008.
12. Fydrych, D., Labanowski, J., Rogalski, G., Weldability of High Strength Steels in Wet Welding Conditions, Polish Maritime Research, 20 (78), 67-73, 2013.
13. Barnabas, S., Rajakarunakaran, S., Pandian, G.S., Buhari, A., Muralidharan, V., Review on Enhancement Techniques Necessary for the Improvement of Underwater Welding, Materials Today: Proceedings,45 (2) 1191-1195, 2021.
14. Labanowski, J., Development of Under-water Welding Techniques, Welding International, 25 (12), 933-937, 2011.
15. Aktaşoğlu, C., <https://prezi.com/hn5uymbxlzqu/sualt-kaynak/> Erişim Tarihi: 31.08.2021.
16. Yohanes, P., Muhayat, N., Triyono, “Effect of Water Depth on the Microstructure and Mechanical Properties of SS400 Steel in Underwater Welding, Key Engineering Materials, 772, 128-132, 2018.
17. Klett, J., Hecht-Linowitzki, V., Grünzel, O., Effect of the Water Depth on the Hydrogen Content in SMAW Wet Welded Joints, SN Applied Science, 2, 1269, 2020.
18. Sun, Y.L., Hamelin, C.J., Flint, T.F., Vasileiou, A.N., Francis, J.A., Smith, M.C., Prediction of Dilution and Its Impact on the Metallurgical and Mechanical Behavior of a Multipass Steel Weldment, Journal of Pressure Vessel Technology, 141 (6), 061405, 2019.

19. Demirbaş, U., Investigation of Weldability and Mechanical Properties of S355J2+N Materials by Electroslag Welding Method, *Düzce University Journal of Science and Technology*, 8, 940-950, 2020.
20. Shao, Y., Liu, C., Yan, Z., Li, H., Li, Y., Formation Mechanism and Control Methods of Acicular Ferrite in HSLA Steels: A Review, *Journal of Materials Science Technology*, 34 (5), 737–744 2018.
21. Farrar, R.A., Harrison, P.L., Acicular Ferrite in Carbon-Manganese Weld Metals: An Overview, *Journal Materials Science*, 22, 3812–3820, 1987.
22. Gao, W., Wang, D., Cheng, F., Di, X., Deng, C., Xu, W., Microstructural and Mechanical Performance of Underwater Wet Welded S355 Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 333-340, 2016.
23. Maksuti, R., Impact of the Acicular Ferrite on the Charpy V-Notch Toughness of Submerged Arc Weld Metal Deposits, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7 (8), 1149-1155, 2016.
24. Jorge, J.C.F., Souza, L.F.G., Evans, G.M., Influence of Multiple Reheating on the Microstructure and Impact Toughness of C-Mn-Ti Steel Weld Metals”, *IIW; Doc. II-A343e18*, 2018.
25. Johnson, M.Q., Evans, G.M., Edwards G.R., The Influence of Titanium on the Microstructures and Mechanical Properties of High Strength SMA Weld Metals, *ISIJ International*, 35 (10), 1222-123, 1995.
26. Bose-Filho, W.W., Carvalho, A.L.M., Strangwood, M., Effects of Alloying Elements on the Microstructure and Inclusion Formation in HSLA Multipass Welds, *Materials Characterization*, 58 (1), I29-39, 2007.
27. İmdat, K., Kaya, Y., Kahraman, N., An Investigation on Joinability of Grade A Ship Steel Through Shielded Metal Arc Welding Method in Underwater and Atmospheric Conditions, *Journal of Polytechnic*, 21 (3), 543-552, 2018.

