



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HARDOX 450 VE S355J2C+N ÇELİKLERİNİN ROBOTİK
OLARAK GAZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLME KABİLİYETİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eray BAYRAKDAR

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222304721 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Eray BAYRAKDAR tarafından hazırlanan “**HARDOX 450 VE S355J2C+N ÇELİKLERİNİN ROBOTİK OLARAK GAZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLME KABİLİYETİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Semih BENLİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Recep YURTSEVEN

Pamukkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 20/12/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazlıye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Eray BAYRAKDAR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarım süresince yönlendirme ve bilgilendirmelerinden sürekli faydalandığım değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi İsmail SARAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımın yapılmasında ve oluşumunda kıymetli destekleriyle ve tecrübeleriyle yardımlarını esirgemeyen, meslektaşım Erkan TÜRKMEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman bana destek olan ve hiçbir yardımı esirgemeden her daim yanımda olan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Eray BAYRAKDAR

AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ARAŞTIRMA	2
2.1 Kaynak ve Temel Kaynak Yöntemleri	2
2.2 Gazaltı Kaynak Yöntemleri	4
2.3 Kaynak Kusurları	7
2.3.1 Dış hatalar.....	7
2.3.2 İç hatalar	11
2.4 Hardox Çelikleri.....	11
2.5 Genel Yapı Çelikleri.....	13
2.6 Taguchi Yöntemi	15
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	18
3.1 Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri	21
4. MATERYAL VE YÖNTEM	22
4.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	22
4.2 Kaynak Makinesi ve Kaynak Teli	23
4.3 Deney Parametreleri ve Deney Tasarımı	25
4.4 Çekme Deneyi.....	30
4.5 Mikrosertlik Testi	32
4.6 Mikroyapı İncelemeleri.....	37
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
5.1 Çekme Testi Sonuçları.....	39
5.1.1 S/N (Sinyal/Gürültü) analizi	43
5.1.2 Varyans analizi (ANOVA)	44
5.1.3 Regresyon analizi	45
5.2 Sertlik Testi Sonuçları	47
5.3 Mikroyapı İncelemeleri.....	53
5.4 Hasar Analizi.....	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	72

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARDOX 450 VE S355J2C+N ÇELİKLERİNİN ROBOTİK OLARAK GAZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLME KABİLİYETİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Eray BAYRAKDAR

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

ÖZET

Bu çalışmada yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 ve düşük karbonlu genel yapı çeliği S355J2C+N'nin robotik gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Çalışmada kaynak parametreleri olarak, ön tavlama sıcaklığı (20 °C, 50 °C, 100 °C) akım (200 A, 220 A, 240 A) ve gerilim (26 V, 27 V, 28 V) kullanılmıştır. Her parametre için 3 seviye belirlenerek Taguchi L9'a göre deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi L9'a uygun olarak üretilen kaynaklı plakalardan çekme deneyi numuneleri üretilmiş ve çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda numunelerin hasar yükleri ve hasar yerleri belirlenmiştir. Kaynak parametrelerinin sonuçlara etkisini analiz etmek amacıyla Varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Buna göre, sonuçlar üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla kaynak gerilimi ve akım olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda optimum kaynak parametreleri kullanıldığından hasarın kaynak bölgesinde oluşmadığı gösterilmiştir. Ön tavlama sıcaklığının kaynak kalitesi üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bu çalışma kapsamında Hardox 450 ve S355J2C+N malzemelerinin gaz altı kaynak yöntemi ile kaynak edilmesinde kaynak bölgesinde hasar oluşmasına neden olan kaynak parametre seviyeleri 28 V ve 240 A olarak bulunmuştur.

Hasar yerleri ve hasar yüklerine göre belirlenen 7 ve 8 nolu deneylere mikrosertlik testi yapılmıştır ve mikroyapıları incelenmiştir. Deneysel parçalar metalografik numune hazırlama cihazı ile hazırlanarak bakelite alınmıştır. Kaynak üst bölgesi ve kaynak alt bölgesi olmak üzere ana metal, kaynak bölgesi ve ITAB bölgelerinden sertlik ölçümleri alınmıştır ve değerleri incelenmiştir. Mikroyapı görüntülemeleri ile ana metal, ısı tesiri altındaki bölge, geçiş bölgesi ve kaynak bölgesinden 100X büyütme ile görüntüleri alınmıştır ve tane yapıları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hardox 450, S355J2C+N, Gazaltı ark kaynağı, Taguchi yöntemi, Mikrosertlik, Mikroyapı Isı tesiri altındaki bölge.

Aralık, 2024; 72 sayfa

M.Sc. THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ABILITY TO JOIN HARDOX 450 AND S355J2C+N STEELS ROBOTICALLY USING GAS ARC WELDING METHOD

Eray BAYRAKDAR

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Dr. Lecturer İsmail SARAÇ

ABSTRACT

In this study, the ability to combine high wear resistance Hardox 450 with low carbon general structural steel S355J2C+N by robotic gas arc welding method was investigated. In the study, pre-annealing temperature (20 °C, 50 °C, 100 °C), current (200 A, 220 A, 240 A) and voltage (26 V, 27 V, 28 V) were used as welding parameters. Experimental design was made by determining 3 levels for each parameter according to Taguchi L9. Tensile test samples were produced from welded plates produced in accordance with Taguchi L9 and tensile tests were performed. As a result of the tensile test, the damage loads and damage locations of the samples were determined. Analysis of variance (ANOVA) was performed to analyze the effect of welding parameters on the results. Accordingly, it was determined that the most effective parameters on the results were welding voltage and current, respectively. As a result of the study, it was shown that damage did not occur in the welding area since optimum welding parameters were used. No significant effect of pre-annealing temperature on weld quality was observed. Within the scope of this study, the welding parameter levels that cause damage in the weld area when welding Hardox 450 and S355J2C+N materials with the gas arc welding method were found to be 28 V and 240 A.

Microhardness tests were carried out in experiments no. 7 and 8, which were determined according to damage locations and damage loads, and their microstructures were examined. Experimental parts were prepared with a metallographic sample preparation device and bakelite. Hardness measurements were taken from the base metal, the weld zone and the areas under heat influence, including the upper weld zone and the lower weld zone, and their values were examined. With microstructure imaging, images of the base metal, heat affected zone, transition zone and weld zone were taken at 100X magnification and their grain structures were examined.

Keywords: Hardox 450, S355J2C+N, Gas arc welding, Taguchi method, Microhardness, Microstructure, Area under heat influence.

December, 2024; 72 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kaynak bölgeleri.	2
Şekil 2.2. ITAB bölgeleri.	3
Şekil 2.3. a) Ergitme kaynağı ve b) basınç kaynağının şematik gösterimi.	4
Şekil 2.4. Gazaltı kaynağının prensibi.	5
Şekil 2.5. Gazaltı kaynak donanımı.	5
Şekil 2.6. Kaynakta gözenek hatası.	7
Şekil 2.7. Kaynakta yetersiz nüfuziyet.	8
Şekil 2.8. Kaynakta yanma oluşu.	8
Şekil 2.9. Kaynakta çatlak hatası.	9
Şekil 2.10. Kaynakta oluşan sıçramalar.	9
Şekil 2.11. Kaynakta oluşan çarpılma hataları.	10
Şekil 2.12. Metod kaynak yöntemi.	10
Şekil 2.13. Hardox çeliklerinin sertlik ve akma dayanımları.	12
Şekil 2.14. Hardox malzemelerin kullanıldığı yerler.	13
Şekil 4.1. Numune plakaların lazer kesim işlemi.	22
Şekil 4.2. Kaynakta kullanılan robot kaynak makinesi.	23
Şekil 4.3. Robot kaynak makinesi çalışma alanı.	24
Şekil 4.4. V kaynak ağzı gösterimi.	26
Şekil 4.5. Hardox 450 ve S355J2C+N numunelerin V kaynak ağzı açma işlemi.	26
Şekil 4.6. Hardox 450 ve S355J2C+N numunelerin puntalama işlemi.	27
Şekil 4.7. Numune plakaların a) 50 °C ve b) 100 °C ön tavlama işlemleri.	28
Şekil 4.8. Hardox 450 ve S355J2C+N parçaların kaynak işlemi.	28
Şekil 4.9. Hardox 450 ve S355J2C+N kaynaklanmış numune parçalar.	29
Şekil 4.10. Kaynaklı plaka test numuneleri hazırlanması.	29
Şekil 4.11. Kaynaklı plakadan test numunelerinin kesilmesi.	30
Şekil 4.12. Çekme deneyi test numuneleri.	31
Şekil 4.13. Çekme deneyi test cihazı.	31
Şekil 4.14. Numunelere uygulanan çekme deneyi işlemi.	32
Şekil 4.15. Kesme makinesi.	33
Şekil 4.16. Bakalite alma işlemi öncesi zımparalama yapılması.	33
Şekil 4.17. Bakalite alma işlemi.	34
Şekil 4.18. Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı.	34
Şekil 4.19. Metalografik numune hazırlama işlemi sonrası parçalar.	35
Şekil 4.20. Otomatik vickers sertlik ölçme cihazı.	36
Şekil 4.21. Sertlik ölçme noktaları.	36
Şekil 4.22. Sertlik ölçme işlemi.	37
Şekil 4.23. Mikroskop ile görüntü alma işlemi.	38
Şekil 4.24. Mikroyapı uygulaması yapılan numune parçalar.	38
Şekil 5.1. Çekme deneyi sonucu numunelerin hasar yerleri.	39
Şekil 5.2. 1 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	40
Şekil 5.3. 2 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	40
Şekil 5.4. 3 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	40
Şekil 5.5. 4 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	41
Şekil 5.6. 5 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	41
Şekil 5.7. 6 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	41
Şekil 5.8. 7 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	42
Şekil 5.9. 8 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	42

Şekil 5.10. 9 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.	42
Şekil 5.11. S/N oranları için ana etki grafiği.	44
Şekil 5.12. Hasar yükleri için artıkların gösterilmesi.	45
Şekil 5.13. Deneysel sonuçlarla lineer regresyon modeli karşılaştırılması.	46
Şekil 5.14. Deneysel sonuçlarla 2. dereceden regresyon modeli karşılaştırılması.	47
Şekil 5.15. Sertlik değerleri alınan bölgeler.	48
Şekil 5.16. 7 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri grafiği.	49
Şekil 5.17. 7 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri grafiği.	50
Şekil 5.18. 8 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri grafiği.	51
Şekil 5.19. 8 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri grafiği.	52
Şekil 5.20. 7 No'lu numune Hardox 450 ana metalinin görüntüsü.	54
Şekil 5.21. 8 No'lu numune Hardox 450 ana metalinin görüntüsü.	54
Şekil 5.22. 7 No'lu numune Hardox 450-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.	56
Şekil 5.23. 8 No'lu numune Hardox 450-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.	56
Şekil 5.24. 7 No'lu numune Hardox 450 ITAB görüntüsü.	57
Şekil 5.25. 8 No'lu numune Hardox 450 ITAB görüntüsü.	57
Şekil 5.26. 7 No'lu numune kaynak merkezinin görüntüsü.	58
Şekil 5.27. 8 No'lu numune kaynak merkezi görüntüsü.	59
Şekil 5.28. 7 No'lu numune S355J2C+N-kaynak geçiş bölgesinin görüntüsü.	60
Şekil 5.29. 8 No'lu numune S355J2C+N-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.	60
Şekil 5.30. 7 No'lu numune S355J2C+N ITAB görüntüsü.	61
Şekil 5.31. 8 No'lu numune S355J2C+N ITAB görüntüsü.	61
Şekil 5.32. 7 No'lu numune S355J2C+N ana metalinin görüntüsü.	62
Şekil 5.33. 8 No'lu deney S355J2C+N ana metalinin görüntüsü.	63
Şekil 5.34. 7 ve 8 numaralı numuneler hasar oluşumu.	64
Şekil 5.35. 7 numaralı çekme deney numunesinin kaynak kesiti.	65
Şekil 5.36. 8 numaralı çekme deney numunesinin kaynak kesiti.	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Hardox 450 ve S355J2C+N ağırlıkça kimyasal bileşimi (Wt%).	23
Çizelge 4.2. Hardox 450 ve S355J2C+N mekanik özellikleri.	23
Çizelge 4.3. Kaynak robotunun modeli ve özellikleri.	24
Çizelge 4.4. SG2 kaynak teli ağırlıkça kimyasal bileşimi (Wt%).	25
Çizelge 4.5. SG2 kaynak teli mekanik özellikleri.	25
Çizelge 4.6. Kaynak parametreleri ve seviyeleri.	25
Çizelge 4.7. Taguchi L ₉ deney tasarımı.	25
Çizelge 5.1. Ortalama hasar yükleri ve hasar yerleri.	39
Çizelge 5.2. Deneylere ait ortalama hasar yükleri ve S/N oranları.	43
Çizelge 5.3. Ortalama hasar yükü için S/N yanıt tablosu.	43
Çizelge 5.4. Ortalama hasar yükü için ANOVA tablosu.	45
Çizelge 5.5. Deneysel ve tahmini hasar yükleri.	47
Çizelge 5.6. Çekme deneyi sonucunda 7 ve 8 no'lu deneyin hasar yükü ve yerleri.	48
Çizelge 5.7. 7 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri.	49
Çizelge 5.8. 7 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri.	50
Çizelge 5.9. 8 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri.	51
Çizelge 5.10. 8 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri.	52
Çizelge 5.11. 7 ve 8 numaralı deneylerin sertlik değerleri karşılaştırılması.	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Amper
Al	Alüminyum
Ar	Argon
ASTM	Amerikan Test Ve Malzeme Kurumu
C	Karbon
CO₂	Karbondioksit
Cr	Krom
DIN	Deutch Industrie Normen - Alman Endüstri Normları
EN	European Norm - Avrupa Normu
Fe	Demir
Fm	Maksimum Kuvvet
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HV	Vickers Sertliği
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
J	Joule
kN	Kilonewton
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
ml	Mililitre
mm	Milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapascal
N	Newton
Ni	Nikel
P	Fosfor
Rpm	Revolutions Per Minute - Dakikadaki Devir Sayısı
S	Kükürt
SG2	Kaynak Teli
Si	Silisyum
S/N	Sinyal-Gürültü
St	Stahl
TIG	Tungsten Inert Gas
TS	Türk Standardı
V	Voltaaj
Wt%	Ağırlıkça Yüzde
°C	Santigrat
µm	Mikrometre
%	Yüzde
Σ	Toplam
Log	Logaritma

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde kullanılan çeliklerde, aşınma direnci aranan önemli bir kriterdir. Birçok imalat sektöründe aşınma sorunu verimliliği düşürmekte ve maliyetleri arttırmaktadır.

Yüksek mukavemetli ve aşınma direnci yüksek olan çelikler oldukça maliyetlidir. Çelik malzeme kullanılarak imal edilmesi tasarlanan aşınmaya maruz bir yapıyı tamamen aşınma direnci yüksek olan Hardox çeliği kullanarak imal etmek malzeme maliyetini oldukça artırmaktadır. Hardox 450 çelikleri ile S355J2C+N birim maliyetleri arasında 2.6 oranı bulunmaktadır. Bir yapıda aşınmaya maruz kısımların malzeme kütlesi yaklaşık %10 olduğu düşünüldüğünde, geri kalan %90'lık kısmı Hardox 450 yerine S355J2C+N çeliği ile imal etmek, malzeme maliyetini yaklaşık %43.2 oranında azaltmaktadır. Dolayısıyla, farklı özelliklere sahip çeliklerin ihtiyaca uygun şekilde tasarlanarak çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi kompleks sistemlerin üretimi için günümüzde gereksinim haline gelmiştir.

Bu çalışmada kullanılan ve endüstriyel uygulamalarda karşılığı olan, yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 çeliği ve düşük karbonlu bir genel yapı çeliği olan S355J2C+N çeliği, ağır sanayi sektöründe, inşaat endüstrisindeki makinelerde, taşımacılık alanında, madencilikte, tarım iş makineleri vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan, yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 ve düşük karbonlu bir genel yapı çeliği olan S355J2C+N çeliklerinin robotik gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Çalışmada kaynak parametreleri olarak, ön tavlama sıcaklığı (20 °C, 50 °C, 100 °C), akım (200 A, 220 A, 240 A) ve gerilim (26 V, 27 V, 28 V) kullanılmıştır. Her parametre için 3 seviye belirlenerek Taguchi L₉'a göre deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi L₉'a uygun olarak üretilen kaynaklı plakalardan hazırlanan ölçüm numuneleri kullanılarak çekme deneyleri, sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda numunelerin hasar yükleri ve hasar yerleri belirlenmiştir. Kaynak parametrelerinin sonuçlara etkisini analiz etmek amacıyla Varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Hasar yükü tahmin denklemleri regresyon analizi ile elde edilmiştir.

2. TEORİK ARAŞTIRMA

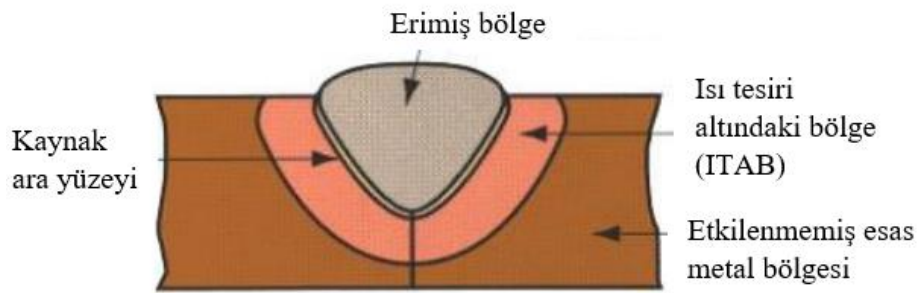
2.1 Kaynak ve Temel Kaynak Yöntemleri

İki veya daha fazla parçanın ısı, basınç veya her ikisi yoluyla birleştirilmesi, kaynak olarak adlandırılır.

Kaynak yapılırken birleştirilen parçalar ana malzeme olarak tanımlanır. Bağlantıyı oluşturmak için kullanılan ilave malzemeler ise dolgu, sarf veya ara malzeme olarak adlandırılır. Kaynak sonrası homojen bir yapı elde etmek için kaynakta kullanılan ara malzemeler, genellikle ana malzemeye benzer olacak şekilde seçilir.

Kaynak metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Mekanik bağlantıların tasarımı ve üretiminde malzemelerin birleştirilmesi önemli bir husustur. Birleştirme yöntemleri arasında, mekanik özellikleri iyileştirmek, ağırlığı azaltmak ve üretim süresini düşürmek için kaynak işlemi tercih edilen bir yöntemdir. Çalışma sırasında bu yapılar dinamik ve statik yükler altında deformasyona uğramaya eğilimlidir. Kaynaklı bağlantının dış koşullar altında göstereceği davranışlar kaynaklı bölgelerin yapısına göre değişir [1].

Tipik bir kaynaklı birleştirme farklı bölgelerden oluşur (Şekil 2.1.) [30].



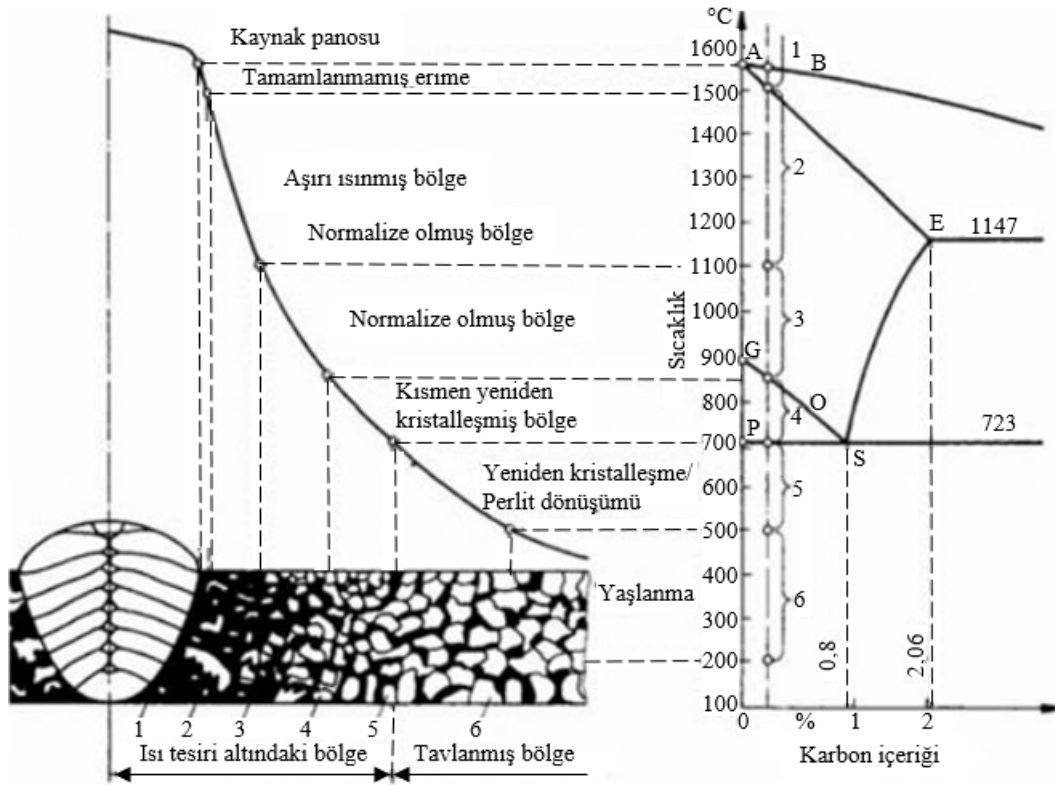
Şekil 2.1. Kaynak bölgeleri [30].

Erime bölgesi, tamamen erimiş asıl metal ile varsa dolgu metalinin oldukça homojen şekilde karıştığı bölgedir. Homojen karışım sıvı metal havuzundaki taşınım ile olur.

Erime bölgesini ince bir zar şeklinde çevreleyen kaynak ara yüzeyi, kaynak esnasında ergimiş ancak taşınım olayına maruz kalmadan hızla katılaştığından asıl metal ile aynı özelliklerdeki bölgedir.

ITAB, kaynak sırasında ergimemiş ancak ısı etkisi ile katı hal dönüşümlerine maruz kalmıştır. Bu bölgenin kimyasal bileşimi de asıl metal ile aynıdır. ITAB içinde gerçekleşen katı hal dönüşümleri soğuma hızına ve metalin ısı özelliklerine bağlı olmakla birlikte yapıyı olumsuz etkiler ve hasar genellikle bu bölgeden meydana gelir [30].

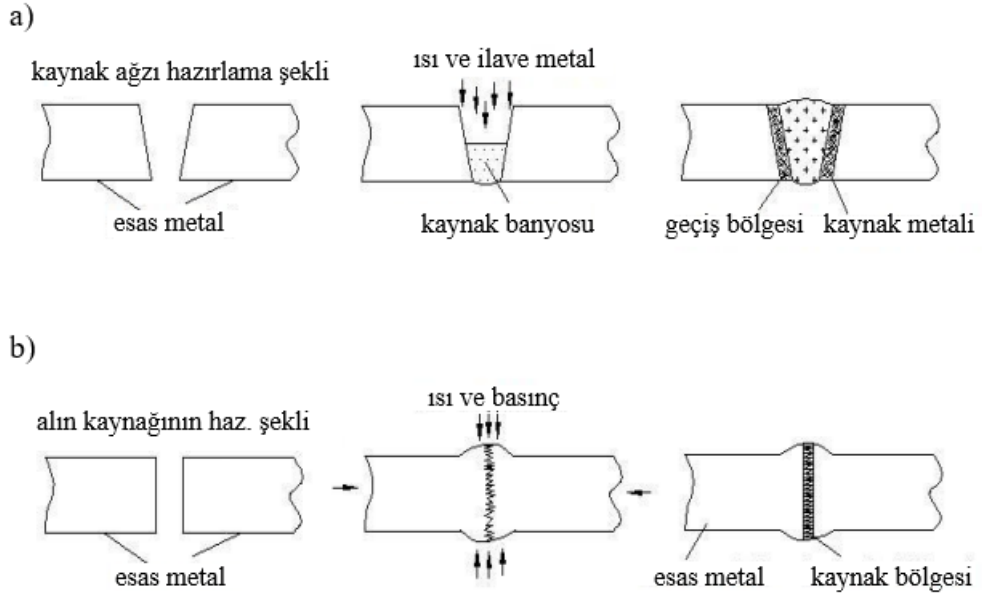
İçyapı değişikliğine uğramamış bölge; diğer bölgelerde ulaşılan sıcaklığın altına kadar ısınan ve bu ısınma süresince bir içyapı dönüşümüne uğramayan bölgedir. Kaynak işlemlerinde genellikle metal, önce ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve sonra soğutulmaktadır. Bu yüzden çelik malzemelerin kaynağında, kaynak bölgesinde Şekilde gösterilen yukarıda kısaca belirtilen dönüşümler olmaktadır (Şekil 2.2) [2].



Şekil 2.2. ITAB bölgeleri [3].

Kaynak yöntemi temelde iki grup halinde incelenebilir. İlki ergitme kaynağı, malzemeyi yalnız sıcaklığın tesiri ile bölgesel olarak ertip, ilave metal katarak veya katmadan birleştirmektir. Elektrik ark kaynağı, elektrik direnç kaynağı, oksiyanııcı gaz kaynağı, lazer kaynağı vb. yöntemler ergitme kaynağına örnek gösterilebilir. Diğerleri ise basınç kaynağı, malzemeyi genellikle ilave metal katmadan basınç altında

bölgesel olarak ısıtıp birleştirmektir. Dövme kaynağı, sürtünme kaynağı, haddeleme kaynağı vb. yöntemler basınç kaynağına örnek verilebilir (Şekil 2.3).

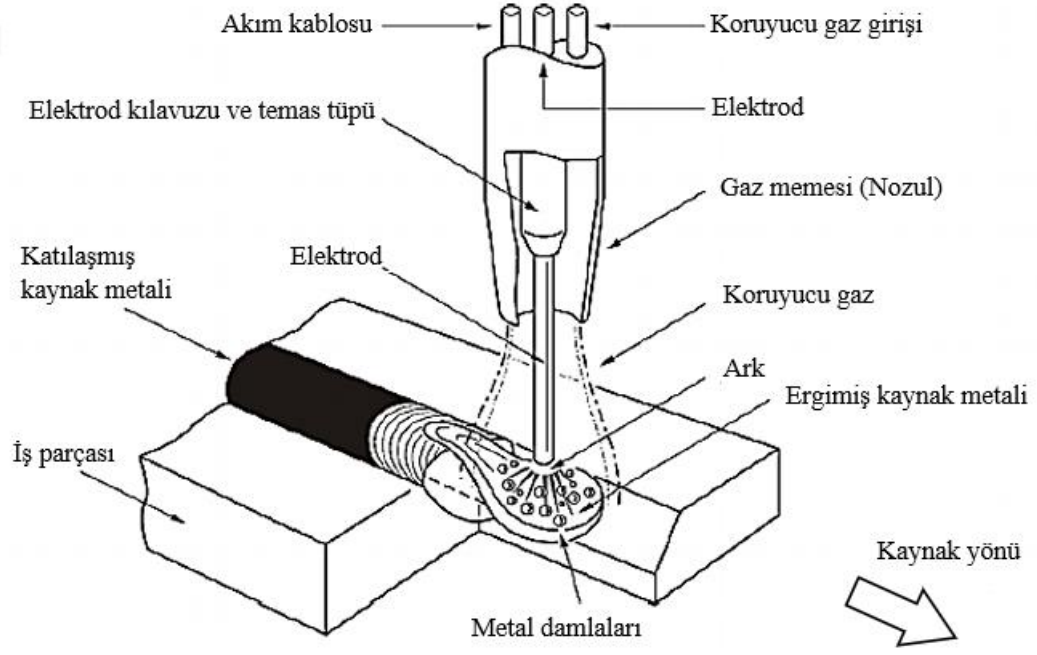


Şekil 2.3. a) Ergitme kaynağı ve b) basınç kaynağının şematik gösterimi [31].

Endüstride yaygın olarak elektrik ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı, oksi asetilen kaynağı, elektrik direnç ark kaynağı, enerji ışın kaynağı (lazer kaynağı) ve tozaltı kaynak yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemlerinin temel ortak özelliği elektrik akımı kullanılarak oluşturulan ark vasıtasıyla kaynak bölgesinde oluşturulan ısı ile dar bir alanda ergitme işleminin gerçekleştirilmesidir [4].

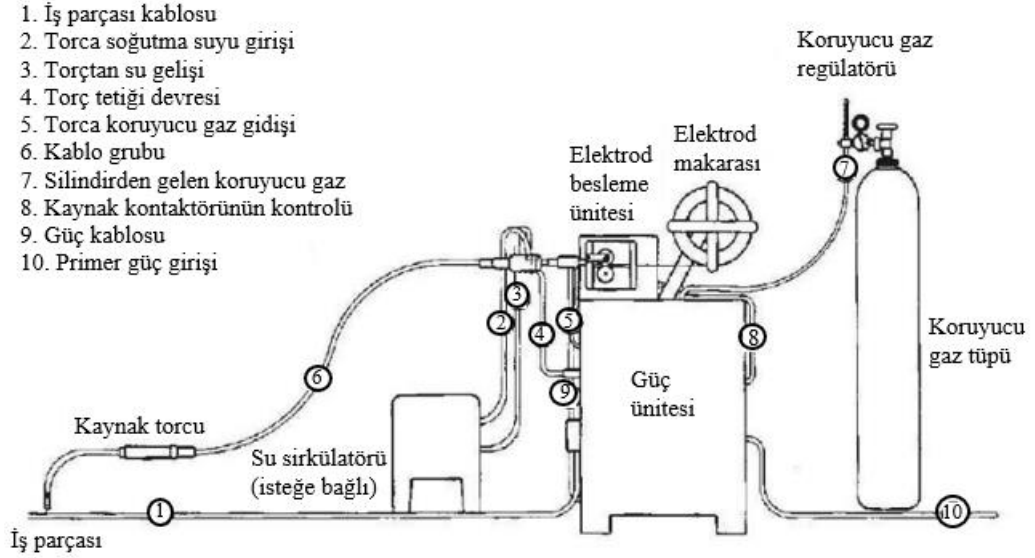
2.2 Gazaltı Kaynak Yöntemleri

Gazaltı ark kaynağı, kaynak bölgesini dış etkenlerden çeşitli gazlarla koruyarak, metalleri elektrotla birbirine birleştiren bir kaynak yöntemidir. Koruyucu gazın etkisi kaynak arkını ve kaynak yerini koruyarak, kaynağın en az hata ile oluşturulmasına yardımcı olur (Şekil 2.4). Elektrot çıplak bir tel olup, elektrot besleme mekanizmasından kaynak bölgesine önceden ayarlanmış sabit hızla kaynak bölgesine aktarılır [5].



Şekil 2.4. Gazaltı kaynağının prensibi [6].

Gazaltı kaynak donanımı kaynak torcu ve kablo grubu, güç ünitesi, elektrod besleme ünitesi ve koruyucu gaz ünitesi olmak üzere dört temel gruptan oluşur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Gazaltı kaynak donanımı [7].

Gazaltı kaynak yöntemlerinin isimlendirilmesi, kullanılan koruyucu gaz ve elektrod ergimesine göre değişmektedir. Ergiyen elektrod ile soygaz altında yapılan gazaltı kaynak yöntemi MIG (Metal Inert Gaz), ergiyen elektrod ile aktif gaz altında yapılan

gazaltı kaynak yöntemi MAG (Metal Aktif Gaz) olarak isimlendirilir. Ergimeyen bir elektrodla yapılan gazaltı kaynak yöntemi ise TIG (Tungsten Inert Gaz) olarak adlandırılır.

Bazı ülkelerde bu kaynak yöntemlerinin isimleri değişebilmektedir. Örneğin, Avrupa bölgesinde MIG/MAG, Amerika Birleşik Devletleri'nde ise GMAW (Gas Metal Arc Welding) adı verilmektedir. Ülkemizde ise Ergiyen Elektrod Gazaltı veya MIG/MAG Kaynağı adları kullanılmaktadır.

Kullanılan kaynak yöntemlerine bakıldığında ergiyen elektrod gazaltı kaynağı, malzeme kalınlığı çok düşük parçalar dışında, hemen hemen tüm kalınlıklardaki metal ve alaşımlarda daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılması ise diğer kaynak yöntemlerine göre avantajlı olmasındandır. Bu avantajlar aşağıda verilmiştir;

- Kaynak işleminde kaynak teli sürekli olarak beslenmektedir. Elektrik ark kaynağındaki gibi elektrod uzunluğu sınırlı değildir.
- Endüstride çoğunlukla kullanılan metal ve alaşımlarının kaynağında kullanılabilir olması ile sürekliliği olan bir kaynak yöntemidir.
- Elektrik ark kaynağında olduğu gibi iş parçasında, her pozisyonda kaynak yapılabilir.
- Ara vermeden uzun bir kaynak uygulaması yapılabilir.
- Kaynak telinin sürekli olarak beslenmesi ve metal yığılma hızından dolayı kaynak hızı elektrik ark kaynağına göre daha yüksektir.
- Cüruf tabakasının az olması sebebiyle cüruf temizleme zamanı azalmaktadır [7].

Bu yöntemin de diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi dezavantajları vardır. Bunlar;

- Kaynak donanımı daha kompleks yapıya sahiptir ve taşınması zordur.
- Kaynağın koruyucu gaz tarafından korunabilmesi için, torcun iş parçasına yakın olması gerekmektedir. Ulaşılması güç olan yerlerde bu yöntemi kullanmak mümkün değildir.
- Bu yöntem atmosfere açık ortamda uygulanması uygun değildir. Koruyucu gazın, kaynak arkını havadan koruduğu için kapalı alanlarda yapılması gerekmektedir [7].

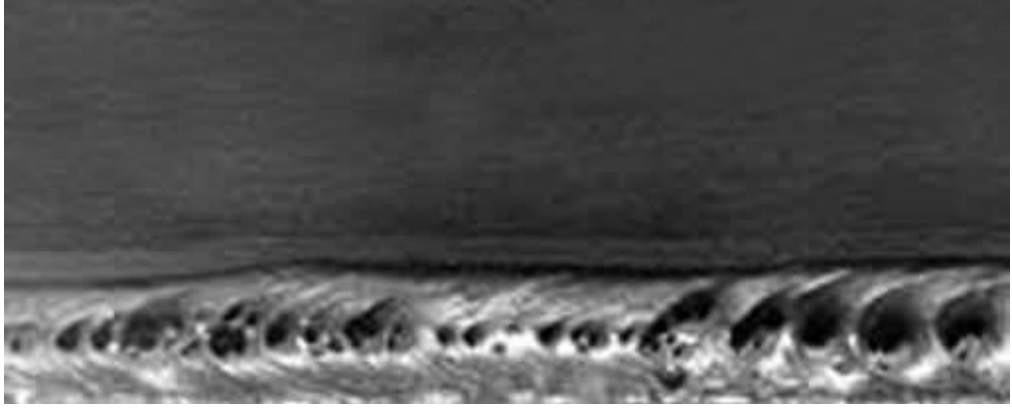
2.3 Kaynak Kusurları

Kaynakla birleştirilen iş parçasında, ana malzeme veya kaynak bölgesinde mekanik, metalurjik veya fiziksel özelliklerin homojenliğini bozan sebepler süreksizlik olarak tanımlanır. Her süreksizlik kaynak hatası olarak kabul edilmez [8]. Önemli olan hatanın kabul edilir olup olmamasıdır.

Kaynak hataları dış hatalar ve içyapı hataları olmak üzere ikiye ayrılır. Dış hatalar, genellikle gözle ve büyüteçle belirlenebilen hatalardır. İçyapı hataları ise, mikroskop ile incelendiğinde belirlenebilen hatalardır.

2.3.1 Dış hatalar

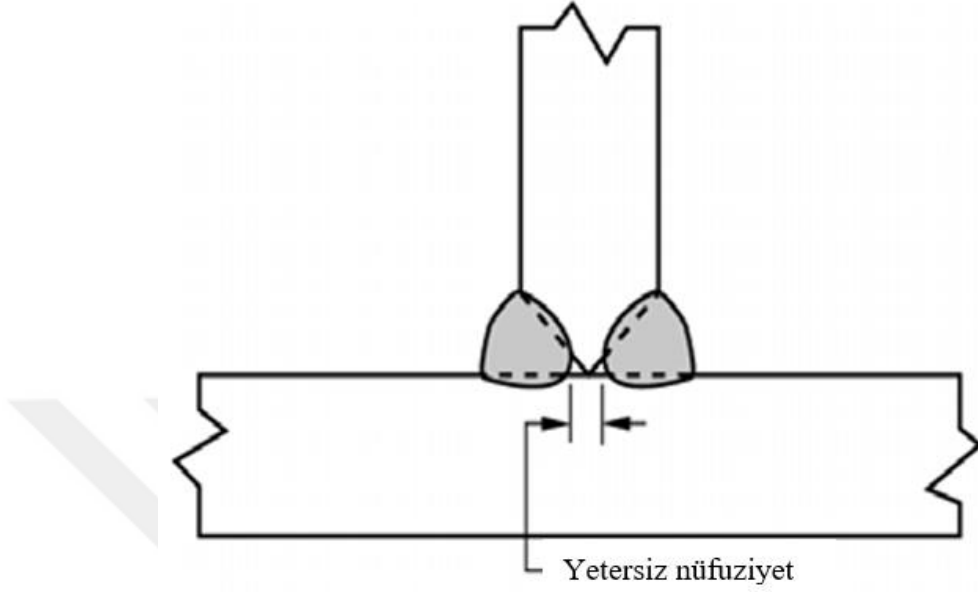
Gözenek oluşumu; kaynak metalinin katılaşması esnasında içerde bulunan gazların dışarı atılamamasından dolayı oluşan bir hata türüdür. Gözenekler, kullanımda oluşacak herhangi bir zorlamada mukavemeti azaltır. Gözenek çevrelerinde gerilme yığılmaları oluşur. Kullanılan elektrodun rutubetli olması, akım derecesinin düşük uygulanması, kaynak yapılacak yüzeyin yeterince temiz olmaması gibi sebeplerle gözenek hataları görülür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Kaynakta gözenek hatası.

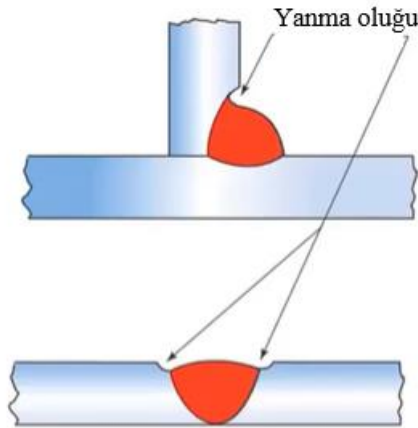
Yetersiz nüfuziyet; kaynak ergimesinin bütün malzeme kalınlığı boyunca olmaması sonucunda oluşan hata türüdür. Kaynaklı bağlantının alt bölgelerinde, kırılmaya sebep olan oyuk ve çentikler meydana gelir. Nüfuziyetin az olması kaynak dikişinin yorulma mukavemetinin önemli derecede düşmesine neden olur. Dikişin eğmeye zorlanması durumunda alt kısımdaki oyuk ve çentikler kırılmaya sebep olur. Uygun çapta elektrot

kullanılmaması, akım şiddetinin doğru seçilmemesi, uygun kaynak ağzının açılmaması ve uygun olmayan bir kök paso çekilmesi nüfuziyet azlığına sebep olur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Kaynakta yetersiz nüfuziyet.

Yanma olukları; kaynak sonrasında ana malzemenin yan kısımlarında oluşan hata türüdür. Genellikle kaynak esnasında çıkan gaz miktarı fazlaysa bu ani hacim artmasına yani patlamaya neden olur. Ani hacim artışında kaynak dikişinin kenarlarında oluklar oluşabilir. Yanma olukları, kesitte azalma ve kuvvet hatlarının yön değiştirmesine sebep olur. Dinamik zorlamalarda yanma olukları kırılmalara sebebiyet verir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Kaynakta yanma oluğu.

Kaynak çatlakları; kaynak dikişinde kabul edilemez bir hatadır. Özellikle dinamik yükleme durumunda çatlak küçük bile olsa büyüyerek çentik etkisi yapar ve parçanın kırılmasına neden olur. Çatlak, kaynak bölgesi, ITAB bölgesi veya ana malzemede meydana gelebilir. Hatalı kaynak ağzı açılması, kaynağın hızlı soğutulması, yanlış kaynak metali kullanılması ve kaynak yapılacak yüzeyin temiz olmaması gibi durumlarda çatlaklar oluşabilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Kaynakta çatlak hatası.

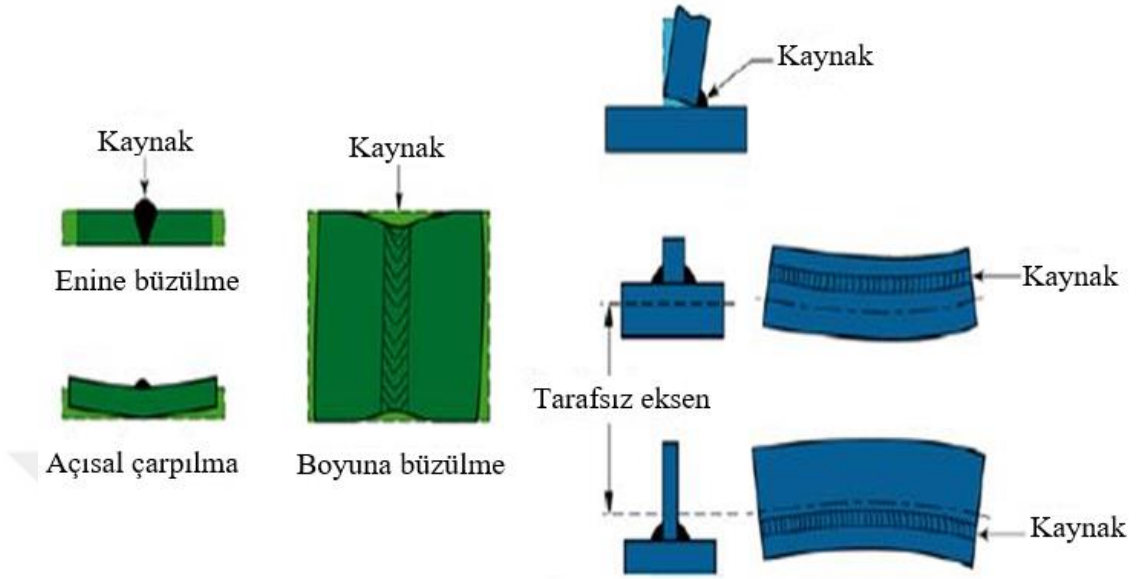
Sıçramalar; kaynak işlemi sırasında ergimiş metalin sağa sola sıçramasıyla oluşan bir hata türüdür. Özellikle akım derecesi yüksek olduğunda ve nemli elektrot kullanıldığında oluşur. Yan yüzeylere sıçrayan metal elektrot dolgusunda azalmaya sebep olur. Sıçrayan metaller kaynak dikişinde görüntüyü bozar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Kaynakta oluşan sıçramalar.

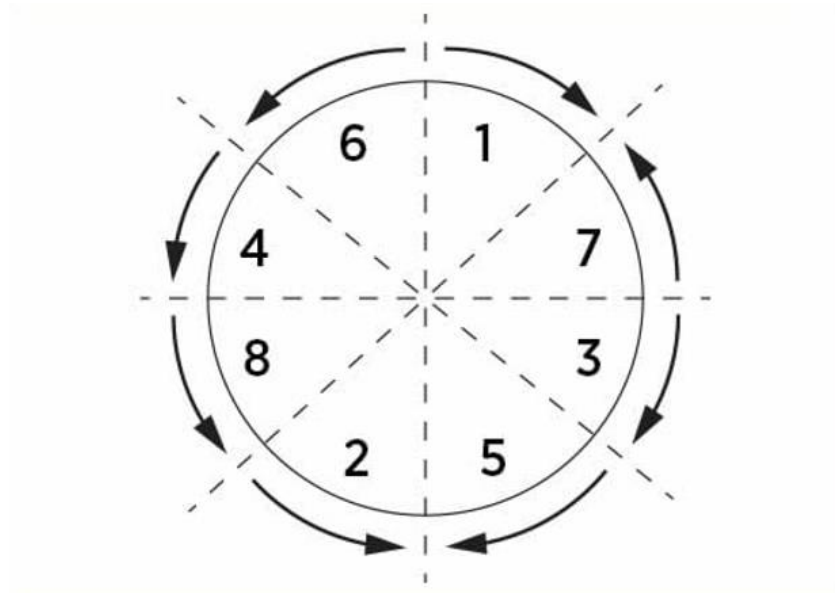
Çarpılmalar; kaynamış metalde üst ve alt kısımda oluşan ergimiş metal yoğunluğu farkından dolayı büzülme ile oluşan hata türüdür. Fazla ısı girdisi, yanlış kaynak ağzı

seçimi, parçaların puntalanmaması ve yanlış sırada kaynak uygulanması yani metod kaynak kullanılmaması gibi durumlarda parçada çarpılma hataları oluşur (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Kaynakta oluşan çarpılma hataları [32].

Metod kaynağı kaynaklarda çarpılmaları önlemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu kaynak yönteminde karşılıklı kaynak yaparak, malzemelerin tek bir yöne doğru çekmesini önleyerek ısıdan kaynaklı eğilmeler minimum düzeye indirilir (Şekil 2.12) [7].



Şekil 2.12. Metod kaynak yöntemi [32].

2.3.2 İç hatalar

Hidrojen gevrekliği; kaynak sırasında nemli elektrod kullanılırsa su buharı içerisindeki hidrojen kaynak dikişi içine nüfuz eder. Parça soğuduğunda hidrojen tekrar moleküle dönüşür bu hacimsel değişiklik iç gerilme oluşturur.

Martenzit oluşumu; hızlı soğuma sonucu oluşur. Sert bir yapıdır.

Azot yaşlanması; azot atomları tane sınırlarında yapının gevrek ve sert olmasına neden olan hata türüdür. Bu durumda kırılma ve çatlama olayı kolaylaşır.

İçyapıdaki tane farklılıkları; tane yapısı büyüdükçe tane sınırı azalır. Bu durumda dislokasyonların hareketi kolaylaşır ve mukavemet azalır.

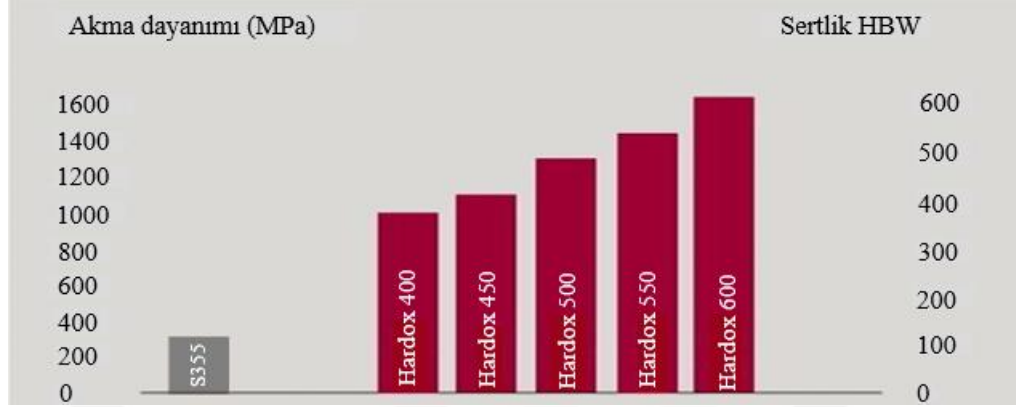
2.4 Hardox Çelikleri

Hardox çelikleri, aşınmaya karşı yüksek direnç, işlenebilme kabiliyeti ve yüksek mekanik özellikleri ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [9].

Endüstride kullanılan malzemelerin diğer malzemeler ile teması ya da çevre koşulları nedeni ile aşınmalarıyla orijinal ölçülerini kaybetmesi parçanın işlevselliğini bozarak verimini düşürmektedir. Malzeme cinsi, kimyasal içerik, sertlik, elastisite modülü, aşındırıcının tane boyutu ve şekli aşınmanın şiddetine etki eden faktörlerdendir. Sert malzemelerin aşınmaya karşı dirençlerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu sebeple sertlik, aşınmaya dirençli malzeme seçiminde tercih edilen önemli bir etkidir [10].

Hardox, aşınma direnci yüksek bir aşınma levhasıdır. Düzgün dağılımlı yüksek sertlik, yüksek tokluk ve yüksek mukavemete sahip bu malzeme birbirinden farklı çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu ürün 1970 yılında ilk defa piyasaya sunulmuş ve günümüze kadar farklı gereksinimleri karşılayacak şekilde sürekli olarak geliştirilmiştir. Aşınmaya karşı dirençli Hardox çeliği, diğer yüksek mukavemetli çeliklere göre 4-5 kat daha sert olmasına rağmen iyi kaynak edilebilirliği ve yüksek işlenebilme kabiliyetinden dolayı malzeme ile çalışma kolaylaşmaktadır. Bu sebeple kullanımda avantaj sağlamaktadır [10].

Hardox aşınma çeliklerinin farklı sertlik seviyelerinde, Hardox 400, Hardox 450, Hardox 500, Hardox 550 ve Hardox 600 olmak üzere çeşitleri bulunmaktadır. Hardox çeliklerinin sertlik ve akma dayanımları Şekil 2.13'te gösterilmiştir [9].



Şekil 2.13. Hardox çeliklerinin sertlik ve akma dayanımları.

Sertlik, Hardox çeliğine mükemmel bir aşınma direnci ve tokluk sağlamaktadır. Hardox'un sertliği, malzemenin kullanım ömrünün sonuna kadar aynı olduğundan, aşınma direnci de malzeme tükenene kadar devam eder. Ayrıca sertlik parçanın şeklinin deforme olmadan aynı kalmasını sağlayan çok iyi akma ve çekme dayanımına sahip olduğunu gösterir.

Hardox çelikleri, kolay işlenebilir, şekillendirilebilir ve kaynak edilebilir olmasından dolayı farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle damperli araç üretiminde ve ekskavatör kovaları yapımında vazgeçilmez ürünlerden biri olarak kabul edilir. İnşaat ve madencilik endüstrisinde yıkım ekipmanları ve darbelere karşı koruma sağlamak için kullanılan zemin kaplamaları gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Tarım endüstrisinde, dayanıklılığı ve aşınma direncinden dolayı traktörlerin, hasat makinelerinin ve diğer tarım ekipmanlarının imalatında tercih edilmektedir. Bu malzeme ayrıca zırh plakaları ve diğer savunma sanayi uygulamalarında da kullanılmaktadır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Hardox malzemelerin kullanıldığı yerler.

2.5 Genel Yapı Çelikleri

Yapı çelikleri genel olarak alaşımsız çeliklerdir. İçeriğinde bulunan alaşım elementi oranlarına göre çeliklerin alaşımsız olup olmadıkları belirlenir. Tanım ve kullanımında kolaylık sağlamak amacıyla çelikler, değişik sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırmalar, karbon oranına göre, alaşım elementi miktarına göre ve kullanım alanına göre sıralanabilir.

İçeriğindeki karbon oranlarına göre çelikler, düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, yüksek karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu takım çelikleri olarak 4 sınıfa ayrılırlar. %0.25 oranına kadar karbon içeren çeliklere düşük karbonlu çelikler, %0.25 ile %0.55 arasındaki oranlarda karbon içeren çelikler orta karbonlu çelikler ve %0.55' den başlayıp %1.6'ya kadar karbon içeren çelikler yüksek karbonlu çelikler olarak adlandırılır. %0.9-1.6 arasında karbon miktarına sahip çelikler yüksek karbonlu takım çelikleridir [1].

Alaşım elementi miktarına göre yapılan sınıflandırmada çelikler, alaşımsız çelikler, düşük alaşımlı çelikler, alaşımlı çelikler olmak üzere üç ana grupta toplanır. Kullanım alanına göre çelikler ise çeliklerin karakteristik özellikleri ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırmalarla ön plana çıkmaktadır. Örneğin; konstrüksiyon çelikleri, yay çelikleri, otomat çelikleri, imalat çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve borlu çelikler vb. şeklinde sıralanabilir.

Yapı  elikleri eskiden ifade edilirken çekme dayanım özelliğinin belirtildiği bir kodlama ile gösterilirdi. Alman DIN standartlarında yapı çeliklerinin adlandırılması sırasında Almanca  elik anlamına gelen “Stahl” kelimesinin ilk iki harfi olan St ve malzemenin çekme mukavemeti (kg/mm^2 olarak) belirtilirdi. Bunlara  rnek olarak St33, St34, St37, St42, St46, St50, St52, St60, St70 gösterilebilir. Burada  ekme dayanımı en düşük olan St33 iken, çekme dayanımı en yüksek olan ise St70 olmaktadır. Günümüzde ise yapı  eliklerinin TS EN 10025-2 standardı ile yeni simgeleri, kimyasal ve mekanik özellikleri, teslim şartları gibi tüm özellikleri düzenlenmiştir. Burada St52  eliğinin yeni karşılığı S355 olarak adlandırılmıştır ve “S”  elik grubunu (Structural Steel – Yapı  eliği), “355” MPa olarak minimum akma mukavemetini göstermektedir. S355 adlandırması ise yalnız başına kullanılmayıp ardına ek olarak J0, JR, J2 ve K2 gibi ekler yer almaktadır. Bu ekler ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- J0: 0 C  darbe enerjisi, en az 27 J olduğunu ifade eder.
- JR: 20 C  darbe enerjisi en az 27 J olduğunu ifade eder.
- J2: -20 C  darbe enerjisi en az 27 J olduğunu ifade eder.
- K2: -20 C  kalınlık ≤ 150 mm için darbe enerjisi en az 40 J olduğunu ifade eder [1].

Bu çalışmada da kullanılan S355J2C+N yapı çeliği, geniş kullanım alanına sahiptir ve iyi kaynak edilebilme kabiliyeti vardır. S355J2C+N gösterimindeki C sembolü malzemenin soğuk şekillendirebilme özelliğine sahip olduğunu, +N sembolü ise malzeme üretiminin normalizeli olduğunu ifade etmektedir.

S355J2  elik, mühendislik ve yapısal uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda, yüksek performans göstererek birçok kullanım alanına hitap eder. Minimum 355 MPa akma mukavemeti ve 470-630 MPa

arası çekme mukavemeti vardır. Bu değerler, çeliğe ağır yükler ve zor şartlar altında bile çalışma imkânı sunar.

Yapı çeliklerinde karbon (C) elementinin yanı sıra Cr, Si, Mn, Ni, Al, Mo gibi farklı elementlerle alaşımlandırma işlemi yapılır. Çeliklerin mekanik dayanımları, sertlik, süneklik, çentik darbe direnci, tokluk, şekillenebilme, talaşlı imalat ve kaynak kabiliyeti gibi birçok özelliğinde alaşımlandırma işleminin etkisi vardır.

Yapı çeliklerinin kullanımı günümüzde birçok alanda kaynaklı bağlantı şeklindedir. Özellikle düşük veya orta karbonlu yapı çelikleri ön ısıtma yapmaya gerek duymadan kaynak yapılabilmektedir. Karbon miktarı dışında diğer alaşım elementlerinin miktarı da kaynaklanabilirlik açısından önemli bir etkidir [11].

S355J2 çelik, çeşitli endüstriyel uygulamalarda, geniş kullanım alanları olan bir malzemedir. Yüksek mukavemet ve dayanıklılık özellikleri sayesinde özellikle inşaat, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde; yüksek katlı yapılar, köprüler, kuleler, platformlar, tarım makineleri, ağır iş makinaları gibi imalatlarda sıklıkla kullanılır.

2.6 Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi, üründe değişkenliği oluşturan faktörlerin en uygun kombinasyonunu sağlayarak, daha az deneme yöntemiyle daha iyi sonuç alınabilmesinde ve ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesinde etkili olan bir deneysel metottur [12]. Bunun yanında felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir [13]. Bu metotta faktör seviyelerinin belirlenmesinde; gözlem, sıralama, sütun farkları, varyans analizi yöntemi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır [14].

Taguchi metodu, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir.

Sistem tasarımı; normal şartlar altında çalışacak prototip bir sistemin geliştirilmesi için kullanılan, metodun başlangıç aşamasıdır. Bu aşamada en az maliyetli üretim sistemini oluşturmak için malzeme tercihi, yeni teknolojiler ve gelişmeler, alt montaj ve bileşen parçaların seçimi gibi faaliyetler yapılır.

Parametre tasarımı; istenilen kalitede bir ürünü üretebilmek ve en az deneme yöntemiyle hedef değere ulaşabilmek için kullanılan deneysel tasarımları içerir.

Tolerans tasarımı; parametre tasarımı çalışmaları sonucunda beklenen değerlere ulaşamadığı durumda yapılacak çalışmaları içerir ve hedeften sapmanın getirdiği kayıplar incelenir [15].

Taguchi yönteminde, tercih edilen kalite karakteristiği olarak sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılır. S/N oranı, standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılır. En basit hali ile S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır. S/N oranı özellikleri, en büyük en iyi olduğu durumda, en düşük en iyi olduğu durumda ve nominal en iyi olduğu durumda olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir.

En büyük en iyi olduğu durumda,

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.1)$$

Bu durum en büyük değer en iyi olacağı S/N oranını ifade eder. y'nin değeri sonsuzluk olarak ideal bir hedefi olan negatif olmayan ölçülebilir bir değerdir. Örneğin, güç ve verim vb.

En düşük en iyi olduğu durumda,

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.2)$$

Bu durum ise, en küçük değer en iyi durumu için S/N oranını ifade eder ve y'nin hedef değeri sıfırdır. Örneğin yüzey pürüzlülüğü, lastik aşınması ve proses arızası vb.

Nominal en iyi durumda,

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (2.3)$$

Bu durum ise, hedef değer en iyi durumu için S/N oranını ifade eder. Yani bütün parçalar bu değere getirilirse, varyasyon sıfır olur ve en iyisidir. Örneğin ürün boyutları vb. [33].

Eşitliklerde n değeri toplam deney sayısını, y değeri de deneysel sonucu ifade etmektedir.

Proses parametrelerinin optimal değeri en yüksek S/N oranına sahip değerdir. Çünkü daha yüksek bir S/N oranı daha iyi kalite özelliklerine karşılık gelir [33].



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Farklı tipte Hardox çeliklerin genel yapı çelikleriyle kaynaklanabilirliği önemli bir araştırma konusu olarak son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu konuyla ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar ve elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Uluocak (2008), yapmış olduğu çalışmada 5 mm kalınlığındaki Hardox 450 çeliklerini MAG kaynak yöntemi ile birleştirilerek çeliğin mekanik özelliklerini ve ısı tesiri altında kalan bölgenin mekanik ve mikroyapısal değişimlerini incelemiştir. Kaynaklı Hardox 450 çeliğinin çekme deneyi sonucunda tüm numunelerde kopmanın ısıdan etkilenen bölgede olduğu tespit edilmiştir. Hardox 450 çeliğinin mikrosertlik ölçümlerinde ise Hardox 450 ana metalin sertlik değeri, kaynak metalinin ve ITAB'ın sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Optik mikroskop incelemelerinde ise kaynak bölgesinde daha büyük tanelere ve kaynak bölgesinden uzaklaştıkça, ısı etkisinin azalması neticesiyle daha ince tanelerin olduğu gözlemlenmiştir [10].

Yılmaz (2010), yaptığı çalışmada Hardox 400 çeliğini MAG kaynak yöntemi ile farklı kaynak telleri kullanarak birleştirmiştir. Çalışmada SG2 ve SG3 masif kaynak telleri ve E 71 T-1 adlı özlü kaynak teli kullanarak V kaynak ağzı formunda ve yatay pozisyonda kaynak yapılmıştır. Farklı kaynak telleri ile kaynatılan bu yapının mikroyapısındaki benzerlikleri ve farklılıklar tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Hardox 400 çeliğinin, uygun parametreler ile MAG kaynak yöntemi kullanılarak, hem yüksek mekanik değerlerin elde edilebileceği, hem de SG3 kaynak teli ile yüksek hızlarda ve yüksek dolgu miktarında kaynak yapmaya izin veren özlü kaynak telleri ile başarıyla birleştirilebileceği tespit edilmiştir. Çalışmada, numunelere çekme testi uygulanmış ve bütün numuneler mekanik özelliklerin zayıf olduğu düşünülen ITAB bölgesinden kopmuştur. Yapılan eğme testi sonucunda numunelerin birleşme yerlerinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanmazken, sertlik testinde ise en yüksek sertlik değeri ana malzemede olurken ITAB bölgesinde sertlik azalmış, kaynak bölgesinde ise bir miktar artma gözlemlenmiştir [16].

Okay vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada S235JR ve Hardox 400 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel

Çalışma sonunda, farklı cins çeliklerin kaynakla birleştirilmesinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çekme testi sonucunda, kırılmanın ITAB bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Darbe kırılma enerjisi -50 C' de 84 J, 0 C' de 92 J ve oda sıcaklığında ise 98 J olarak ölçülmüştür. Ayrıca sertlik ölçüldüğünde ITAB bölgesinde sertlik değeri, Hardox 400 ana malzemesinden daha düşük, kaynak metalinden daha yüksek bir sertliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir [17].

Bilen (2016), yaptığı çalışmada 4 mm kalınlığında Hardox 400 eliği ve AISI 304 paslanmaz eliğini, PTA (Plazma Transferli Ark) kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametreleri ile kaynak yapmıştır ve kaynak parametrelerinin etkilerini incelemiştir. elik malzemeler, kaynak ağzı açılmadan ve ilave metal kullanılmadan farklı kaynak parametrelerinde yatay pozisyonda kaynak edilmiştir. Çalışmada kaynak sonrası numunelerin tahribatlı muayenesi ve tahribatsız muayenesi yapılmıştır ve sonuç olarak kaynaklı bağlantıların birleşme ara yüzeyinden alınan mikroyapı görüntülerinde sırasıyla kaynak dikişi ve ısı tesiri altında kalan bölgeden ana malzemeye doğru ilerledikçe mikroyapı karakteristiklerinde değişimler olduğunu gözlemlemiştir [18].

Huang vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada gaz tungsten ark kaynağı ile 3,2 mm çaplı A022 dolgu elektrotu kullanarak, 8 mm kalınlığında S355JR eliği ile 316L paslanmaz çeliği kaynatılmıştır. Farklı kaynak ağızları (V, X, K) uygulanarak kaynaklanan parçalarda mikroyapının karakterizasyonu ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışması sonucunda, farklı kaynak ağızlarına rağmen boyuna artık gerilme dağılımının benzer olduğu görölmüştür. V kaynak ağzındaki enine artık gerilmenin tepe değeri, K kaynak ağzındakinden %40,1 daha büyük olduğunu ölçülmüş ve kaynak ağızlarının farklı çeliklerde kaynak verimini etkilediği gösterilmiştir [19].

Kaçar vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada Hardox 400 ve AISI 304 eliklerini elektrik ark kaynağı ve gazaltı ark kaynağı yöntemleri ile birleştirerek, farklı kaynak yöntemlerinin birleşmenin mekanik özelliklerine ve yapısına etkisini incelemişlerdir. Yapılan test çalışmalarına göre, gazaltı ark kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin dayanımlarının elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerden daha iyi olduğu tespit edilmiştir [20].

Kaya (2018), yaptığı çalışmada 3 mm kalınlığında S235JR ile S355JR yapı çeliklerini özlü tel kullanarak MAG kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Çelik levhalar kaynatılırken aralarında 1 mm boşluk kalacak şekilde hazırlanmıştır ve sabit kaynak parametreleri ayarlanıp koruyucu gaz olarak CO₂ kullanılmıştır. Kaynak işlemi, S235JR ile S355JR malzemeleri arasında ve kendi aralarında (S235JR-S235JR ve S355JR S355JR) olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmıştır. Kaynak işlemleri sonucunda yapının mekanik testler ile çekme testleri sonucunda oluşan kopma, malzemelerin aynı cins olduğu testlerde (S235JR-S235JR ve S355JR-S355JR) ana malzemeden gerçekleşirken S235JR-S355JR numunelerinde ise parçaların S235JR ana malzeme tarafında gerçekleşmiştir. Kaynaklı parçaların tümünde 180° iki yönlü eğme testlerinde ise, kaynak bölgesinde gözle görülebilir herhangi bir çatlama veya ayrılma gözlenmemiştir. Mikrosertlik testleri sonucunda ise sertlik değeri kaynak metalinde daha yüksek iken, ITAB ve ana malzemeye doğru düştüğü gözlemlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde ise, numunelerin tümünde ana malzemeden kaynak metaline doğru gidildikçe tane yapılarında irileşme meydana geldiği tespit edilmiştir [21].

Adar (2019), yapmış olduğu çalışmada Hardox 500 ile S355 çeliklerinin robotik gazaltı metal ark kaynak (MAG) yöntemi kullanarak, farklı akım ve voltaj parametreleri ile kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Yaptığı bu çalışmada 3 farklı akım (180 A, 190 A, 200 A) ve voltaj (26,6 V, 27,2 V, 27,8 V) parametreleri belirlenerek, tam faktöriyel deney tasarımı ile 9 farklı deney koşulu oluşturulmuştur. Kaynaklı numunelerin birleşim kabiliyetleri mekanik testlerle (çekme ve sertlik ölçüm) belirlenmiştir. Deney sonuçları analiz edilmiş ve SEM-OM görüntüleri ile desteklenmiştir. Sonuç olarak Hardox 500 ve S355 çeliklerinin en uygun şekilde 200 A ve 27,8 V kaynak parametreleri ile kaynaklanabileceği tespit edilmiştir [22].

Savaş (2021), yapmış olduğu çalışmada, 4 mm kalınlığında Hardox 400, AISI 304L tipi paslanmaz çelik ve St52 tipi çelikler kullanılarak, Hardox 400 - Hardox 400, Hardox 400 - AISI 304L paslanmaz çelik ve Hardox 400 - St52 kombinasyonlarında parçaları MIG kaynak yöntemi ile kaynak yapmıştır. Kaynak işlemi, 7,49 m/dk tel hızında, 20,8 V ve 165 A parametreleriyle yapılmıştır. Koruyucu gaz olarak ArCO₂ gazı kullanılmıştır. Kaynak sırasında paslanmaz Si307 tipi kaynak teli kullanılmıştır. Kaynak parametreleri sabit tutularak çeliklerin davranışları ve dayanımlarına

bakılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre en dayanıklı bağlantı 640 MPa ile Hardox-paslanmaz çelik bağlantısında ölçülmüş olup, Hardox- Hardox bağlantısı 400 MPa ve Hardox- St52 bağlantısı ise yaklaşık olarak 350 MPa bulunmuştur. Darbe tokluk testinde ise en iyi sonuç paslanmaz çelik ile yapılan kaynakta elde edilmiş olup değeri 68 J iken sonrasında Hardox metali ile yapılan numunede 44 J, St52 çeliği ile yapılan numunede 38 J olarak ölçülmüştür [23].

3.1 Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri

Literatürde Hardox çeliklerinin farklı tip çeliklerle kaynaklanabilirliği ile ilgili çalışmalar vardır. Ancak, Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin kaynak kabiliyetine ön tavlama sıcaklığı, akım ve voltaj parametrelerinin etkilerinin Taguchi deney tasarımı, ANOVA ve regresyon analizleri ile bir bütün olarak incelendiği bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygın olan bu iki farklı çeliğin kaynak kabiliyetinin parametrik ve istatistiksel yöntemlerle araştırılması çalışmanın özgün yönüdür. Ayrıca literatürde bulunan birçok çalışmada kaynaklar elle yapılmıştır. Robotik kaynak kullanılmasıyla, kaynakların elle yapılmasının neden olabileceği numuneler üzerindeki anlık değişimlerin önlenmesi hedeflenmiştir. Araştırma yöntemi olarak literatürde bulunan yöntemlerden olan mikroyapı incelemeleri ve mekanik test yöntemleri kullanılmıştır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışmada, aşınmaya karşı dirençli ve kaynak kabiliyeti yüksek Hardox 450 çeliği ile mühendislik ve yapısal uygulamalarda geniş kullanım alanına sahip bir genel yapı çeliği olan S355J2C+N kullanıldı.

Çelikler, numune üretiminde kullanılmak üzere belirli boylardaki plakalar halinde hazır halde imalatçı firmadan temin edilmiştir. Daha sonra, 8 mm et kalınlığında olan S355J2C+N ve Hardox 450 malzemelerden kaynak ile birleştirilmek üzere 240×170×8 mm boyutlarda plakalar, lazer kesim ile kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Numune plakaların lazer kesim işlemi.

Kullanılan Hardox 450 ve S355J2C+N ana metallerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Hardox 450 ve S355J2C+N ağırlıkça kimyasal bileşimi (Wt%) [24].

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
S355J2C+N	0.20	1.60	0.25	0.24	-	-	0.035	0.032	Kalan
Hardox 450	0.30	1.62	0.78	1.12	0.22	0.26	0.020	0.010	Kalan

Hardox 450 ve S355J2C+N ana metallerinin yapılan çekme deneylerine göre elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Elde edilen mekanik özellikler literatürle uyumludur [1,24].

Çizelge 4.2. Hardox 450 ve S355J2C+N mekanik özellikleri.

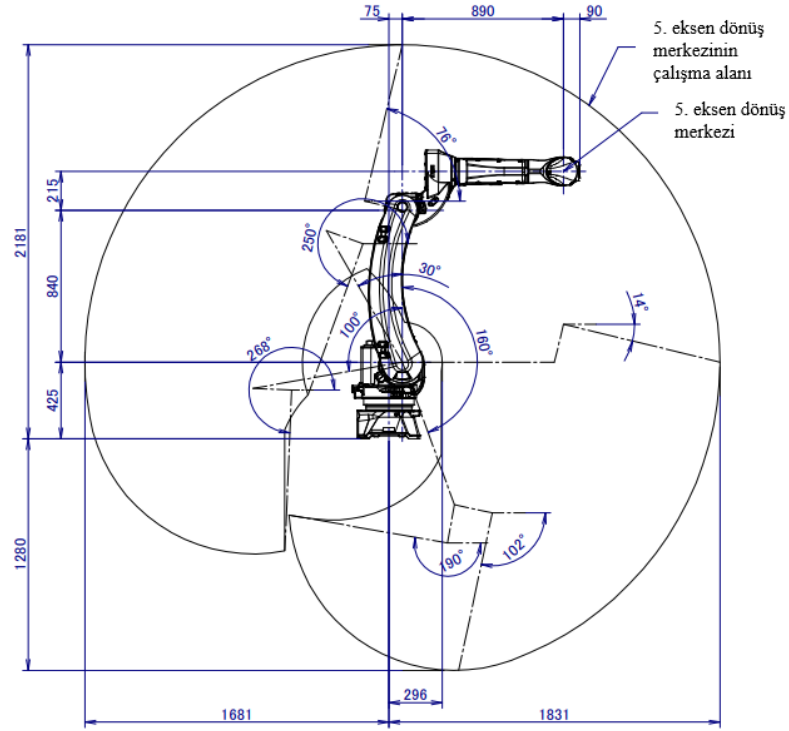
Mekanik Özellikler	S355J2C+N	Hardox 450
Akma Mukavemeti (MPa)	409	1409
Çekme Mukavemeti (MPa)	584	1436
% Uzama	25	11

4.2 Kaynak Makinesi ve Kaynak Teli

Kaynak işleminde 1.2 mm çaplı SG2 kaynak teli ve koruyucu gaz olarak CORGON 82 Ar + %18 CO₂ kullanılmıştır. Kaynak, robotik gazaltı kaynak makinesi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.2). Kullanılan robot kaynak makinesinin çalışma alanı Şekil 4.3’te, özellikleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.2. Kaynakta kullanılan robot kaynak makinesi.



Şekil 4.3. Robot kaynak makinesi çalışma alanı [34].

Çizelge 4.3. Kaynak robotunun modeli ve özellikleri [34].

Model		FANUC ARC Mate 120 iD
Eksen Sayısı		6
Maksimum Uzanma Mesafesi (mm)		1831
Maksimum Yük Kapasitesi Bilekte (kg)		25
Robot Hareket Aralığı (°)	1. Eksen	340 (370)
	2. Eksen	260
	3. Eksen	458
	4. Eksen	400
	5. Eksen	360
	6. Eksen	900
Maksimum Hız (°/s)	1. Eksen	210
	2. Eksen	210
	3. Eksen	265
	4. Eksen	420
	5. Eksen	420
	6. Eksen	720
Pozisyon Tekrarlama Hassasiyeti (mm)		±0.02
Ağırlık (kg)		250

Kullanılan SG2 kaynak teline ait kimyasal bileşim Çizelge 4.4'te, mekanik özelliklerine ait bilgiler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. SG2 kaynak teli ağırlıkça kimyasal bileşimi (Wt%) [24].

Kaynak teli	C	Si	Mn	Fe
SG2	0.08	1.00	1.70	Kalan

Çizelge 4.5. SG2 kaynak teli mekanik özellikleri [24].

Akma Dayanımı (MPa)	470
Çekme Dayanımı (MPa)	570
Uzama (%)	25
Darbe Dayanımı (-30°) J	60

4.3 Deney Parametreleri ve Deney Tasarımı

Çalışmada kaynak parametreleri olarak, ön tavlama sıcaklığı, akım ve gerilim kullanılmıştır. Her parametre için 3 seviye belirlenerek Taguchi L₉'a göre deney tasarımı yapılmıştır. Kaynak parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.6'da, Taguchi L₉'a göre yapılan deney tasarımı ise Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

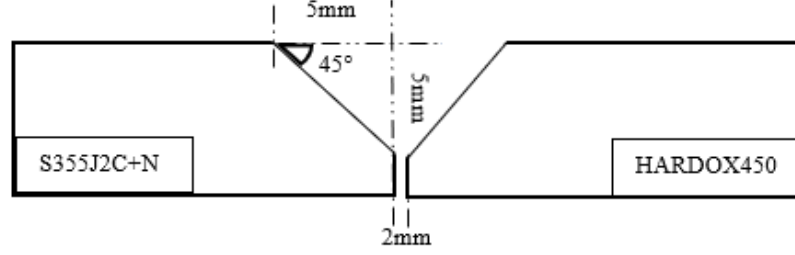
Çizelge 4.6. Kaynak parametreleri ve seviyeleri.

Parametreler	Seviyeler		
	1	2	3
A: Ön tavlama sıcaklığı (°C)	20	50	100
B: Akım (A)	200	220	240
C: Voltaj (V)	26	27	28

Çizelge 4.7. Taguchi L₉ deney tasarımı.

Deney No	Ön Tavlama Sıcaklığı (°C)	Akım (A)	Voltaj (V)
1	20	200	26
2	20	220	27
3	20	240	28
4	50	200	27
5	50	220	28
6	50	240	26
7	100	200	28
8	100	220	26
9	100	240	27

Lazer kesimi yapılan numune plakaların kaynaklanacak birleşim çizgilerine V-45°'lik açı ile 5 mm kaynak ağzı açılmıştır (Şekil 4.4, Şekil 4.5). Kaynak ağzı açıldıktan sonra, parçalar puntalanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.4. V kaynak ağzı gösterimi.

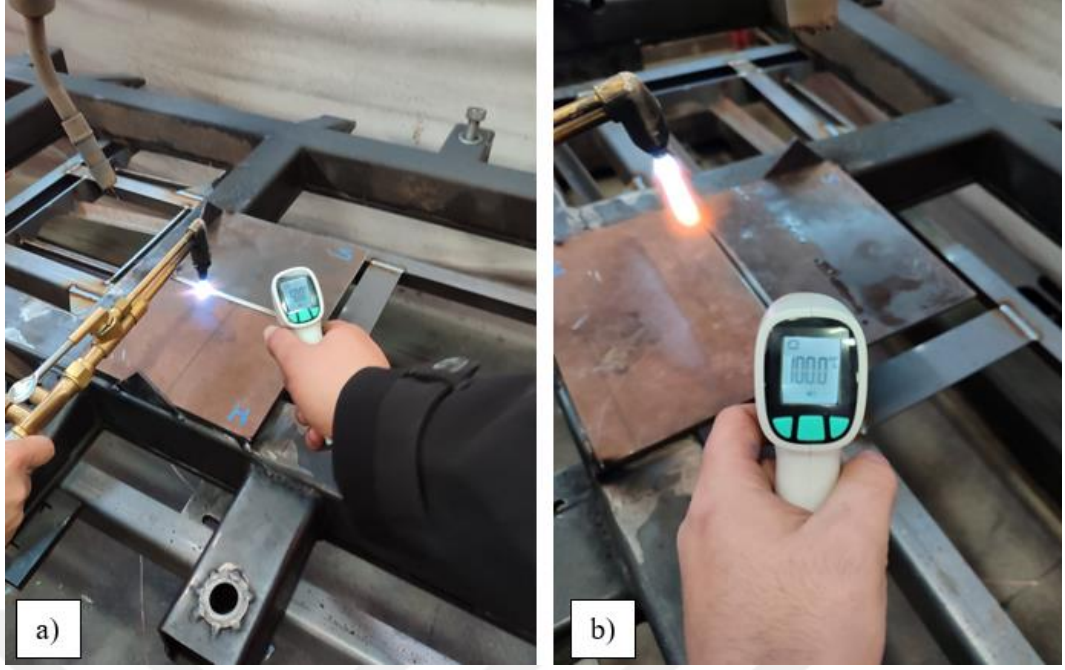


Şekil 4.5. Hardox 450 ve S355J2C+N numunelerin V kaynak ağzı açma işlemi.



Şekil 4.6. Hardox 450 ve S355J2C+N numunelerin puntalama işlemi.

Puntalama işleminden sonra, Taguchi L₉ deney tasarımındaki kaynak parametrelerine uygun olarak plakalar kaynatılmıştır. Ön tavlama işlemi uygulanan deney plakaları oksijen ve yanıcı gaz karışımı ile kaynak hattında noktasal erime oluşturmadan tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7) ve kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynak, robotik gazaltı kaynak makinesi ile 1 pasoda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Kaynaklı plakalar oda sıcaklığında soğutulmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.7. Numune plakaların a) 50 °C ve b) 100 °C ön tavlama işlemleri.

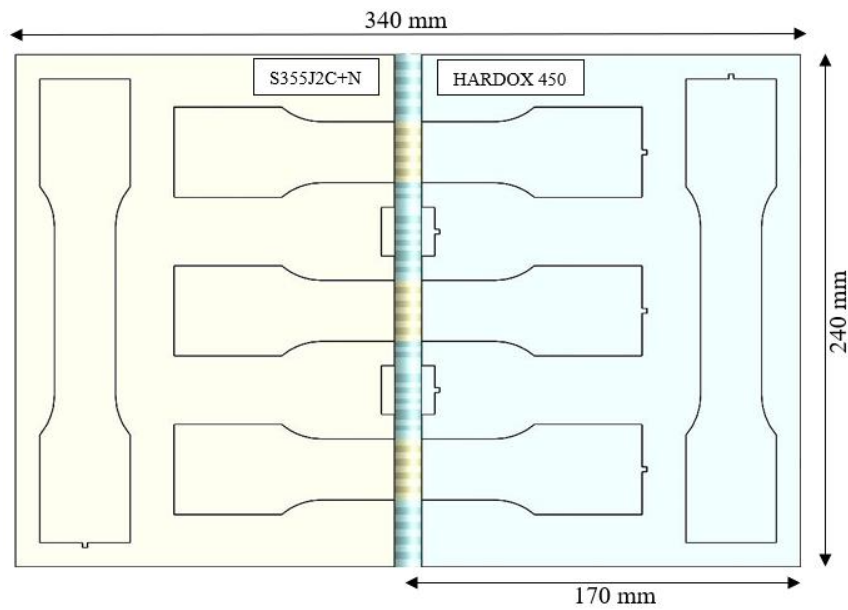


Şekil 4.8. Hardox 450 ve S355J2C+N parçaların kaynak işlemi.



Şekil 4.9. Hardox 450 ve S355J2C+N kaynaklanmış numune parçalar.

Taguchi L9'a uygun olarak üretilen kaynaklı plakaların her biri numaralandırılarak, çekme deneyi ve mikrosertlik test numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 4.10). Her bir plakanın kaynak bölgesinden 3 adet, ana metal bölgelerinden 1'er adet olmak üzere çekme deneyi test numuneleri ile mikrosertlik testi ve mikroyapı görüntülemeleri için yine kaynak bölgesinden test numuneleri lazer kesim ile kesilerek üretilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.10. Kaynaklı plaka test numuneleri hazırlanması.



Şekil 4.11. Kaynaklı plakadan test numunelerinin kesilmesi.

4.4 Çekme Deneyi

Farklı kaynak parametreleriyle birbirine kaynaklanmış kaynaklı plakalardan ASTM-E8 standartına göre çekme deneyi numuneleri oluşturulmuştur (Şekil 4.12). Çekme deneyi numunelerinin parça kalınlığı, kaynak kökü yüzeyinden talaş almak suretiyle talaşlı imalat ile 6 mm'ye düşürülmüştür. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri, 1 mm/dk çekme hızında, 50 kN yükleme kapasiteli SHIMADZU AG-IC test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.13).

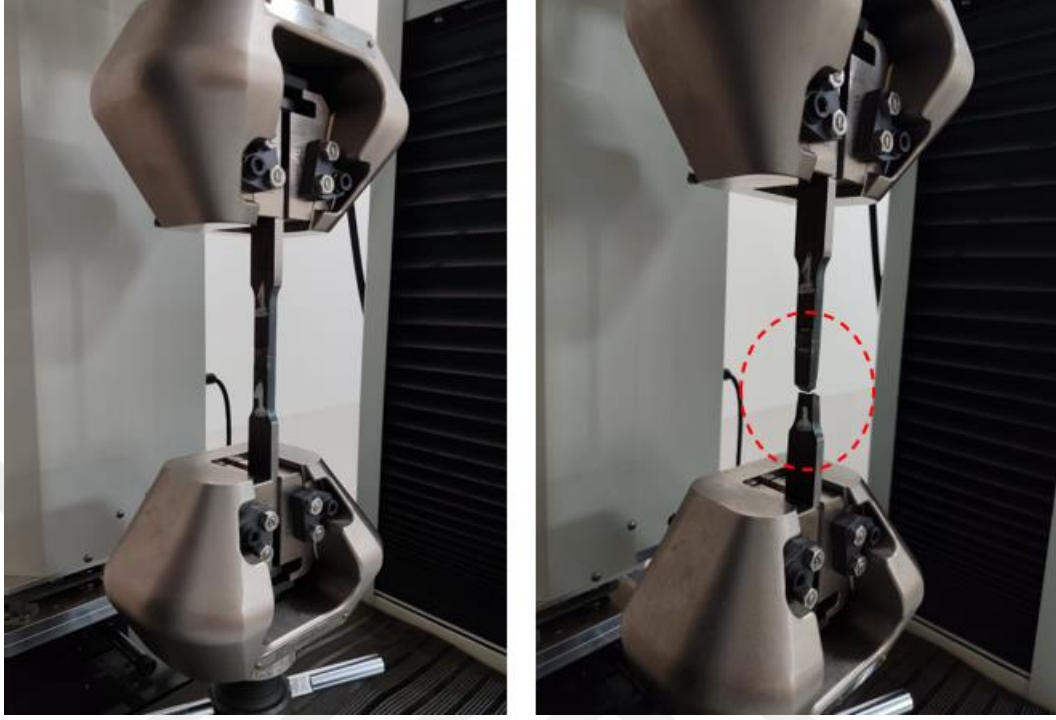


Şekil 4.12. Çekme deneyi test numuneleri.



Şekil 4.13. Çekme deneyi test cihazı.

Her numune grubu için üç çekme test numunesi test edilmiştir. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Numunelere uygulanan çekme deneyi işlemi.

4.5 Mikrosertlik Testi

Farklı türden malzemelerin kaynatılarak birleştirilmesi sonucu oluşan kaynak bölgelerindeki sertlik değerlerini incelemek amacıyla sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda tespit edilen hasar yükleri ve hasar yerlerine göre 7 ve 8 numaralı deneylerin mikrosertlikleri incelenmiştir.

Kaynaklı plakalardan mikrosertlik ve mikroyapı çalışması için numune parçalar üretilmiştir ve bakalite alma işlemi için parçalar bakalit cihazına sığacak şekilde kesilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Kesme makinesi.

Kesme makinesinde kesimi yapılan parçaların kesim çapaklarının alınması için zımparalama makinesi ile düzeltmeler yapılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Bakalite alma işlemi öncesi zımparalama yapılması.

Bakalit alma cihazında 4 dk 190 °C'de ısıtma ve 3 dk soğutma işlemi ile bakalit numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.17). Daha sonra numunelere metalografik numune hazırlama cihazında yüzey kalitesini artırmak amacıyla zımparalama ve parlatma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.18).

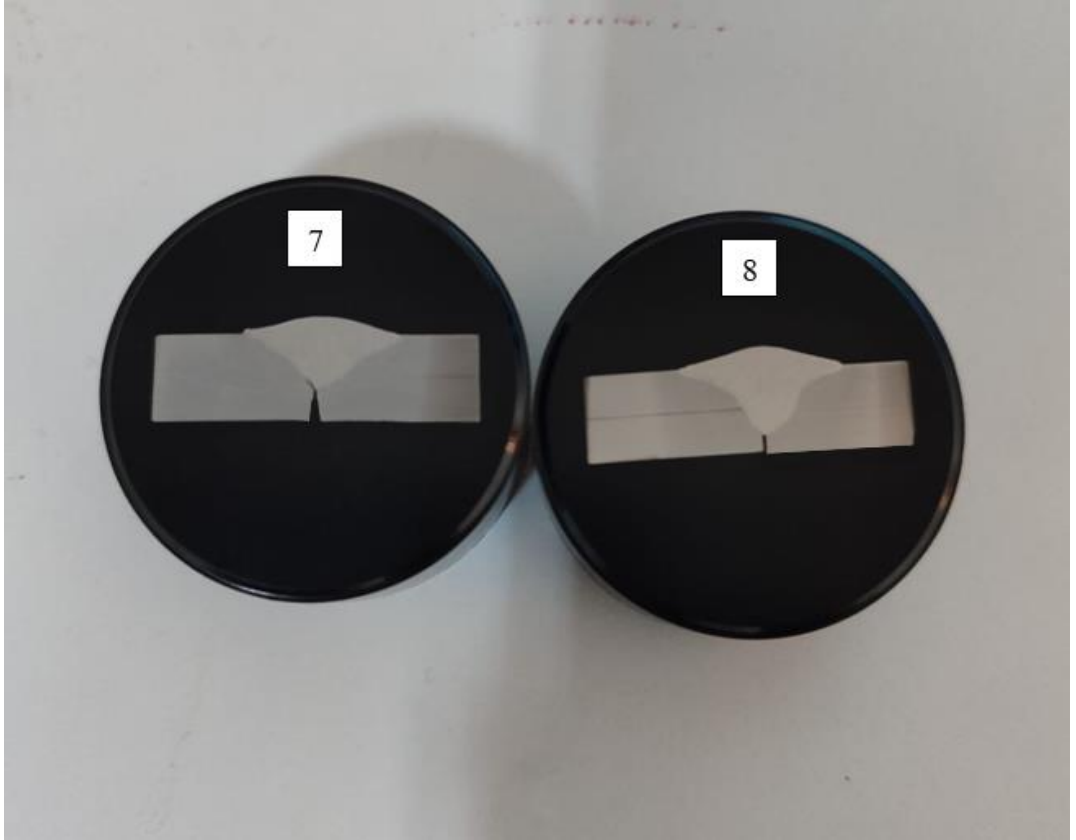


Şekil 4.17. Bakalite alma işlemi.



Şekil 4.18. Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı.

Zımparalama öncelikle 320 elmas zımpara kullanılarak, su ile 4.30 dakika 25 N baskı kuvveti ile ve 300 rpm hızda gerçekleştirildi, temizlendi ve yıkama yapıldı. İkinci zımparalama işlemi 600 elmas zımpara kullanılarak, su ile 4.30 dakika 25 N baskı kuvveti ile ve 300 rpm hızda gerçekleştirildi, temizlendi ve yıkama yapıldı. Üçüncü zımparalama işlemi 1000 elmas zımpara kullanılarak, su ile 4.30 dakika 25 N baskı kuvveti ile ve 300 rpm hızda gerçekleştirildi, temizlendi ve yıkama yapıldı. Daha sonra parlatma işlemi için sırasıyla 6 µm parlatma çuhası ile 4.30 dakika 15 N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda gerçekleştirildi, temizlendi ve yıkama yapıldı. İkinci işlem 1 µm parlatma çuhası ile 4.30 dakika 15 N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda gerçekleştirildi. Yüzey parlatma işleminden sonra mikroyapıların açığa çıkarılması için dağlama işlemi uygulandı (Şekil 4.19). Dağlayıcı olarak %2 Nital (2 Nitrik asit+ 98 ml etil alkol) çözeltisi kullanılmıştır.



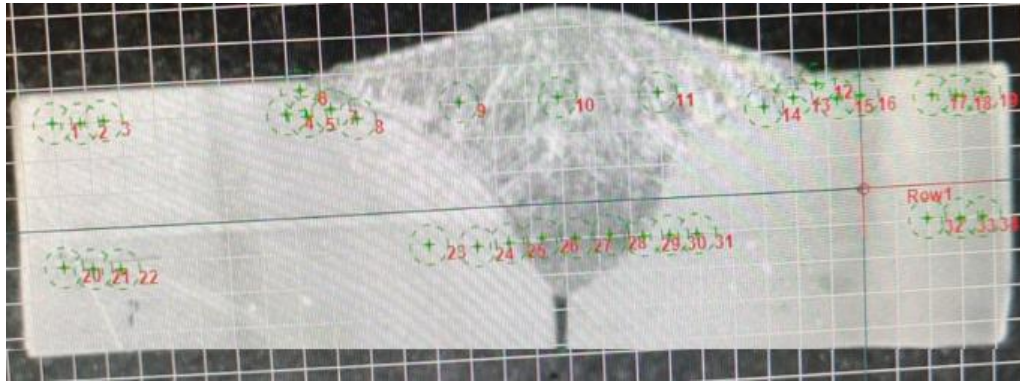
Şekil 4.19. Metalografik numune hazırlama işlemi sonrası parçalar.

Bakalite alınmış numunelerin sertlik ölçme işlemi için otomatik sertlik ölçme cihazı kullanıldı (Şekil 4.20). Sertlik testinde, Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmış olup, kaynak üst ve alt bölgelerinden gerçekleştirilen noktalardan ana metal, ısı tesiri

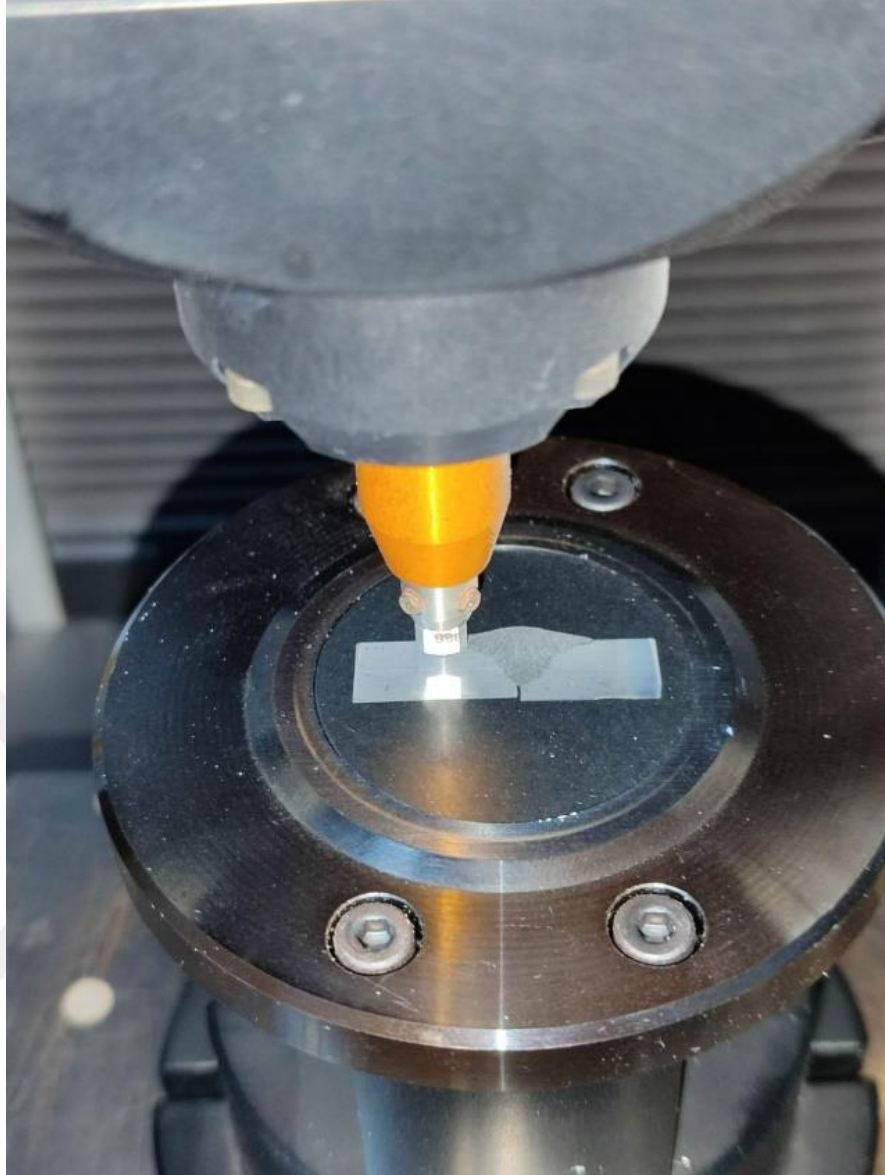
altındaki bölge, kaynak metali ve diğer ana metal bölgelerinden eşit aralıklarla ve aynı sayıda sertlik noktaları belirlenmiş ve sertlik ölçüm işlemi yapılmıştır (Şekil 4.21, Şekil 4.22).



Şekil 4.20. Otomatik vickers sertlik ölçme cihazı.



Şekil 4.21. Sertlik ölçme noktaları.



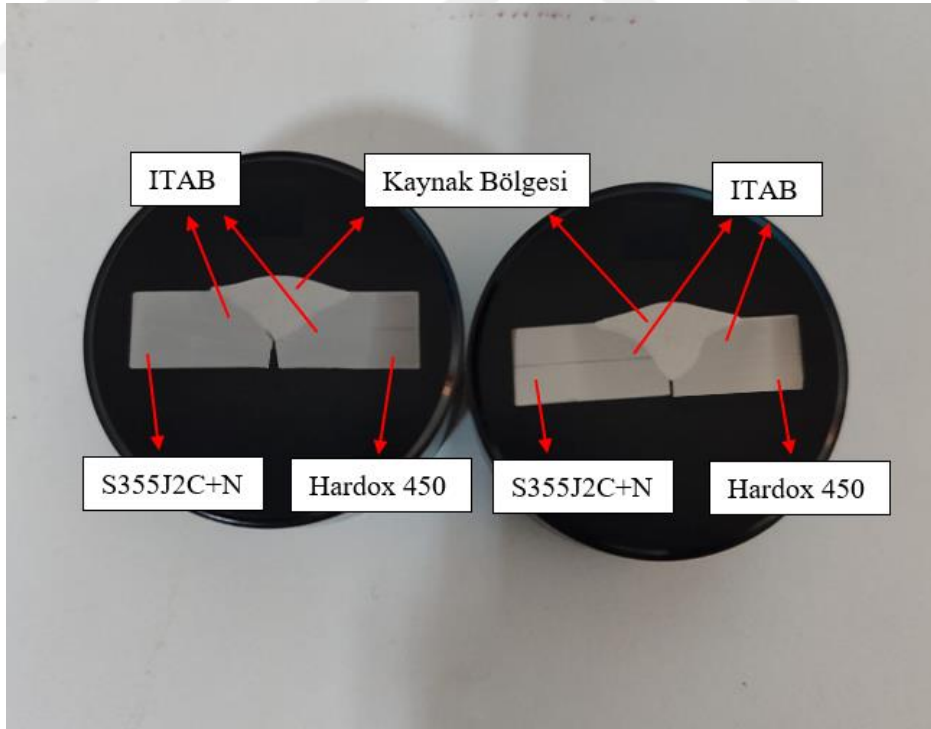
Şekil 4.22. Sertlik ölçme işlemi.

4.6 Mikroyapı İncelemeleri

Metalografik inceleme için hazırlığı yapılmış numunelerin mikroyapılarını görüntülemek için Nikon marka mikroskop kullanılmıştır (Şekil 4.23). 100X büyütme ile çekme deneyleri sonucunda tespit edilen hasar yükleri ve hasar yerlerine göre 7 ve 8 numaralı deney numunelerinin ana malzeme, ITAB ve kaynak bölgelerinden görüntüler alınmıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.23. Mikroskop ile görüntü alma işlemi.



Şekil 4.24. Mikroyapı uygulaması yapılan numune parçalar.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Çekme Testi Sonuçları

Taguchi L₉ deney tasarımına uygun olarak üretilen numunelere çekme deneyleri uygulanmıştır. Her deney üç defa tekrarlanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda ortalama hasar yükleri ve kopma bölgeleri belirlenmiştir (Çizelge 5.1, Şekil 5.1).

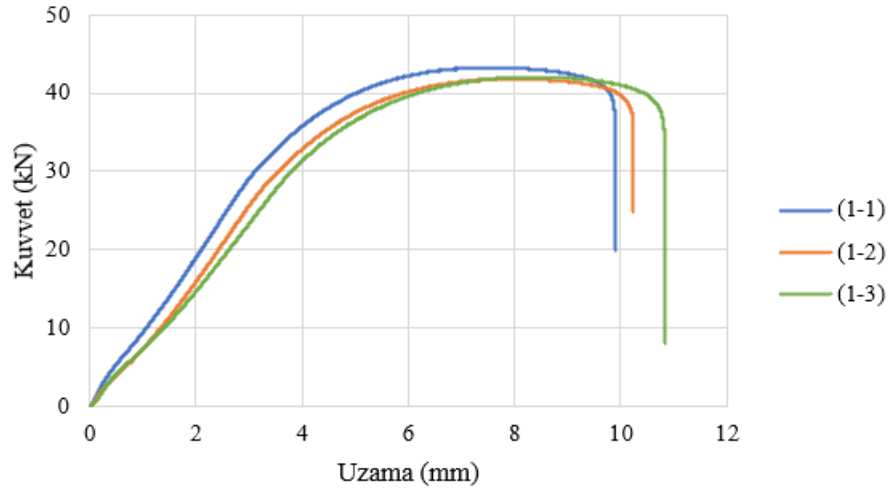
Çizelge 5.1. Ortalama hasar yükleri ve hasar yerleri.

Deney No	Ortalama hasar yükü (kN)	Hasar Yeri
1	42.394	S355J2C+N
2	41.782	S355J2C+N
3	38.262	Kaynak Bölgesi
4	41.345	S355J2C+N
5	41.080	S355J2C+N
6	38.183	Kaynak Bölgesi
7	31.598	Kaynak Bölgesi
8	43.764	S355J2C+N
9	41.357	S355J2C+N

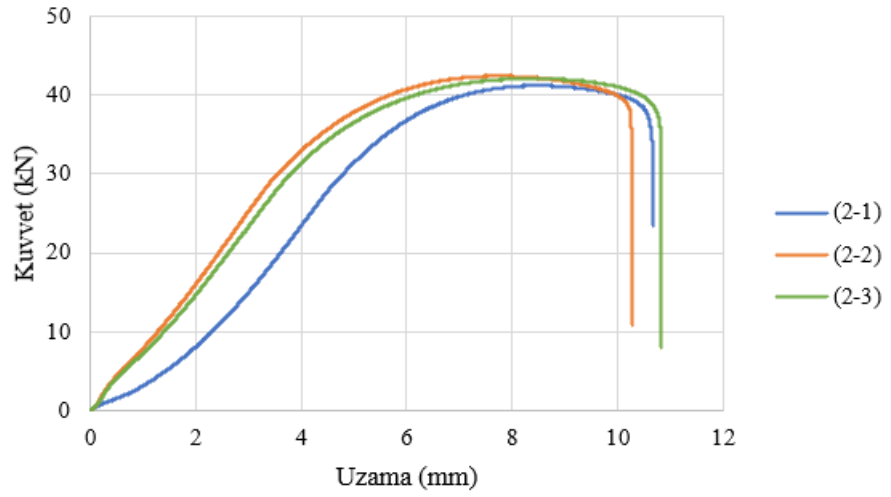


Şekil 5.1. Çekme deneyi sonucu numunelerin hasar yerleri.

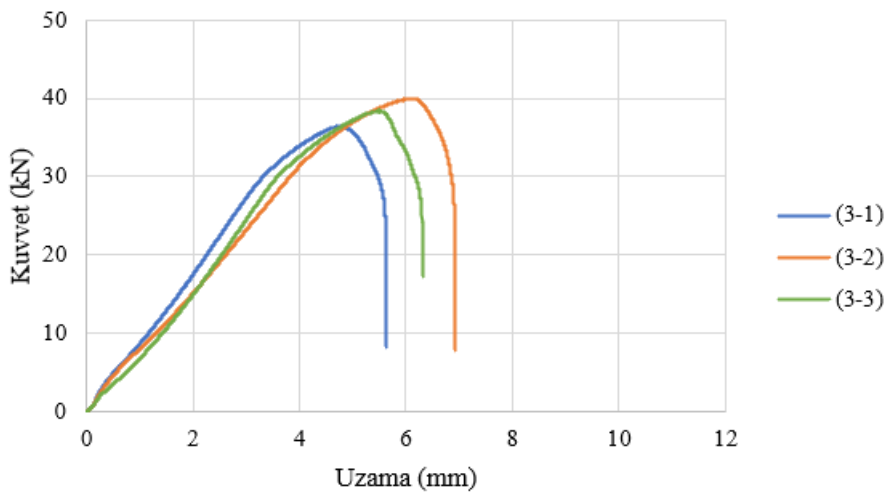
Yapılan çekme deneyleri sonucunda oluşan kuvvet (kN) – uzama (mm) grafikleri her deney için yapılan 3 tekrar dikkate alınarak aşağıda verilmiştir (Şekil 5.2-5.10).



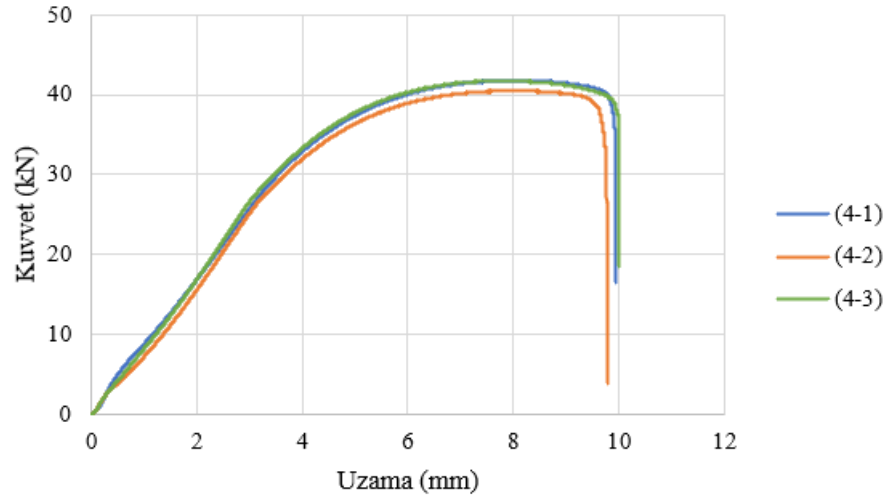
Şekil 5.2. 1 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



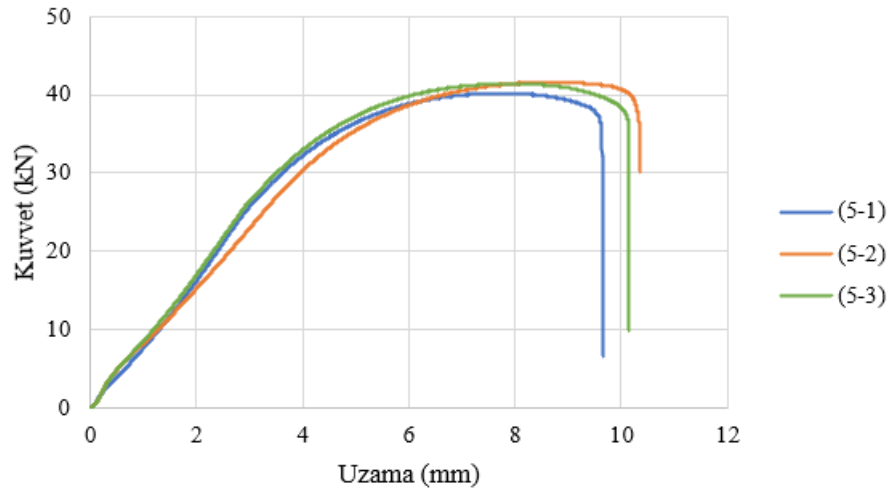
Şekil 5.3. 2 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



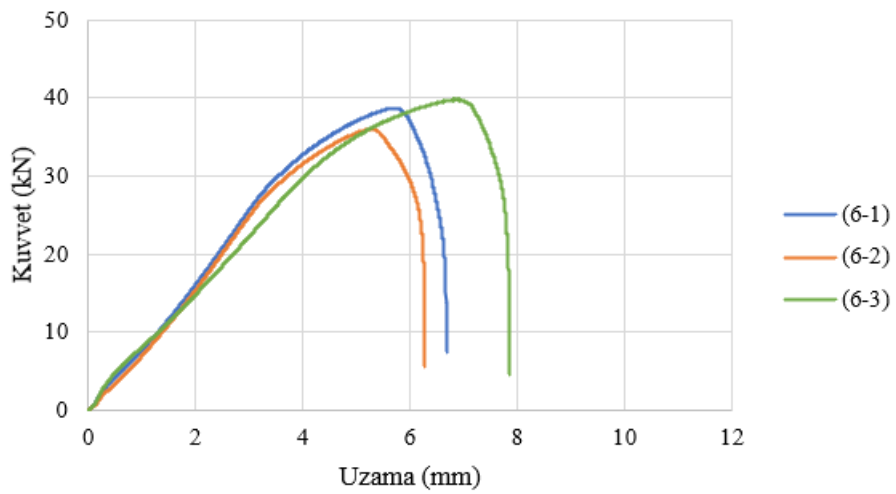
Şekil 5.4. 3 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



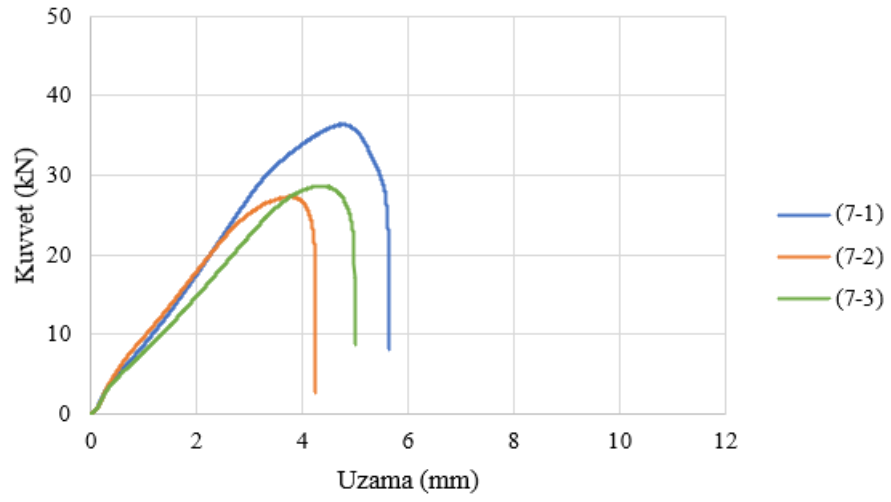
Şekil 5.5. 4 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



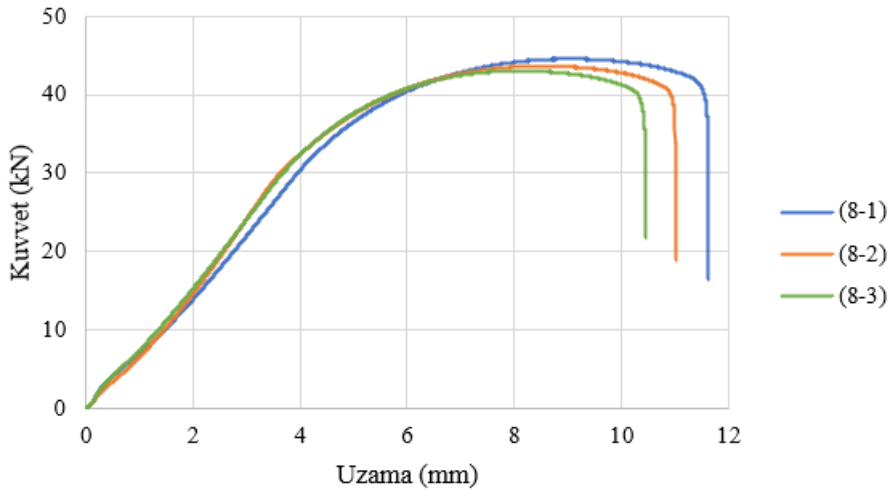
Şekil 5.6. 5 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



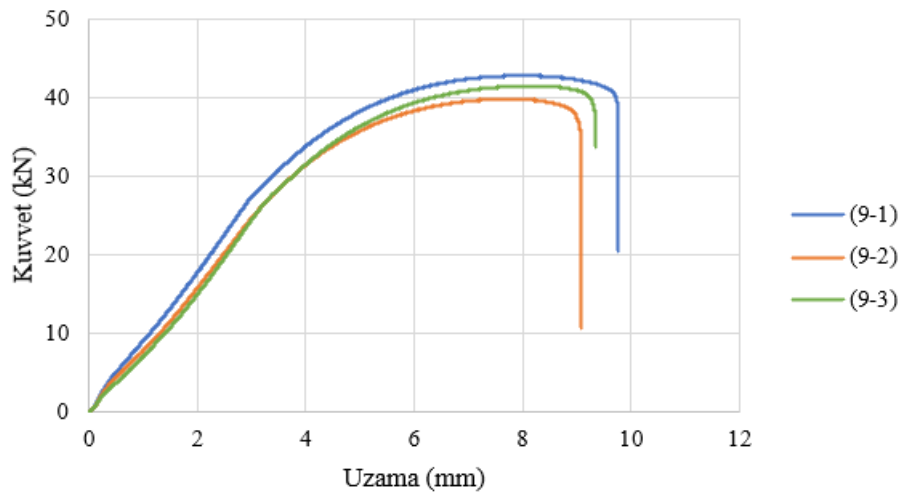
Şekil 5.7. 6 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 5.8. 7 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 5.9. 8 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.



Şekil 5.10. 9 nolu deneylere ait kuvvet-uzama grafiği.

5.1.1 S/N (Sinyal/Gürültü) analizi

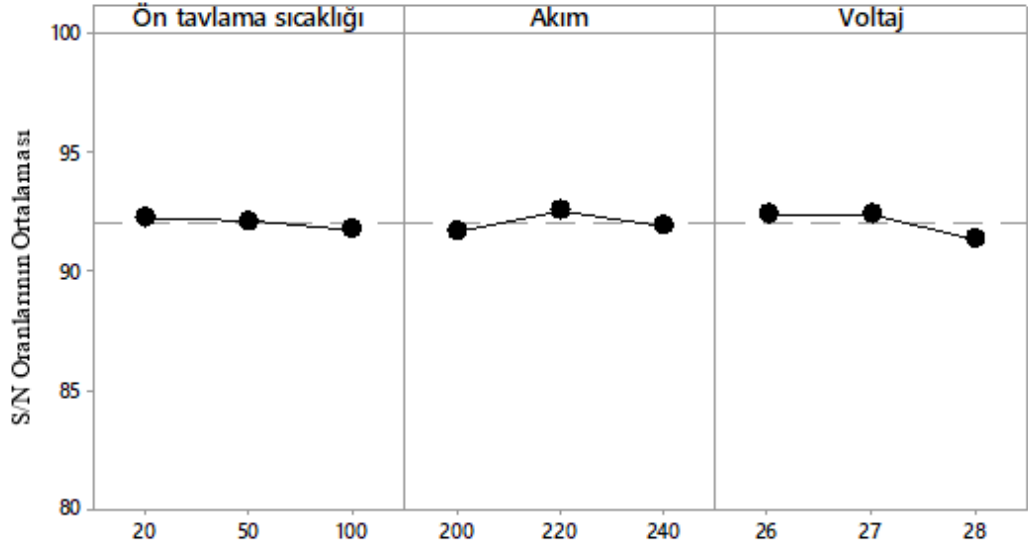
Kaynaklı bağlantıların ortalama hasar yükleri belirlendikten sonra, kontrol parametrelerini Taguchi tekniğine göre optimize etmek için S/N oranları kullanılmıştır. Çizelge 5.2’de, her deneyin 3 defa tekrarlanması sonucu elde edilen ortalama hasar yükleri ve S/N oranları verilmiştir. Ayrıca, kontrol faktörlerinin ortalama hasar yükü üzerindeki etkisini incelemek için S/N yanıt tablosu kullanılmıştır. S/N yanıt tablosu rank (sıralama) satırı incelendiğinde, ortalama hasar yükü üzerinde en etkili parametrenin voltaj, en az etkili olan parametrenin ise ön tavlama sıcaklığı olduğu rank satırında görülmektedir (Çizelge 5.3). Ortalama hasar yükü için Tabloda gösterilen değerler Şekil 5.11’de grafik formunda sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Deneylere ait ortalama hasar yükleri ve S/N oranları.

Deney No	Deney Parametreleri			Ortalama hasar yükü (kN)	S/N (dB)
	A	B	C		
1	20	200	26	42.394	92.54
2	20	220	27	41.782	92.41
3	20	240	28	38.262	91.65
4	50	200	27	41.345	92.32
5	50	220	28	41.080	92.27
6	50	240	26	38.183	91.63
7	100	200	28	31.598	89.99
8	100	220	26	43.764	92.82
9	100	240	27	41.357	92.33

Çizelge 5.3. Ortalama hasar yükü için S/N yanıt tablosu.

Seviye	Ön tavlama sıcaklığı (°C)	Akım (A)	Voltaj (V)
1	92.21	91.62	92.34
2	92.08	92.50	92.36
3	91.72	91.87	91.31
Delta	0.49	0.88	1.05
Rank	3	2	1



S/N: En büyük en iyi durumda

Şekil 5.11. S/N oranları için ana etki grafiği.

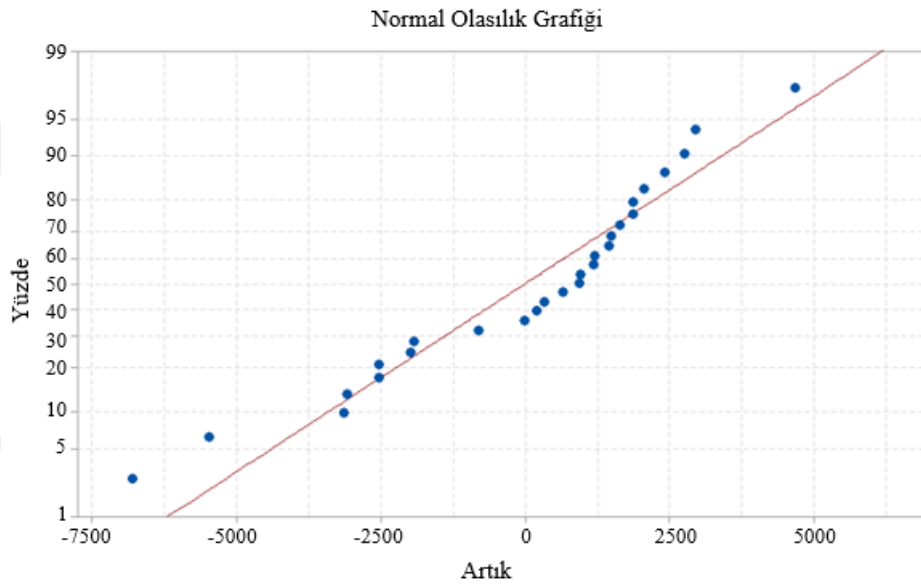
5.1.2 Varyans analizi (ANOVA)

Kontrol parametrelerinin (Ön tavlama sıcaklığı, akım, voltaj) sonuç (Hasar yükü) üzerindeki etkilerini ölçmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Çizelge 5.4'te verilen sonuçlara göre, hasar yükü üzerinde en etkili parametreler voltaj (%29.03) ve akım (%16.90) bulunmuştur. Ön tavlama sıcaklığının hasar yüküne etkisi (%4.09) diğer parametrelere göre sınırlı olmuştur. ANOVA sonuçlarının Çizelge 5.3'te gösterilen S/N yanıt tablosundaki etki sıralamasıyla (rank) uyumlu olduğu görülmektedir.

Normal olasılık grafiği, bir veri setinin genel olarak normal dağılıp dağılmadığı hakkında bilgi vermektedir. Normal olasılık grafiğinde, çizginin etrafında kümelenmiş noktalar tahmin değeri ile gerçekleşen değer arasında düşük sapmalar olduğunu, çizgiden uzak noktalar ise sapmaların daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Ortalama hasar yükleri için artık grafiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Ortalama hasar yükü için ANOVA tablosu.

Faktörler	DF	Seq SS	Katkı Oranı (%)	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
Ön Tavlama Sıcaklığı	2	17060518	4.09	17060518	8530259	0.82	0.455
Akım	2	70445420	16.90	70445420	35222710	3.38	0.054
Voltaj	2	121009837	29.03	121009837	60504918	5.81	0.010
Error	20	208276345	49.97	208276345	10413817		
Total	26	416792120	100.00				



Şekil 5.12. Hasar yükleri için artıkların gösterilmesi.

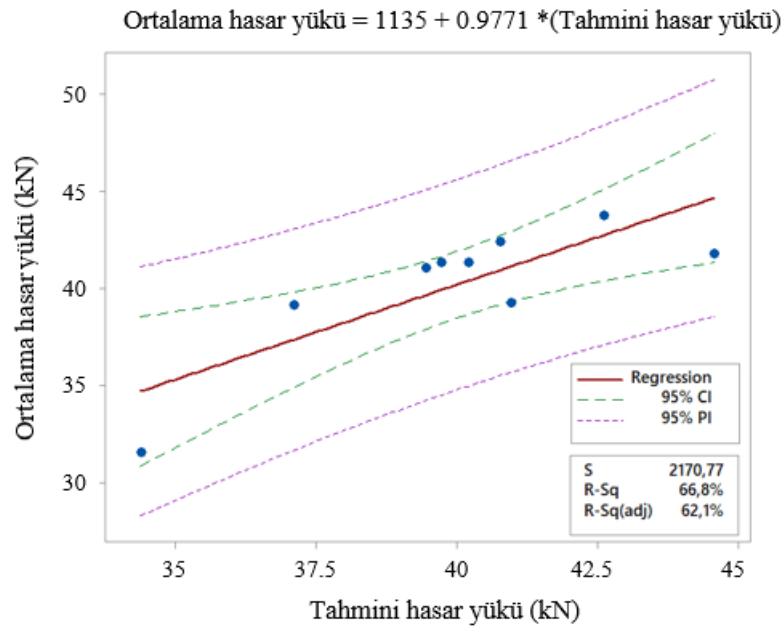
5.1.3 Regresyon analizi

Regresyon analizi bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada bağımlı değişken ortalama hasar yüküdür. Bağımsız değişkenler ise ön ısıtma sıcaklığı (A), akım (B) ve voltajdır (C). Yapılan regresyon analizi sonucunda, ortalama hasar yükü için doğrusal ve ikinci dereceden tahmin denklemleri sırasıyla Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te deneyler sonucunda elde edilen ortalama hasar yükleri ile lineer ve ikinci dereceden regresyon modeline göre hesaplanan tahmini hasar yükü değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.5’te deneysel hasar yükleri, lineer ve ikinci dereceden regresyon modellerine göre elde

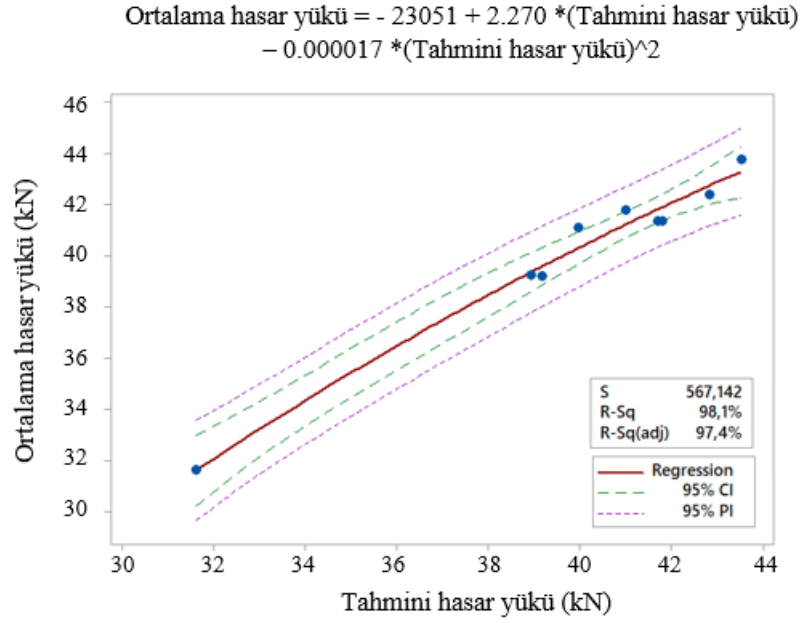
edilen hasar yükleri gösterilmiştir. Şekil 5.13-5.14 ve Çizelge 5.5'te gösterilen tahmin değerleri ile gerçek değerler arasında uyum görülmektedir. Lineer modele göre elde edilen gerçek değerler ile tahmini değerler arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) değerleri 0.66 çıkmıştır. Buna karşın kuadratik modele göre hesaplanan gerçek değerler ile tahmini değerler arasındaki korelasyon katsayısı 0.96'dır. Bu durumda, bu çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen tahmini hasar yüklerinin gerçek sonuçlarla uyumu lineer modele göre daha iyi çıkmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Tahmini hasar yükü} = & 39974 + 839 A1 + 229 A2 - 1068 A3 - 1528 B1 + 2235 B2 \\ & - 706 B3 + 1473 C1 + 1521 C2 - 2994 C3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\text{Tahmini hasar yükü} = -3258 + 1354A - 293.6B + 4050C + 4.308A B - 86.2 AC \quad (5.2)$$



Şekil 5.13. Deneysel sonuçlarla lineer regresyon modeli karşılaştırılması.



Şekil 5.14. Deneysel sonuçlarla 2. dereceden regresyon modeli karşılaştırılması.

Çizelge 5.5. Deneysel ve tahmini hasar yükleri.

Deney No	Ortalama Hasar Yükü (kN)	Tahmini Hasar Yükü –Lineer Model (kN)	Tahmini Hasar Yükü – Kuadratik Model (kN)
1	42.394	40.757	42.810
2	41.782	44.568	40.987
3	38.262	37.112	39.164
4	41.345	40.195	41.782
5	41.080	39.443	39.958
6	38.183	40.970	38.914
7	31.598	34.384	31.622
8	43.764	42.614	43.506
9	41.357	39.720	41.680

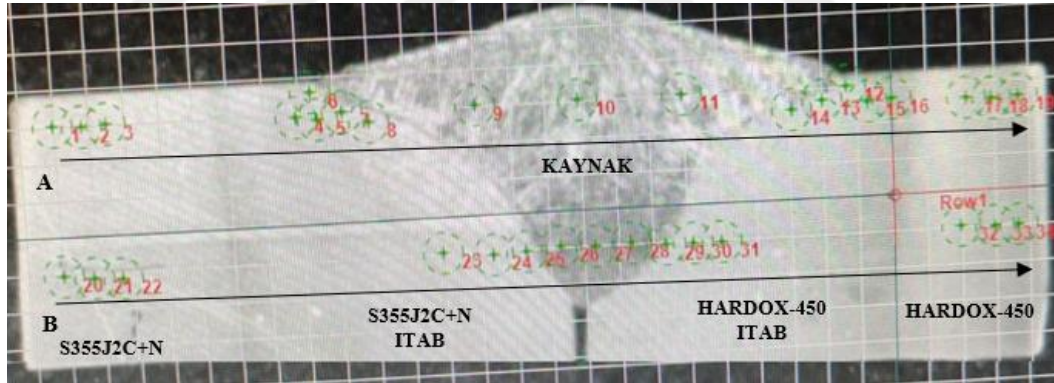
5.2 Sertlik Testi Sonuçları

Çekme deneyleri sonucunda tespit edilen hasar yükleri ve hasar yerlerine göre 7 ve 8 numaralı deneylerin mikrosertlik analizleri yapılmıştır (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6. Çekme deneyi sonucunda 7 ve 8 no’lu deneyin hasar yükü ve yerleri.

Deney No	Hasar Yükü, Max. Kuvvet (kN)	Hasar Yeri
7	31.598	Kaynak Bölgesi
8	43.764	S355J2C+N

Kaynaklı malzemelerin mekanik özellikleri ile sertlik değerleri arasında bir ilişki vardır. Kaynak işlemi sırasında farklı ısı girdisine maruz kalan bölgelerde soğuma durumuna bağlı olarak tane yapısı ve sertlik değerleri farklı olabilmektedir. Bu çalışmada, mikroyapısı incelenen 7 ve 8 numaralı deney numunelerinin sertlik değerleri de incelenmiştir. Deney numunelerinin kaynak merkezi referans alınarak sağa ve sola olmak üzere farklı bölgelerden tekrarlı noktasal sertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik ölçümleri, V kaynak dikişinin üst ve alt bölgeleri referans alınarak iki hat (A ve B hattı) üzerinden yapılmıştır (Şekil 5.15). Numuneler üzerindeki sertlik ölçümleri ana metaller, ITAB bölgeleri ve kaynak merkezi olarak üç bölge için yapılmıştır.

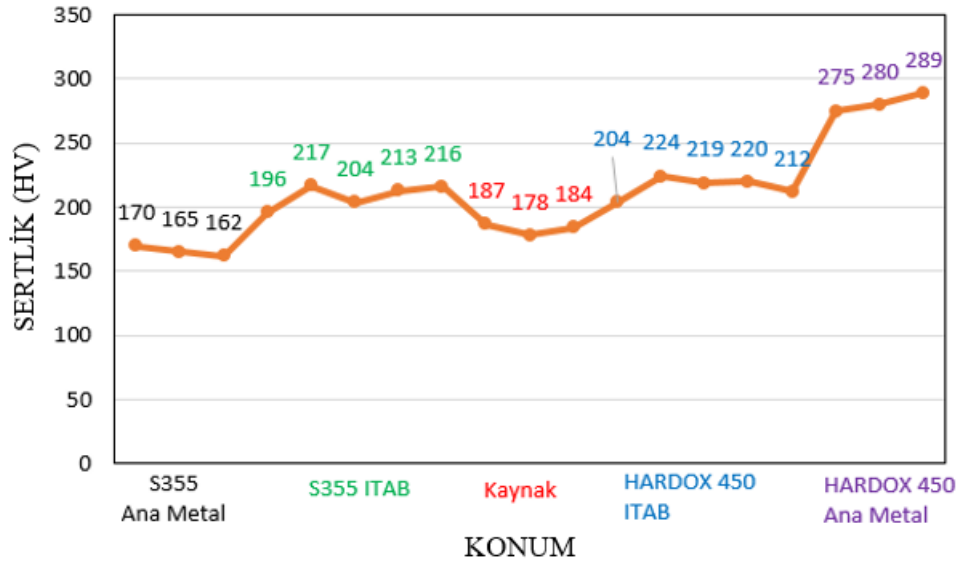


Şekil 5.15. Sertlik değerleri alınan bölgeler.

Yapılan sertlik testi sonucuna göre 7 numaralı deneye ait kaynak üst bölgesinin sertlik ölçümleri Çizelge 5.7’de, kaynak alt bölgesinin sertlik ölçümleri Çizelge 5.8’de gösterilmiştir. Kaynak üst bölgesi sertlik grafiği Şekil 5.16’da, kaynak alt bölgesine ait sertlik grafiği Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. 7 no’lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri.

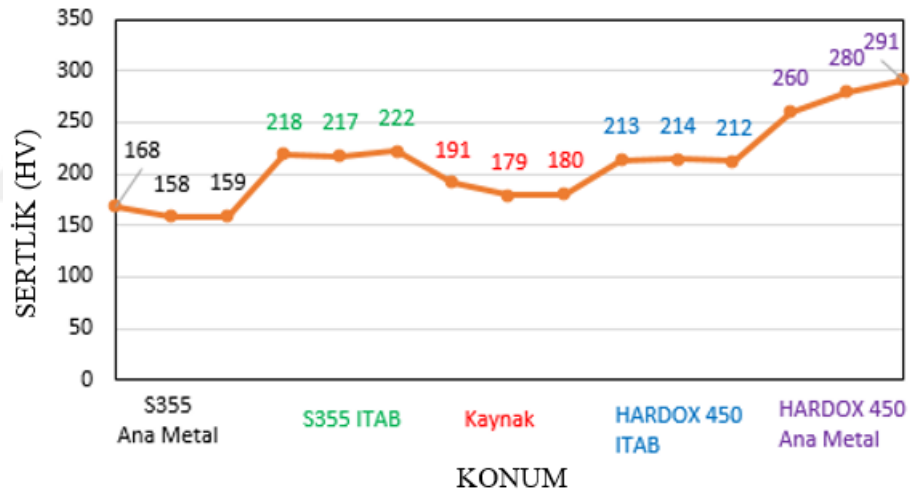
7 No’lu Deney		Numara	Sertlik	Metot	Lens
KAYNAK ÜST BÖLGESİ (A HATTI)	S355 ANA METAL	1	170	HV 10	10x
		2	165	HV 10	10x
		3	162	HV 10	10x
	S355 ITAB	4	196	HV 10	10x
		5	217	HV 10	10x
		6	204	HV 10	10x
		7	213	HV 10	10x
		8	216	HV 10	10x
	KAYNAK	9	187	HV 10	10x
		10	178	HV 10	10x
		11	184	HV 10	10x
	HARDOX 450 ITAB	12	204	HV 10	10x
		13	224	HV 10	10x
		14	219	HV 10	10x
		15	220	HV 10	10x
		16	212	HV 10	10x
	HARDOX 450 ANA METAL	17	275	HV 10	10x
		18	280	HV 10	10x
		19	289	HV 10	10x



Şekil 5.16. 7 no’lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri grafiği.

Çizelge 5.8. 7 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri.

7 No'lu Deney		Numara	Sertlik	Metot	Lens
KAYNAK ALT BÖLGESİ (B HATTI)	S355 ANA METAL	20	168	HV 10	10x
		21	158	HV 10	10x
		22	159	HV 10	10x
	S355 ITAB	23	218	HV 10	10x
		24	217	HV 10	10x
		25	222	HV 10	10x
	KAYNAK	26	191	HV 10	10x
		27	179	HV 10	10x
		28	180	HV 10	10x
	HARDOX 450 ITAB	29	213	HV 10	10x
		30	214	HV 10	10x
		31	212	HV 10	10x
	HARDOX 450 ANA METAL	32	260	HV 10	10x
		33	280	HV 10	10x
		34	291	HV 10	10x



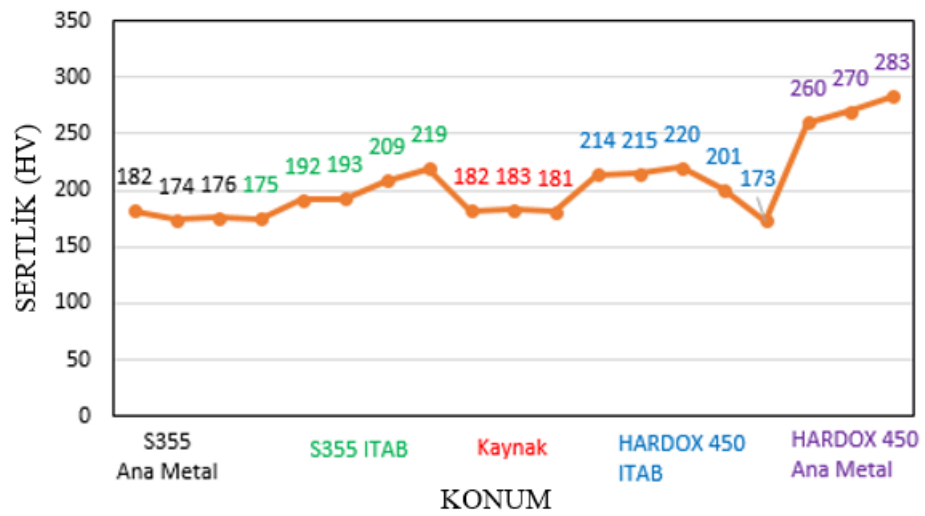
Şekil 5.17. 7 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri grafiği.

7 numaralı deneye ait kaynak üst ve alt bölgesinden ölçülen test sonucuna göre, en düşük sertlik değeri S355J2C+N ana metalinde 158 HV olarak görülürken, en yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalinde 291 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ortalama sertlik değeri 183 HV olarak ölçülmüştür. ITAB bölgelerinde ise, Hardox 450 ITAB bölgesinde ortalama sertlik değeri 215 HV olarak ölçülürken, S355 ITAB bölgesinde ise ortalama 213 HV olarak ölçülmüştür.

8 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesinin sertlik ölçümleri Çizelge 5.9'da, kaynak alt bölgesinin sertlik ölçümleri Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Kaynak üst bölgesi sertlik grafiği Şekil 5.18'de, kaynak alt bölgesine ait sertlik grafiği Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. 8 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri.

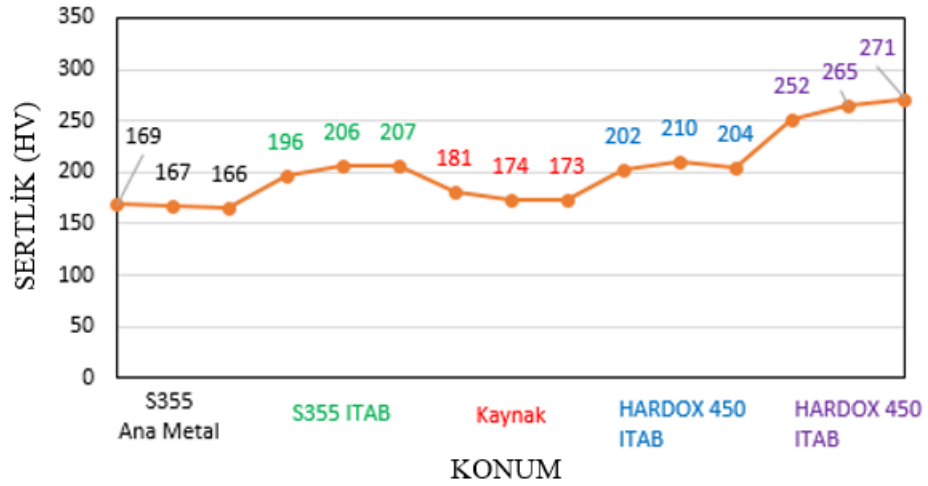
8 No'lu Deney		Numara	Sertlik	Metot	Lens
KAYNAK ÜST BÖLGESİ (A HATTI)	S355 ANA METAL	1	182	HV 10	10x
		2	174	HV 10	10x
		3	176	HV 10	10x
	S355 ITAB	4	175	HV 10	10x
		5	192	HV 10	10x
		6	193	HV 10	10x
		7	209	HV 10	10x
		8	219	HV 10	10x
	KAYNAK	9	182	HV 10	10x
		10	183	HV 10	10x
		11	181	HV 10	10x
	HARDOX 450 ITAB	12	214	HV 10	10x
		13	215	HV 10	10x
		14	220	HV 10	10x
		15	201	HV 10	10x
		16	203	HV 10	10x
	HARDOX 450 ANA METAL	17	260	HV 10	10x
		18	270	HV 10	10x
		19	283	HV 10	10x



Şekil 5.18. 8 no'lu deneye ait kaynak üst bölgesi sertlik değerleri grafiği.

Çizelge 5.10. 8 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri.

8 No'lu Deney		Numara	Sertlik	Metot	Lens
KAYNAK ALT BÖLGESİ (B HATTI)	S355 ANA METAL	20	169	HV 10	10x
		21	167	HV 10	10x
		22	166	HV 10	10x
	S355 ITAB	23	196	HV 10	10x
		24	206	HV 10	10x
		25	207	HV 10	10x
	KAYNAK	26	181	HV 10	10x
		27	174	HV 10	10x
		28	173	HV 10	10x
	HARDOX 450 ITAB	29	202	HV 10	10x
		30	210	HV 10	10x
		31	204	HV 10	10x
	HARDOX 450 ANA METAL	32	252	HV 10	10x
		33	265	HV 10	10x
		34	271	HV 10	10x



Şekil 5.19. 8 no'lu deneye ait kaynak alt bölgesi sertlik değerleri grafiği.

8 numaralı deneye ait kaynak üst ve alt bölgesinden ölçülen test sonucuna göre, en düşük sertlik değeri S355J2C+N ana metalinde 166 HV olarak ölçülmüş olup, en yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalinde 283 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ortalama sertlik değeri 179 HV olarak ölçülmüştür. ITAB bölgelerinde ise, Hardox 450 ITAB bölgesinde ortalama sertlik değeri 209 HV olarak ölçülürken, S355 ITAB bölgesinde ise ortalama 200 HV olarak ölçülmüştür.

Sertlik ölçme deneyi sonucunda 7 ve 8 numaralı deneylere ait, S355J2C+N ana metali, kaynak metali, ITAB bölgeleri ve Hardox 450 ana metaline ait ortalama sertlik değerleri Çizelge 5.11’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.11. 7 ve 8 numaralı deneylerin sertlik değerleri karşılaştırılması.

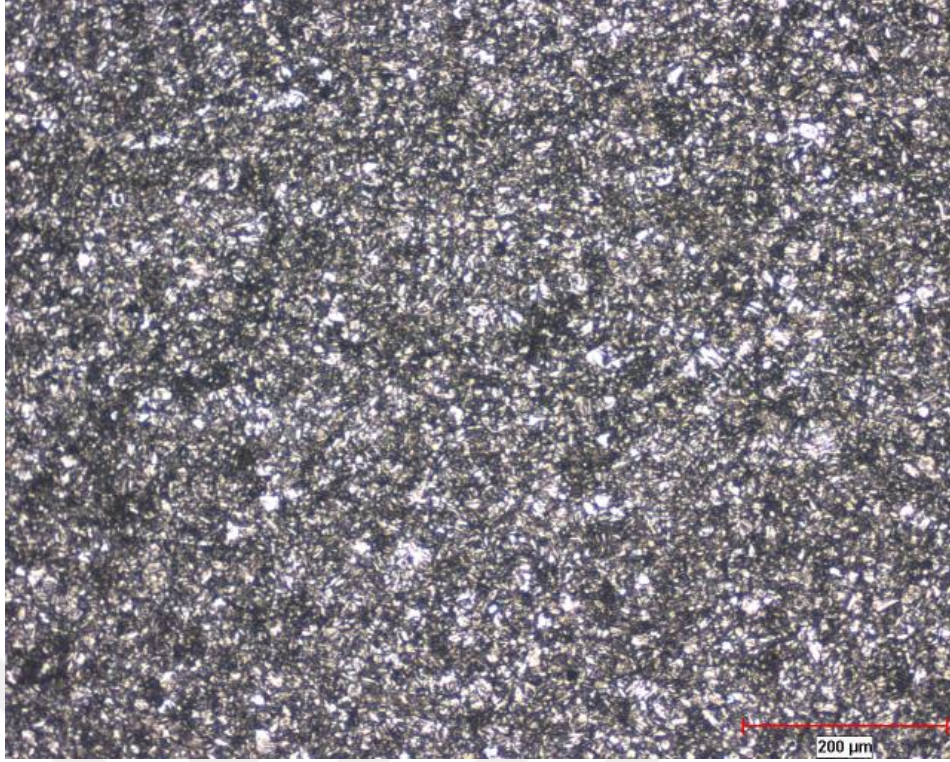
Deney No	S355J2C+N Ana Metal (HV)	S355J2C+N ITAB Bölgesi (HV)	Kaynak Metali (HV)	Hardox 450 ITAB Bölgesi (HV)	Hardox 450 Ana Metal (HV)
7	158	213	183	215	291
8	166	200	179	209	283

7 ve 8 numaralı deney numuneleri için kaynak metalinden ITAB bölgelerine doğru ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında sertlik değerlerinde artış görülmüştür.

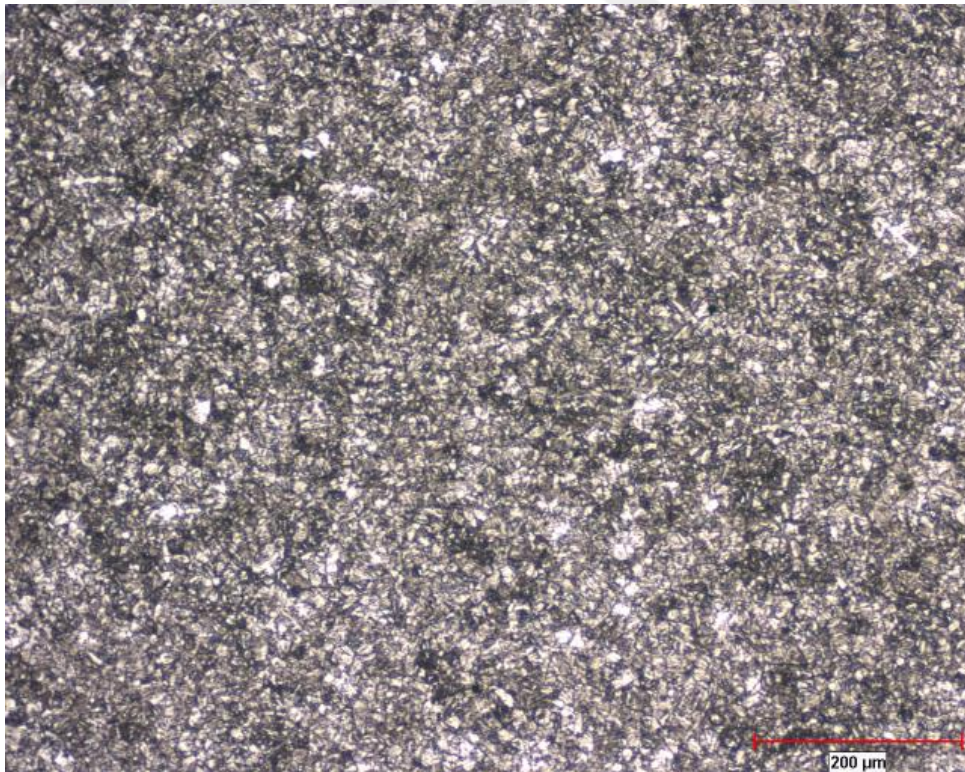
5.3 Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri çekme deneyleri sonucunda maksimum ve minimum hasar yüklerinin elde edildiği test numuneleri kullanılarak yapıldı. Buna göre, 7 ve 8 no’lu parçaların metalografik hazırlığı yapılarak, mikroyapıların açığa çıkarılması için dağlama işlemi uygulanmıştır ve numunelerin mikroyapıları görüntülenmiştir. 100X büyütme ile görüntülenen numunelerde mikroyapı incelemeleri, ana malzeme, geçiş, kaynak metali ve ITAB bölgelerinde yapılmıştır.

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de sırasıyla 7 ve 8 numaralı deney numunelerine ait Hardox 450 ana metalinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde homojen bir şekilde oluşmuş asiküler ferrit ve temperlenmiş martenzit fazları görülmektedir. 7 ve 8 numaralı deney numunelerinde görülen mikroyapının benzer olduğu anlaşılmaktadır. Karşılaşılan mikroyapı literatüre uygundur [25-28].

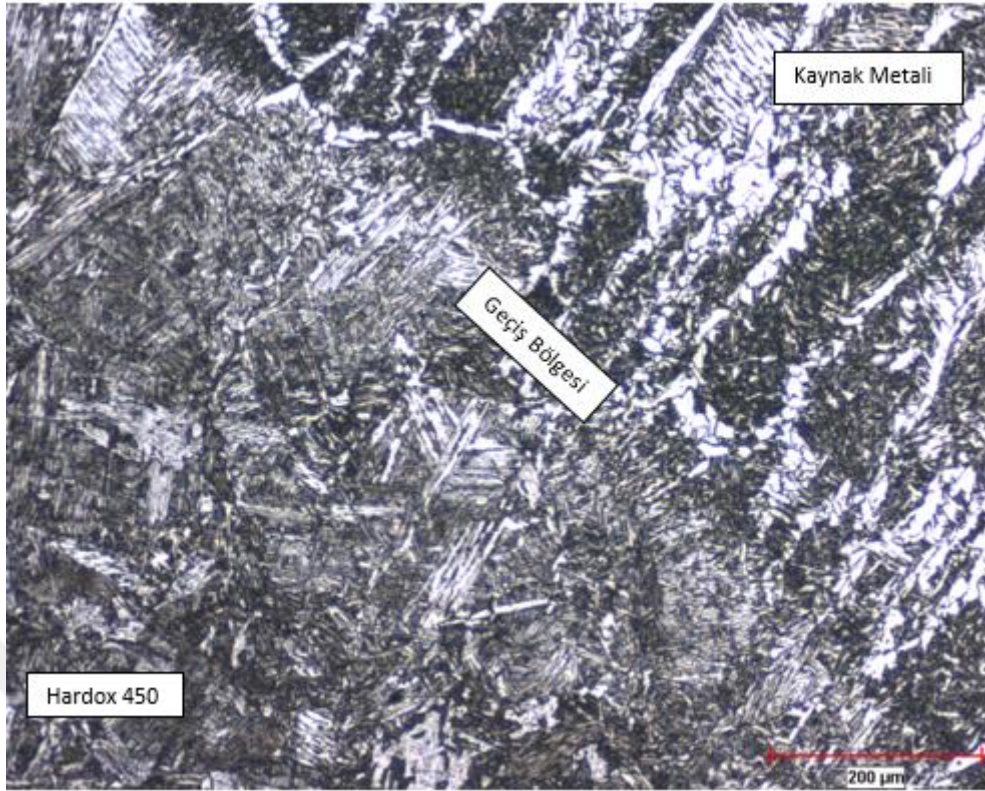


Şekil 5.20. 7 No'lu numune Hardox 450 ana metalinin görüntüsü.

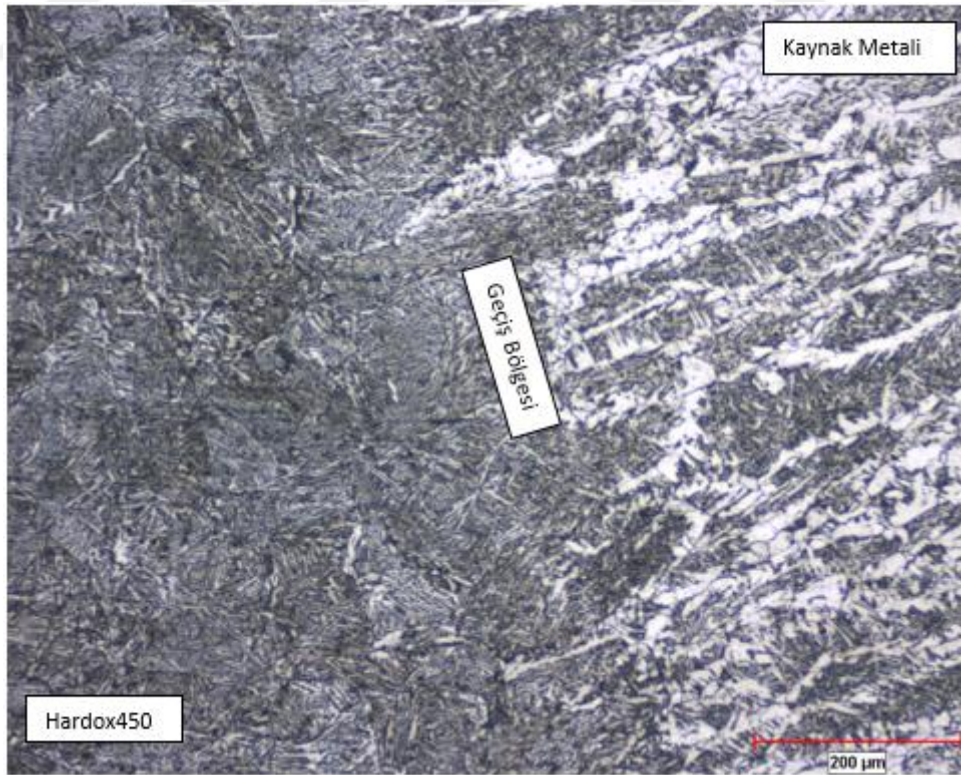


Şekil 5.21. 8 No'lu numune Hardox 450 ana metalinin görüntüsü.

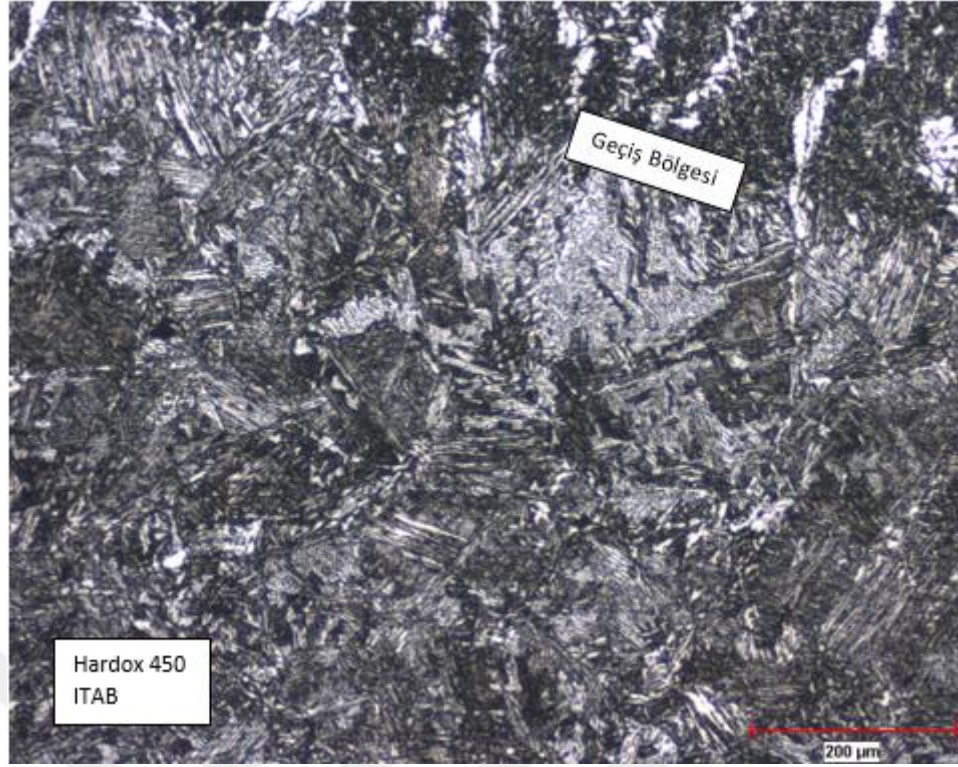
Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te sırasıyla 7 ve 8 numaralı numunelere ait Hardox 450 kaynak metali geçiş bölgesi mikroyapısı verilmiştir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te ise sırasıyla 7 ve 8 numaralı numunelere ait Hardox 450 ana metal ITAB bölgesi gösterilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde kaynak metali, Hardox 450 ana metal geçiş bölgeleri net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Hardox 450 ana metal tane yapısının homojen bir yapı durumunu koruduğu gözlemlenirken kaynak metali ve ana metal birleşiminde farklı bir mikroyapı oluşumunu gözlemlemek mümkündür. Kaynak işlemiyle birlikte ısı etkisi altında oluşan östenitik fazdan soğuma sırasında, taneler inklüzyonlar üzerinde farklı yönlerde çekirdeklenmiştir [25]. Hardox 450 malzemedeki görülen martenzitik ve ferrit yapı geçiş bölgelerinde ve ITAB bölgelerinde net olarak görülmektedir. Bu durum Hardox malzemesine dayanım ve sertlik özelliği veren mikroyapının kaynak işleminden sonra da özelliğini koruduğunu göstermektedir. Geçiş bölgelerinden kaynak metali merkezine doğru gidildikçe tipik dentritik bir kaynak mikroyapısı dikkat çekmektedir. Hardox 450 malzemesinin geçiş bölgelerinde ve ITAB bölgelerindeki mikroyapının ana malzemeye göre daha büyük olduğu ve daha fazla ferrit içerdiği görülmektedir. Geçiş bölgeleri ve ITAB bölgelerindeki ısı girdisi ana malzemeye göre daha fazla olduğu için beklendiği gibi daha geç soğumaktadır. Bunun sonucunda tane yapısı daha kabadır ve ferrit miktarı daha fazladır. 8 numaralı deney numunesinin geçiş ve ITAB bölgesindeki ferrit oluşumunun 7 numaralı deney numunesine kıyasla daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden anlaşılmaktadır. Ferrit oluşumunu destekleyen faktörün, çalışmada kullanılan kaynak parametrelerinin etkilediği ısı girdisi olduğu düşünülmektedir.



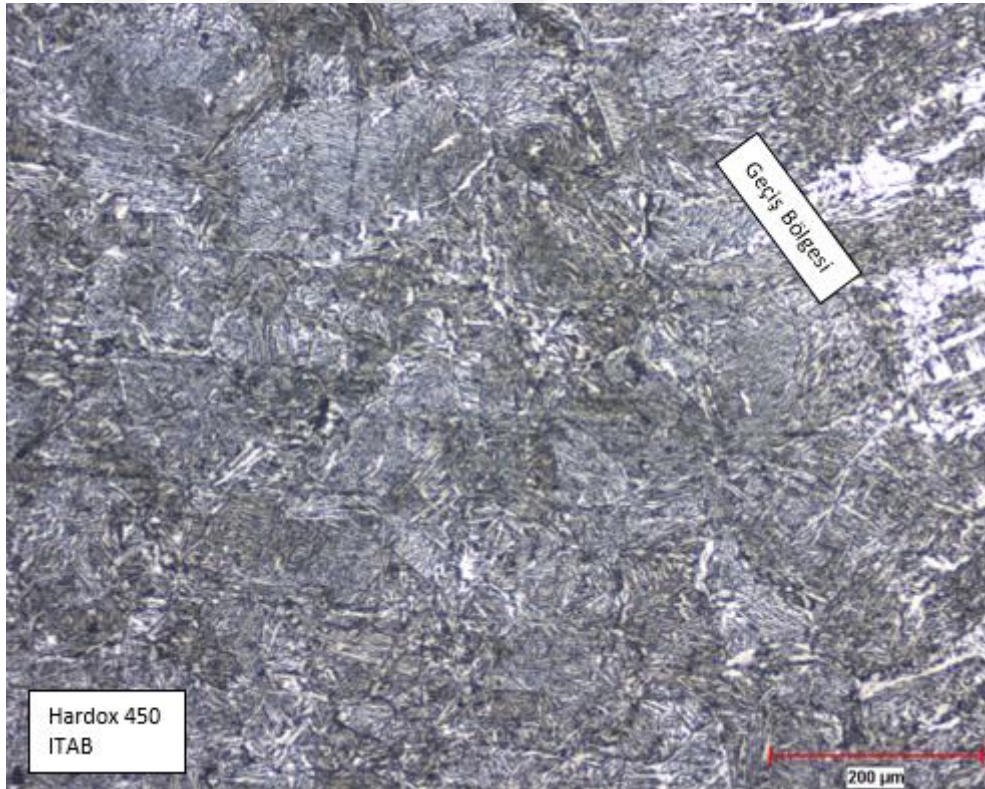
Şekil 5.22. 7 No'lu numune Hardox 450-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.



Şekil 5.23. 8 No'lu numune Hardox 450-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.

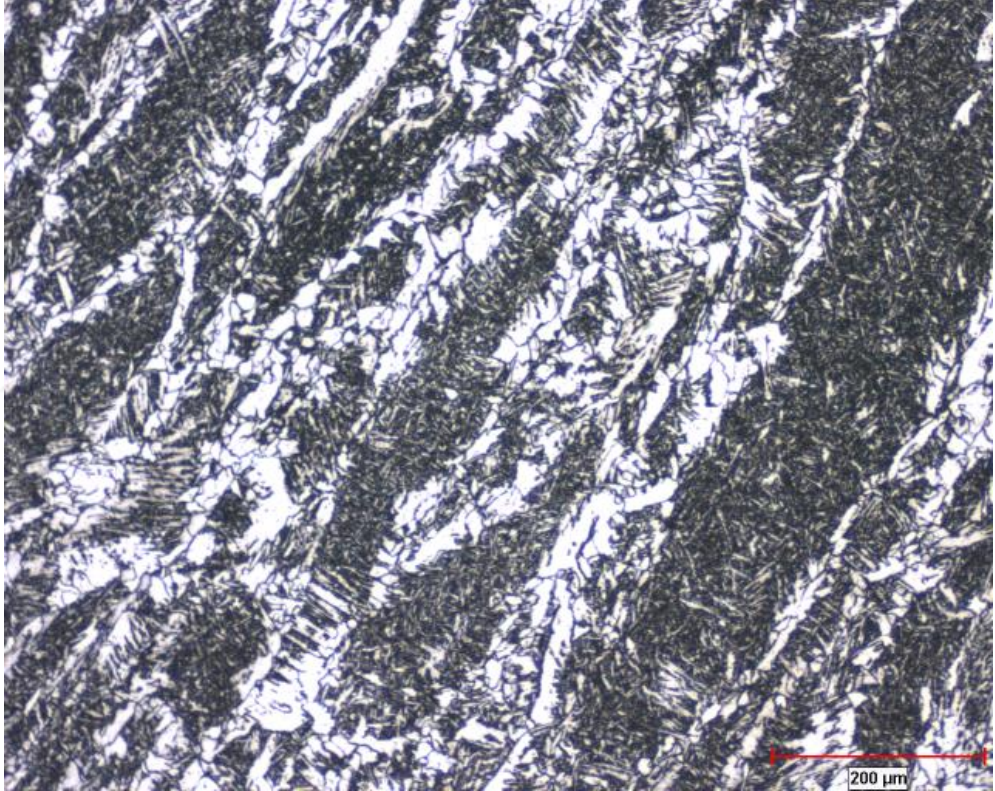


Şekil 5.24. 7 No'lu numune Hardox 450 ITAB görüntüsü.

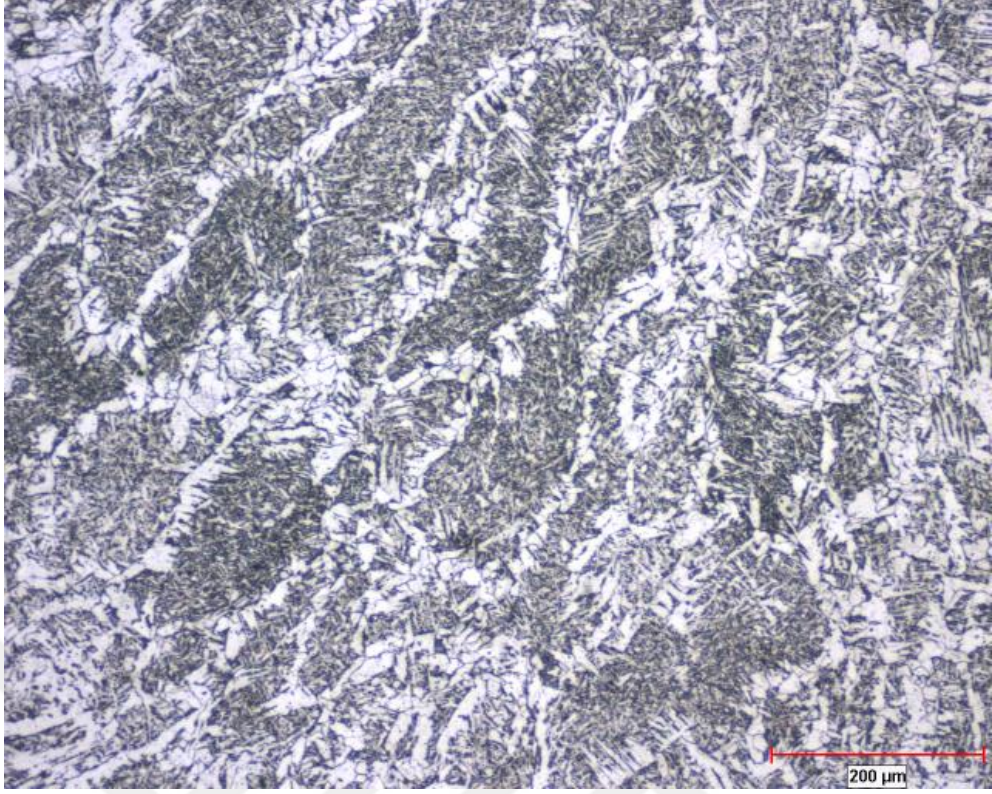


Şekil 5.25. 8 No'lu numune Hardox 450 ITAB görüntüsü.

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de sırasıyla 7 ve 8 numaralı numunelerin kaynak metalleri mikroyapıları gösterilmiştir. Mikroyapı görüntülerinden kaynak bölgesi tane yapısının uzunlamasına dendritler şeklinde olduğu ve katılaşmanın ana malzeme tarafından başlayarak kaynak metali merkez çizgisine doğru olması sebebi ile, tanelerin kaynak metali merkezine doğru yönlendiği anlaşılmaktadır. Kaynak merkezi mikroyapıları incelendiğinde, dentritik ferrit ve perlit fazları çok net şekilde ayırt edilebilmektedir. Koyu renkli bölgeler perlit fazının yoğun olduğu bölgeler iken, açık renkli bölgeler ferrit fazını göstermektedir. 8 numaralı deney numunesinde 7 numaralı numuneye göre ferrit fazının daha yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri literatürde yapılan çalışmalarla uyumludur [29].

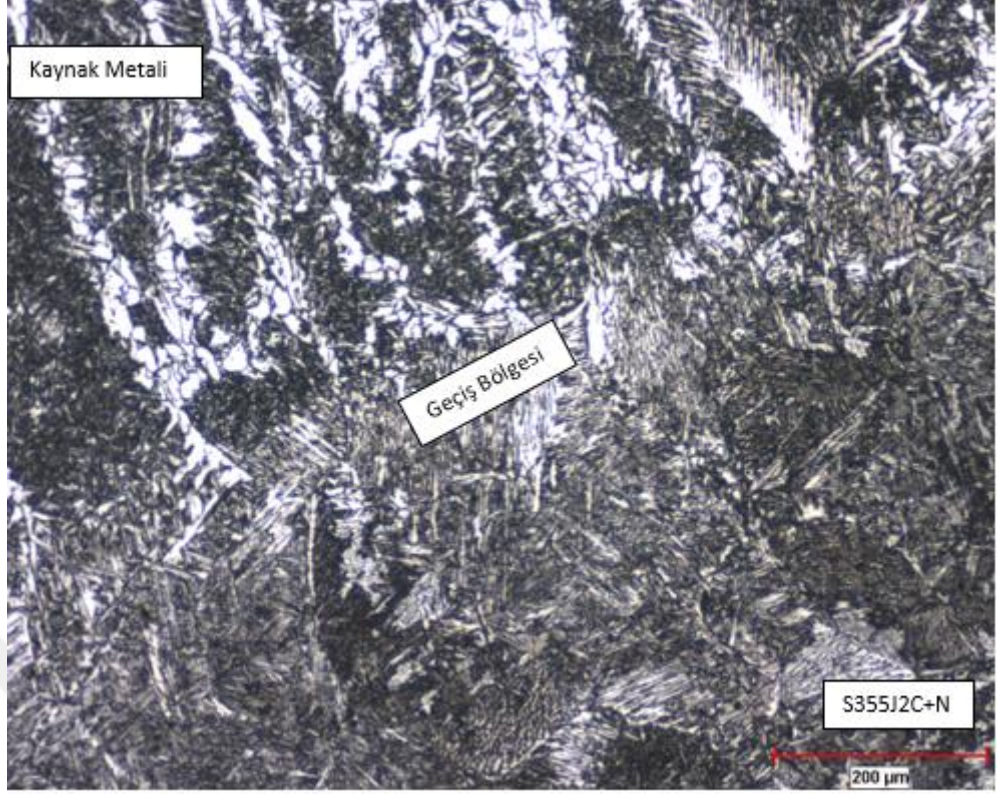


Şekil 5.26. 7 No’lu numune kaynak merkezinin görüntüsü.

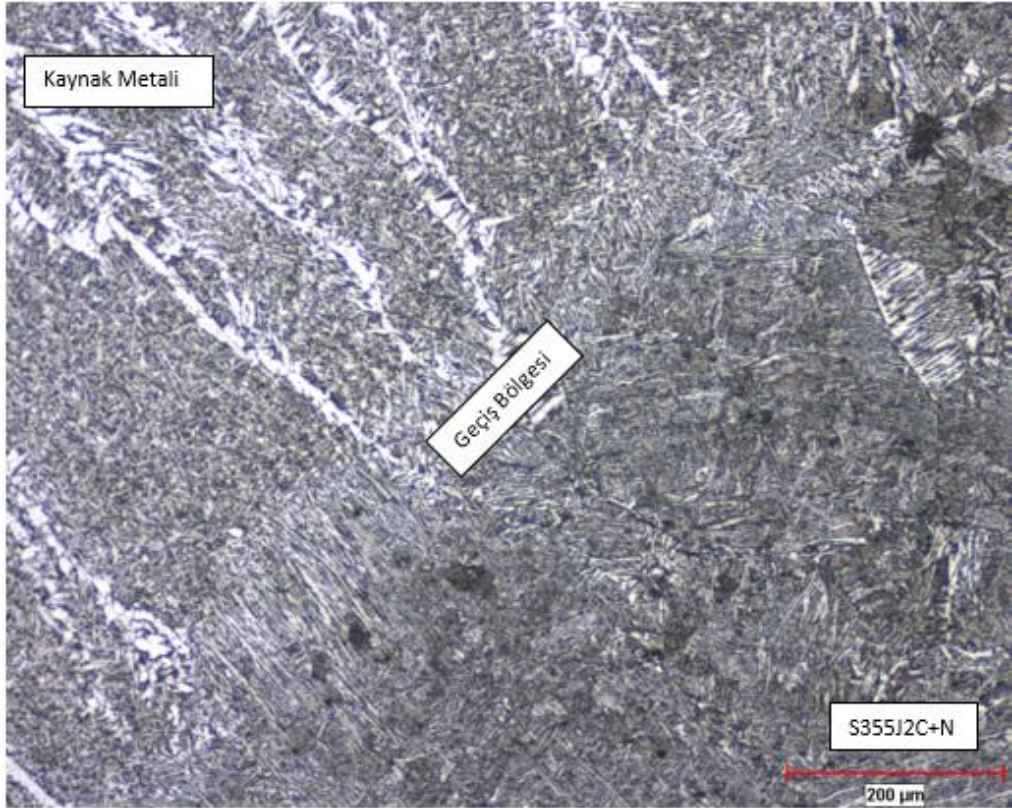


Şekil 5.27. 8 No’lu numune kaynak merkezi görüntüsü.

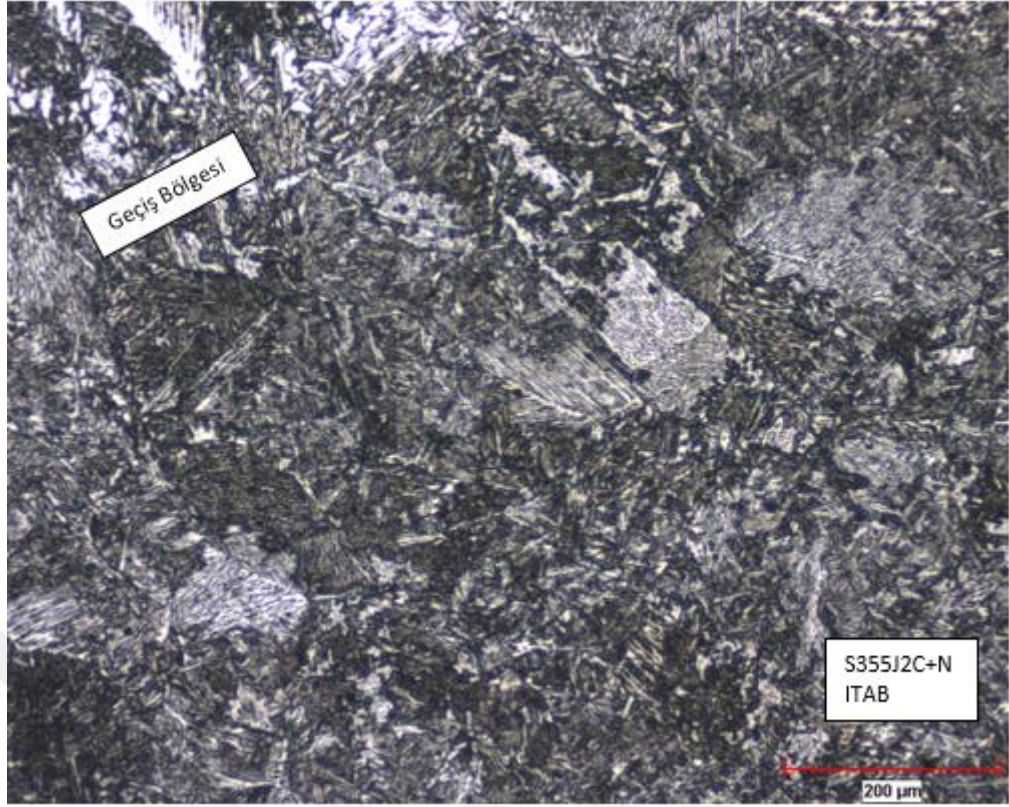
Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’da sırasıyla 7 ve 8 numaralı deney numunelerine ait S355J2C+N kaynak metali geçiş bölgesi mikroyapısı gösterilmiştir. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de ise sırasıyla 7 ve 8 numaralı deney numunelerine ait S355J2C+N ana metal tarafındaki ITAB bölgesi gösterilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde kaynak metali, S355J2C+N ana metal geçiş bölgesi tane yapısı farkı net olarak görülebilmektedir. Kaynak metali mikroyapısının ana malzemenin mikroyapısından farklı ve uzunlamasına dendritler şeklinde olduğu görülmektedir. Bu şekilde tane yönelmesi, katılaşmanın, kaynak merkezine göre daha düşük sıcaklıktaki ana malzemeden başlayıp sıcaklığın yüksek olduğu kaynak merkezine doğru oluştuğunu göstermektedir [29]. S355J2C+N ana metal tane yapısının homojen bir yapı durumunu koruduğu gözlemlenirken kaynak metali ve ana metal birleşiminde farklı bir mikroyapı oluşumunu gözlemlemek mümkündür. Ayrıca geçiş bölgesinin ana metal tarafında tane boyutunun, ana metal genel tane yapısına göre arttığı bir ITAB bölgesi görülmektedir. 8 numaralı deney numunesinin geçiş ve ITAB bölgesindeki ferrit oluşumunun 7 numaralı deney numunesine kıyasla daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden anlaşılmaktadır.



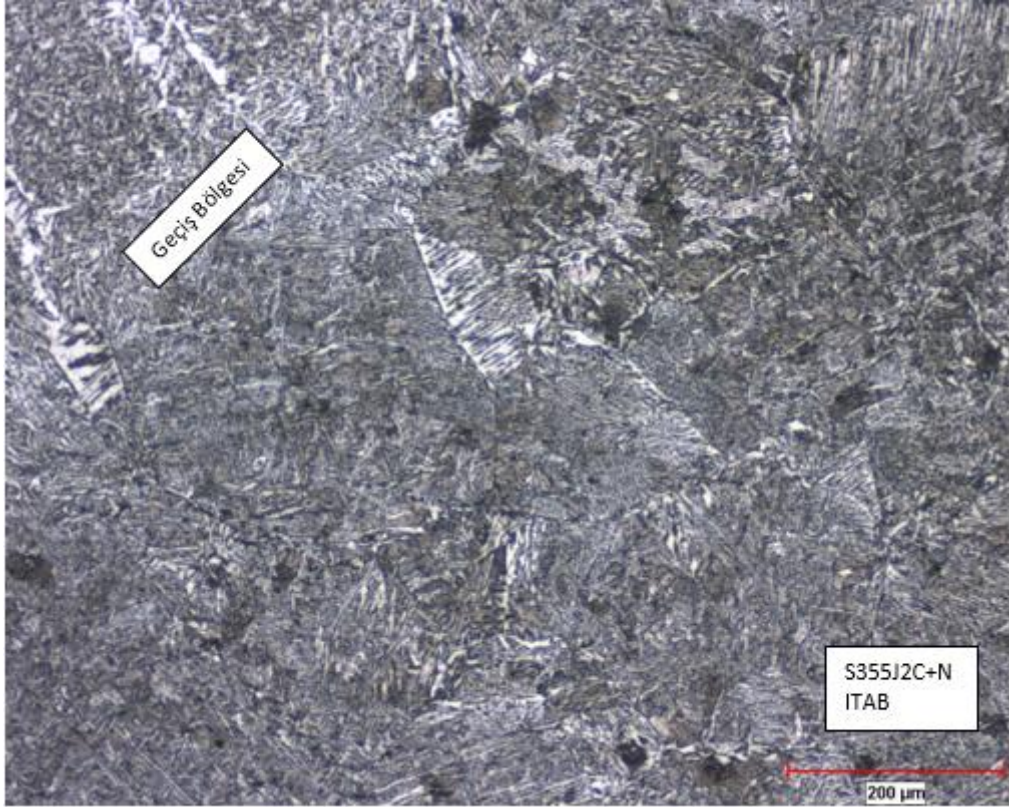
Şekil 5.28. 7 No'lu numune S355J2C+N-kaynak geçiş bölgesinin görüntüsü.



Şekil 5.29. 8 No'lu numune S355J2C+N-kaynak geçiş bölgesi görüntüsü.

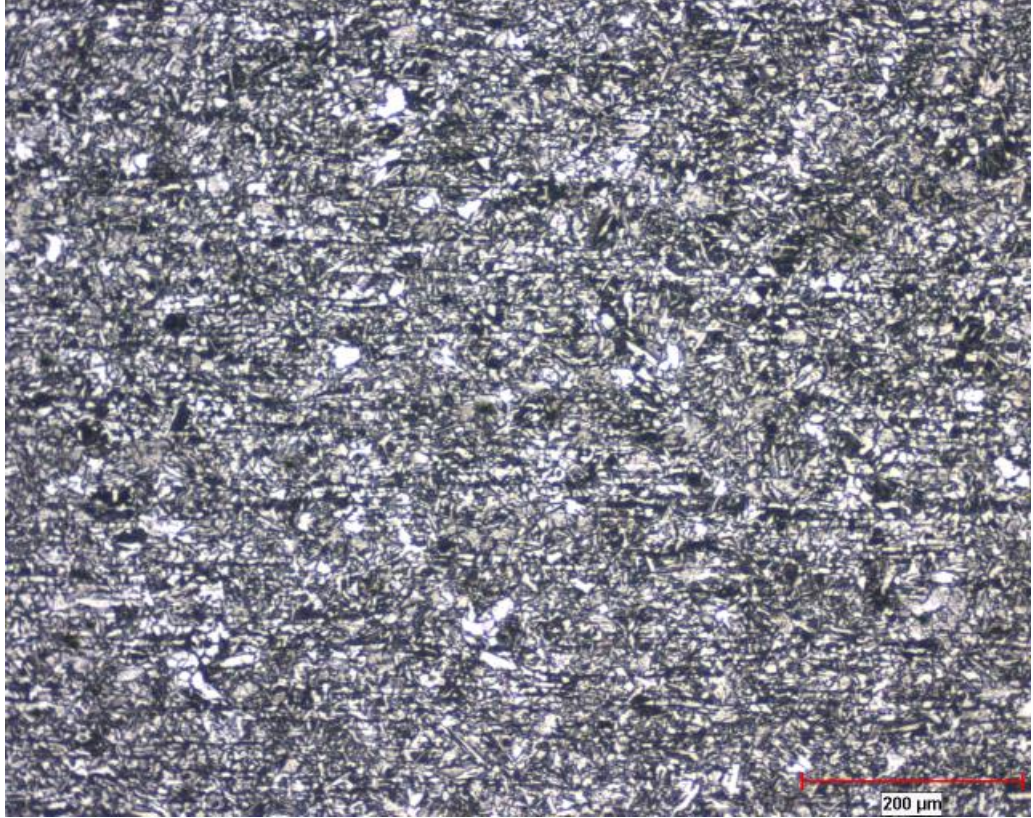


Şekil 5.30. 7 No'lu numune S355J2C+N ITAB görüntüsü.

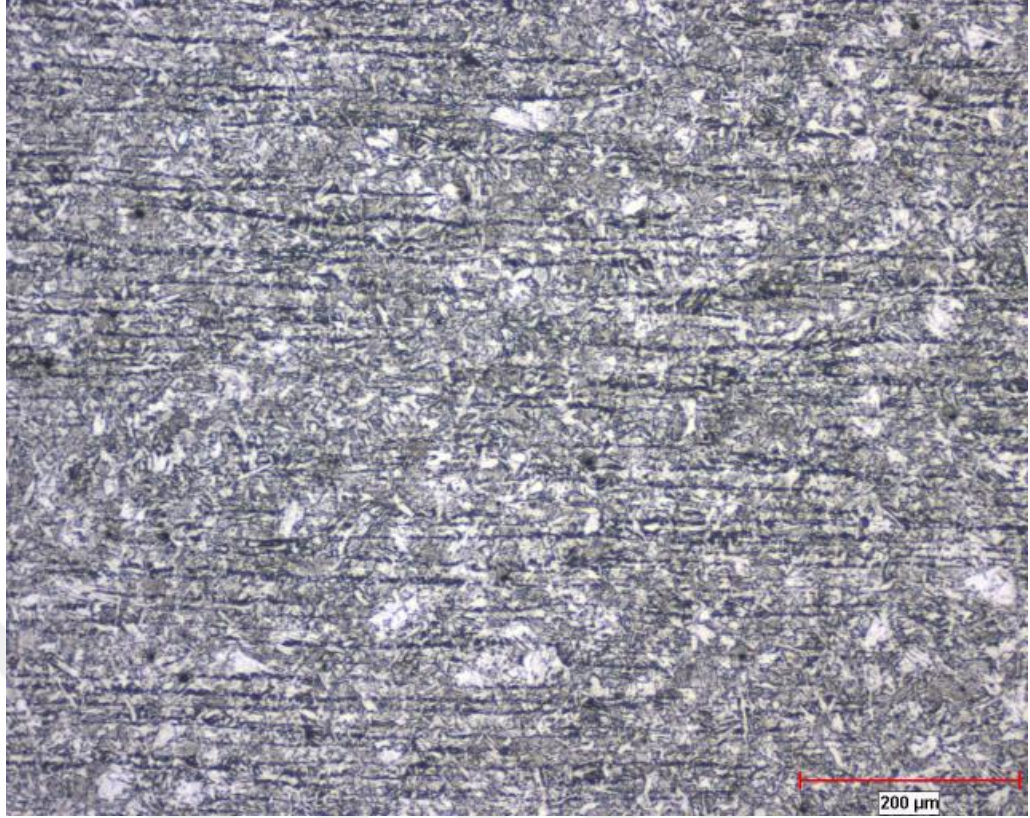


Şekil 5.31. 8 No'lu numune S355J2C+N ITAB görüntüsü.

Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te sırasıyla 7 ve 8 numaralı deney numuneleri S355J2C+N ana malzemeye ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Buna göre, S355J2C+N mikroyapısında, ferrit ve perlit fazları belirgin bir şekilde görülmektedir. Perlit bölgesinde bulunan taneler genellikle sütunsal ve daha ince yapılıdır. S355J2C + N ana metali mikroyapı görüntüleri literatürde bulunan benzer çalışmalarla örtüşmektedir [25,29].



Şekil 5.32. 7 No'lu numune S355J2C+N ana metalinin görüntüsü.



Şekil 5.33. 8 No’lu deney S355J2C+N ana metalinin görüntüsü.

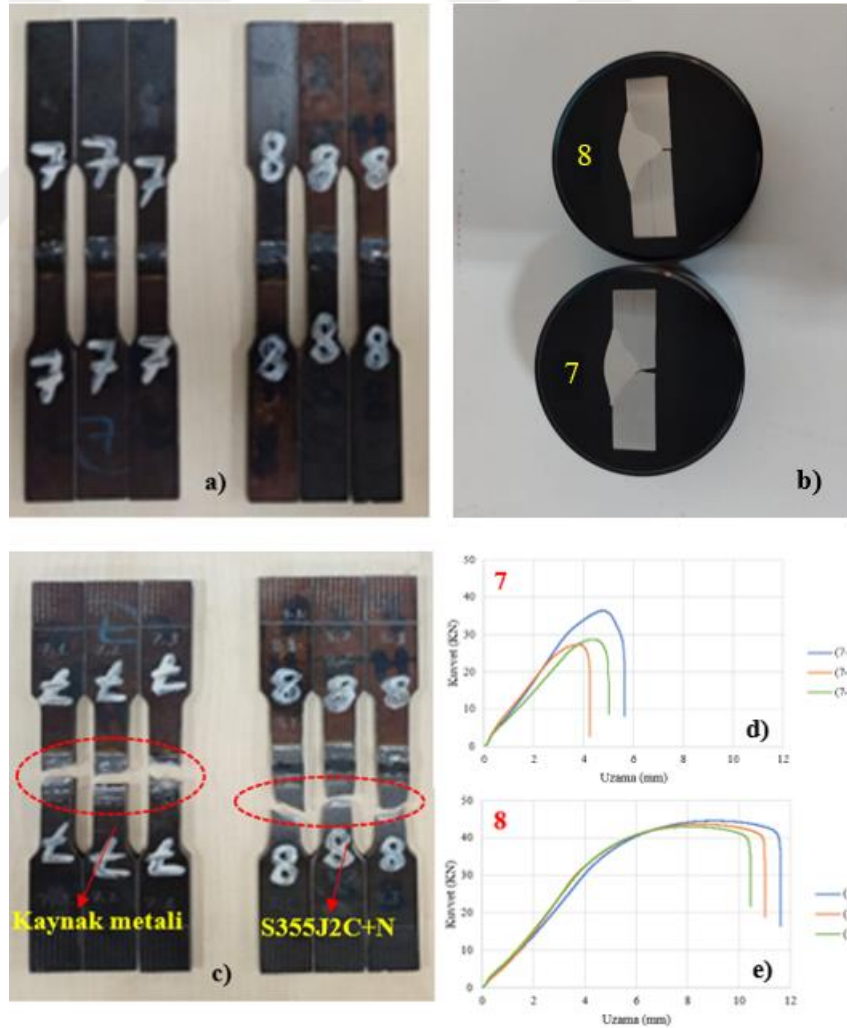
5.4 Hasar Analizi

7 ve 8 numaralı deney numunelerinden elde edilen sertlik değerleri ve mikroyapı görüntülerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Çizelge 5.11’de görüldüğü gibi, genel olarak 8 numaralı deney numunesinin sertlik değerleri 7 numaralı deney numunesine göre daha düşüktür. Mikroyapı görüntülerinde, bu durumu destekleyen yumuşak bir faz olan ferrit fazının 8 numaralı numunesinde daha fazla olduğu görülmektedir.

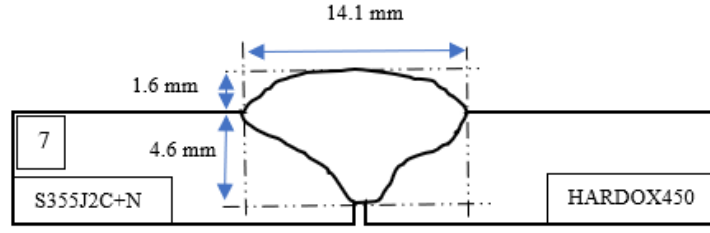
7 ve 8 numaralı deney numunelerinin Şekil 5.34 d ve e’de verilen kuvvet uzama grafiklerinde görüldüğü gibi, daha yumuşak yapıda olan 8 numaralı deney numunesinin şekil değiştirme özelliğinin 7 numaralı numuneye göre belirgin bir şekilde daha fazla olduğu görülmektedir.

Sertlik ve mikroyapı durumu ile ilgili yukarıda belirtilen sebeplerin hasar oluşumunda etkili olduğu düşünülmektedir. Ancak, mikroyapı incelemeleri için hazırlanan ve Şekil 5.34 b’de gösterilen numune kesitleri incelendiğinde hasar oluşumunu etkileyen temel faktörün kaynak nüfuziyeti olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.34 b’de görüldüğü gibi,

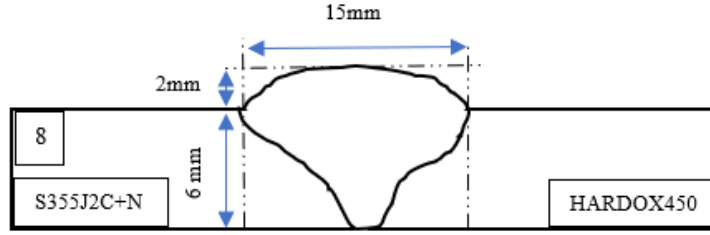
7 numaralı deney numunesindeki kaynak nüfuziyeti 8 numaralı numuneye göre özellikle plaka kalınlığı boyunca daha düşük çıkmıştır. Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da 7 ve 8 numaralı çekme deneyi numunelerinin kaynak kesit ölçüleri şematik olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, 7 numaralı deney numunesinde kalınlık boyunca kaynak nüfuziyeti 4.6 mm ölçülürken, 8 numaralı deney numunesinde kaynak nüfuziyeti 6 mm çıkmıştır. Bunun sonucunda beklendiği gibi kaynak kesit alanı daha düşük olan 7 numaralı deney numunesinde hasar kaynak bölgesinde meydana gelmiştir. 7 numaralı deney numunesindeki kaynak kökünde oluşan çentik ise hasarı hızlandırmıştır. Kaynak nüfuziyetini etkileyen temel faktörlerin akım ve voltaj değerleri olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada incelenen kaynak parametrelerinin (akım ve voltaj) kaynak oluşturdıkları ısı girdisine göre kaynak nüfuziyetini etkilediği bunun sonucunda da hasar oluşumlarının farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.34. 7 ve 8 numaralı numuneler hasar oluşumu.



Şekil 5.35. 7 numaralı çekme deney numunesinin kaynak kesiti.



Şekil 5.36. 8 numaralı çekme deney numunesinin kaynak kesiti.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 ve düşük karbonlu bir genel yapı çeliği olan S355J2C+N çeliklerinin robotik gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Kaynak işleminde 1.2 mm çaplı SG2 kaynak teli ve koruyucu gaz olarak CORGON 82 Ar + %18 CO₂ kullanılmıştır. Çalışmada kaynak parametreleri olarak, ön tavlama sıcaklığı (20 °C, 50 °C, 100 °C), akım (200 A, 220 A, 240 A) ve gerilim (26 V, 27 V, 28 V) kullanılmıştır. Her parametre için 3 seviye belirlenerek Taguchi L₉'a göre deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi L₉'a uygun olarak üretilen kaynaklı plakalardan hazırlanan ölçüm numuneleri kullanılarak çekme deneyleri, sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Yapılan çalışma sonucunda optimum kaynak parametreleri kullanıldığında hasarın kaynak bölgesinde oluşmadığı gösterilmiştir. 1, 2, 4, 5, 8 ve 9 numaralı deney numunelerinde hasar S355J2C +N malzemesinde oluşurken, 3, 6 ve 7 numaralı deney numunelerinde hasar kaynak bölgesinde meydana gelmiştir.
2. Maksimum hasar yükü 8 numaralı deney numunesinde 43.764 kN olarak ölçülürken minimum hasar yükü 7 numaralı deney numunesinde 31.598 kN olarak ölçülmüştür.
3. ANOVA analizi ve Taguchi analizleri sonucunda hasar yükü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla voltaj ve akım olarak elde edilmiştir. Voltaj parametresinin sonuçlar üzerinde katkı oranı %29.03, akım parametresinin ise %16.90 olarak hesaplanmıştır.
4. Maksimum hasar yükünün elde edildiği akım ve voltaj değerleri sırasıyla 200 A ve 26 V olarak belirlenmiştir. Ön ısıtma sıcaklığının sonuçlara etkisi %4.09 olarak bulunmuştur.
5. Ön tavlama sıcaklığının kaynak kalitesi üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir.
6. Bu çalışma kapsamında, Hardox 450 ve S355J2C+N malzemelerinin gaz altı kaynak yöntemi ile kaynak edilmesinde, kaynak bölgesinde hasar oluşmasına neden olan kaynak parametre seviyeleri 28 V ve 240 A olarak bulunmuştur.

7. Regresyon analizi sonucunda, lineer modele göre elde edilen gerçek değerler ile tahmini değerler arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) 0.66 çıkmıştır. Kuadratik modele göre hesaplanan gerçek değerler ile tahmini değerler arasındaki korelasyon katsayısı ise 0.96'dır. Bu durumda, bu çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen tahmini hasar yüklerinin gerçek sonuçlarla uyumu lineer modele göre daha iyi bulunmuştur.

8. 7 numaralı deney numunelerine uygulanan mikrosertlik analizi sonuçlarına göre; en düşük sertlik değeri S355J2C+N ana metalinde 158 HV olarak ölçülürken, en yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalinde 291 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ortalama sertlik değeri 183 HV olarak ölçülmüştür. Hardox 450 ITAB bölgesinde ortalama sertlik değeri 215 HV olarak ölçülürken, S355 ITAB bölgesinde ortalama sertlik değeri 213 HV olarak ölçülmüştür.

9. 8 numaralı deney numunelerine uygulanan mikrosertlik analizi sonuçlarına göre; en düşük sertlik değeri S355J2C+N ana metalinde 166 HV olarak ölçülmüş olup, en yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalinde 283 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ortalama sertlik değeri 179 HV olarak ölçülmüştür. Hardox 450 ITAB bölgesinde ortalama sertlik değeri 209 HV olarak ölçülürken, S355J2C+N ITAB bölgesinde ise ortalama sertlik değeri 200 HV olarak ölçülmüştür.

10. Mikroyapı inceleme sonucuna göre 7 ve 8 numaralı deney sonuçlarında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak genel olarak 8 numaralı deney numunesinde mikroyapıdaki ferrit oranının daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Her iki deneyde de elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak metali ile Hardox 450 ve S355J2C+N ana metal geçiş bölgesinde tane yapısı farkı belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Kaynak metalinde elde edilmiş olan mikroyapının ana malzemelerin mikroyapısından farklı ve uzunlamasına ferrit ve perlit fazında dendritler şeklinde olduğu görülmektedir. Hardox 450 ve S355J2C+N ana metal tane yapısında ince taneli ferrit ve perlit fazları görülmüştür. Isı tesiri altındaki alanda, kaynak işlemi sırasında oluşan ısı girdisi etkisi ile tane büyümesi gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

1. Farklı cins malzemeler kullanılarak aynı uygulamalar yapılabilir.

2. Kullanılan parametreler ve kaynak yöntemi değiştirilerek testler yapılabilir.
3. Farklı test yöntemleri ile inceleme yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Daniş, A., 2024. Gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen S355J2 yapı çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
2. Anık, S., 1991. Kaynak tekniği el kitabı, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 18-28.
3. Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. B. ve Uzgider, E., 2003. Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği, Türkiye Mühendislik Haberleri, 4(426), 4-40.
4. Weman, K., 2012. Introduction to welding. Welding Processes Handbook, 1–12. doi:10.1533/9780857095183.1
5. Erol, R., 2017. Gaz altı ark kaynağı yönteminde proses parametrelerinin yapıdaki çarpılmaya etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
6. Türk, M., 2021. S355J0 çeliğinin mag yöntemiyle birleştirilmesinde koruyucu gaz ve kaynak telinin mukavemet, dikiş geometrisine etkisi ve mikroyapı karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
7. Eryürek, B., 2007. Gazaltı ark kaynağı, İstanbul.
8. Türker, A., 2005. Kaynak hataları, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Emre, İ. E., 2019. Kırma ve öğütme sistemlerinde hardox 450 ve 20MnCr5 çeliklerinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
10. Uluocak, M. E., 2008. Hardox 450 çeliklerinin mag kaynak bölgesi mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Ertürk, İ., Durukan, T. ve Şentürk, B., 2017. Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikroyapı ve özelliklerinin tahmini, %1 içinde, X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre, Ankara, X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 11-12.
12. Canıyılmaz, E., 2001. Kalite geliştirmede taguchi metodu ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
13. Genichi, T. ve Clausing, D., 1990. Robust Quality, Harvard Business Review, 65-76.
14. Ross, P.J., 1989. Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, Singapore.

15. Aydın, M. E., 1994. Taguchi metodu ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
16. Yılmaz, T., 2010. Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
17. Okay, T., Najafi, A., Emre, H. E. ve Kaçar, R., 2015. Investigation of the Weldability of S235JR - Hardox400 Steel. 2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IIS'15).
18. Bilen, F. A., 2016. Hardox 400-AISI 304 çelik çiftlerinin plazma transferli kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
19. Huang, B. S., Yang, J., Lu, D. H. ve Bin, W. J., 2016. Study on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of S355JR/316L dissimilar welded joint prepared by gas tungsten arc welding multi-pass welding process. Science and Technology of Welding and Joining, 21(5), 381–388. doi:10.1080/13621718.2015.1122152
20. 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):255-264.
21. Kaya, Y., 2018. S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla mag kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Politeknik Dergisi, 21(3), 597 602.
22. Adar, M., 2019. HARDOX-500 ile ST-52 çeliğinin kaynak edilebilirliğinin mekanik testler ve istatistiksel yöntemlerle araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
23. Savaş, A., 2021. Mıg kaynak yöntemiyle birleştirilen hardox 400, AISI 304l ve st52 kalite çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
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, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
25. Özturan, A. B., İrsel, G. ve Güzey, B. N., 2022. Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints. Materials Science and Engineering: A, 856, 143486

26. Ulewicz, R., Mazur, R. ve Bokůvka, O., 2013. Structure and mechanical properties of fine-grained steels. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 41(2), 111-115.
27. Altuğ, M., 2018. Investigation of Hardox 400 Steel exposed to heat treatment processes in WEDM. *Politeknik Dergisi*, 22(1), 237-244.
28. Pawlak, K., 2015. A review of high-strength wear-resistant steel-HARDOX. *Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Materialoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa*, ul. Smoluchowskiego, 25, 50-370.
29. 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, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
30. URL-1 <<https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr300320186Q3C5L6N.pdf>>, Erişim Tarihi: 12.09.2024
31. URL-2 <<http://w3.bilecik.edu.tr/makine/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/kaynakteknigi-föy-notu.pdf>>, Erişim Tarihi: 14.09.2024
32. URL-3 <<https://www.kaynakekipmanlari.com/blog/icerik/kaynakta-hatalari>>, Erişim Tarihi: 17.09.2024
33. URL-4 <<https://www.muhandisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/>>, Erişim Tarihi: 20.09.2024
34. URL-5 <<https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/arc-mate/arc-mate-120id-welding-robot>>, Erişim Tarihi: 25.09.2024

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Eray BAYRAKDAR

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
2009-2013

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, 2022-2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Man Türkiye A.Ş./ Yaz Stajı
2. Ford Otosan / Yaz Stajı
3. Özel Sektör / Üretim- İmalat alanı, Makine Mühendisi / 2014-2021
4. Kamu Kurumu / Makine Mühendisi / 2021-

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Bayrakdar, E. ve Saraç, İ., 2024. Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin robotik gazaltı kaynak yöntemi ile kaynak kabiliyetinin çekme testleri ile araştırılması, 4. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, İstanbul, 4. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Bildiri Kitabı, 182-188.