



## GMAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ HARDOKS500 - ST52 NUMUNENİN ÇEKME DAYANIMI VE SERTLİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Şeyma KORKMAZ , <sup>2</sup>M. Hüseyin ÇETİN , <sup>3</sup>Muhammed ADAR , <sup>4</sup>Abdulkadir ORAK 

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

<sup>1</sup>korkmaz.syma@gmail.com, <sup>2</sup>hctin@karabuk.edu.tr, <sup>3</sup>muhammedadarr@gmail.com,

<sup>4</sup>abdulkadiorak06@gmail.com

Geliş/Received: 26.08.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.11.2019

**ÖZ:** Makine konstrüksiyonunda yüksek dayanım, aşınma ve korozyon direnci gibi farklı endüstriyel gereksinimlerin karşılanması farklı malzemelerin birlikte kullanımı ile sağlanabilir. Özellikle metalik malzemelerin birlikte kullanımı sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Farklı metalik malzemelerin birlikte kullanımı, her iki malzemenin birleştirilebilme kabiliyetine bağlıdır ve birleştirilebilirlik kabiliyetinin analizi için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Hardoks500 ve St52 (S355) çeliğinin farklı akım ve voltaj parametreleri kullanılarak GMAK (Gaz Metal Ark Kaynağı) yöntemiyle kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. İki farklı çelik alaşımının kaynak edilebilirliği çekme testi, mikro sertlik ölçümü, SEM ve mikro yapı görüntüleme teknikleri ile incelenmiştir. Kaynaklanmış numunelere çekme deneyleri uygulanmış, elde edilen grafiklerde oluşan kritik noktalar ve numunelerin deformasyon karakteristikleri, belirlenen giriş parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Numunelerin mikro sertlik değerleri Vickers (HV) sertlik ölçme yöntemine göre ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; düşük akım ve voltaj değerlerinde Hardoks500 ile St52 malzemesinin kaynak edilebilirlik kabiliyetinin düşük olduğu ve sertlik dağılımının düzensiz bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek akım ve yüksek voltaj değerlerinde çekme eğrilerinin daha kararlı davranış ortaya koyduğu ve homojen bir sertlik dağılımı gerçekleştiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaynak edilebilirlik, Hardoks500, St52, GMAK

### Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500 – St52 Specimen Joined by GMAW Method

**ABSTRACT:** In mechanical construction, meeting different industrial requirements such as high strength, wear and corrosion resistance can be achieved by using different materials together. Especially the usage of metallic materials together is important for sustainability. The use of different metallic materials together depends on the joining ability of the materials and experimental studies are needed for the analysis of joining ability. In this study, the weldability of Hardox500 and St52 (S355) steel by GMAW (Gas Metal Arc Welding) method was investigated using different current and voltage parameters. Weldability of two different steel alloys were examined by tensile test, micro hardness measurement, SEM and microstructure imaging techniques. Tensile tests were applied to the welded samples and the critical points and deformation characteristics of the samples were evaluated according to the determined input parameters. Micro hardness values of the samples were determined by Vickers (HV) hardness measurement method. According to the results, it was determined that the welding capability of Hardox500 and St52 material was low at low current and voltage values and that the hardness distribution

occurred irregularly. It was determined that the tensile curves at high current and high voltage values exhibited more stable behaviour and a homogeneous hardness distribution occurred.

**Key Words:** Weldability, Hardox500, St52, GMAW

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaynak bağlantıları endüstriyel olarak büyük önem taşımakta ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Gemi inşaatı, basınçlı kaplar, demiryolları, damper ve vinç imalatları gibi özellikle ağır sanayi sektöründe kullanılan makine sistemlerinde bağlantıların büyük çoğunluğu kaynak işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Ağır sanayi makinelerinde oluşan masif gerilmeler, yüksek mukavemetli malzemeler ve bağlantılar ile karşılaşmaktadır. Fakat yüksek mukavemetli malzemelerin maliyet ve temin edilebilirlik problemi, farklı malzeme çiftlerinin birlikte kullanılabilirliği yaklaşımını doğurmaktadır. Aşınma ve gerilmenin yüksek olduğu konstrüktif uygulamalarda yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı tercih edilirken, aşınma ve gerilmenin daha düşük olduğu uygulamalarda ise nispeten düşük mukavemetli ve maliyet açısından daha uygun bir malzemenin kullanımı tercih edilebilir.

İki veya daha fazla malzemenin kullanılabilirliği için en uygun konstrüksiyonlardan birisi de ağır taşıtlardır. Günümüzde ağır taşıtların şase ve damper imalatında ağırlıklı olarak Hardoks serisi malzeme kullanılmaktadır. Hardoks malzeme her ne kadar mukavemetli ve aşınma dayanımı yüksek olsa da maliyeti de bir o kadar yüksektir. Bu sebepten dolayı nispeten daha düşük aşınma ve gerilmelerin olduğu bölgelerde, düşük mukavemet ve aşınma dayanımına sahip St52 malzemesi tercih edilebilir.

Literatürde, düşük maliyetle yüksek mekanik performans elde edilebilmesi için iki farklı malzemenin kaynak edilebilirliğinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Abioye ve arkadaşları (Abioye ve diğ., 2019), AISI 304 paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik malzemenin GMAK (gaz metal ark kaynak) bağlantısını farklı kaynak hızlarında elde etmişler ve hız parametresinin kaynak bölgesinin korozyon davranışına ve mikro yapısına etkisini incelemişlerdir. Sabit tel besleme hızı (84 mm/s), voltaj (22V) parametrelerinde üç farklı kaynak hızı (3 mm/s, 4,5 mm/s, 6 mm/s) uygulanarak hazırlanan numuneler korozyon testine tabi tutulmuş ve kaynak bölgesinin mikro yapısı EDX (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) analizi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda düşük kaynak hızında bağlantı bölgesinin korozyon direncinin arttığı görülmüştür. EDX analizi sonuçlarına göre ise kaynak hızı arttıkça delta ferrit hacminin arttığı belirlenmiştir.

Vijay ve arkadaşları (Vijay ve diğ., 2019), Al2024 ve Al6063'ün TIG (Tungsten Asal Gaz) kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin bağlantı bölgesinin mekanik özelliklerine etkisini deneysel çalışmalar ve görsel analizler ile incelemişlerdir. Voltaj, akım, kaynak ağzı açıklığı, gaz akış hızı parametreleri için üç farklı seviye belirlenmiş, parametre değişimlerinin bağlantı bölgesinin mekanik davranışına etkisi sertlik, çekme, korozyon testleri ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda optimum kaynak kabiliyeti 0,5 mm- 1,5 mm kaynak ağzı açıklığı, 70-80 amper akım ve 18-20 lt/dk gaz akış hızı parametrelerinde elde edilmiştir.

Sharma ve Dwivedi (Sharma ve Dwivedi, 2019), P92 çeliği ve 304H östenitik paslanmaz çeliğinin A-TIG (Aktif-Tungsten Asal Gaz) kaynağı ile birleştirilmesinde farklı kaynak tozlarının nüfuziyet derinliğine etkisini incelemişlerdir. Kaynak işlemi esnasında dört farklı kaynak tozu ( $Cr_2O_3$ ,  $MoO_3$ ,  $SiO_2$  ve  $TiO_2$ ) kullanılmış ve mikro yapı incelemeleri sonucunda en iyi penetrasyonu sağlayan kaynak tozunun  $TiO_2$  olduğu belirlenmiştir.  $TiO_2$  ile birleştirilen numunenin kaynak bölgesine yapılan çekme, çentik darbe ve mikro sertlik testleri ile kaynak bölgesinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, kaynak bölgesinin ana metale kıyasla daha yüksek çekme dayanımı (1042,6 MPa) gösterdiği ve numunenin 304H malzemesi (688,6 MPa) bölgesinden kırıldığı belirlenmiştir. Darbe dayanıklılık testinde ise, kaynak bölgesi ana metale kıyasla daha düşük darbe mukavemeti göstermiştir. Bu durumun sebebi, kaynak bölgesindeki temperlenmemiş martensitik yapı oluşumu ile açıklanmıştır.

Wang ve arkadaşları (Wang ve diğ., 2016), MIG kaynağı ile birleştirilmiş 6N01S-T5 ve 7N01P-T4 alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak ısısının baz metallere ve füzyon bölgesine etkisi mikro sertlik testi, çekme testi ve EBSD (Enerji

Geri Saçılım Elektron Kırınımı), TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu), mikro yapı görüntüleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 6N01S-T5 alaşımında ısıdan etkilenen iki farklı bölgenin oluştuğu (ITAB) ve baz metal bölgenin en düşük gerilme mukavemetine, füzyon bölgenin ise en yüksek uzama miktarına sahip olduğu görülmüştür. 7N01P-T4 alaşımında ise sadece bir ITAB oluştuğu, bu bölgenin daha düşük mukavemet ve sünek davranış sergilemesinin yanı sıra baz metalle benzer sertlikte olduğu belirlenmiştir.

Nie ve arkadaşları (Nie ve diğ., 2018), 6061-T6 ve A356-T6 alüminyum alaşımlarının darbeli MIG kaynağı ile birleştirilmesiyle elde edilen kaynak bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, kaynak işlemi farklı hareket hızlarında (8, 10, 12 ve 16 mm/s) fakat diğer kaynak parametreleri (tel besleme hızı, kaynak akımı, darbe süresi, darbe frekansı, kaynak voltajı) sabit tutularak gerçekleştirilmiş, hareket hızının kaynak bölgesine etkisi mekanik testler (çekme testi ve mikro sertlik ölçümü) ve mikro yapı (optik mikroskop, SEM, EPMA) görüntüleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, çekme mukavemeti ve mikro sertlik değerinin 12 mm/s hızda maksimum değere ulaştığı görülmüş, hareket hızı arttıkça çekme mukavemeti ve ergimiş bölge genişliğinin azaldığı gözlenmiştir.

Emre ve arkadaşları (Emre ve diğ., 2017), AISI 316L ve AISI 2205 paslanmaz çeliklerinin kaynak edilebilirliğini, elektrik ark kaynağı (EAK) ve gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemlerini kıyaslayarak araştırmışlardır. EAK yöntemi için östenitik (E308L-16) ve dubleks (E2209-17) elektrotlar, GMAK yöntemi için ise östenitik (TETRAV316L-G) ve dubleks (TETRAS2293L-G) ilave metalleri kullanılarak, farklı elektrot ve ilave metallerin kaynak kabiliyetine etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen kaynaklı numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve sonrasında mikro sertlik ölçümü yapılarak numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikro yapı analizi için SEM ve optik mikroskop (OM) görüntüleri incelenmiştir. Mekanik testler ve ölçümler sonucunda, dubleks elektrot ve ilave metalinin kullanıldığı kaynaklı bağlantıların akma mukavemeti, çekme mukavemeti, sertlik ve yüzde uzamasının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekme testi sonucunda kopmaların AISI 316L malzemesinin ITAB'ında(Isı Tesiri Altındaki Bölge) gerçekleştiği görülmüştür. Kaynak yöntemleri genel olarak değerlendirildiğinde ise GMAK yöntemi ile elde edilen kaynaklı malzemelerin EAK yöntemi ile elde edilen kaynaklı malzemelere kıyasla daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde GMAK yöntemi ile elde edilen yüzeylerde daha küçük boyutlu çukurcuk oluşumu görülmüş ve daha sünek bir yapı elde edilmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar da deneysel sonuçları destekler niteliktedir.

Okay ve arkadaşları (Okay ve diğ.,2015), elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş S235JR ve Hardoks400 çeliklerinin kaynak edilebilirlik kabiliyetini mekanik testler ve mikro yapı incelemeleri ile araştırmışlardır. Kaynak bağlantısının mekanik özelliklerinin analizi için çekme, çentik darbe ve eğme deneyleri yapılmış, ayrıca numunenin baz metal ve kaynak bağlantısı bölgelerinin sertlik değerleri ölçülmüştür. Bağlantı bölgelerinin mikro yapı analizi için SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Çekme deneylerinde kaynaklı numunenin, S325JR malzemesinin ITAB bölgesinden kırıldığı, darbe çentik testinde sıcaklık azaldıkça malzemenin gevrekleştiği, eğme testinde ise şekillendirilen numunede herhangi bir çatlak görülmediği, en düşük sertlik değerinin S235JR malzemesinin ITAB bölgesinden elde edildiği sonucuna varılmıştır. SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde daha çok küçük boyutlu çukurcukların oluşması sebebiyle malzemenin sünek kırılmaya maruz kaldığı ve S235JR malzemesinin ITAB bölgesinde daha büyük tane oluşumu sebebiyle kopmanın bu bölgede gerçekleştiği belirlenmiştir.

Özen ve arkadaşları (Özen ve diğ., 2016), Hardoks400 çeliklerinin elektrik ark kaynağı ile birleştirilebilme kabiliyetini mekanik testler ve metalografik incelemeler ile araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak çekme, çentik darbe testi, eğme testleri yapılarak kaynaklı malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş, daha sonra SEM ve EDS analizleri ile yüzey morfolojisi incelenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda kaynaklı numunenin ana malzemedan kırıldığı ve kaynak bölgesinin çekme dayanımının ana malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Eğme testi sonucunda ise kaynaklı malzemedede herhangi bir çatlama görülmemiştir. Ayrıca SEM görüntüleri analizinden, sıcaklık düştükçe kırılma mekanizmasının düzgün tane içi kırılma şeklinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Yapılan mekanik ve

metalografik incelemeler sonucunda Hardoks400 çeliğinin elektrik ark kaynağı ile başarılı bir şekilde kaynaklanabildiği belirlenmiştir.

Kaçar ve arkadaşları (Kaçar ve diğ., 2018), Hardoks400 ve AISI 304 çeliklerinin elektrik ark kaynağı ve gaz altı kaynak yöntemleri ile elde edilen kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada farklı iki yöntemle kaynaklanmış numunelerin mekanik özelliklerinin analizi için çekme, eğme ve Charpy çentik darbe testleri gerçekleştirilmiş, yüzey morfolojisi ve içyapı analizi için ise mikro yapı, SEM ve EDS görüntüleri incelenmiştir. Çekme testi sonucunda her iki yöntemle birleştirilen malzemenin de kaynak bölgesinden kırıldığı görülmüştür. Fakat eğme testi, darbe testi ve görsel analizler birlikte değerlendirildiğinde gaz altı kaynak yöntemi ile elde edilen kaynaklı bağlantının elektrik ark kaynağı ile elde edilen kaynaklı bağlantıya kıyasla daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir.

Hardoks500 malzemesi yüksek aşınma direnci, kolay şekillendirilebilme ve kaynak edilebilme kabiliyetine sahip olması sebebiyle endüstride ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir (Brezová ve diğ., 2014; Dudziński ve diğ., 2008; Konat ve diğ., 2006; Konat, 2019; Konat ve diğ., 2017). Aşınmaya maruz ve yüksek gerilme etkisi altındaki uygulamaların büyük çoğunluğunda, farklı özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanımı tercih edilmektedir. Bu sebeple yüksek mekanik özelliklere sahip Hardoks500 malzemesi ile nispeten daha düşük mekanik özelliklere sahip ve kolay temin edilebilen St52 malzemesinin birlikte kullanımı mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bir bölümünde alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çelik malzemelerin kaynak edilebilme kabiliyeti, bağlantı bölgesinin mekanik ve mikro yapı özellikleri analiz edilerek incelenmiştir. Fakat ağır taşıtların imalatında kullanılan Hardoks500 malzemesinin kaynak edilebilme kabiliyetinin incelendiği yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Hardoks500 - St52 çeliğinin kaynak edilebilme kabiliyetinin incelenmesidir. Hardoks500 - St52 kaynak bölgesinin mekanik davranışı ve mikro yapı özellikleri deneysel, istatistiksel ve görsel analizler ile araştırılmıştır. İlk olarak voltaj ve akım parametreleri için üç farklı seviye belirlenmiş ve belirlenen parametre değerlerinde elde edilen numuneler çekme testi ve sertlik testine tabi tutulmuştur. Deney sonrasında kaynak bölgelerinin SEM/OM görüntüleri elde edilerek mikro yapı oluşumları yorumlanmıştır. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak S/N oranı belirlenerek deney esnasında kontrol edilemeyen (cihaz kalibrasyonu, titreşim vb.) faktörlerin sebep olduğu deneysel hata oranları belirlenmiştir. Voltaj ve akım parametrelerinin deney sonuçlarına etkisi ise ANOVA ile analiz edilerek, kaynak kabiliyetine en çok etki eden parametre belirlenmiştir. İstatistiksel analizler ile deney numunelerinden elde edilen yüzey görüntüleri kıyaslanarak yapılan analizlerin doğruluğu teyit edilmiştir.

#### MALZEME VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Yapılan deneylerde Çizelge 1'de kimyasal bileşenleri verilen Hardoks500 çelik ile St52 (S355) çelik malzemeler kullanılmıştır. Kaynak işleminden önce malzemelerin karbon eşdeğerleri hesaplanmış ve malzemeler uluslararası standartlarca belirlenmiş sıcaklık değerlerinde (150 °C-250 °C arası) ön tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede malzemelerin ısıya maruz kalan bölgelerinde martenzit fazının artışı ve buna bağlı olarak gerçekleşen çatlak oluşumu önlenmiştir (Çam ve diğ., 1999; Kaçar ve diğ., 2018; Yılmaz, 2010). Birleştirme işlemi ~ 690 MPa akma ve ~ 900 MPa çekme dayanımına sahip çelik tel elektrot malzeme kullanılarak gaz metal ark kaynağı (GMAK) metoduyla (Şekil 1) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Malzemelerin Ağırlıkça % Kimyasal Bileşimi

*Table 1. Chemical composition of materials (wt.%)*

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe	C <sub>eş</sub>
Hardoks500	0,30	1,62	0,78	1,12	0,22	0,26	0,020	0,010	Kalan	<b>0,86</b>
St52	0,20	1,60	0,25	0,24	-	-	0,035	0,032	Kalan	<b>0,51</b>



Şekil 1.GMAK kaynak makinesi

Figure 1.GMAW welding machine

Çizelge 2. Kaynak Parametreleri

Table 2. Welding parameters

Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Süresi (s)	Tel Besleme Hızı (mm/dk.)	Kaynak Kalınlığı (mm)
180	26,6	30	~720	10
190	27,2			
200	27,8			

Deneyisel çalışma için, tel besleme hızı (720 mm/dk.) sabit tutularak 3 farklı voltaj ve akım parametresi belirlenmiş ve bu parametrelere göre tam faktöriyel deney tasarımı ile 9 farklı deney koşulu oluşturulmuştur. Tam faktöriyel tasarıma göre elde edilen parametreler Çizelge 3'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3'te Eşitlik 1'e göre hesaplanan kaynak bölgesine aktarılan enerji değerleri de verilmiştir. Eşitlik 1'de "V" ark voltajı değerini (volt), "I" kaynak akım değerini (amper), "s" ise zamanı (saniye) temsil etmektedir (Çetin ve diğ., 2018).

$$\text{Kaynak Enerjisi (Joule)} = V \cdot I \cdot s$$

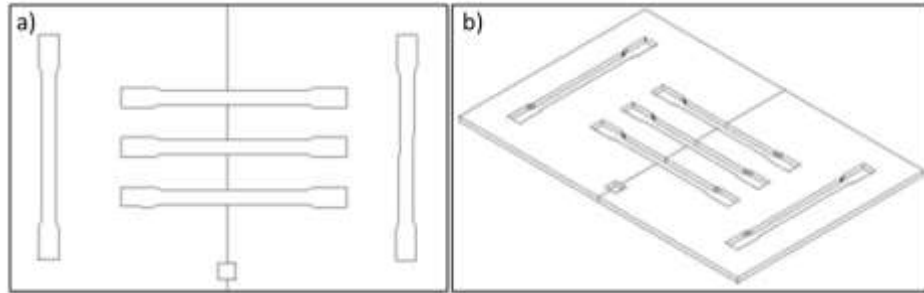
(1)

Çizelge 3. Tam faktöriyel deney tasarımı

Table 3. Full factorial experimental design

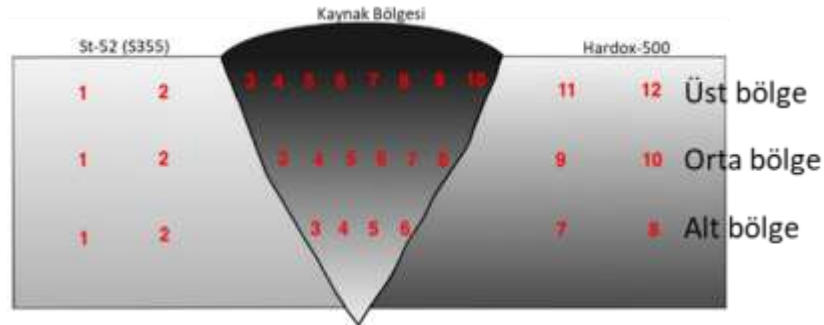
Deney Numarası	Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Süresi (s)	Kaynak Enerjisi (Joule)
1	180	26,6	30	143640
2	180	27,2	30	146880
3	180	27,8	30	150120
4	190	26,6	30	151620
5	190	27,2	30	155040
6	190	27,8	30	158460
7	200	26,6	30	159600
8	200	27,2	30	163200
9	200	27,8	30	166800

Kaynak işlemi uygulanmış çelik malzemelerin mekanik özellikleri, çekme deneyleri ve mikro sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Çekme testi Shimadzu Autograph AGS-X Universal test cihazı (100 kN) ile oda sıcaklığında TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri için hazırlanan numuneler, Şekil 2’de şematik olarak gösterilen geometride plazma ile kesilerek elde edilmiştir. Vickers mikro sertlik (HV) testi ise Bruker UMT Universal sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, 15 saniye süreyle 0,5 kg yük altında uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin üst-orta ve alt bölgesi olmak üzere 3 farklı konumdan sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Her bir kademedeki St52 malzeme – kaynak bölgesi – Hardoks500 malzeme bölgesinde mikro sertlik değerleri alınmıştır. Ölçüm alınan noktalar ve ölçüm noktası sayısı Şekil 3’de gösterilmiştir. Kaynak bölgesi mikro yapısının görsel analizleri için optik mikroskop (OM-Nikon Ters Metalurjik Mikroskop) ve taramalı elektron mikroskopundan (SEM-Carl Zeiss Gemini FESEM) elde edilen görüntüler kullanılmıştır.



Şekil 2. Kaynaklanan ve üzerinden çekme numuneleri çıkartılan parçaya ait (a) üstten görünüş ve (b) perspektif teknik resimler

Figure 2. (a) Top view and (b) perspective technical drawings of the welded and extruded specimen



Şekil 3. Sertlik ölçüm noktaları

Figure 3. Hardness measurement points

DeneySEL sonuçların analizi için varyans analizi (ANOVA) ve korelasyon yöntemleri ile parametreler arasındaki ilişki incelenmiş, Taguchi yöntemi ile de giriş parametreleri optimize edilmiştir. Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin uygulanmasında Minitab paket programı kullanılmıştır. Korelasyon katsayısı hesabı Eşitlik 2 dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 2’de r korelasyon katsayısını, X ve Y ise incelenen parametrelere ait sayısal değerleri ifade etmektedir. Parametre optimizasyonunda sinyal/gürültü (S/N) oranı dikkate alınarak, Eşitlik 3’de matematiksel modeli verilen “en yüksek en iyi” yaklaşımına göre gerilme ve sertlik deneyi sonuçları değerlendirilmiştir (Nalbant ve diğ., 2007). Eşitlik 3’de n değeri toplam deney sayısını, y değeri de deneysel sonucu ifade etmektedir.

$$r = \frac{\sum(xy) - (\sum x)(\sum y) / n}{\sqrt{(\sum x^2 - (\sum x)^2 / n)(\sum y^2 - (\sum y)^2 / n)}} \quad (2)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

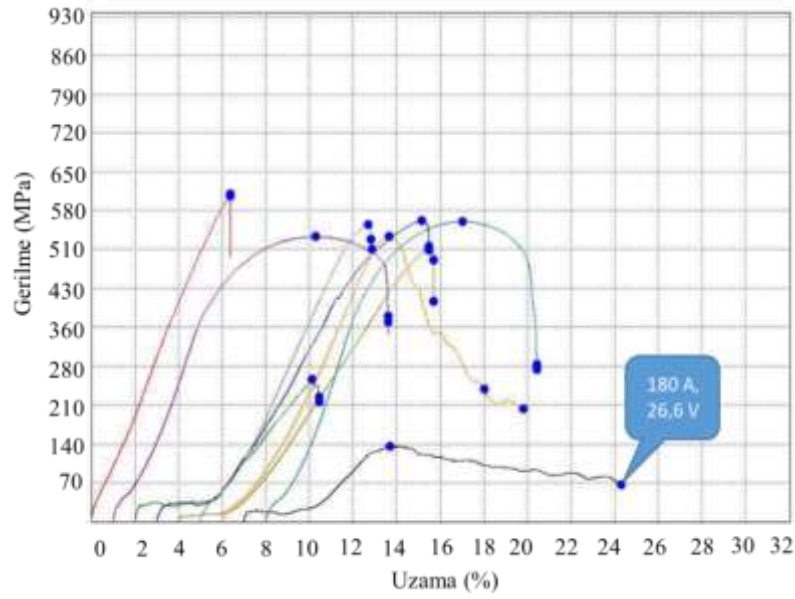
## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Çekme deneylerinden elde edilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  grafikleri Şekil 4'te, her bir deney koşulu için elde edilen maksimum gerilme değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre 180 A, 26,6 V deney koşulu (1 numaralı deney – Şekil 5) hariç bütün deneylerde deformasyonun kaynak bölgesi dışında oluştuğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Kaçar ve arkadaşlarının çalışması referans alınarak kıyaslanmıştır (Kaçar ve diğ., 2018). Referans alınan çalışmada numunelerin kaynak bölgesinden kırıldığı belirlenmiştir. Hardoks500 malzemesinin şekillendirilebilme ve kaynak edilebilme kabiliyetinin Hardoks400'den daha iyi olması sebebi ile mevcut çalışmada deformasyonlar kaynak bölgesi dışında gerçekleşmiştir (Sarıgün, 2016).

Şekil 4'te verilen grafiklerde sadece 1 numaralı deney koşuluna ait grafiğin kararlı bir davranış göstermediği görülmektedir. Çizelge 4'te 1 numaralı deney için ölçülen maksimum gerilme değeri 290,346 MPa'dır. Deneylerde kullanılan malzemelerin maksimum gerilme değerleri; St52 malzeme için ~500 MPa, Hardoks500 için ~1400 MPa ve kaynak teli için ~900 MPa'dır. Belirtilen 3 malzemenin kaynak ortamında oluşturacağı kompozit yapının gerilme değerinin 290 MPa değerinden yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu sebeple 1 numaralı deney koşulu, kaynak bölgesinde yeterli penetrasyonun gerçekleşmemesi sonucu kaynak edilebilirlik açısından olumsuz sonuç vermiştir. Bu durum 180 A ve 26,6 V kaynak parametrelerinin bağlantı için yeterli kaynak enerjisi sağlayamadığını göstermektedir. Tekrarlı deneylerde de (Şekil 5) benzer sonuçların elde edilmesi parametrelerin yetersizliğini doğrulamaktadır. 2 numaralı deneyde ise (180A, 27,2V) deformasyon çizgisinin ITAB bölgesinden (Şekil 6.c) başlayarak St52 (S355) malzemeye doğru ilerlediği görülmektedir. 1 ve 2 numaralı deneyler hariç diğer bütün deneylerde ise deformasyonun kaynak ve ITAB bölgesinin dışında, St52 malzeme bölgesinde ve sünek bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 6.d'de görülen kırılma davranışı 3-9 numaralı deneylerin hepsinde benzer şekilde gerçekleşmiştir. Bu duruma bağlı olarak 180 A deney koşulunda voltaj artışının etkisiyle kabul edilebilir kaynaklı bağlantısı gerçekleştirilebilmektedir. 190 A ve 200 A deney koşullarında ise belirlenen bütün akım değerlerinde kaynaklı bağlantı emniyetli bir şekilde sağlanabilmiştir.

Çizelge 4'te verilen maksimum çekme gerilmesi değerlerine bakıldığında, St52 bölgesinde gerçekleşen deformasyonlarda değerlerin 480 MPa ile 640 MPa arasında oluştuğu görülmektedir. St52 malzemesinin çekme gerilmesi değerinin 500 MPa olduğu dikkate alındığında, deformasyon oluşan bölgelerde kaynak ısısına bağlı olarak içyapı değişimi gerçekleştiği iddia edilebilir. Kaynak kompozisyonunu oluşturan metallerin yüksek mukavemet değerleri sebebiyle kaynak bölgesine aktarılan yüksek miktarda enerji, kaynak bölgesi dışındaki malzemenin mekanik özelliklerini yaklaşık %20 oranında değiştirebilecek kadar etki oluşturmaktadır.

Gerilme ile kaynak prosesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenerek, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar desteklenmiştir. Çekme gerilmesi değerleri (Çizelge 4) ile akım ve voltaj parametreleri arasındaki ilişki korelasyon analizi ile incelenmiştir. Akım ve voltaj parametreleri zaman parametresi ile çarpılarak her bir koşulda kaynak bölgesine aktarılan enerji miktarı belirlenmiş (Çizelge 3) ve korelasyon analizinde enerji miktarı ile çekme gerilmesi değeri arasındaki ilişki niceliksel olarak elde edilmiştir. Eşitlik 2'ye göre enerji ve gerilme arası korelasyon değeri +0,57 olarak bulunmuştur. Elde edilen değer kaynak bölgesine aktarılan enerji ile kaynaklı numunelerin maksimum gerilme değerleri arasında pozitif yönlü bir ilişkinin varlığını göstermektedir. İki değer arasındaki ilişkinin etki oranı ise %57 seviyesindedir. Enerji değişimi ile açıklanamayan %43'lük kısım ise kaynağın yapıldığı ortamdaki hava akımında artış, kaynak sonrası soğuma süresi ve elektrottaki nem oranı gibi faktörlerle açıklanabilir.



Şekil 4. Çekme deneyi sonuçları

Figure 4. Results of tensile test

Çizelge 4. Çekme deneyi ve sertlik ölçüm sonuçları

Table 4. Results of tensile test and hardness measurement

Giriş Parametreleri	Çekme Mukavemeti	Ortalama Sertlik
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$ : 290,346 MPa	370,67 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 143640 J		
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$ : 591,003 MPa	434 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 146880 J		
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$ : 613,144 MPa	456,33 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 150120 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$ : 504,427 MPa	416,08 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 151620 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$ : 512,216 MPa	443,75 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 155040 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$ : 531,797 MPa	467,75 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 158460 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$ : 615,850 MPa	410,58 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 159600 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$ : 489,630 MPa	430,5 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 163200 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$ : 637,536 MPa	456,92 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 166800 J		





Şekil 5. 180 A ve 26,6 V koşullarında tekrarlı deneyler  
Figure 5. Repeated experiments at 180 A and 26.6 V conditions



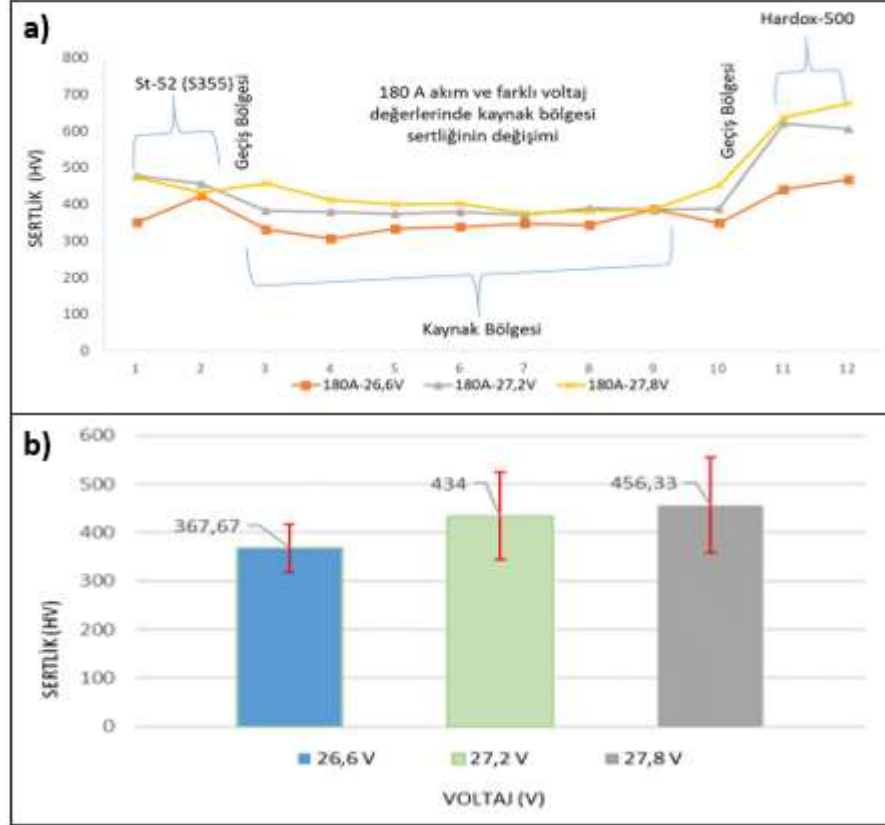
Şekil 6. (a) 200 A ve 27,8 V, (b) 180 A ve 26,6 V, (c) 180 A ve 27,2 V, (d) 180 A ve 27,8 V koşullarında elde edilen numuneler

Figure 6. Specimens obtained under conditions of (a) 200 A ve 27,8 V, (b) 180 A ve 26,6 V, (c) 180 A ve 27,2 V, (d) 180 A ve 27,8 V

Kaynaklı numunelerin mukavemetine etki eden önemli faktörlerden bir diğeri ise sertlik değeridir. 180A,190A,200A akım değeri için farklı voltaj değerlerinde ana malzemeler ve kaynak bölgesinin çekme mukavemeti ve sertlik değerleri Çizelge 4'te, sertlik değerlerinin değişim grafikleri Şekil 7-9'de verilmiştir.

Grafikler sadece üst bölgeden alınan değerlere göre oluşturulmuştur. Diğer bölgelerden elde edilen sonuçlar üst bölge ile benzer nitelik taşıdığı için dikkate alınmamıştır. Sertlik testlerinden elde edilen ölçüm sonuçlarına göre St52 ve Hardoks500 malzemelerinin kaynak bölgesine kıyasla daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. St52 malzeme bölgesinde sertlik değeri ~500 HV, Hardoks500 malzemede ~600 HV ve kaynak bölgesinde ise ~400 HV sertlik değerleri oluşmaktadır. Bu değerlere göre kaynak bölgesinde; Hardoks500'den %25 oranında, St52'den ise %20 oranında daha düşük sertlik oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda kaynak bölgesi sertliğinin ana malzemelere göre daha yüksek

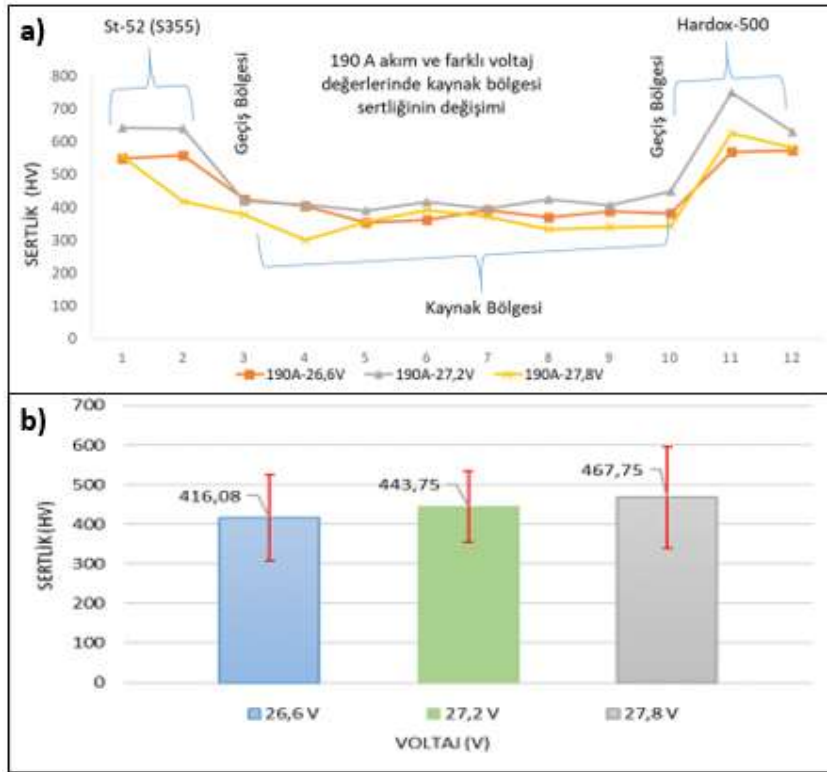
olduğu belirlenmiştir (Bertrand ve diğ., 2019; Fei ve diğ., 2019). Fakat bu çalışmada ana malzemelerin kaynak bağlantısına göre daha yüksek sertlikte olması, kaynak bölgesine yüksek ısı girdisi sebebiyle bölgede tane irileşmesi oluşumu ve bölgenin tokluk değerindeki düşüşle açıklanabilir (Eryürek ve Odabaş, 2007; Kaya, 2010).



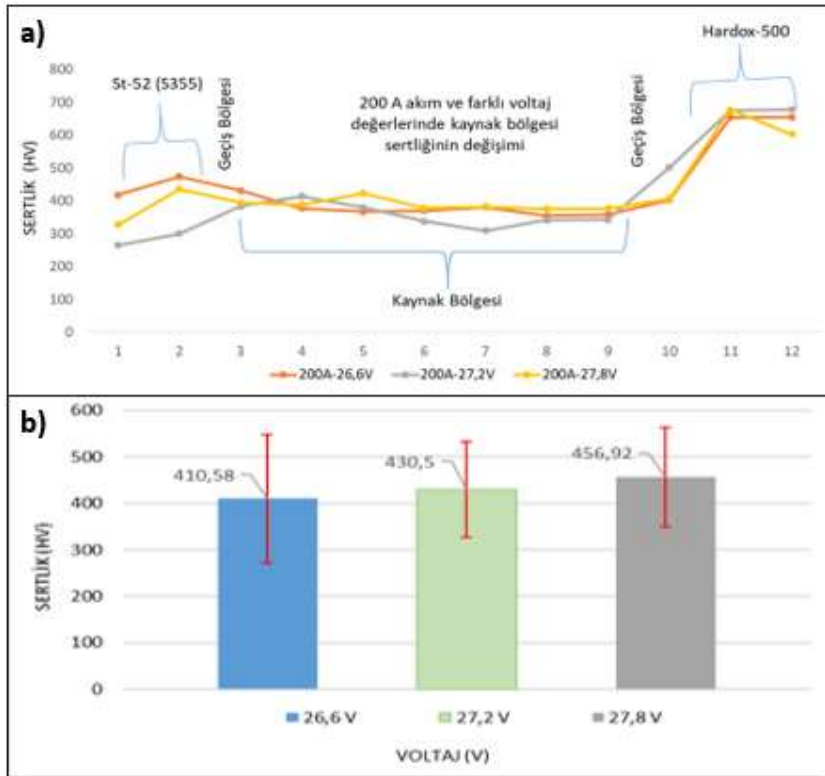
Şekil 7. 180 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri

Figure 7. At 180 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results

Kaynak bölgesine aktarılan enerji miktarı ile sertlik değeri arasındaki ilişki korelasyon yöntemi ile istatistiksel olarak da analiz edilmiştir. Analizden elde edilen sonuca göre enerji miktarı ile sertlik değeri arasında korelasyon değeri +0,50 olarak bulunmuştur. Bu durum enerji girdisi değişimi ile sertlik değerindeki değişim arasında %50 oranında bir anlamlılık olduğunu ve aralarında pozitif yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Açıklanamayan %50'lik kısım ise soğuma hızı ve malzemelerin ısı iletim kabiliyetiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 8. 190 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri  
Figure 8. At 190 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results



Şekil 9. 200 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri  
Figure 9. At 200 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results

Akım ve voltaj parametrelerinin gerilme ve sertlik parametreleri üzerindeki etki oranlarının sayısal olarak analiz edilebilmesi için ANOVA testi yapılmıştır. Gerilme parametresi için ANOVA sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5’e göre kaynak bölgesinin gerilme değerindeki değişimin, akım ve voltaj parametreleri ile %95,01 ( $R-Sq$  ( $adj$ )) oranında açıklanabildiği belirlenmiştir. Gerilme parametresi üzerindeki etkili parametrenin voltaj (%59,68) olduğu, akımın (%7,56) ise düşük oranda etkisi olduğu görülmektedir. Sertlik değeri için akım ve voltaj parametrelerinin etki oranları Çizelge 6’da verilen ANOVA sonuçları ile değerlendirilmiştir. Çizelge 6’ya göre akım ve voltaj parametrelerinin sertlik değişimini açıklayabilme oranı %89,61( $R-Sq$  ( $adj$ )) olarak belirlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliği üzerinde etkili parametrenin voltaj olduğu (%79), akımın (%3,20) ise düşük oranda etkisi olduğu görülmektedir. Akım ve voltaj parametreleri kıyaslandığında, akımın etkin bir şekilde hissedilmesi voltaj değerinin yüksekliğine bağlıdır. Bu sebeple voltaj arttıkça daha fazla akım kaynak bölgesine transfer edilerek kaynak enerjisi artırılmıştır. Bu duruma bağlı olarak voltaj değişiminin gerilme ve sertlik değişimi üzerinde yüksek etki göstermesi beklenen bir durumdur. Çizelge 5-6’da verilen diğer bir parametre de üstel etki oranlarıdır. Üstel etki, ilgili parametrenin değişimine bağlı olarak ortaya çıkan ve ikinci dereceden denklemlerle ifade edilebilen davranış oranını açıklamaktadır. Hem doğrusal hem de üstel etkinin yüksek değerlerde olması kararsızlık davranışının yüksek olması ile ilişkilendirilebilir. Bu sebeple anlamlı bir deney tasarımında doğrusal veya üstel etkiden herhangi birinin yüksek oranda çıkması beklenir. Çizelge 5 incelendiğinde, akım<sup>2</sup> parametresinin gerilme değişimi üzerinde %11,93 oranında, voltaj<sup>2</sup> parametresinin ise %13,32 oranında etkili olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak, voltaj parametresinin gerilme değişimi üzerinde doğrusal etkisinin yüksek olduğu, fakat akım parametresinin değişimi ile gerilme değerlerinin bazen doğrusal bazen ikinci dereceden değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Benzer durum Çizelge 6’da verilen sertlik değerleri içinde geçerlidir. Bu sonuca bağlı olarak, kaynak parametrelerinin ayarlanmasında sabit akım değişken voltaj ile oluşturulan çalışma koşullarında daha kararlı kaynak işlemi yapılabileceği görülmektedir. Çizelge 5-6’da verilen akım-voltaj etkileşiminin etki oranları gerilme değişimi için %5,62, sertlik değişimi için %5,44 değerlerindedir. Akım ve voltaj parametreleri bağımsız fiziksel büyüklükler olmaları sebebiyle etkileşimleri düşük etki göstermektedir.

**Çizelge 5.** Gerilme parametresi için ANOVA sonuçları

*Table 5. ANOVA results for stress parameter*

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ( $\alpha = \%5$ )	P	Etki Oranı (%)
Model	5	133526	26705,2	31,48	0,009	98,13
Lineer	2	91512	45755,9	53,94	0,004	67,25
Akım	1	10294	10293,9	12,13	0,040	7,56
Voltaj	1	81218	81217,9	95,74	0,002	59,68
Üstel Etki (2)	2	34368	17183,8	20,26	0,018	25,25
Akım*Akım	1	16238	16237,8	19,14	0,022	11,93
Voltaj*Voltaj	1	18130	18129,8	21,37	0,019	13,32
Etkileşim	1	7647	7646,8	9,01	0,058	5,62
Akım*Voltaj	1	7647	7646,8	9,01	0,058	5,62
Hata	3	2545	848,3			1,87
Toplam	8	136071				100
Anlamlılık		$R-sq = \% 98,13$		$R-sq$ ( $adj$ )= % 95,01		

**Çizelge 6.** Sertlik parametresi için ANOVA sonuçları

Table 6. ANOVA results for hardness parameter

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ( $\alpha = \%5$ )	P	Etki Oranı (%)
Model	5	6831,78	1366,36	14,80	0,025	96,10
Lineer	2	5850,61	2925,31	31,69	0,010	82,30
Akım	1	228,17	228,17	2,47	0,214	3,20
Voltaj	1	5622,44	5622,44	60,90	0,004	79
Üstel Etki (²)	2	594,65	297,32	3,22	0,179	8,36
Akım*Akım	1	513,71	513,71	5,56	0,099	7,23
Voltaj*Voltaj	1	80,94	80,94	0,88	0,418	1,14
Etkileşim	1	386,52	386,52	4,19	0,133	5,44
Akım*Voltaj	1	386,52	386,52	4,19	0,133	5,44
Hata	3	276,96	92,32			3,89
Toplam	8	7108,74				
Anlamlılık		<b>R-sq = % 96,10</b>		<b>R-sq (adj)= % 89,61</b>		

Gerçekleştirilen analizlerle akım-voltaj-kaynak enerjisi ile gerilme ve sertlik arasındaki ilişki nicel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kaynak işlemi sonrası maksimum gerilme ve sertlik değerlerini verecek akım ve voltaj değerlerinin belirlenmesi optimizasyon çalışması ile mümkündür. Çalışma kapsamında Taguchi optimizasyon yaklaşımı kullanılarak optimum akım ve voltaj değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Taguchi'nin S/N oranı değerlerine göre maksimum gerilme ve sertlik sağlayan optimum akım değeri 200A, optimum voltaj değeri ise 27,8 V'dir (Şekil 10). Kaynaklı numunelerin deformasyon davranışları açısından durum kıyaslandığında ise, 1 ve 2 numaralı deney hariç bütün deney koşulları optimum nokta ile benzer deformasyon davranışı göstermiştir. Bu sebeple, her ne kadar optimum değerler 200 A ve 27,8V olsa da, 3-8 numaralı deney koşulları da optimuma eşdeğer şartlar olarak nitelendirilebilir.

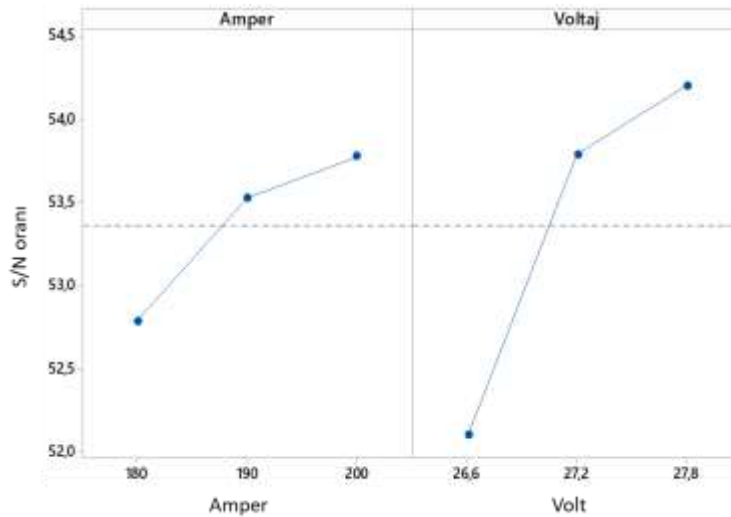
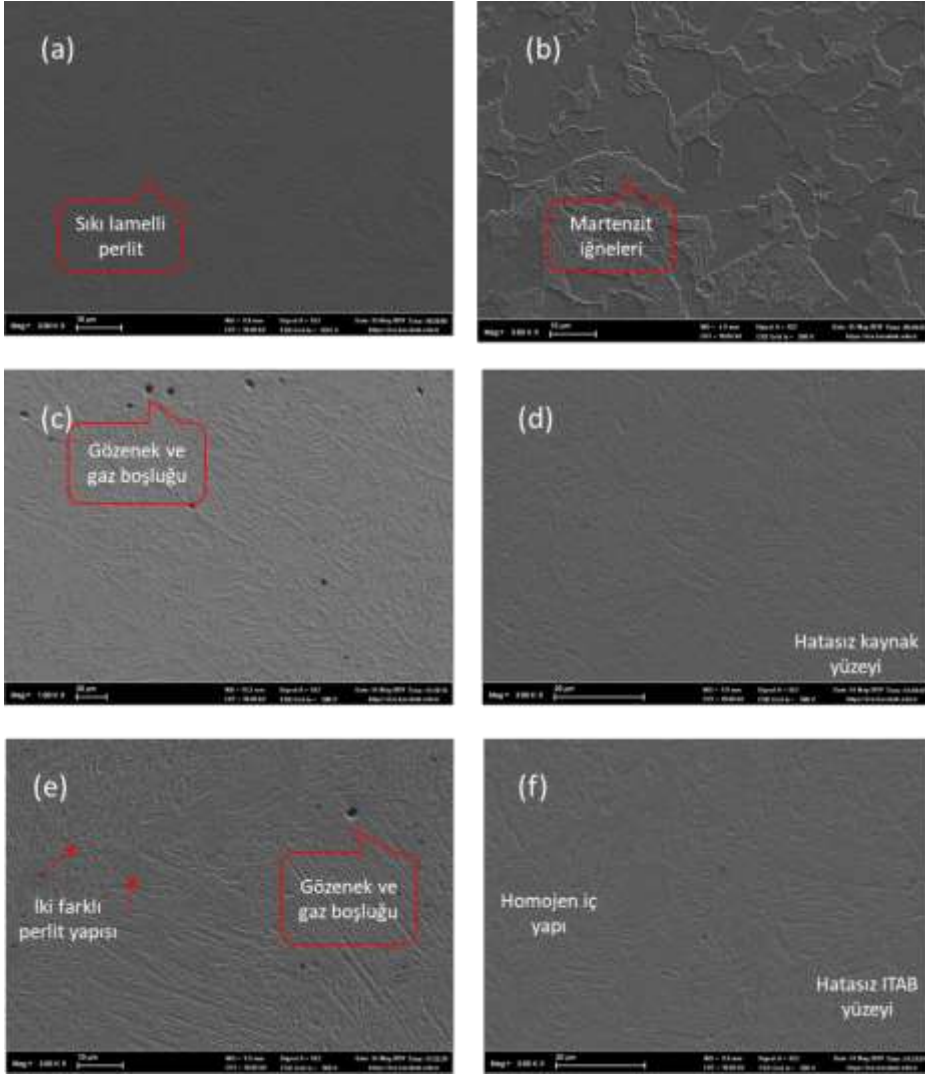
**Şekil 10.** S/N oranları

Figure 10. S/N ratios

Deney sonuçlarının görsel analizi için kaynak bağlantılarının içyapısı OM ve SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Görüntüler baz malzemeler, kaynak bölgesi ve geçiş bölgesi (ITAB) olmak üzere 3 farklı noktadan alınmıştır. En başarısız (180A- 26,6V) ve en başarılı (200A-27,8V) deney koşulları için elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'e göre St52 malzemenin içyapısında sıkı lamelli perlit fazı (Şekil 11.a), Hardoks500 malzemesinde ise martenzit fazı (Şekil 11.b) görülmektedir. Martenzit

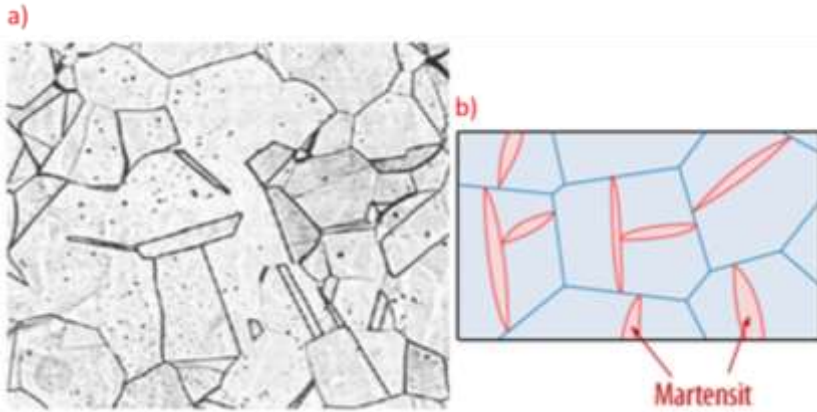
fazı literatür referans alınarak belirlenmiştir (Kaçar ve diğerleri, 2018). Fazın şekli ve oluşumuna ilişkin görseller Şekil 12'de verilmiştir (Çetin, 2019; Küçükyıldırım, 2019). Kaynak bağlantısının başarısız olduğu deney koşulunda (1 numaralı deney) gözenek oluşmuş (Şekil 11.c), kaynağın optimum şartlarda gerçekleştirildiği koşulda (9 numaralı deney) ise kaynak bağlantısında yüzey kusuru görülmemiştir (Şekil 11.d). Şekil 11.c'de görülen gözenekler, Şekil 6.b'de resmi verilen numunenin kaynak bölgesinde oluşan deformasyonu açıklamaktadır. Yetersiz kaynak enerjisine bağlı olarak penetrasyonun yeterli oranda gerçekleşmemesi sebebiyle oluşan gözenekler ve gaz boşlukları, çekme deneyi esnasında deformasyonun kaynak bölgesinde oluşmasına sebebiyet vermiş ve çekme eğrisi de kararlı bir davranış gösterememiştir. 1 numaralı deney koşulu hariç diğer deney şartlarında gözeneklilik kusuru görülmemiştir. 1 ve 9 numaralı deney koşullarında oluşan ITAB bölgeleri incelendiğinde, Şekil 11.e'de 1 numaralı deney koşulunda 2 farklı fazın oluştuğu, Şekil 11.f'de 9 numaralı deney koşulunda ise homojen bir içyapının oluştuğu görülmektedir. 2 farklı fazın oluşumu, kaynak bölgesine enerji girişi yetersizliği nedeniyle oluşan dengesiz ısı dağılımı ile açıklanabilir. 1 numaralı deney koşulu hariç diğer deney şartlarında ITAB'da homojen ve kusursuz bir içyapının oluştuğu gözlenmiştir.

1 ve 9 numaralı deney koşulları için elde edilen OM görüntüleri, St52 ile Hardoks500'ün kaynak edilebilirliği hakkında SEM görüntülerini destekler nitelikte bilgi vermektedir (Şekil 13-Şekil 14). Şekil 13.a'da 1 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden St52 malzemeye geçiş bölgesi, Şekil 13.b'de ise 1 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden Hardoks500 malzemeye geçiş bölgesi görülmektedir. Şekil 14.a'da 9 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden St52 malzemeye geçiş bölgesi, Şekil 14.b'de ise 9 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden Hardoks500 malzemeye geçiş bölgesi görülmektedir. Hardoks500 malzeme yüksek mukavemete sahip olduğu için her iki şekilde de belirgin geçiş çizgisi görülmektedir. Fakat Şekil 14.b'deki geçiş çizgisi Şekil 13.b'ye göre daha belirgin ve düzgün bir geometriye sahiptir. St52 malzemeye ait geçiş çizgisi Şekil 13.a'da düzensiz yapıda iken, Şekil 14.a'da belirgin ve düzgün bir geometriye sahiptir. Elde edilen sonuçlar kaynak bölgesine enerji girişi artışına bağlı olarak kararlı bir kaynak işleminin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Hardoks500 malzemenin her iki deney koşulunda da belirgin kaynak geçiş çizgisi oluşturması, Hardoks500 malzemenin kimyasal bileşiminde bulunan %0,78 Si, %0,22 Ni ve %0,26 Mo elementlerinin varlığı ile açıklanabilir. Si elementi oksidasyonu engelleyerek kaynağın kararlı bir davranış göstermesini sağlamıştır. Ni ve Mo elementleri ise malzemenin tane boyutunu küçülterek kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Vural ve diğ., 2003).



**Şekil 11.** SEM görüntüleri: (a) St52 baz malzeme, (b) Hardox500 baz malzeme, (c) 180 A, 26,6 V kaynak bölgesi, (d) 200 A, 27,8 V kaynak bölgesi, (e) 180 A, 26,6 V ITAB bölgesi, (f) 200 A, 27,8 V ITAB bölgesi.

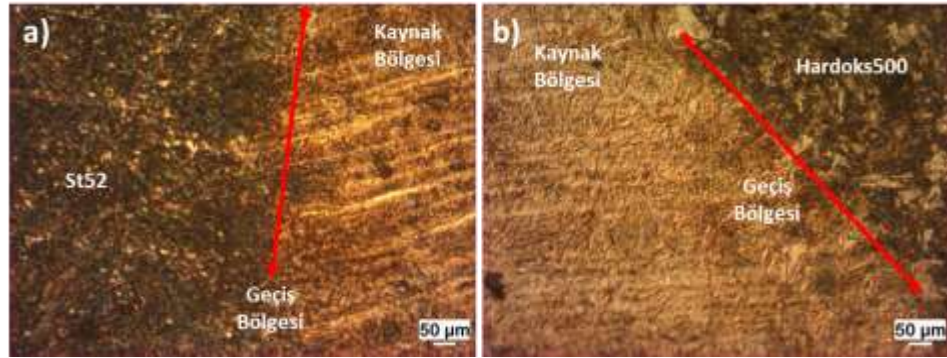
*Figure 11.* SEM images of (a) St52 base material, (b) Hardox500 base material, (c) 180 A, 26,6 V welding zone, (d) 200 A, 27,8 V welding zone, (e) 180 A, 26,6 V ITAB, (f) 200 A, 27,8 V ITAB.



**Şekil 12.** a) Martenzit fazının şekli ve b) fazın oluşumu (Çetin, 2019; Küçükıldırım, 2019)

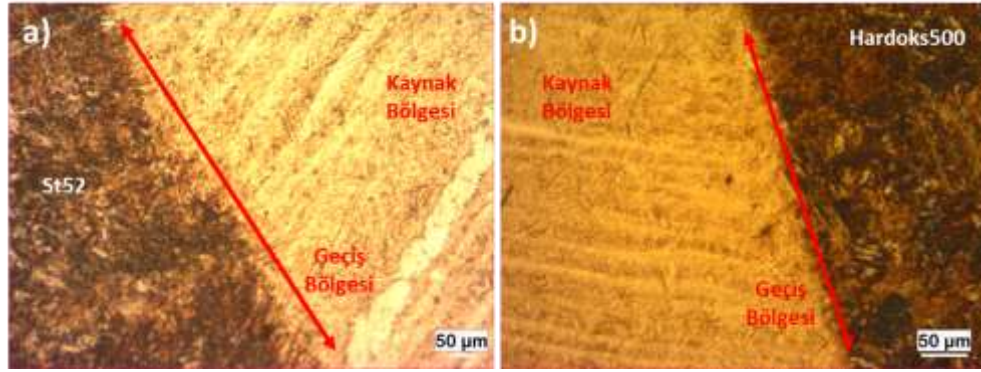
*Figure 12.a)* Shape of martensite phase and b) formation of phase





**Şekil 13.** 180 A ve 26,6 V koşulları için OM'den elde edilengeçiş bölgesi görüntüleri; (a) St52 ile kaynak bölgesi, (b) Hardoks500 ile kaynak bölgesi

*Figure 13.* Transition zone images obtained from OM for conditions of 180 A and 26,6 V; (a) Welding zone with St52, (b) Welding zone with Hardox500



**Şekil 14.** 200 A ve 27,8 V koşulları için OM'den elde edilen geçiş bölgesi görüntüleri; (a) St52 ile kaynak bölgesi (b) Hardoks500 ile kaynak bölgesi

*Figure 14.* Transition zone images obtained from OM for conditions of 200 A and 27,8 V; (a) Welding zone with St52, (b) Welding zone with Hardox500

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip Hardoks500 malzeme ile genel makine imalatında kullanılan St52 (S355) malzemenin GMAK yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Farklı akım ve voltaj parametrelerinde tam faktöriyel tasarıma göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanan numunelerin birleşme kabiliyeti çekme deneyleri ve sertlik ölçüm testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları istatistiki olarak analiz edilmiş ve SEM-OM görüntüleri ile nicel analiz sonuçları doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. En iyi sonuçların elde edildiği kaynak parametreleri 200 A ve 27,8 V'dir.
2. 180 A - 27,8 V altı değerlerde kararlı bir kaynak yapısı elde edilememiştir. 180 A - 26,6 V koşullarında elde edilen kaynaklı bölgenin iç yapısında gözeneklilik kusurları olduğu görülmüş ve çekme deneyinde deformasyon kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir.
3. Akım ve voltaj değerlerine bağlı olarak hesaplanan kaynak enerjisi ile kaynaklı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ve sertlik değerleri arasında sırasıyla +0,57 ve +0,50 oranlarında pozitif yönlü korelasyon ilişkisi bulunmaktadır.
4. ANOVA sonuçlarına göre; gerilme parametresi üzerinde voltaj parametresinin %59,68, akım parametresinin ise %7,56 oranında etkili olduğu, sertlik parametresi üzerinde ise voltaj parametresinin %79, akım parametresinin ise %3,20 oranında etkili olduğu belirlenmiştir.
5. Kaynak parametrelerinin ayarlanmasında, sabit akım değişken voltaj ile oluşturulan çalışma koşullarında daha kararlı kaynak işlemi yapılabileceği belirlenmiştir.



## KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Abioye, T. E., Ariwoola, O. E., Ogedengbe, T. I., Farayibi, P. K. ve Gbadeyan, O. O. (2019). Effects of Welding Speed on the Microstructure and Corrosion Behavior of Dissimilar Gas Metal Arc Weld Joints of AISI 304 Stainless Steel and Low Carbon Steel. *Materials Today: Proceedings*, 17, 871–877. doi:10.1016/j.matpr.2019.06.383
- Bertrand, R., Robe, H., Texier, D., Zedan, Y., Feulvarch, E. ve Bocher, P. (2019). Analysis of AA2XXX/AA7XXX friction stir welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 271(November 2018), 312–324. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.03.027
- Brezová, E., Mäsiar, \* -Harold ve Radič, -Pavol. (2014). Welding of High Strength Materials Used in the Manufacture of Special Equipment. *University Review*, 8(4), 51–61.
- Çam, G., Erim, S., Yeni, C. , ve Koçak, M. (1999). Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 78(6).
- Çam, G., Yeni, Ç., Erim, S., Ventzke, V. ve Koçak, M. (1998). Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 3(4), 177–189. doi:10.1179/stw.1998.3.4.177
- Çetin, A. (2019). Martensit dönüşümünün mikroskobik ölçekteki işleyişi. <https://muhendishane.org/kutuphane/malzeme-biliminin-fiziksel-temelleri/martensit-donusumunun-mikroskobik-olcekteki-isleyisi/> adresinden erişildi.
- Çetin, M. H., Korkmaz, Ş., ELGADDAFI, K. A. B. ve Çuğ, H. (2018). Östenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 1068–1081.
- Dudziński, W., Konat, Ł. ve Pękalski, G. (2008). Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels. *Archives of Foundry Engineering*, 8(2), 21–26. <http://www.afe.polsl.pl/index.php/en/404/structural-and-strength-characteristics-of-wear-resistant-martensitic-steels.pdf> adresinden erişildi.
- Emre, H. E., Kaçar, R., Bülbül, A. ve Manisalı, B. (2017). AISI 316L-AISI 2205 Farklı Paslanmaz Çelik Çiftinin Kaynak Kabiliyeti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 244–256.
- Eryürek, B. ve Odabaş, C. (2007). Çelikler İçin Örtülü Elektrot Seçimi, Gazaltı Kaynağı, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı (ss. 109–113). İstanbul: Askaynak Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticareti A.Ş. Yayını.
- Fei, Z., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Van Duin, S. ve Yu, Z. (2019). Microstructural characterization and mechanical properties of K-TIG welded SAF2205/AISI316L dissimilar joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 45(July), 340–355. doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.017
- Kaçar, R., Emre, H. E., İşineri, A. Ü. ve Najafiharehtapeh, A. (2018). Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 255–265. doi:10.17341/gazimmfd.406797
- Kaya, Y. (2010). An Investigation on Joinability of the AISI 304 and AISI 430 Stainless Steel by TIG, MIG and Shielded Metal Arc Welding Methods. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(3), 549–557.
- Konat, Ł., Pękalski, G. ve Oskwarek, M. (2006). Macro and Microstructural Properties of Welded Joints of Hardox 400 and Hardox 500 Steels. In *XIX Scientific Conference "Development Problems of Working Machines"* içinde (ss. 15–27).
- Konat, Ł. (2019). Structural aspects of execution and thermal treatment of welded joints of hardox extreme steel. *Metals*, 9(9). doi:10.3390/met9090915
- Konat, Ł., Białobrzaska, B. ve Bialek, P. (2017). Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9). doi:10.3390/met7090349
- Küçükyıldırım, B. O. (2019). *Mikro Yapı İncelemeleri Numune Hazırlama*.
- Nalbant, M., Gökkaya, H. ve Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28(4), 1379–1385.

doi:10.1016/j.matdes.2006.01.008

- Nie, F., Dong, H., Chen, S., Li, P., Wang, L., Zhao, Z., ... Zhang, H. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(3), 551–560. doi:10.1016/j.jmst.2016.11.004
- Okay, T., Najafgharehtapeh, A., Ertek Emre, H. ve Kaçar, R. (2015). S235JR – HARDOKS400 Çelik Çiftinin Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. 2. *Uluslar arası Demir Çelik Sempozyumu* içinde . Karabük.
- Özen, M., Emre, H. E., Najafgharehtapeh, A. ve Kaçar, R. (2016). HARDOKS400 Çeliklerin Elektrik Ark Kaynak Kabiliyeti, (November).
- Sarıgün, C. (2016). Hardox - Aşınma Direnciyle Öne Çıkan Özel Bir Çelik. 31 Ekim 2019 tarihinde <https://malzemebilimi.net/hardox-asinma-direnciyle-one-cikan-ozel-bir-celik.html> adresinden erişildi.
- Sharma, P. ve Dwivedi, D. K. (2019). A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 44(January), 166–178. doi:10.1016/j.jmapro.2019.06.003
- Vijay, S., Rajanarayanan, S. ve Ganeshan, G. N. (2019). Analysis on mechanical properties of gas tungsten arc welded dissimilar aluminium alloy (Al2024 & Al6063). *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). doi:10.1016/j.matpr.2019.06.136
- Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. ve Uzgider, E. (2003). Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 47–51.
- Wang, X., Mao, S., Chen, P., Liu, Y., Ning, J., Li, H., ... Han, X. (2016). Evolution of microstructure and mechanical properties of a dissimilar aluminium alloy weldment. *Materials and Design*, 90, 230–237. doi:10.1016/j.matdes.2015.10.134
- Yılmaz, T. (2010). *Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri*. Sakarya Üniversitesi.