



## AŞINMAYA KARŞI DİRENÇLİ MİILUX450 ÇELİĞİ İLE S235JR YAPI ÇELİĞİNİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ercan KAYA<sup>1\*</sup>, Mehmet Cengiz KAYACAN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Isparta,  
TÜRKİYE

Sorumlu Yazar: [ercankaya16@hotmail.com](mailto:ercankaya16@hotmail.com)

DOI: 10.57120/yalvac.1554214

### ÖZET

Üretimde hem maliyetleri düşürmek hem de yüksek performanslı ürünler üretmek için farklı birleştirme yöntemleri kullanılır. Farklı metallerin bir arada kullanılmasında en çok tercih edilen yöntemlerin başında kaynaklı birleştirme yöntemi gelir. Bu çalışmada, fiber lazer kaynak yöntemi ve robotik metal aktif gaz kaynak yöntemi kullanılarak 6 mm kalınlığında S235JR ve Miilux450 çeliği Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen uygun parametrelerle kaynatılmıştır. Kaynak sonrası numunelere çekme testi, 3 nokta eğme testi, mikro sertlik testi yapılmıştır. Son olarak numunelerin optik mikroskopla mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarının minitab programı ile istatistiksel analizi yapılmıştır. Sertlik testinde; ana malzeme, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgelerin vickers sertlikleri incelenerek optik mikroskop ile mikro yapıları incelenmiştir. Çekme deneyine ait parametreler varyans analizi ile incelendiğinde metal aktif gaz kaynağında en etkili parametrenin kaynak hızı, lazer kaynağında frekans olduğu görülmüştür. Lazer kaynağında ergimenin dar bir bölgede olması ve düşük ısı girdisi sayesinde sertlik değerinin metal aktif gaz sertlik değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ortalama sertlik değerlerinde lazer kaynak dikiş sertliği 511,9 HV iken gazaltı kaynak dikiş sertliği 255,3 HV'dir. Eğme testinde Miilux450 aşınmaya karşı dirençli çeliğin sert bir malzeme olması nedeniyle Miilux450 çelik numunelerinin hiçbirinde eğilme gerçekleşmezken eğilme 235JR üzerinde gerçekleşmiştir.

**Anahtar kelimeler:** S235JR, Miilux450, Lazer Kaynağı, Metal Aktif Gaz Kaynağı, Taguchi, Minitab.

### ABSTRACT

Different joining methods are used in production to both reduce costs and produce high-performance products. Welded joining method is one of the most preferred methods for using different metals together. In this study, using the fiber laser welding method and the robotic metal active gas welding method, the appropriate parameters of 6 mm thick 235JR and Miilux450 steel were welded using Taguchi method. Tensile test of samples after welding, 3 point bending test, hardness test and micro struction were performed. Statistical analysis of tensile test results with minitab program was performed. In the hardness test; the vickers hardness of the main material the welding zone and the heat effected zones were examined and the microstructures were examined with the optical microscope. When the parameters of the tensile test were examined with analysis of variance, it was seen that the most effective parameter in metal active gas welding was the welding speed and in laser welding the frequency. In laser welding, it was observed that the hardness value was higher than the gas hardness value due to the fact that the melting was in a narrow region and the low heat in put. In average hardness values, laser welding seam hardness is 511,9 HV and gas welding seam hardness is 255,3 HV. In the bending test, bending occurred on 235JR, while bending did not occur on any of the Miilux450 steel samples, since Miilux450 wear resistant steel is a hard material.

**Keywords:** S235JR, Miilux450, Laser Welding, Metal Active Gas Welding, Taguchi, Minitab.

### 1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan malzemelerin elde edilmesi kolay olmayıp; üretim aşamasında yüksek maliyetli enerji gereksinimi, bakımı, kullanım ömrü, işçilik gibi faktörler malzemeleri daha kıymetli kılmaktadır. Endüstriyel alanda kullanılan makine parçaları çevresel faktörler ve birbirleri ile olan temasları sonucu aşınmakta, güç kaybı ve yedek parça ihtiyacı doğmaktadır. Malzeme ve metalürji alanında yapılan çalışmalar aşınma sorununun

endüstride yıllık 2 milyar euro zarara yol açtığını ortaya koymuştur [1,2]. Aşınma; farklı malzemelerin (katı, sıvı, gaz) kullanılan malzemeler ile teması neticesinde, mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve sürekli ilerleyerek malzeme yüzeyinde istenmeyen yüzey hasarıdır [3]. Aşınmayı engelleyip kayıpları en aza indirmek için çelik malzeme üreticileri Miilux, Hardox, Dillidur, Xar, Fora vb. aşınmaya karşı dirençli çelikler üretmişlerdir. Üreticiler aşınmaya dirençli çeliklerin pahalı ürünler olmasından maliyeti azaltmak için farklı birleştirme yöntemleri kullanmışlardır. Birleştirme yöntemleri içinde kaynaklı birleştirme yöntemleri %20 tasarruf sağlamaktadır [4].

Yapı çelikleri (S235JR, ST52) ise geniş bir kullanım alanına sahip maliyeti düşük çeliklerdir. Aşınmaya dirençli çelikler ile yapı çelikleri kaynak kabiliyeti açısından kaynaklı birleştirmeye uygun olduklarından oluşturulacak yeni konstrüksiyon ve ekipmanlar hem üretimde enerji tasarrufu hem de üretim maliyetlerinin aşağı çekilmesini sağlayacaktır. Başta madencilik sektöründe sürtünen ve aşınan parçaların bir arada kullanıldığı daha düşük aşınma ve gerilmelere maruz bölgelerde farklı metaller kaynak yöntemleri ile bir arada kullanılabilir. Kullanılacak kaynak yöntemlerinin başında gazaltı kaynağı ve lazer kaynağı gelmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan lazer kaynak makineleri Nd: YAG lazeri, CO<sub>2</sub> lazeri, Disk lazerleri ve Fiber lazerlerdir. Yüksek güç, düşük ışın sapması, kompakt tasarım, esnek ışın iletimi, fiber-optik kablo sayesinde basit ışın iletimi, temiz kaynak yüzeyi, yüksek hassasiyet fiber lazerleri diğer lazerlerden ayıran üstün özelliklerdir [5]. Gazaltı kaynağı üç çeşit olup; Metal İnert Gaz (MIG) kaynağı, Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı ve Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağıdır [6]. Endüstriyel alanda mükemmel kaynak kalitesini elde edebilmek için robotik kaynak tekniği tercih edilmektedir.

Bu çalışma ile lazer kaynak ve gazaltı kaynak uygulamalarının uygun parametrelerle farklı çeliklerin kaynaklanabilirliği gösterilerek Miilux450 gibi pahalı bir çelik yerine aşınmanın daha az olduğu yerlerde, daha hesaplı bir malzeme olan düşük karbonlu S235JR çeliğinin kullanılabilirliği ile ekonomik kazanım amaçlanmıştır.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere aşınmaya dirençli çelikler ile düşük karbonlu çelikler farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilerek bir arada kullanılmasına yönelik uygulamalar yapılmış ve yeni uygulamalar da yapılmaya devam etmektedir. Ekonomiklik, maliyetleri düşürme, düşük enerji kullanımı, uzun ömürlü malzeme vb. özellikler çalışmalarda devamlılığı sağlamaktadır. Daha önceki yıllarda başarılı bir şekilde yapılmış kaynak uygulamalarından bazıları: Aşınmaya dirençli RAEX AR 400 çeliği ile ST37 yapı çeliği elektrik ark, MAG ve TIG kaynak yöntemiyle kaynatılmıştır. Karışım gazlı MAG kaynaklı numunenin çekme mukavemeti 436,61 MPa ile en yüksek çıkmıştır. Yüksek çıkma nedeni mikro yapıdaki dayanımı ve tokluğu arttıran asiküler ferrit miktarının fazlalığı ile açıklanmıştır [7]. Hardox 450 ile MAG kaynağında çekme deneyinde kopmaların kritik bölge olan ITAB'da gerçekleştiği, kaynak bölgesinde ısının ilerleme yönüne paralel tane yöneliminin gerçekleştiği belirtilmiştir [8]. Hardox 500 ile St-52 çeliğinin robotik gazaltı kaynağında gerilim ve akım değerleri arttığında kaynak kısımlarının çekme eğrilerinin daha kararlı olup sertlik deney sonuçlarının çekme sonuçları ile uyusuklarını belirtmiştir [9]. Hardox 450 robotik MAG kaynağında; CO<sub>2</sub> gazı kullanımında ısı girdisi arttığı için ITAB'da sertlik değerlerinde azalmaların gerçekleştiği, ITAB'da iri taneli östenit yapılar yoğun olarak görüldüğü belirtilmiştir [10]. Ramor600 çeliğini Taguchi L<sub>9</sub> deney dizaynına göre fiber lazer kaynağında en etkili parametrenin %34,26 ile lazer atış hızı olduğu belirtilmiştir [11]. Hardox 450- S355J2 robotik MAG kaynağında; 110SG ilave tel ile yapılan kaynaklı numunelerin sertlik değerleri diğer ilave teller ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek bulunmuş, kaynak bölgesi sertlik değerlerinin S355J2 ana malzemeden yüksek, Hardox 450 ana malzemeden daha düşük olduğu belirtilmiştir. Kullanılan farklı ilave kaynak metalleri sonucu farklı kaynak bölgesi mikro yapıları elde edildiği belirtilmiştir. SG3 ilave metalinin kullanıldığı kaynak bölgesinde ferritik ve martenzitik fazları, 110SG ilave metalinde aseküler ferrit ve temperlenmiş martenzit fazları, 307LSi ilave metalinde delta ferrit fazının oluştuğu belirtilmiştir. Her iki malzemenin ITAB'ında tane irileşmesi gerçekleştiği belirtilmiştir [12]. S355J2 yapı çeliğinin SG2 ilave teli kullanılarak farklı akım değerleri ile tek ve çift taraflı MIG gazaltı kaynağında; en iyi kaynak, akım değeri 260 A olan çift taraflı numunede elde edilmiştir. Akımın artması ile kaynak bölgesi ve ITAB sertlik değerinin arttığı, akım değeri 260 A olan tek taraflı numunenin sertlik değerinin 219.9 HV ile en yüksek olduğu belirtilmiştir [13].

Miilux çelikleri ülkemizde Miilux Yüksek Mukavemetli Çelik Üretim A.Ş. tarafından Manisa Organize Sanayi Bölgesinde ısıl işlem çelikleri olarak üretilmektedir. Miilux çelikleri aşınmaya dayanıklı çelikler ve zırh çelikleri olarak üretilmektedir. Literatürde yer alan Miilux çelikleri üzerine yapılmış çalışmaların tamamı zırh çelikleri üzerinedir. Miilux aşınmaya dayanıklı çelikler üzerine yapılmış çalışma ülkemizde yoktur. Bu nedenle ülkemizde üretilen aşınmaya dirençli çelikler üzerine yapılan bu ve benzeri tüm çalışmalar literatür açısından sonraki yapılacak tüm çalışmalara katkı sağlayacaktır.

Aşınmaya dirençli çeliklerin üretiminde işçilik, yüksek enerji ihtiyacı ve rekabetçi ortam gibi faktörler malzemeleri

daha kıymetli yapmaktadır. Aşınmaya dirençli çeliklerin pahalı olmasından maliyeti azaltmak için farklı birleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Tek bir malzeme ile istenilen her özellik karşılanamazken farklı özelliklere sahip malzemelerin beraber kullanılması ile istenilen özellikte bir malzeme üretilebilir. Böyle bir malzemeyi üretmenin en iyi yollarından biri kaynaklı birleştirmedir.

Bu çalışma ile lazer ve gazaltı kaynak uygulamalarının uygun parametrelerle farklı çeliklerin kaynaklanabilirliği gösterilerek Miilux450 gibi pahalı bir çelik yerine aşınmanın daha az olduğu yerlerde, daha hesaplı bir malzeme olan düşük karbonlu S235JR çeliğinin kullanılabilmesi ile ekonomik kazanım amaçlanmıştır. Bu çalışma ile elde edilen verilerin dikkate alınarak yapıldığı kaynak çalışmalarında kaynak kalitesi daha yüksek olacaktır.

Yapılan çalışmada Miilux450-S235JR çeliklerinin kaynaklanabilirliği araştırılmış olup; kaynak sonrası numunelere çekme testi, 3 nokta eğme testi, mikro sertlik testi yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarının minitab programı ile istatistiksel analizi yapılmıştır. Sertlik testinde; ana malzeme, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgelerin (ITAB) Vickers sertlik durumu incelenerek optik mikroskop ile mikro yapıları incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

Deneyel çalışmada 6 mm'lik Miilux450 ile S235JR çelikleri kullanılmıştır. SG2 kaynak teli ve çeliklere ait kimyasal (Tablo 1) ve mekanik özellikler (Tablo 2)'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Malzemelerin kimyasal özellikleri [14,15]

Numune	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Mo	B	Fe
S235JR	0,17		1,4	0,04	0,04	0,012	-	-	-	-	Kalan
Miilux450	0,26	0,7	1,7	0,025	0,01	-	1,3	0,8	0,5	0,005	Kalan
SG2	0,08	0,85	1,45	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tablo 2.** Malzemelerin mekanik özellikleri [14,15]

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik Değeri (HB)
S235JR	235	360-510	26	100-154
Miilux450	1100	1350	8	400-480
SG 2	min 420	500-640	22	-

### 2.2. Yöntem

Robotik Gazaltı (MAG) kaynağı ve fiber lazer kaynağı çift taraflı, kaynak ağızı açılmadan küt alın şeklinde, yatay pozisyonda (Tablo 3), (Tablo 4), (Tablo 5) ve (Tablo 6)'da verilen Taguchi L<sub>9</sub> yöntemine uygun 9'ar adet yapılmıştır. Çalışmada her bir kaynak türü için (Tablo 3)'te yer alan 3'er kaynak parametresi belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Gazaltı ve lazer kaynağı Taguchi parametre girdileri

Taguchi L <sub>9</sub> Parametre no	Gazaltı kaynak parametreleri			Lazer kaynak parametreleri		
	Gaz debisi (l/dk)	Kaynak hızı (mm/s)	Akım (A)	Güç (W)	Frekans (Hz)	Işın Genişliği (mm)
1	12	30	190	75	10	2,8
2	10	20	170	80	8	3
3	8	40	150	85	6	3,2

Optimum kaynak parametrelerinin belirlenebilmesi için (Tablo 4)'te yer alan Taguchi L<sub>9</sub> deney dizaynı seçilmiştir. Taguchi L<sub>9</sub> deney dizaynı sayesinde 3<sup>3</sup>=27 deney çalışması yerine 9 deneyle sonuca ulaşılabilmektedir. Ayrıca (Tablo 5)'te yer alan Taguchi L<sub>9</sub> dizaynı ile maliyet ve zamandan kazanmak amaçlanmıştır. Taguchi kalite karakteristiğinde Sinyal (Signal)-Gürültü (Noise) (S/N) oranı kullanılır. Taguchi çalışmasıyla bulunan sonuçlar

(S/N) oranına dönüştürülerek değerlendirilir. (S/N) oranı değerleri nominal değer iyi, küçük değer iyi ve büyük değer iyi şeklinde kalite değeri hedeflenen değere göre farklı şekillerde hesaplanıp analizleri yapılır. (S/N) oranı değerlerinden nominal, küçük ve büyük değer iyi kullanılması fark etmeksizin sonuç değerlerinden daha büyük olan (S/N) oranı daha iyi deney sonucu demektir. Deneysel çalışmalarda seçilen faktör seviyeleri arasında en yüksek (S/N) oranını gösteren değerler en iyi performansa sahiptir. Varyans analizi (ANalysis Of VAriance–ANOVA) hangi prosesin üzerinde hangi faktörlerin ne kadar etkili olduğunun istatistiki açıklanmasıdır. (S/N) oranı ve ANOVA procesteki optimum performansı bulmaya yardımcı olur [16].

**Tablo 4.** Deneyde kullanılan Taguchi yöntemi

Deney No	Malzeme	Kaynak Parametreleri		
		1	2	3
1	235jr-Miilux450	1	1	1
2	235jr-Miilux450	1	2	2
3	235jr-Miilux450	1	3	3
4	235jr-Miilux450	2	1	2
5	235jr-Miilux450	2	2	3
6	235jr-Miilux450	2	3	1
7	235jr-Miilux450	3	1	3
8	235jr-Miilux450	3	2	1
9	235jr-Miilux450	3	3	2

**Tablo 5.** Taguchi yöntemi ile belirlenen kaynak parametreleri

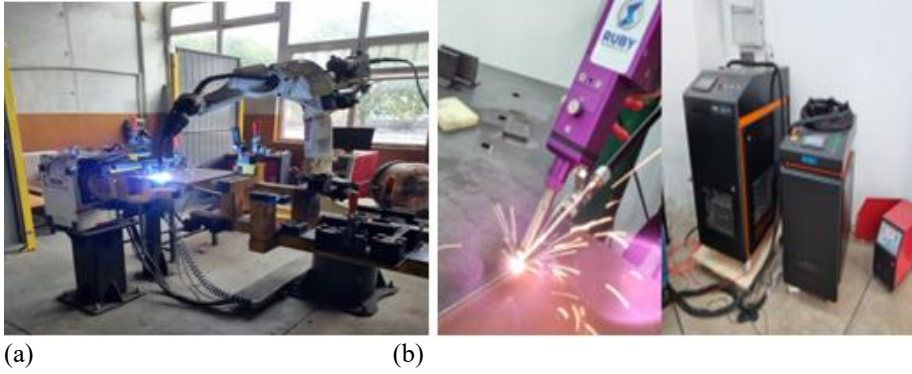
Deney No	Malzeme	Gazaltı Kaynak Parametreleri			Lazer Kaynak Parametreleri		
		Gaz debisi (l/dk)	Kaynak hızı (mm/s)	Akım (A)	Güç (W)	Frekans (Hz)	Işın Genişliği (mm)
1	235jr-Miilux450	12	30	190	75	10	2,8
2	235jr-Miilux450	12	20	170	75	8	3
3	235jr-Miilux450	12	40	150	75	6	3,2
4	235jr-Miilux450	10	30	170	80	10	3
5	235jr-Miilux450	10	20	150	80	8	3,2
6	235jr-Miilux450	10	40	190	80	6	2,8
7	235jr-Miilux450	8	30	150	85	10	3,2
8	235jr-Miilux450	8	20	190	85	8	2,8
9	235jr-Miilux450	8	40	170	85	6	3

**Tablo 6.** Gazaltı ve lazer kaynak parametreleri

	Gazaltı Kaynak Tekniği	Lazer Kaynak Tekniği
Parametrelerin Adı	Değeri	Değeri
Kullanılan Yöntem	Gazaltı (MAG)	Fiber Lazer Kaynak
Kaynak Makinesinin Marka Modeli	Gekamac / Webee P500L	RT-HW 1500
Robot Kaynak Kolunun Marka/Modeli	Otcfd-b6	-
İmalat Türü	Robotik Kaynak	Lazer Kaynak
Ana Malzemeler	235JR - Miilux450	235JR - Miilux450
Kaynak Akım Türü	DC	DC
Kutuplama (-/+)	Parça + / Torç -	-
Koruyucu Gaz	Habaş 212 Karışım Gazı (%2 Oksijen + %12 CO2 + Balans Argon Gazı İhtiva eder.)	Argon
Kaynak Pozisyonu	PA – Çift taraflı	PA – Çift taraflı

Dikiş Türü	Alın Dikiş (I-Dikiş)	Alın Dikiş (I-Dikiş)
Ek Tel / Dolgu Metalinin (Marka/Model)	SG 2 (TS EN ISO 14341-A)	SG 2 (TS EN ISO 14341-A)
Ek Tel Kimyasal Bileşimi	C:0,08/Mn:1,5/ Si0,85/ Bakır kaplı	C:0,08/Mn:1,5/ Si0,85/ Bakır kaplı
Ek Tel / Dolgu Metalinin (Çapı, mm)	1	1
Kaynak Aralık (mm)	1	2

Kaynak numunelerine (Şekil 1)'de robotik gazaltı ve fiber lazer kaynak işlemi yapılmıştır. Deney numuneleri kaynak ağızı açılmaksızın gerekli ön hazırlıklar yapılarak küt alın kaynağı olacak şekilde kaynatılmıştır.



Şekil 1. (a) Robotik gazaltı ve (b) fiber lazer kaynak işlemi

### 2.3. Test Numunelerinin Tahribatlı Muayeneye Hazırlanması

Çekme testi için kaynaklı numuneler TS EN ISO 6892, kaynaklı numuneler TS EN ISO 4136 standardına ve 3 nokta eğme numuneleri TS EN ISO 5173'e göre hazırlanarak su jeti kesimi ile çıkartılmıştır.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deney numuneleri çekme, üç nokta eğme, mikro yapı ve mikro sertlik deneylerine tabi tutulmuştur.

### 3.1. Çekme Testi Bulguları

Çekme testleri çekme hızı 1 mm/dk ve +20 °C'de yapılmıştır. Çekme testi sonucu elde edilen gazaltı ve lazer kaynaklı numunelere ait ortalama çekme mukavemeti değerleri (Tablo 7)'de verilmiştir.

Tablo 7. Gazaltı ve lazer kaynak parametreleri ve çekme testi sonuçları

Deney No	Gazaltı Kaynağı				Lazer Kaynağı			
	Gaz debisi (l/dk)	Kaynak hızı (mm/s)	Akım (A)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Güç (W)	Frekans (Hz)	Işın Genişliği (mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)
235JR	-	-	-	506,4	-	-	-	506,4
Miilux450	-	-	-	1310	-	-	-	1310
1 235JR-Miilux	12	30	190	498,4	75	10	2,8	482,1
2 235JR-Miilux	12	20	170	501,57	75	8	3	462,23
3 235JR-Miilux	12	40	150	390,87	75	6	3,2	473,77
4 235JR-Miilux	10	30	170	508	80	10	3	469,5
5 235JR-Miilux	10	20	150	498,73	80	8	3,2	452,33
6 235JR-Miilux	10	40	190	506,63	80	6	2,8	511,3
7 235JR-Miilux	8	30	150	495,07	85	10	3,2	486,5
8 235JR-Miilux	8	20	190	495,23	85	8	2,8	493,13
9 235JR-Miilux	8	40	170	452,27	85	6	3	510,07

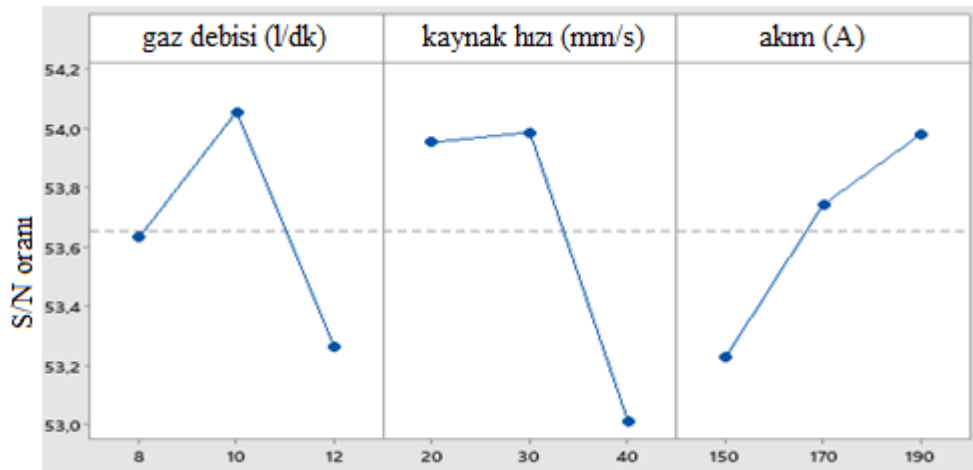
### 3.1.1. Gazaltı ve Lazer Kaynağına Ait Sinyal / Gürültü (S/ N) Oranları

Taguchi yönteminde (S/N) oranı ile en uygun yani optimum kaynak parametresinin bulunmasına yardımcı olur. Taguchi metodu ile “larger is better” en yüksek en iyi şartı aranmıştır. Deneysel çalışmada seçilen faktör seviyeleri arasında en yüksek (S/N) oranını gösteren değerler en iyi performansa sahiptir. ANOVA hangi prosesin üzerinde hangi faktörlerin ne kadar etkili olduğunun istatistiki açıklamasıdır. (S/N) oranı ve ANOVA procesteki optimum performansı bulmaya yardımcı olur. (Tablo 7)’deki gazaltı ve lazer kaynak parametreleri ve çekme testi sonuçları Minitab programına girildiğinde (Tablo 8)’deki gazaltı ve lazer kaynağına ait (S/N) oranları elde edilmiştir.

**Tablo 8.** Gazaltı ve lazer kaynağına ait (S/N) oranları

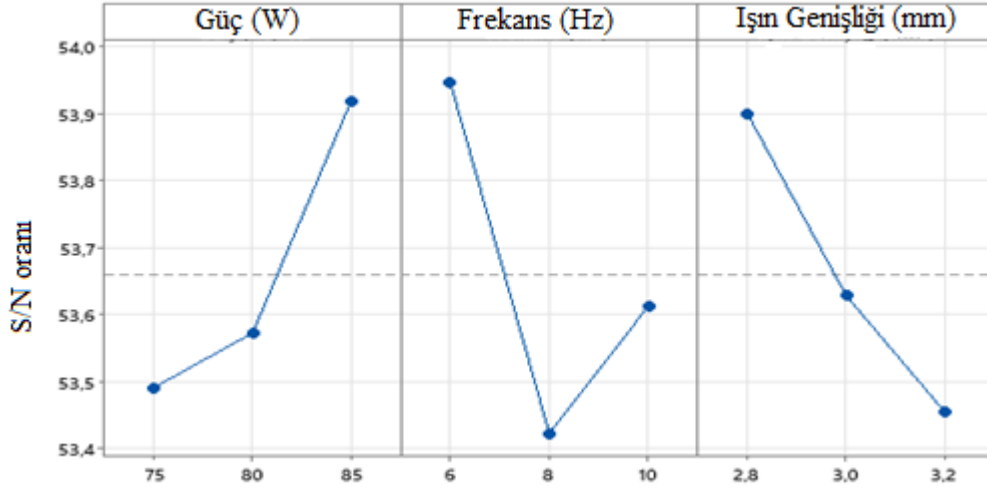
Gazaltı kaynağı	Seviye	Gaz debisi (l/dk)	Gaz debisi SN oranı	Kaynak hızı (mm/s)	Kaynak hızı SN oranı	Akım (A)	Akım SN oranı
	1	8	53,63	20	53,95	150	53,23
	2	10	54,06	30	53,99	170	53,74
	3	12	53,27	40	53,01	190	53,98
Lazer kaynağı	Seviye	Güç (W)	Güç SN oranı	Frekans (Hz)	Frekans SN oranı	Işın Genişliği (mm)	Işın Genişliği SN oranı
	1	75	53,49	6	53,95	2,8	53,9
	2	80	53,57	8	53,42	3	53,63
	3	85	53,92	10	53,61	3,2	53,45

Gazaltı kaynağı (Tablo 8) (S/N) en uygun oranları; gaz debisi için 54,06 iken, kaynak hızı için 53,99 ve akım içinse 53,98 değeridir. Gazaltı çekme mukavemetinin (Şekil 2) Taguchi (S/N) performans grafik değerlerine göre en iyi gazaltı kaynak parametreleri Gaz debisi 10 l/dk, kaynak hızı 30 mm/s ve akım 190 A değerleridir. Uygulanan Taguchiye göre bu değerlere en yakın parametreler 4 nolu deney numunesindedir. Gazaltı kaynak parametreleri ve çekme testi sonuçlarının yer aldığı (Tablo 7)’de 4 nolu deney numunesinin çekme mukavemeti 508 MPa olarak en yüksek çekme mukavemetidir.



**Şekil 2.** Gazaltı çekme mukavemetinin Taguchi (S/N) performans grafiği

Lazer kaynağı (Tablo 8) (S/N) en uygun oranları; güç için 53,92 iken, frekans için 53,95 ve ışın genişliği içinse 53,90 değeridir. Lazer kaynağı çekme mukavemetinin (Şekil 3) Taguchi (S/N) performans grafiği değerlerine göre en iyi lazer kaynak parametreleri güç 85 W, frekans 6 Hz ve ışın genişliği 2,8 mm değerleridir. Uygulanan Taguchiye göre (Tablo 7)’de bu değerlere en yakın 511,3 MPa ile 6 nolu lazer kaynak deney numunesidir.



Şekil 3. Lazer kaynağı çekme mukavemetinin Taguchi (S/N) performans grafiği

Farklı fiber lazer kaynağı çalışmasında; minitab programı, Taguchi  $L_9$  deney dizaynına göre; 1401,25 MPa en iyi çekme mukavemetine sahip lazer gücü 1400 W, lazer atış hızı 3 mm/sn ve odaklama mesafesi 5 mm olan 8 nolu deney numunesinin en iyi lazer kaynak parametrelerine sahip olduğu belirtilmiştir [11]. Bu çalışmada lazer kaynağının kaliteli olması için belirlenecek uygun kaynak parametre değerlerinin güç 85 W, frekans 6 Hz ve ışın genişliği 2,8 mm değerlerine yakın olması gerektiği görülmüştür.

### 3.1.2. Gazaltı ve Lazer Kaynağına Ait ANOVA Çalışması

ANOVA ile deneysel çalışmadaki en etkili parametre belirlenmektedir. Yüzde etki oranına göre en etkili parametre (Tablo 9)'da gazaltı kaynağında %41,92 ile kaynak hızı, lazer kaynağında %40,00 ile frekanstır.

Tablo 9. Gazaltı ve lazer kaynağı çekme mukavemetine ait ANOVA sonucu

	Parametreler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı (Adj SS)	Ortalama kareler toplamı (Adj MS)	% Etki oranı (Contribution)	P değeri
Gazaltı kaynağı	Gaz debisi (l/dk)	2	2522	1261,0	%21,48	0,441
	Kaynak hızı (mm/s)	2	4922	2460,8	%41,92	0,288
	Akım (A)	2	2310	1155,1	%19,68	0,462
	Hata	2	1986	993,2	%16,92	
	Toplam	8	11740		%100	
	$R^2 = R\text{-sq} = \%83,08$		Düzeltilmiş $R^2 = R\text{-sq(adj)} = \%32,32$			
Lazer kaynağı	Güç (W)	2	950,29	475,15	%28,93	0,092
	Frekans (Hz)	2	1313,98	656,99	%40,00	0,068
	Işın Genişliği (mm)	2	924,34	462,17	%28,14	0,094
	Hata	2	96,13	48,06	%2,93	
	Toplam	8			%100,00	
	$R^2 = R\text{-sq} = \%97,07$		Düzeltilmiş $R^2 = R\text{-sq(adj)} = \%88,29$			

$R^2$  ( $R\text{-sq} = R\text{-squared}$ ); bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki toplam varyansı açıklama oranını gösteren istatistiksel ölçüdür. Bağımsız değişken sayısı arttıkça  $R^2$ 'nin tek başına kullanımı yanıltıcı olabilir. Burada devreye düzeltilmiş  $R^2 = R\text{-sq(adj)}$  (Adjusted R Squared) girer. Düzeltilmiş  $R^2$  hem  $R^2$ 'nin bir düzeltmesini sunar hem de modelin bağımsız değişken sayısını dikkate alır.  $R^2$  değeri daima düzeltilmiş  $R^2$  değerinden büyüktür.

Bu modelde gazaltı kaynak yöntemindeki  $R^2 = R\text{-sq} = \%83,08$  ile düzeltilmiş  $R^2 = R\text{-sq(adj)} = \%32,32$  arasındaki fark

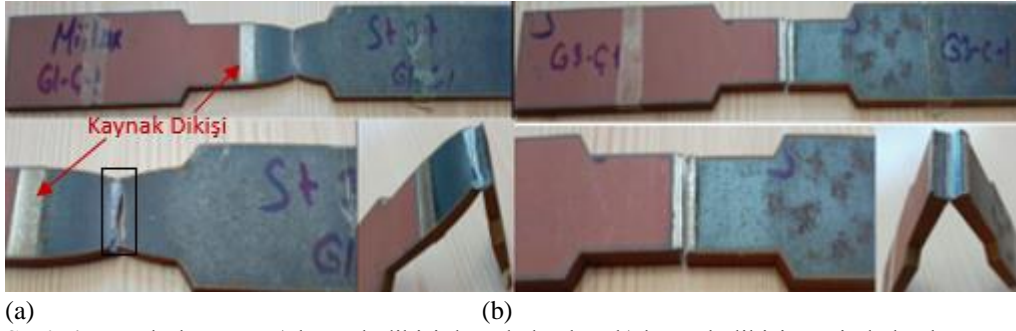


değeri beklenenden fazla çıkmıştır. Bu durum seçmiş olduğumuz parametrelerin dışında da etkili olan parametrelerin olduğunu göstermektedir. İleride yapılacak çalışmalarda gazaltı kaynak yönteminin diğer parametrelerinin de göz önüne alınarak analiz yapılması uygun olacaktır [17].

Fiber lazer kaynağı Taguchi L<sub>9</sub> deney dizaynına göre yapılan farklı bir çalışmada çekme deneylerine uygulanan ANOVA ile en etkili parametrenin %34,26 ile lazer atış hızının olduğu belirtilmiştir [11]. Yapılan bu çalışmada da lazer kaynağı parametrelerinden %40,00 çıkan frekans parametresinin etkisinden dolayı dikkate alınması gerekmektedir.

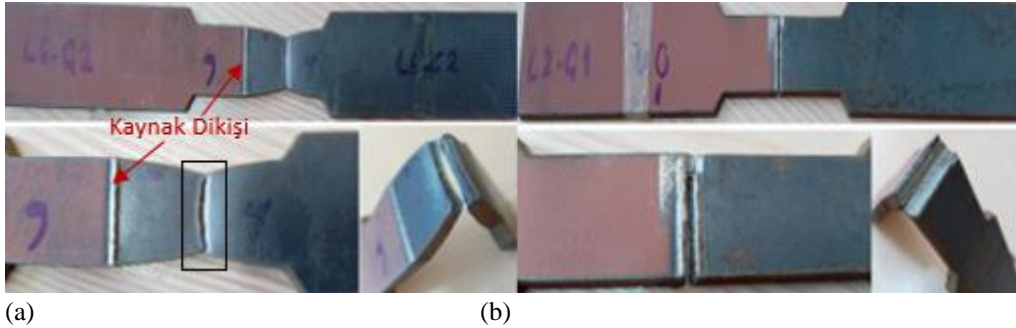
### 3.1.3. Gazaltı ve Lazer Kaynağına Ait Çekme Testi Numuneleri

Gazaltı kaynak numunelerinden 3 ve 9 nolu numuneler kaynak bölgesinden kırılırken diğer 1, 2, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu numuneler (Şekil 4) kaynak bölgesi dışından olacak şekilde sünek ve kesit daralması şeklinde kırılmalar gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Gazaltı kaynağı a) kaynak dikişi dışında kırılma b) kaynak dikişi üzerinde kırılma

Lazer kaynak numunelerinden 2, 4 ve 5 nolu numuneler kaynak bölgesinden kırılırken diğer 1, 3, 6, 7, 8 ve 9 nolu numunelerde (Şekil 5) kaynak bölgesi dışından, sünek ve kesit daralması şeklinde kırılmalar gerçekleşmiştir.



Şekil 5. Lazer kaynağı a) kaynak dikişi dışında kırılma b) kaynak dikişi üzerinde kırılma

S235JR-Hardox400 çeliklerinin kaynağında çekme mukavemeti 385 MPa olup, kopmalar S235JR ITAB kısmında kesit daralması şeklinde sünek kırılma şeklinde gerçekleştiği belirtilmiştir [18]. Hardox 400-ST52 ve AISI 304L çelikleri arasında yapılan MIG kaynağında en yüksek çekme sonucu 640 MPa Hardox- AISI 304L'de en düşük değer 350 MPa St52-Hardox çelik numunelerinde gerçekleşmiştir [19]. RAEX AR 400 ile St37 çeliğinin ile karışım gazla yapılan MAG kaynağında en yüksek çekme mukavemeti 436,61 MPa bulunmuş, mikro yapıdaki fazla aseküler ferritin mukavemet ve tokluğu arttırdığı belirtilmiştir [7]. HBW450 Hardox-S355J2 robotik gazaltı kaynağında kopmaların düşük mekanik özelliklere sahip S355J2 yapı çeliği üzerinde gerçekleştiği belirtilmiştir [20]. Aşınmaya dirençli çelikler ile yapı çelikleri arasında yapılan tüm kaynaklı birleştirmelerde çekme testleri sonucunda kopmalar yapı çelikleri üzerinde görülmüştür [18,19,20].

Yapılan S235JR-Miilux450 kaynağına ait çekme testlerinde gerçekleşen kopmalar düşük mekanik özelliklere sahip S235JR yapı çeliği üzerinde (Şekil 4) ve (Şekil 5)'te gerçekleşmiştir.

### 3.2. Üç Nokta Eğme Testi Bulguları

Gazaltı ve lazer kaynak numunelerine ait üç nokta eğme testi sonucu eğilme (Şekil 6) Miilux450 çeliğine göre daha sünek bir malzeme olan 235JR çeliği üzerinde gerçekleşmiştir.





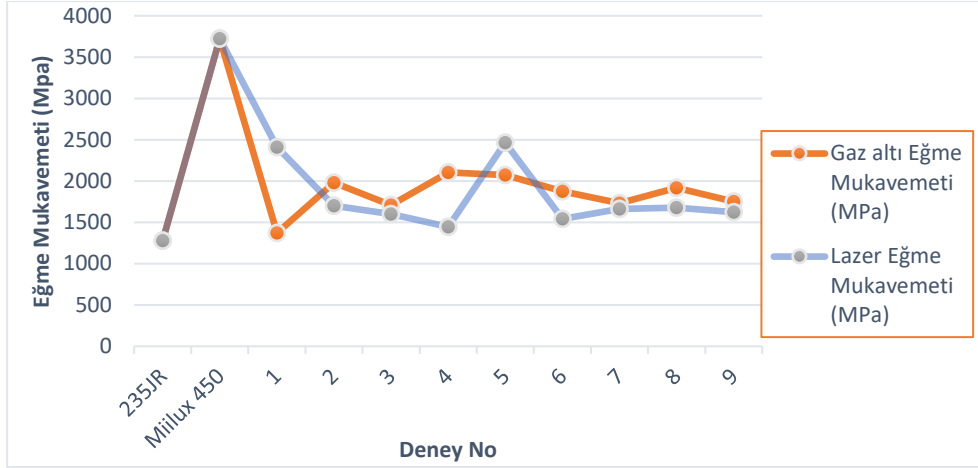
Şekil 6. Eğme testi sonucu eğilen kaynaklı numuneler

Gazaltı ve lazer kaynak yöntemi ile kaynaklanmış numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları (Tablo 10)'da yer almaktadır.

Tablo 10. Gazaltı ve lazer kaynak numunelerinin eğme testi sonuçları

	Deney No	Maksimum Yük (N)	Eğme Mukavemeti (MPa)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Mesnetler Arası Mesafe (mm)
Ana numune	235JR	7677,9	1279,4	25	6	106
Ana numune	Miilux450	22653,5	3723	25	6	106
Gazaltı kaynağı	1 235JR-Miilux	8344,2	1371,2	25	6	106
	2 235JR-Miilux	12036,1	1978,1	25	6	106
	3 235JR-Miilux	10391	1707,7	25	6	106
	4 235JR-Miilux	12808,1	2105	25	6	106
	5 235JR-Miilux	12614,4	2073,1	25	6	106
	6 235JR-Miilux	11401,1	1873,8	25	6	106
	7 235JR-Miilux	10547,2	1733,4	25	6	106
	8 235JR-Miilux	11665,7	1917,2	25	6	106
	9 235JR-Miilux	10647	1749,8	25	6	106
Lazer kaynağı	1 235JR-Miilux	14660	2409,4	25	6	106
	2 235JR-Miilux	10357	1702,1	25	6	106
	3 235JR-Miilux	9738,7	1600,5	25	6	106
	4 235JR-Miilux	8793,1	1445,1	25	6	106
	5 235JR-Miilux	14996	2464,6	25	6	106
	6 235JR-Miilux	9379,2	1541,5	25	6	106
	7 235JR-Miilux	10110,8	1661,7	25	6	106
	8 235JR-Miilux	10204,7	1677,1	25	6	106
	9 235JR-Miilux	9876,9	1623,2	25	6	106

Eğilme dikiş yüzeylerinde gerçekleşmediği için dikiş yüzeylerinde herhangi bir kırılma veya çatlak görülmemiştir. Bu sonuç 235JR çeliğinin hem sünekliğinden hem de yapılan kaynak işleminin başarılı olmasından kaynaklanmıştır. Kaynaklı tüm numunelerin eğme mukavemeti 235JR ana malzemeden daha yüksektir. Bunun nedeni kaynaklanan numunelerin ısı girdisi sonucu sertleşerek mukavemetlerinin artmasıdır. Eğme mukavemeti grafiğinde (Şekil 7)'de yer alan ana numuneler 235JR ve Miilux450'ye ait çekme mukavemeti değerleri hem gazaltı hem de lazer kaynak çekme değerleri ile iki kez yazıldığı için grafikte mavi ve turuncu veriler çıkışarak kahverengi görünmektedir. Miilux450 ana malzemesi sert bir malzeme olup (Tablo 10)'da eğme mukavemeti değeri en büyüktür. Kaynak bölgesi üzerinde istenilen eğme işlemi 235JR çeliğinin daha sünek olması nedeniyle 235JR çeliğinin kaynaksız bölgelerinde gerçekleşmiştir.

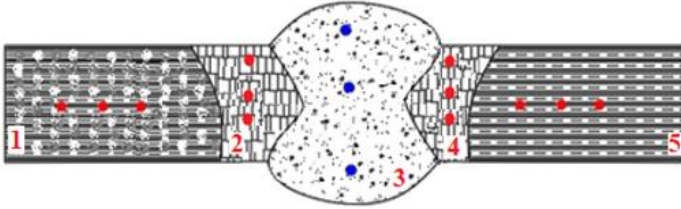


Şekil 7. Eğme mukavemetleri grafiği

Miilux450 ana numunesi ve kaynaklı tüm numunelere uygulanan yük değerinin 235JR ana malzemesinden daha büyük değer olmasından eğilme kaynak bölgesinin de ısı olarak sertleşmesi sonucu 235JR üzerinde ve kaynak bölgesine yakın bölgede gerçekleşmiştir. Lazer eğme numunelerine uygulanan yük gazaltı numunelerine uygulanan yük değerlerinden daha yüksektir. Bunun nedeni kaynak enerjisinin lazer kaynak yönteminde daha yüksek olmasıdır.

### 3.3. Mikro Sertlik Testi Bulguları

Mikro sertlik ölçümlerinde Vickers (HV) sertlik ucu kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçüm işlemlerinin yapıldığı bölgeler; 1-Miilux450 ana malzeme, 2-ITAB Miilux450, 3-Kaynak dikişi, 4-ITAB 235JR ve 5-235JR ana malzeme bölgeleridir. (Şekil 8)'deki her bölgede en az üç ölçüm yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümü 10 sn boyunca 200 g yük uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 8. Mikro sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler

Gazaltı ve lazer kaynaklı numunelere ait mikro sertlik değerleri (Tablo 11)'de verilmiştir. Lazer kaynak numunelerinin sertlik değerleri daha yüksek ve bölgeler arasındaki sertlik geçişleri daha yumuşaktır. Lazer sertlik değerleri genel olarak Miilux450 değerlerine yakınken gazaltı kaynağı sertlik değerleri 235JR değerlerine daha yakındır. Burada etkili olan özellik lazer kaynağının dar bir alanda ergime meydana getirmesidir.

Tablo 11. Gazaltı ve lazer kaynak numunelerine ait mikro sertlik testi sonuçları

	No	Miilux450 (HV)	ITAB Miilux450 (HV)	Kaynak Dikişi (HV)	ITAB 235JR (HV)	235JR (HV)
Gazaltı kaynak	1	560,5	447	238,9	228	385,3
	2	560,5	362	236,8	218	385,3
	3	560,5	446	272,4	227	385,3
	4	560,5	467	252,9	211	385,3
	5	560,5	420	239,4	224	385,3
	6	560,5	485	250,6	198	385,3
	7	560,5	463	270,6	231	385,3
	8	560,5	354	236,5	213	385,3
	9	560,5	445	299,3	241	385,3
Lazer kaynak	1	560,5	553	516,9	301	385,3
	2	560,5	543	529,6	298	385,3

3	560,5	538	504,3	267	385,3
4	560,5	478	506,3	367	385,3
5	560,5	524	508,8	273	385,3
6	560,5	548	525	282	385,3
7	560,5	551	508,4	273	385,3
8	560,5	554	500,7	279	385,3
9	560,5	563	507,6	236	385,3

(Tablo 11)'deki lazer sertlik değerleri gazaltı değerlerinden daha yüksektir. Lazer kaynağında ITAB ve kaynak dikişi dar bir alanda gerçekleşmesiyle ana metal ısıl etkilerden minimum etkilenir. Lazer kaynağında ısı girdisinin düşük, kaynak hızının yüksek, ITAB alanının dar olmasıyla ısı kaynaklı distorsiyonlar azdır [21]. Gazaltı kaynağında ısıl etkinin geniş alanı etkilemesi sonucu (Tablo 11)'de Miilux sertlik değerlerinin daha fazla düştüğü görülmektedir.

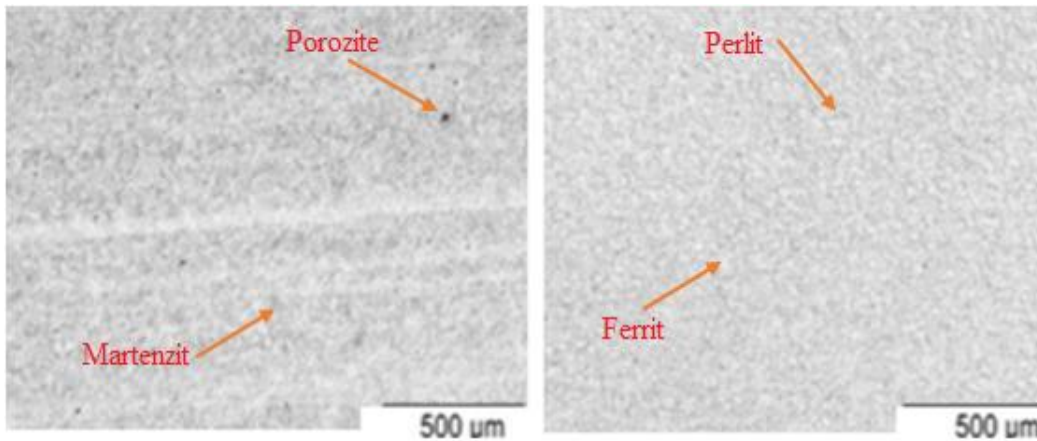
Gazaltı kaynağın ait (Tablo 11)'de sertlik değeri en yüksek Miilux ana malzeme iken en düşük sertlik değeri ITAB 235JR de görülmektedir. Gazaltı 2 ve 8 nolu numunelerin ITAB Miilux450 sertlik değerleri 235JR ana malzeme sertlik değerinden daha düşük çıkmıştır. Lazer kaynağında ise (Tablo 11)'de yer alan sertlik değerlerinden 4 nolu numunenin Kaynak Dikişi sertlik değeri, ITAB Miilux450 sertlik değerinden daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde lazer kaynağı 9 nolu numunenin ITAB Miilux450 sertlik değeri, Miilux450 ana malzemenin sertlik değerinden yüksek çıkmıştır. SG2 ilave kaynak telindeki Mn ve Si elementleri lazer kaynağının kaynak dikiş sertliğine olumlu etki ederek (Tablo 11)'deki sertlik değerleri elde edilmiştir.

Hardox400 çeliklerinin SG2 ilave telle yapıldığı MAG kaynak çalışmasında; SG2 kaynak teli içerisindeki Mn elementinin kaynak dikiş sertliğine olumlu etki ettiği, Mn'nin östenitin ferrite dönüşüm sıcaklığını azaltarak sertleşme kabiliyetini artıran bir element olduğu belirtilmiştir [22]. RAEX AR 400-St37 kaynak çalışmasında; elektrik ark ve MAG kaynak yöntemlerine kıyasla TIG kaynak yönteminin düşük kaynak hızı ve yüksek ısı girdisi sayesinde mikro yapıda tane irileşmesine, ferrit hacim oranının artarak mukavemet ve sertlik değerlerinin düşümüne sebep olduğu belirtilmiştir [7]. Yapılan çalışmada da benzer özellikler görülmüş olup yüksek ısı girdisi açısından lazer ile gazaltı sertlik değerleri karşılaştırıldığında; lazer kaynağının hem dar alanda ısı girdisi olması hem de lazer kaynağının hızlı yapılan bir yöntem olmasıyla hızla soğuması sonucu sertlik değerleri (Tablo 11)'de gaz altı kaynağına göre daha yüksek çıkmıştır.

### 3.4. Mikro Yapı Test Bulguları

Optik Mikroskopla ana malzeme, kaynak dikişi ve ITAB kısımlarının mikro yapıları fotoğraflanmıştır.

Miilux450 ana malzemesi Cr ve Ni elementleri ile alaşımlandırılmış ~%99 martenzitik yapıdadır. Yine Miilux450 çeliğinin mikro yapısının plakalı martenzitten (koyu renkli kısım) ve tane sınırlarında sementitten Fe<sub>3</sub>C (açık renkli kısım) oluştuğu (Şekil 9)'daki görselde görülmektedir. Miilux450 çeliğinde az miktarda porozite mevcuttur. 235JR çeliğinin mikro yapısı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. 235JR çeliği (Şekil 9)'da perlit (koyu renkli kısım) ve ferrit (açık renkli kısım)'dan oluşmaktadır [18]. Miilux450 ve 235JR çeliğinin mikro yapısında kalışkılar ve porozite homojen dağılım göstermekte, segregasyonlar ve bantlaşmalar bulunmamaktadır.



(a) (b)  
Şekil 9. Ana malzeme (a) Miilux450 ve (b) 235JR (2x) mikro yapı görüntüsü

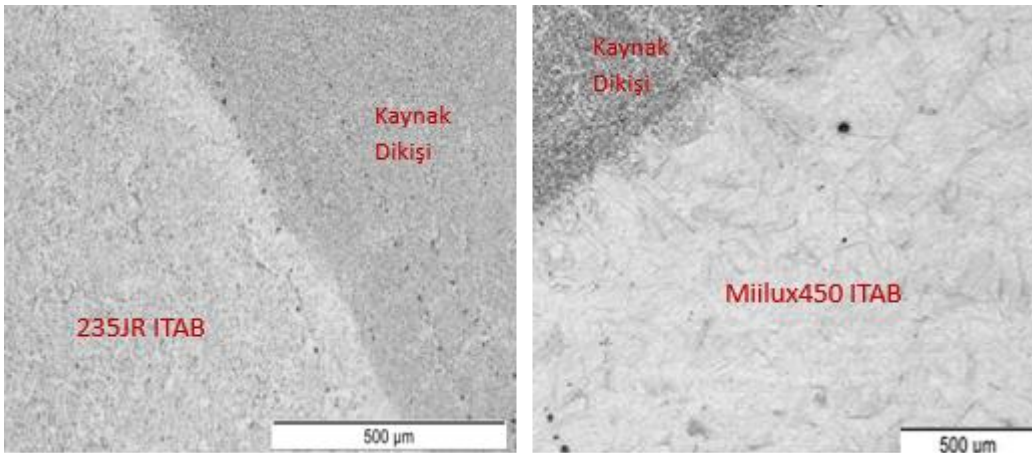
Gazaltı kaynak yöntemi numunelerin mikro yapıları incelendiğinde kaynak dikişinde ısı girdisine bağlı olarak mikro yapıda farklı bölgeler gözlemlenmektedir. ITAB'daki tane büyümleri ve yönelmeler kaynak dikişindeki ısı girdisi ve kaynak yöntemine bağlı olarak uygulanan enerji miktarından kaynaklanmaktadır [23]. Hardox450-S355J2C+N çeliklerinin gazaltı kaynak sonrası ferrit ve martenzit fazlarından oluşan Hardox450 çeliğinin ITAB mikroyapısında ferrit miktarı ile tane boyutlarının arttığı belirtilmiştir [24]. Yapılan çalışmada da Miilux450 çeliğinin ITAB'ında da nispeten tane yapısında yönelme, büyüme ve ferrit yapısında artış olduğu görülmüştür. Miilux450 çeliğinin ITAB'ı, 235JR çeliğinin ITAB'ına nispeten daha dar olduğu (Şekil 10)'da görülmektedir. Isı girdisine bağlı Miilux450 çeliğinin ITAB'ında martenzit yapının değişime uğradığı görülmektedir. Miilux450 çeliğinin ITAB'ındaki yapının kaynakta kullanılan düşük karbonlu yapıya sahip olan ek tel ile karıştığından dolayı kalıntı ostenit, ferritik yapıya kaydığı görülmüştür. Ayrıca Miilux450 çeliğinin ITAB bölgesinin sertlik değeri ana malzeme Miilux450 mikro sertlik değerinden daha düşüktür. Bu veride mikro yapıdaki değişimi desteklemektedir.

SG2 teli ile yapılan MAG kaynak çalışmasında, Hardox400'un kaynak bölgesinde iğnesel martenzit fazı, poligonal ferrit ve az miktarda asiküler ferrit fazlarının görüldüğü belirtilmiştir [22]. Hardox500-St52 kaynak çalışmasında, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop görüntülerinde Hardox500'un martenzit, St52'nin sıkı lamelli perlit yapıda olduğu belirtilmiştir. Gaz Metal Ark Kaynağında da geçiş çizgisinin ortaya çıktığı sebebi ise Hardox500'un kimyasal bileşiminde yer alan Si, Ni ve Mo elementleri ile açıklanmıştır. Si elementinin oksidasyon oluşumunu engelleyerek kaynağın kararlı olmasını sağladığı belirtilmiştir. Ni ve Mo elementlerininse tane boyutlarını küçülterek kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin iyileşmesinde rol oynadığı belirtilmiştir [25]. Yapılan çalışmada da Miilux450 içerisinde yer alan Si, Ni ve Mo elementleri sayesinde benzer geçiş çizgisi kaynak dikişi ve ITAB geçiş bölgesinde (Şekil 10)' ve (Şekil 13)'deki mikroyapı görüntüsünden anlaşılmaktadır. Bu elementler her iki kaynak yöntemindeki tane boyutlarının küçülmesine olumlu etki etmiştir. Ancak gazaltı kaynağı ısı girdisi lazer kaynağına göre daha yüksek olduğu için gazaltı kaynağında iri taneli ve ince taneli yapılar oluşurken lazer kaynağında sadece ince taneli yapılar oluşmaktadır. Mikroyapıdaki bu oluşum lazer kaynağının mekanik özelliklerinin gazaltı kaynağına göre (Tablo 11)'de daha iyi olmasını sağlamıştır.

HBW450 Hardox-S355J2 robotik gazaltı kaynak çalışmasında Hardox'un martenzitik, S355J2'nin ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu belirtilmiştir. S355J2 ITAB'ında ve Hardox ITAB'ında ana malzemeden oluşup kaynak bölgesi merkezine doğru uzayan uzun şeritler şeklinde dentrit yapılar görülmüştür. Dentritik yapı ısı girdisinin en düşük olduğu ana malzemeden en yoğun olduğu kaynak merkezine doğru soğuma neticesinde oluştuğu belirtilmiştir. ITAB'da ısı girdisine bağlı tane irileşmesi ve ferrit miktarının arttığını buna binaen de ana numuneye göre daha sünek bir yapının oluştuğu belirtilmiştir [20]. Yapılan çalışmada ITAB bölgelerinde dentritik yapılar görülmüştür.

235JR çeliğinin kaynak dikişi ile ITAB geçiş bölgesinde kalıksıklar bulunmaktadır. 235JR çeliği ITAB bölgesindeki mikro yapının perlit, poligonal (çokgenli) ferrit, withmanstater ferrit ve kısmende aseküler ferritten oluştuğu (Şekil 11)'de görülmektedir.

Gazaltı 4 nolu numuneye ait ITAB Miilux450 ve kaynak dikişi (2x) mikro yapı görüntüsü (Şekil 10)'da ve ITAB 235JR (2x) mikro yapı görüntüsü (Şekil 11)'de verilmiştir.

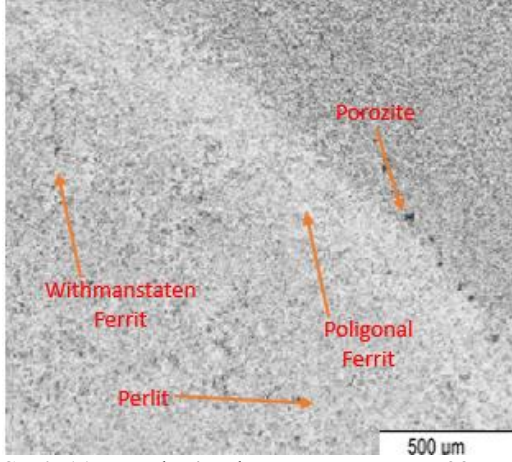


(a)

(b)

Şekil 10. (a) 235JR ITAB ve kaynak dikişi, (b) Miilux450 ITAB ve kaynak dikişi görüntüsü

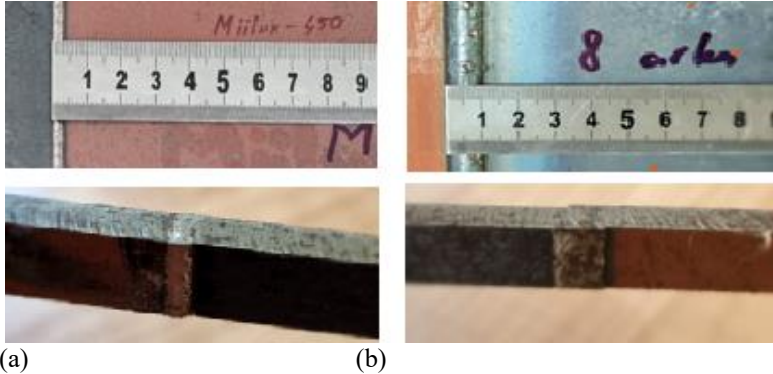




Şekil 11. Gazaltı 4 nolu numune – ITAB 235JR (2x) mikro yapı görüntüsü

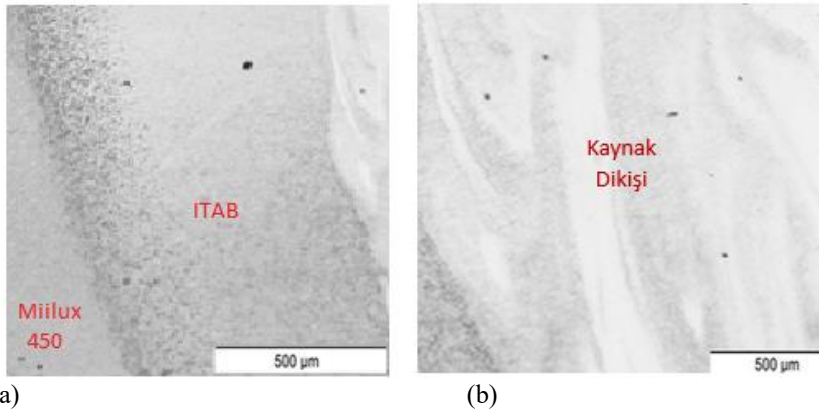
Lazer kaynağında düşük ısı ve dar bir koridor şeklindeki ergime bölgesi sayesinde ITAB dar, ısı kaynaklı distorsiyonlar daha azdır. Lazer kaynağında hızlı soğuma neticesinde yüksek dayanım elde edilmektedir [22]. Mikro sertlik değerlerinin yer aldığı (Tablo 11) bunu doğrulamaktadır. Lazer kaynaklı numunelerin ITAB kısmında az miktarda da olsa tane büyümelerinin olduğu görülmektedir. Lazer kaynağı Miilux450 çeliğinde ortaya çıkan yapı değişimi gazaltı kaynak yöntemine göre daha azdır.

Lazer kaynak yöntemi ısı enerjisi bakımından gazaltı kaynak yöntemi ile kıyaslandığında gazaltı kaynak yöntemine göre daha az ısı enerjisi girdisine sahiptir [26]. Lazer kaynak dikiş genişliği (Şekil 12)'de 5mm'nin altında iken gazaltı dikiş genişliği 10 mm'nin üzerindedir ve lazer kaynağının ITAB bölgesinin gazaltı kaynak yöntemine kıyasla daha dar bir bölge de oluştuğu görülmektedir. Ayrıca (Şekil 12)'deki gazaltı kaynağında, kaynak bölgesine uygulanan yüksek ısı enerjisi girdisi 235JR üzerinde görülmektedir.

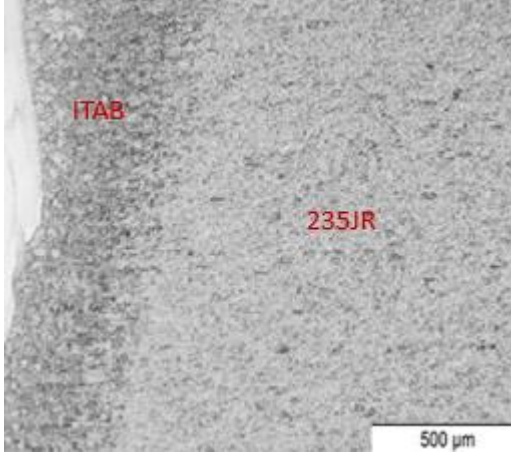


(a) Lazer kaynak dikişi, dikiş genişliği, (b) gazaltı kaynak dikişi, dikiş genişliği

Lazer 6 nolu numuneye ait ITAB Miilux450 (2x) ve kaynak dikişi (2x) mikro yapı görüntüsü (Şekil 13)'te ve ITAB 235JR (2x) mikro yapı görüntüsü (Şekil 14)'te verilmiştir.



(a) Mikro yapı görüntüleri a) ITAB Miilux450 (2x), b) kaynak dikişi (2x)



Şekil 14. Lazer 6 nolu numune – ITAB 235JR (2x) mikro yapı görüntüsü

#### 4. SONUÇLAR

DeneySEL çalışma sonuçlarına göre; çekme testinde lazer ve gazaltı kaynak numunelerinde kopmalar düşük mekanik özelliklere sahip S235JR yapı çeliği üzerinde veya kaynak dikişi üzerinde gerçekleşmiştir.

Minitab Taguchi (S/N)'ye göre en iyi gazaltı kaynak parametreleri Gaz debisi 10 l/dk, Kaynak hızı 30 mm/s ve Akım 190 A değerleri ile 4 nolu deney numunesinde 508 MPa'lık en iyi çekme mukavemeti elde edilmiştir. En iyi lazer kaynak parametreleri Güç 85 W, Frekans 6 Hz ve Işın genişliği 2,8 mm değerleriyle 6 nolu deney numunesinde 511,3 MPa'lık en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Kaynak parametrelerinin bu değerlere yakın seçilmesi durumunda kaliteli, yüksek mukavemetli kaynak işlemleri gerçekleşecek maliyet ve zamandan kazanılmış olacaktır. ANOVA çalışmasına göre; en etkili parametre gazaltı kaynağında %41,92 ile kaynak hızı, lazer kaynağında %40,00 ile Frekans olmuştur. Ancak gazaltı kaynak yöntemindeki R<sup>2</sup> ile düzeltilmiş R<sup>2</sup> arasındaki fark değerinin beklenenden fazla çıkması seçmiş olduğumuz parametrelerin dışında da etkili olan parametrelerin olduğunu göstermiştir. Bir sonraki yapılacak kaynak uygulamalarında gazaltı kaynak yönteminin diğer parametrelerinin de göz önüne alınarak analiz yapılması uygun olacaktır. Lazer kaynağında frekans parametresi kaynak üzerindeki etkilerinden dolayı dikkate alınmalıdır.

3 Nokta eğme testlerinde her iki kaynak çalışmasında eğilmeler 235JR üzerinde gerçekleşmiştir. Dikiş yüzeylerinde eğilme gerçekleşmediği için kırılma veya çatlak görülmemiştir. Gazaltı eğme mukavemetlerinin 1 nolu numune hariç lazer numunelerinden daha yüksektir. Lazer eğme numunelerinden 1 ve 5 nolu numunelerin eğme mukavemeti gazaltı numunelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Uygulanan yük açısından; Miilux450 ana numunesi en yüksek 235JR ise en düşüktür. Buna göre bir arada kullanılacak Miilux450-235JR kaynak uygulamalarında 235JR yüksek yüke maruz bölgeler yerine düşük yük uygulama bölgelerinde tercih edilmelidir.

Mikro sertlik değerlerinde; gazaltı kaynağında ısı etkinin geniş alanı etkilemesi sonucu sertlik değerleri lazer kaynağı sertlik değerlerine oranla daha düşük çıkmıştır.

Mikro yapı açısından; ana malzemelerin mikro yapılarında segregasyonlar ve bantlaşmalar bulunmamakla birlikte, kalıbkılar ve porozite homojen dağılım göstermektedir. Gazaltı kaynak numunelerinde ısı girdisine bağlı kaynak dikişinde farklı bölgeler gözlenmiştir. Kaynak öncesi hazırlık aşamasında kaynak bölgesinin temizliğine dikkat edilmesine rağmen 235JR'nin kaynak dikişi ile ITAB geçiş bölgesinde kalıbkılar görülmüştür. 235JR ITAB'da kaynak dikişine doğru tane yapısında yönelmeler gözlemlenmiştir. Miilux450 çeliğinin ITAB'ında da nispeten tane yapısında yönelme ve büyümeler olduğu görülmektedir. Miilux450'nin ITAB'ının, 235JR'ye nazaran daha dar olduğu görülmektedir. Lazer kaynağında Miilux450 üzerinde gerçekleşen yapı değişimi gazaltı kaynağına göre daha azdır.

Taguchi yöntemi ile belirlenen parametrelerle yapılan Miilux450 çeliği ile 235JR çeliğinin lazer ve gazaltı kaynağı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen parametreler dikkate alınarak yapılacak kaynak çalışması sonucu elde edilen numunelerin kaynak kalitesi de yüksek olacaktır. Ekonomik açıdan pahalı olan aşınmaya dirençli Miilux450 benzeri çelikler ile daha ucuz olan 235JR tarzı yapı çeliklerinin bir arada kullanımı endüstriyel alanda maliyetlerin düşmesini sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Karabaşoğlu, M. (2008). *Aşınma deney cihazı tasarımı ve imalatı* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
2. Gür, A.K., Çalgül, U., Bilen, F.A., 2016. AISI 304/Hardox400 çelik çiftlerinin PTA kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği. 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, 11-13 Mayıs, Gaziantep, 1199-1208.
3. Güven, A., Özcan, M.T. (2005). Sade karbonlu çeliklerin mineral ortamlarda abrasif aşınmasında malzeme sertliğinin aşınma üzerine etkisi. *Mühendis ve Makina*, 46(545), 26-33.
4. Yetmez, N., Koçar, O., Kocaman, E. (2022). Lazer kaynaklı S235JR sac metalin mekanik davranışının incelenmesi, 1 St International Conference On Engineering And Applied Natural Sciences-Iceans 2022, 10-13 Mayıs, Konya.
5. Tunçel, O. (2020). *Lazer kaynağı ile birleştirilmiş farklı türdeki yüksek/ultra yüksek mukavemetli çeliklerde mekanik ve mikroyapı ilişkilerinin incelenmesi* (Doktora Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa.
6. Ata, F. (2021). *Gemi inşa sanayinde kullanılan Grade A çeliğinin kaynak bölgesinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta.
7. Tuncer, E. (2006). *Aşınmaya dayanıklı çelikler ile genel yapı çeliğinin kaynağında birleşme özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
8. Uluocak, M. E. (2008). *Hardox 450 çeliklerinin mag kaynak bölgesi mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul.
9. Adar, M. (2019). *Hardox-500 ile st-52 çeliğinin kaynak edilebilirliğinin mekanik testler ve istatistiksel yöntemlerle araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Karabük.
10. Kaybolma, R. (2020). *Hardox 450 çeliklerinin özlü tel ile robotik mag kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve mekanik özelliklerin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya.
11. Karaşin, M.N. (2022). *Lazer kaynağı ile birleştirilen Ramor600 çeliğinin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
12. Çakır, M.T. (2023). *Aşınmaya dayanıklı zırh çelikleri ile yapı çeliklerinin Mag kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Karabük.
13. Daniş, A. (2024). *Gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen S355J2 yapı çeliklerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
14. Miilux (b.t.).  
<https://www.miilux.com.tr/>
15. Chncelik (b.t.).  
<https://www.chncelik.com.tr/st-37-s235jr-celik-ozellikleri/>
16. Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İtüdergisi*, 3(6), 117-128.
17. Spss (b.t.).  
<https://www.spss-yardimi.com/r-kare-r-squared-nedir-spss/>
18. Okay, T., Najafiharehtapeh, A., Emre, H.E., Kaçar, R. (2015, Nisan). S235JR- HARDOX400 çelik çiftinin kaynaklanabilirliğinin araştırılması. C. Göloğlu (Oturma başkanı), 2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu. Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü, Karabük.



19. Savaş, A. (2021). *MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Hardox 400, AISI 304L ve ST52 kalite çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Karabük.
20. Ayyıldız, E.A. (2022). *Aşınmaya dirençli HBW450 Hardox çeliği ve S355J2 yapı çeliğinin robotik gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve metalurjik özelliklerinin değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
21. Çelen, S. (2006). *Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
22. Yılmaz, T. (2010). *Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
23. Özşahin, S., Çavdar, K. (2023). Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 354-372.
24. Özturan, A.B. (2022). *Hardox 450 ve S355J2C+ N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi, Edirne.
25. Korkmaz, Ş., Çetin, M.H., Adar, M., Orak, A. (2020). Gmak yöntemi ile birleştirilmiş Hardoks500-St52 numunenin çekme dayanımı ve sertlik davranışının incelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 300-317.
26. Kahraman, N., Gülenç, B. (2020). Modern kaynak teknolojisi ve kaynak işlerinde iş sağlığı ve güvenliği. *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti*, 348s, Ankara.