



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ İLE  
BİRLEŞTİRİLEN ALAŞIMSIZ VE HARDOX  
ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE YAPISAL  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Enes Batuhan ZEYBEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2024  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Enes Batuhan ZEYBEK tarafından hazırlanan “Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Alaşımsız ve Hardox Çeliklerinin Mikroyapı ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof.Dr. Hakan GÖKMEŞE

#### Danışman

Doç.Dr. Şaban BÜLBÜL

#### Üye

Doç.Dr. İlker ÖRS

### İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Enes Batuhan ZEYBEK

Tarih: 27.09.2024

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN ALAŞIMSIZ VE HARDOX ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Enes Batuhan ZEYBEK

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Şaban BÜLBÜL

2024, 71 Sayfa

Endüstriyel uygulamalar ve mühendislik tasarımlarında, yüksek mukavemet, aşınma ve korozyon direnci gibi çeşitli özelliklerin tek bir yapıda bir araya getirilmesi, yapının performansını ve dayanıklılığını artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu tür özellikleri aynı yapıda birleştirebilmek genellikle farklı malzemelerin birlikte kullanılmasını gerektirir. Ancak bu durumda, malzemelerin kaynak edilebilirlik kapasitesi, oluşturulacak yapının kalitesini ve bütünlüğünü doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Bu nedenle, malzemelerin kaynak edilebilirlik performanslarını değerlendirmek amacıyla kapsamlı deneysel çalışmalar ve görsel analizler yapılması gereklidir. Bu çalışmada, Hardox 450 ve S235JR çeliklerinin tozaltı ark kaynağı yöntemiyle kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Kaynak performansını değerlendirmek için, kaynak metali ve Isıdan Etkilenmiş Bölge'den (ITAB) alınan kesitler üzerinde mikroyapı ve mekanik özellik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, farklı özelliklere sahip çeliklerin bir araya geldiğinde nasıl davrandığını ve birleştirme sürecinin malzeme performansını nasıl etkilediğini anlamak açısından önemlidir. Deneylerde, 4 mm kalınlığındaki metal levhalar, SG2 kaynak teli ve Eliflux Bar kaynak tozu kullanılarak alın kaynağı yöntemiyle aynı kaynak parametreleri altında birleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıların mukavemetini değerlendirmek amacıyla, numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve sonuçlar Vickers (HV) yöntemi kullanılarak mikro sertlik ölçümleriyle desteklenmiştir. Çekme testlerinin ardından, elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri incelenerek deformasyon özellikleri analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda, iki farklı metalin birleşme bölgesinde düzensiz boyutlarda dendritik bir yapının oluştuğu tespit edilmiştir. Sertlik ölçümleri, S235JR çeliğinde ana metalden kaynak metaline doğru bir sertlik artışı gösterirken, Hardox 450 çeliğinde ise tam tersi bir sertlik düşüşü ortaya koymuştur. Çekme testi sonuçlarına göre, S235JR çeliği kendi içinde veya Hardox 450 çeliği ile kaynatıldığında, esas metalde sünek bir kırılma gözlenirken; Hardox 450 çeliğinde ise kırılmanın kaynak bölgesinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hardoks 450, Kaynak edilebilirlik, ITAB, S235JR, Tozaltı ark kaynağı

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND STRUCTURAL PROPERTIES OF UNALLOYED AND HARDOX STEELS JOINED BY SUBMERGED ARC WELDING.**

**Enes Batuhan ZEYBEK**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Dr. Şaban BÜLBÜL**

**2024, 71 Pages**

In industrial applications and engineering designs, combining various properties such as high strength, wear resistance, and corrosion resistance in a single structure is crucial for enhancing the performance and durability of the structure. Achieving such a combination of properties often requires the use of different materials together. However, in such cases, the weldability of the materials is the most critical factor that directly affects the quality and integrity of the structure to be formed. Therefore, comprehensive experimental studies and visual analyses are necessary to evaluate the weldability performance of materials. This study investigates the weldability of Hardox 450 and S235JR steels using the submerged arc welding (SAW) method. To evaluate welding performance, microstructure, and mechanical property analyses were conducted on sections taken from the weld metal and the Heat-Affected Zone (HAZ). These analyses are essential for understanding how steels with different properties behave when joined and how the welding process affects the material's performance. In the experiments, 4 mm thick metal plates were joined using the butt welding method with SG2 welding wire and Eliflux Bar welding flux, using the same welding parameters. To assess the strength of the welded joints, the samples were subjected to tensile testing, and the results were supported by microhardness measurements using the Vickers (HV) method. After the tensile tests, the microstructure images of the samples were examined to analyze deformation characteristics. The experiments revealed that an irregular dendritic structure formed in the fusion zone where the two different metals were joined. Hardness measurements showed an increase in hardness from the base metal to the weld metal in S235JR steel, while a decrease in hardness was observed in Hardox 450 steel. According to the tensile test results, ductile fracture occurred in the base metal when S235JR steel was welded within itself or with Hardox 450 steel, whereas the fracture occurred in the weld zone in Hardox 450 steel. These findings provide valuable insights into how different types of steel interact during the welding process and how the structural changes that occur during this process affect the material's performance.

**Keywords:** Hardox 450, HAZ, S235JR, Submerged arc welding, Weldability,

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans sürecimde daima yapıcı şekilde destekleyen, tezin yazılmasında engin tecrübeleriyle motive eden ve akademik etik unsurlarında yol gösteren danışmanım sayın Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL'e, deneysel çalışmalarım sırasında deneyimleriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE'ye ve deneylerin gerçekleştirilmesinde teknik altyapı desteğini sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'ne teşekkür ederim.

Lisans eğitimim süresince rehberliğini esirgemeyen ve yüksek lisans eğitimine teşvik eden sayın Prof. Dr. Mehmet GAVGALI'ya şükranlarımı sunarım.

Her zaman ve her koşulda desteklerini daima yanımda hissettiğim aileme ve sevgili eşim Tuba ZEYBEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Enes Batuhan ZEYBEK  
KONYA-2024

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. KAYNAKLI İMALAT YÖNTEMİ</b> .....	<b>8</b>
3.1. Malzeme Türüne Göre Kaynak .....	8
3.2. Amacına Göre Kaynak .....	8
3.3. Uygulanış Şekline Göre Kaynak .....	8
3.4. Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	9
3.4.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri .....	9
3.4.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	10
<b>4. TOZALTI ARK KAYNAĞI</b> .....	<b>12</b>
4.1. Tozaltı Ark Kaynağı Çalışma Prensibi.....	13
4.2. Tozaltı Ark Kaynağı Başlıca Kullanım Alanları .....	14
4.3. Tozaltı Ark Kaynağı Avantaj ve Dezavantajları .....	14
4.3.1. Tozaltı ark kaynağı avantajları .....	14
4.3.2. Tozaltı ark kaynağı dezavantajları .....	15
4.4. Tozaltı Ark Kaynağı Türleri.....	16
4.4.1. Tek telli kaynak cihazları .....	16
4.4.2. Tandem tozaltı ark kaynak yöntemi .....	16
4.4.3. Paralel tozaltı ark kaynak yöntemi .....	17
4.4.4. Çift telli kaynak yöntemi .....	17
4.4.5. Tozaltı sıcak tel kaynağı.....	18
4.4.6. Bant elektrotlu tozaltı ark kaynak yöntemi .....	18
4.5. Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri .....	18
4.6. Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri .....	20
4.6.1. Kaynak tozlarının sınıflandırılması .....	20
4.6.2. Kaynak tozlarının üretim süreci .....	21
4.6.3. Koruyucu kaynak tozlarında aranması gereken özellikler .....	21
4.7. Kaynak Tozlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellik ve Etkileri .....	22
4.7.1. Kimyasal bileşim ve etkileri.....	22
4.7.2. Fiziksel etkiler .....	23
4.8. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisi.....	24
4.8.1. Tozaltı kaynağında dikiş geometrisini etkileyen faktörler .....	24

<b>5. YAPI ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>26</b>
5.2. S235JR (St37) Yapı Çeliği Genel Özellikleri .....	27
5.3. Yapı Çeliklerinin Kaynak Edilebilirliği .....	27
<b>6. HARDOKS ÇELİKLERİ .....</b>	<b>32</b>
6.1. Hardoks Çeliklerinin Uygulama Alanları ve Avantajları.....	33
6.2. Hardoks Çelik Türleri ve Özellikleri.....	33
6.2. Hardoks Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti .....	35
<b>7. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>36</b>
7.1. Malzeme .....	36
7.2. Yöntem .....	37
7.2.1. Numune hazırlama .....	39
7.2.1. Metalografik çalışmalar.....	40
7.2.2. Mikroyapı incelemeleri .....	41
7.2.3. Sertlik ölçümleri .....	42
7.2.4. Çekme deneyi.....	43
7.2.5. Çentik darbe testi.....	44
<b>8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>45</b>
8.1. Mikroyapı Sonuçları.....	45
8.2. Sertlik Sonuçları .....	48
8.3. Çekme Testi Sonuçları .....	51
8.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları .....	52
<b>9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>54</b>
9.1. Sonuçlar.....	54
9.2. Öneriler.....	55
<b>10. KAYNAKLAR.....</b>	<b>56</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

%	: Yüzde
°	: Derece
°C	: Celcius degree
A	: Amper
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
C	: Karbon
Ceş	: Karbon eşdeğeri
Cl	: Klor
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
He	: Helyum
Hz	: Hertz
HV	: Vickers Sertlik
kg/mm <sup>2</sup>	: kilogram/ milimetrekare
m/ dk	: metre/ dakika
m/ dk	: metre/ dakika
m <sup>3</sup> /s	: metreküp/ saniye
mm	: milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Azot
N <sub>2</sub>	: Azot
Ni	: Nikel
O <sub>2</sub>	: Oksijen
P	: Fosfor
PA	: Düz kaynak pozisyonu
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
V	: Vanadyum
V	: Voltaj
Zr	: Zirkonyum

## **Kısaltmalar**

AISI : American Iron and Steel Institute

AWS : American Welding Society

DIN : Deutsches Institut für Normung

EN : European Norm

GMAW:Gas Metal Arc Welding

ISO : International Organization for Standardization

ITAB : Isının tesiri altındaki bölge

M.Ö. : Milattan Önce

MAG : Metal Active Gas

MIG : Metal Inert Gas

SAE : Society of Automotive Engineers

TIG : Tungsten Inert Gas

TS : Türk Standardı

XRD : X-Ray Diffraction

ZSD : Zaman-sıcaklık-dönüşüm

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel sektörde kaynak bağlantılarının önemi gün geçtikçe artmakta ve kullanım alanları genişlemektedir. Özellikle gemi inşaatı, basınçlı kap üretimi, demiryolu altyapısı, damper ve vinç imalatı gibi ağır sanayi uygulamalarında, makinelerin çoğunlukla kaynak işlemleri ile birleştirildiğini görmekteyiz. Bu tür ağır sanayi makineleri, genellikle masif gerilmelere maruz kalır ve bu gerilmeler, yüksek dayanımlı malzemeler ve bağlantılar ile karşılanır. Ancak, yüksek mukavemetli malzemelerin yüksek maliyetleri ve temin zorlukları, farklı malzeme çiftlerinin birlikte kullanılmasına yönelik yeni çözümler geliştirilmesine yol açmıştır.

Konstrüktif uygulamalarda, eğer bir bölgedeki aşınma ve mukavemet ihtiyacı yüksekse, yüksek mukavemetli malzemeler kullanmak idealdir. Ancak, bu bölgeye yakın olan ve aşınmanın veya gerilmenin daha düşük olduğu alanlarda, daha uygun maliyetli ve yeterli mukavemete sahip malzemelerin tercih edilmesi hem maliyet optimizasyonu sağlar hem de sistemin genel dayanıklılığını artırır. Bu yaklaşım, endüstriyel uygulamalarda hem ekonomik hem de işlevsel bir denge kurmayı mümkün kılar.

Çelikler, kolay bulunabilirliği, ekonomik avantajları ve elementlerle alaşımlandırılabilmesi veya ısıl işlem teknikleriyle istenilen mekanik özelliklere kolayca ulaşılabilmesi sayesinde, sağlık sektöründen inşaat sektörüne kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Özellikle makine elemanları ve inşaat gibi, yüksek dayanım, korozyon direnci ve aşınma, sertlik ve işlenebilirlik gibi mekanik özelliklerin önemli olduğu alanlarda, farklı türde çeliklerin birlikte kullanılması kritik bir rol oynar.

Bu yaklaşım, her iki malzemenin üstün özelliklerinden yararlanarak hem dayanıklılığı hem de işlevselliği artırma olanağı sağlar. Örneğin, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren bir bölgede sert bir çelik kullanılırken, aynı yapının diğer kısımlarında daha kolay işlenebilir ve uygun maliyetli başka bir çeliğin kullanılması, performans ve maliyet optimizasyonu açısından önemli bir avantaj sunar. Böylece, sektörler arası geniş bir yelpazede etkin ve verimli malzeme kullanımı mümkün hale gelir (Adar, 2019)

Aşınma, birçok endüstriyel uygulamada önemli bir hasar kriteri olarak öne çıkmaktadır. Makine parçalarının aşınmaya bağlı olarak orijinal boyutlarını kaybetmesi, sistemlerin performansını ve verimliliğini düşürebilir (Frydman & Pękalski, 2008). Bu bağlamda, bu çalışmada ele alınan malzemelerden biri olan Hardoks, SSAB (Svenskt Stal AB) tarafından aşınmaya maruz kalan sistemler ve bileşenler için özel olarak geliştirilmiş martenzitik bir çeliktir. Hardoks çelikleri, brinell sertlik değerlerine göre Hardoks 400, 450, 500, 550, ve 600

olarak sınıflandırılmıştır. Sertlik değerinin artması, malzemenin daha yüksek aşınma direnci, çekme mukavemeti sağladığı anlamına gelirken; aynı zamanda süneklik, tokluk ve kaynaklanabilirlik özelliklerinin de azalmasına neden olmaktadır (Uzunali & Cuvalci, 2015).

Bu çalışmada incelenen Hardoks 450 çeliği, piyasadaki diğer yüksek dayanımlı yapısal çeliklerle kıyaslandığında aşınmaya karşı daha dirençli bir yapıya sahiptir. Hardoks çeliği, yüksek aşınma direncinin yanı sıra, olağanüstü bir tokluk da sunmaktadır. Bu tokluk, malzemenin düşük sıcaklıklarda dahi aşırı zorlanmalara karşı dayanıklı kalmasını sağlar (T. Yılmaz, 2010). Hardoks 450, optimize edilmiş özel bir üretim süreci ve uygun bileşim ile elde edilen, yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzemedir (Uluocak, 2008). Yüksek mukavemet ve aşınma direnci sayesinde zorlu çalışma koşullarında (örneğin iş makineleri, kırıcılar ve ekskavatörlerde) genellikle Hardoks çeliği tercih edilmektedir (Lazić vd., 2017; Mindivan, 2013).

Bu çalışmada ayrıca, Hardoks 450 çeliği ile kaynaklı olarak birleştirilen S235JR çeliği ele alınmıştır. S235JR çeliği, genel amaçlı yapı ve inşaat sektörlerinde, makineler, inşaat bileşenleri, otomobiller, büyük çaplı borular ve iş makineleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çelik, geniş bir teknik kullanım yelpazesine sahip olmasının yanı sıra, iyi kaynak özellikleri ile de öne çıkmaktadır. Bu özellikleri, malzemenin farklı uygulama alanlarında esneklik ve güvenilirlik sunmasına olanak tanır. Bu çelik türü, düşük karbon içeriği sayesinde yüksek kaynaklanabilirlik ve kolay şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir. S235JR çeliği, özellikle inşaat, makine mühendisliği ve çelik konstrüksiyon gibi alanlarda dayanıklılığı ve maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilir (Sahhal & Gunay, 2020).

S235JR 'nin kimyasal ve mekanik özellikleri, bu çeliğin çeşitli yapısal uygulamalar için uygun olmasını sağlamaktadır. Özellikle düşük karbon içeriği, çeliğin yüksek süneklik ve şekillendirilebilirlik gibi özellikler kazanmasına yardımcı olurken, aynı zamanda kaynak işlemlerini de kolaylaştırır. Bu nedenle, S235JR çeliği hem maliyet etkinliği hem de mekanik performans özellikleriyle öne çıkar. Bu özellikler, çeliğin birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmesinin temel nedenlerindedir (Atabey, 2024).

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kapcinska ve Popowska hardoks 500 ve S355 çeliklerinin farklı kaynak yöntemleriyle yapılan bağlantılarının mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemektedir. Ayrıca, bu çeliklerin tribolojik özelliklerinden sorumlu elementlerin dağılımı analiz edilmiştir. Çalışmada, hardoks 500 için MIG kaynağının en uygun yöntem olduğu, S355 için ise elektrot kaynağının daha uygun olduğu belirlenmiştir. Spektrometrik analizler, hardoks 500 çeliğinde tribolojik özelliklere katkıda bulunan elementlerin (Cr, Mn) kaynak bağlantılarında önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Bulgular, kaynak teknolojisinin doğru seçiminin önemini vurgulamaktadır (Kapcinska-Popowska, 2011).

Multani ve ark. araştırmasında, gaz metal ark kaynağı ve korumalı metal ark kaynağı işlemlerinin 20 mm su verilmiş ve temperlenmiş hardoks 400 çelik bağlantılar üzerindeki etkilerini inceler. Çift V oluk bağlantılar kullanılarak yapılan testlerde, SMAW işlemi daha düşük ısı girdisi nedeniyle daha iyi çekme ve darbe özellikleri göstermiştir. Isıdan etkilenen bölgede, SMAW daha az sertlik kaybı yaşarken, kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ve mikroyapı analizleri belirgin farklılıklar ortaya koymuştur (Multani vd., 2020).

Ólafsson ve ark. yaptığı çalışmada, gemi ve deniz yapılarında kullanılan tozaltı ark kaynağı (SAW) örneklerinin kalınlığa bağlı yorgunluk dayanımını inceler. Bulgular, 25 mm'den kalın kaynaklı eklerin, daha ince örneklerle benzer yorgunluk dayanımına sahip olduğunu, 20 mm kalınlığındaki örneklerin ise en yüksek yorgunluk direncini gösterdiğini ortaya koymuştur. 40 mm kalınlığındaki örnekler, 30 mm'ye kıyasla daha iyi yorgunluk direnci sergilemiştir. Kalınlık etkisi, beklenenden daha az ciddi bulunmuştur (Ólafsson vd., 2016).

Özturan'ın araştırmasında, EN 10025 S355J2C+N ve Hardox 450 çeliklerinin gazaltı ark kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi sonucu oluşan mikroyapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Çalışmada, Vickers mikrosertlik, eğilme, Charpy V-Notch darbe, aşınma ve çekme testleri yapılmış; optik mikroskop, FESEM, EDX ve XRD analizleri kullanılmıştır. Hardoks 450'nin ITAB bölgesinde iğnemsiz yapılar ve küçük taneler gözlemlenmiştir. S355J2C+N ITAB bölgesinde kompleks tane dağılımı bulunmuştur. Vickers mikrosertlik sonuçları, hardoks 450'den S355J2C+N metaline doğru azalmış ve en yüksek sertlik hardoks 450 ana metalde ölçülmüştür. Mekanik testlerde, kaynaklı bölgenin iyi dayanım özellikleri sergilediği ve S355J2C+N'den kopma gerçekleştiği belirlenmiştir. Aşınma testi, kaynaklı bölgenin dayanıklılığını göstermiştir. Eğme testleri, iki çelik ve kaynaklı bölgenin eğme

kuvvetlerini ortaya koymuştur. GMAW yöntemi, iki farklı çeliğin başarılı bir şekilde birleştirilmesinde etkili bulunmuştur (Özturan, 2022).

Anandavijayan ve ark yaptığı çalışmada, S355 yapısal çeliğin ön gerilmenin yorgunluk ömrü ve çatlak büyüme davranışı üzerindeki etkilerini inceler. Tek eksenli yorgunluk ve yorgunluk çatlak büyüme testleri, farklı ön gerilme seviyelerinde yapılmış ve sonuçlar gerilmemiş malzeme ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, yorgunluk ömrünün artan ön gerilme seviyesiyle azaldığını, ancak çatlak ilerleme hızının büyük ölçüde değişmediğini göstermiştir. S-N eğrileri, 0% ve 5% ön gerilme seviyelerinde çift eğimli olup, eğim değişimi yaklaşık 600,000 döngüde gözlenmiştir. 10% ön gerilmiş malzeme için daha düşük gerilim seviyelerinde ikincil eğim belirlenmelidir. Testler, çekme geriliminin akma geriliminin altında olduğu durumlarda yorgunluk hasarının mekanik davranış üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Malzeme ön gerilmesinin yorgunluk çatlak ilerleme davranışı üzerinde etkisi olmadığı, ancak ön sıkıştırmanın etkilerinin incelenmesi gerektiği belirtilmiştir (Anandavijayan vd., 2021).

Çetinkaya ve ark. çalışmasında, S235JR çeliğine tozaltı ark kaynak yöntemiyle uygulanan farklı kaplama kalınlıklarının (25 µm, 50 µm, 75 µm) mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemektedir. 75 µm kaplama, kaynak hatalarına yol açmış ve çekme, eğme, çentik testlerinde olumsuz sonuçlar vermiştir. Sertlik, kaynak metalinde en yüksek bulunmuştur. T5 numunesi hariç, diğer numunelerde kopmalar ana malzemedeki, T5'te ise kaynak metalinde olmuştur. Çentik testlerinde, 75 µm kaplamanın olumsuz etkisi belirginleşmiştir. Kalın kaplamaların mekanik özellikleri azalttığı ve kaynak kusurlarına neden olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, kaplama kalınlığının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini kapsamlı şekilde analiz etmiştir (Çetinkaya vd., 2022).

Celasun çalışmasında, S355J2 çeliğinin ısı ile çift-fazlı hale getirilip tozaltı ark kaynağıyla birleştirilmesi incelenmiştir. Isıl işlem sonrası çift-fazlı çeliklerin çekme mukavemeti artmış, S2Mo kaynağıyla daha yüksek mukavemet ve sertlik elde edilmiştir. Gözle, ultrasonik ve manyetik muayenelerde kusur bulunmazken, çentik darbe testlerinde S2Mo kaynağı daha yüksek tokluk göstermiştir. Eğme testlerinde çatlama gözlenmemiştir. Sonuçlar, seramik altlık kullanımının başarılı olduğunu ve S2Mo teliyle yapılan kaynakların daha üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir (Celasun, 2012).

Frydman ve Pękalski makalesinde, hardoks 400 ve hardoks 500 çeliklerinin kaynaklı bölgelerindeki yapısal değişiklikler ve sertlik incelenmiştir. Isıdan etkilenen bölgelerde düşük aşınma direncine sahip yapılar oluştuğu ve bu bölgelerin hızlı aşındığı belirtilmiştir. Çeliklerin sertleştirilmesi ve düşük sıcaklıkta temperlenmesi önerilmiştir. Laboratuvar testlerinde, bu yöntemle çatlak oluşmadan ek yerlerinin sertlik ve yapısı düzeltilmiştir. Hardoks ve HTK çeliklerinin yüksek mekanik özellikleri ve homojen yapıları sayesinde linyit madenciliği makinelerinde geniş bir kullanım alanı bulabileceği vurgulanmıştır. Bu çelikler, homojen aşınma göstererek, uzun ömürlü kullanım sağlar (Frydman & Pękalski, 2008).

Erden ve ark. yaptığı çalışmada, tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak S235JR çeliği ve hardoks hituf çeliği ile üç farklı kaynaklı numune oluşturulmuştur. Tüm numunelerde aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Sertlik testleri sonucunda, Hardox Hituf çeliği ile yapılan bağlantıların daha yüksek sertlik sergilediği tespit edilmiştir. Makro ve mikroyapı analizleri, Hardox çeliğinde ITAB bölgesinin S235JR çeliğine kıyasla daha dar olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, Hardox çeliğinde tane büyümesini önleyen Mo, Nb, V ve B gibi elementlerin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, molibdenin Hardox Hituf çeliğinde sertleşme kabiliyetini artırması ve V, Nb, Ti gibi elementlerin karbonitrürlerinin dislokasyon hareketini engellemesi, yüksek sertlik değerlerine katkıda bulunmuştur. (Erden vd., 2018).

Konat ve Białobrzaska makalesinde, S355 çeliğinin kaynak ve kaynak sonrası ısıtılmasının mikroyapı ve aşınma direncine etkisi incelenmiştir. Kaynak işlemi, çeliğin aşınma direncini düşüren çeşitli mikroyapılar oluşturmuştur. Önerilen kaynak tekniği ve ısıtılma işlemi ile yüksek mekanik özellikler ve artmış aşınma direnci elde edilmiştir. Isıtılma işlemi sonrası, kaynaklı bağlantının mikroyapısı, temperlenmiş martensit ve troostit içermekte olup, aşınma direnci %20 artmıştır. Bu işlemler, yüzey kalitesini iyileştirerek, daha uniform aşınma ve etkili bakım planlaması sağlar (Konat & Białobrzaska, 2022).

Adar'ın yaptığı çalışmada, Hardox 500 ve St-52 (S355) malzemelerinin MIG kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Farklı akım ve voltaj parametreleri kullanılarak tam faktöriyel tasarım esas alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin birleşme performansları, çekme testleri ve sertlik ölçümleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş ve SEM-OM görüntüleri kullanılarak nicel analizlerle doğrulanmıştır. Optimum kaynak koşulları 200 A akım ve 27,8 V voltaj olarak belirlenmiştir (Adar, 2019).

Czupryński ve ark. yaptığı çalışmada, yapısal çelik S355J0 ile aşınmaya dayanıklı hardoks 450'nin MMA ve MAG kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi incelenmiştir. Hardoks 450'nin kullanımı, ekipmanlarının aşınmaya maruz kalan bölgelerinde performansı artırabilir. Çekme dayanımı, her iki kaynak yöntemiyle yapılan bağlantılarda da S355J0 çeliğinden daha yüksek bulunmuştur. Hardoks 450 ve S355J0 malzemelerinin etkin bir şekilde kaynakla birleştirilmesi sağlanmıştır (Czuprynski vd., 2020).

Korkmaz ve ark. çalışmasında, hardoks 500 ve St52 (S355) çeliklerinin GMAK yöntemiyle kaynak edilebilirliği, farklı akım ve voltaj parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Kaynaklı numuneler SEM, mikro yapı görüntüleme, çekme testi ve mikro sertlik ölçümü teknikleriyle değerlendirilmiştir. Düşük akım ve voltajda, hardoks 500 ve St52 malzemelerinin kaynak edilebilirliğinin düşük olduğu ayrıca sertlik dağılımının düzensiz olduğu tespit edilmiştir. Yüksek akım ve voltajda ise çekme eğrilerinin daha kararlı olduğu ve homojen sertlik dağılımı sağlandığı gözlemlenmiştir (Korkmaz vd., 2020).

Teker ve Gençdoğan yaptığı çalışmasında, hardoks 450 ve AISI 430 çelikleri çift taraflı TIG kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak bölgesi OM, SEM, EDS ve EBSD teknikleri ile incelenmiştir. Akım artışı, kaynak dikişinin genişlik ve derinliğini artırmıştır. Hardoks 450 çelik tarafında karbon ve krom difüzyon gradyanları oluşmuştur. 10 mm kalınlığındaki çelikler, ek tel veya kanal olmadan başarıyla birleştirilmiştir. ITAB-AISI 430'da krom karbürler, ITAB-hardoks 450'de ise iğnemsî ferrit, widmanstätten ferrit ve martensit görülmüştür (Teker & Gençdoğan, 2020).

Uzunali ve Çuvalcı çalışmasında, hardoks 450 ve optim 700MC çeliklerinin kaynak sonrası ısıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. PB pozisyonunda MAG kaynak yöntemi kullanılmış, dolgu metali ve koruyucu gaz standartlara uygun seçilmiştir. 150°C, 300°C ve 450°C'de ısıl işlem uygulanmıştır. Artan ısıl işlem sıcaklıklarının, temperlenmiş martensit çeliğin ısıdan etkilenen bölgelerindeki sertlik değerlerini azalttığı tespit edilmiştir (Uzunali & Cuvalci, 2015).

Akay yaptığı çalışmada, düşük alaşımlı X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Ultrasonik ve radyografik testlerde kaynak hatası görülmemiştir. Çekme testlerinde, numunelerin ana malzemelerinde kopma olmuş ve bağlantı dayanımları ana malzemelerden yüksek bulunmuştur. Eğme testlerinde kusur saptanmamıştır. Çentik darbe testlerinde, S2Mo teli ve P223 tozu ile yapılan birleşimlerin daha yüksek tokluk sağladığı

belirlenmiştir. Sertlik testlerinde en yüksek değer kaynak metalinde ölçülmüş, ardından ITAB ve ana malzeme gelmiştir. X70 çeliğinde S2Mo teli ve P223 tozu en iyi sonuçları vermiştir (Akay, 2012a).

Akduman'ın çalışmasında, düşük karbonlu S235JR yapı çeliğinin ısıtım işlem öncesi ve sonrası kimyasal ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. 4 numune hazırlanmış ve rekristalizasyon tavlama uygulanmıştır. Isıtım işlem sonrası farklı ortam ve zamanlarda soğutulmuşlardır. Sertlik, aşınma ve çekme testleri yapılmış, mikroyapıları SEM ile incelenmiştir. Isıtım işlem sonrası martenzit yapının sertlik ve dayanıklılığı artırdığı gözlemlenmiştir. Sertliğin en fazla suda tam soğutma ile arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek tokluğun, 3 saat fırında bekletilen numunede elde edildiği belirtilmiştir (Akduman, 2021).



### 3. KAYNAKLI İMALAT YÖNTEMİ

Kaynak (veya kaynaklama), metallerin ve bazen plastiklerin birleştirilmesi sürecidir. Bu süreçte, iki veya daha fazla parça, ısının, basıncın veya her ikisinin kombinasyonunun etkisiyle birleştirilir (Anık, 1991). Antik dönemlerde temel metal işleme ve birleştirme teknikleriyle başlayan kaynak teknolojisi, tarih boyunca sürekli gelişerek, 21. yüzyılda robotik ve otomatik kaynak sistemlerine evrilmiş ve modern endüstrilerin temel taşlarından biri haline gelmiştir, bu süreçte kaynak yöntemleri daha güvenli, hızlı ve verimli hale gelmiştir (Aslanlar, 2009). Kaynak işlemi, malzemenin türüne, amacına, uygulanış şekline ve işlemin cinsine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır.

#### 3.1. Malzeme Türüne Göre Kaynak

**Metal Malzeme Kaynağı:** Bu tür kaynak, metalik malzemelerin birleştirilmesi amacıyla kullanılır. İşlem sırasında ısı, basınç veya her ikisi birden uygulanarak aynı türden ve benzer erime aralığına sahip malzemeler, ilave bir metal kullanılarak veya kullanılmadan birleştirilir. Bu, metal malzeme kaynağı olarak adlandırılır.

**Plastik Malzeme Kaynağı:** Bu kaynak türünde, termoplastik malzemeler kullanılır. Aynı veya farklı türden plastikler, ısı ve basınç yardımıyla ve genellikle aynı türden bir ilave plastik malzeme eklenerek birleştirilir. Bu işlem, plastik malzeme kaynağı olarak bilinir (Aslanlar, 2009; B. Raj, 2006; Weman, 2011).

#### 3.2. Amacına Göre Kaynak

**Birleştirme Kaynağı:** Bu kaynak yöntemi, iki veya daha fazla malzeme parçasını kalıcı olarak bir bütün haline getirmek için kullanılır.

**Dolgu Kaynağı:** Bu yöntem, bir iş parçasının hacmindeki eksiklikleri tamamlamak, hacmini artırmak veya korozyon ve aşınma etkilerine karşı koruma sağlamak amacıyla uygulanır. Kaplama, zırlama ve tampon tabaka kaplama bu tür işlemlere örnek olarak verilebilir (Anık, 1991; Aslanlar, 2009; Francisco José Gomes da Silva, 2021).

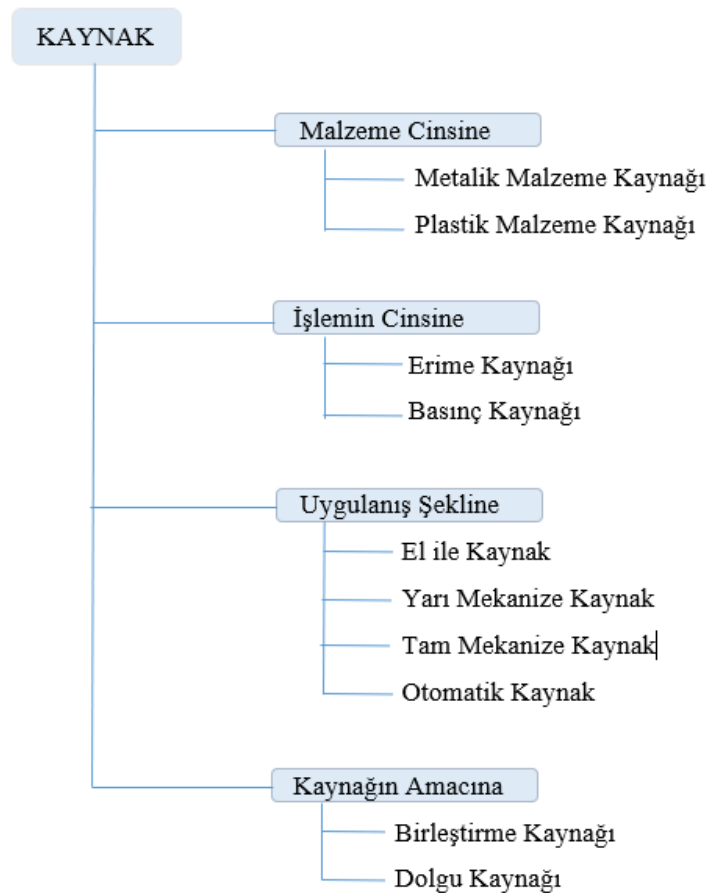
#### 3.3. Uygulanış Şekline Göre Kaynak

**El Kaynağı:** Kaynak işlemi tamamen el ile yönlendirilen bir kaynak aracı kullanılarak gerçekleştirilir.

**Yarı Mekanize Kaynak:** Bu yöntemde, kaynak aleti kısmen mekanize edilmiş bir cihaz tarafından yönlendirilir.

**Tam Mekanize Kaynak:** Kaynak aleti tamamen mekanize bir makine ile yönlendirilir.

**Otomatik Kaynak:** Bu yöntemde, hem kaynak işlemi hem de iş parçasının değiştirilmesi gibi tüm ana ve yardımcı işlemler tam olarak mekanize edilmiştir (Anık, 1991; Aslanlar, 2009; Weman, 2011).



Şekil 3.1. Kaynak işlemi kategorileri (Aslanlar, 2009)

### 3.4. Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Kaynak yöntemleri, temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Ergitme Kaynak Yöntemleri ve Katı Hal Kaynak Yöntemleri (Francisco José Gomes da Silva, 2021).

#### 3.4.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

Bu yöntemler, kaynak bölgesinin ısı etkisiyle eritilmesini ve gerektiğinde dolgu malzemesi eklenerek dayanımın artırılmasını içerir.

- Oksi-Gaz Kaynağı: Bu yöntemde, oksijen ve asetilen gibi yanıcı gazların karışımı yakılarak elde edilen alev ile malzemeler eritilir (Gençdoğan, 2020).
- Elektrik Ark Kaynağı: Bu yöntemde, elektrot ile ana metal arasında oluşturulan elektrik arki kullanılarak ısı üretilir. Genellikle bu işlemde basınç uygulanır ve dolgu metali kullanılır. 4 çeşidi vardır.
- Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı (GTAK/TIG): Argon ve helyum gibi inert gazlar ve tungsten elektrot kullanılır. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve kaliteli kaynak dikişleri sağlar. Özellikle ince malzemelerin kaynak işlemlerinde tercih edilir.
- Gaz Altı Metal Ark Kaynağı (GMAK/MIG-MAG): MIG kaynakta koruyucu olarak argon ve helyum gibi soy gazlar kullanılır. MAG kaynakta koruyucu olarak oksijen ve karbondioksit gibi aktif gazlar kullanılır. Bu yöntem, hızlı ve verimli kaynak işlemleri için uygundur. Çeşitli metal türleriyle geniş bir uygulama alanına sahiptir.
- Toz Altı Ark Kaynağı (TAK): Kaynak işlemi sırasında eriyen toz cürufun kaynak yüzeyini kaplayarak koruma sağladığı bir yöntemdir. Bu koruyucu katman, kaynak işlemi sırasında yüzeyi çevresel etkilerden izole eder. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra, gevrek hale gelen bu toz kabuk fırça yardımıyla temizlenir ve uzaklaştırılır. Ayrıca, aktif gazlar da bu yöntemde kullanılır; özellikle çeliklerin kaynak işlemlerinde oksitlenmeyi kontrol etmek ve kaynak dikişinin formunu düzenlemek amacıyla tercih edilir. Toz Altı Ark Kaynağı, büyük yapısal kaynak işlemlerinde ve uzun, sürekli dikişlerin gerektiği projelerde oldukça etkilidir.
- Plazma Ark Kaynağı (PAK): Argon ve helyum gibi inert gazların koruyucu gaz olarak kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, ark içerisinde yüksek hızda gönderilen gazların yaklaşık 17000°C sıcaklığa ulaşarak plazma oluşturmasıyla çalışır. Plazma Ark Kaynağı, düşük enerji tüketimi ile yüksek enerji sağlamasıyla dikkat çeker. Yüksek kaynak hızı ve üstün kalite sunan bu yöntem, özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin kaynak işlemleri için uygundur (Anık, 1991; Aslanlar, 2009; Gençdoğan, 2020; Kahraman & Gülenç, 2016).
- Elektrik Direnç Kaynağı: Metal parçalar basınç altında tutulur ve elektrik akımının parçalardan geçişi sırasında ortaya çıkan direnç nedeniyle ısıtılırlar (Aslanlar, 2009).

### 3.4.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Bu yöntemlerde basınç ve/veya ısı kullanılır, ancak bu ısı malzemeleri eritmez. Bunun yerine, malzemeleri yumuşatarak atomik seviyede difüzyonu kolaylaştırır.

- Difüzyon Kaynağı: Isı ve basınç yardımıyla malzemeler arasındaki atomların daha kolay yayılması teşvik edilerek kaynak yapılır.
- Sürtünme Kaynağı: Bu yöntem, parçaların birbirine göre hareket etmesiyle oluşan sürtünme kuvvetiyle ısı üretilir. Bu ısı, basınç altında tutulan parçaların kaynak edilmesini sağlar.
- Ultrasonik Kaynak: Çok yüksek frekansta titreşimler kullanılarak parçalar ısıtılır ve birbirine kaynatılır.
- Dövme Kaynağı: Tarihte bilinen en eski kaynak yöntemlerinden biridir. Isıtılan parçalar, presle birbirine bastırılarak atomik yayılma sağlanır.

Her iki yöntem grubu da farklı uygulama alanları ve malzeme türlerine göre seçilerek kullanılır. Ergitme yöntemleri, yüksek ısı gerektiren ve genellikle dolgu malzemesi kullanılan işlemler için uygundur. Katı hal yöntemleri ise, malzemelerin erimeden, daha düşük ısı ve yüksek basınçla birleştirilmesini sağlar. Bu yöntemlerin her biri, belirli malzeme ve uygulama gereksinimlerine göre dikkatle seçilmelidir. Endüstriyel uygulamalarda doğru kaynak yöntemi seçimi, birleştirilen malzemelerin performansını ve dayanıklılığını doğrudan etkiler (B. Raj, 2006; Kahraman & Gülenç, 2016; Weman, 2011).

#### 4. TOZALTI ARK KAYNAĞI

Tozaltı ark kaynağı yöntemi, ilk kez McKeesport, Pensilvanya'daki bir boru fabrikasında National Tube şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, boruların boyuna dikişlerini kaynaklamak amacıyla tasarlanmış olup, 1930 yılında Robinoff tarafından patenti alınmış ve ardından Linde Air Products firmasına satılmıştır. 1930'ların sonları ile 1940'ların başlarında savunma sanayi ve tersanelerde geniş bir kullanım alanı bulan bu yöntem, günümüzde de en verimli kaynak yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. (Akay, 2012a; Çetinkaya vd., 2022).

1933 yılından itibaren Amerika'da yaygınlaşmaya başlayan tozaltı ark kaynağı, 1937'den sonra Avrupa'da da uygulanmaya başlandı ve özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında endüstride büyük önem kazandı. Türkiye'de ise 1960'larda likit petrol gazlarının kullanılmasına başlamasıyla LPG tüplerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Bu yöntem, çelik malzemelerin kaynağı için uygundur ve gemi inşa sanayi, boru imalatı, sanayi kazanları, basınçlı kaplar, çelik konstrüksiyon, dolgu kaynağı ve metal kaplama işlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Celasun, 2012)

Tozaltı ark kaynağı, kaynağın gerçekleştirilmesi için gerekli ısının, tükenen elektrot veya elektrotlarla iş parçası arasında oluşan arklar aracılığıyla üretildiği bir yöntemdir. Kaynak işlemi sırasında ark bölgesi, kaynak tozu tabakası, ergimiş kaynak metali ve kaynağa yakın ana metal tarafından korunur. Bu işlemde, elektrik arkı ve ergimiş metal ile cürufun karışımından oluşan kaynak banyosu önemli bir rol oynar. Arkın ısıyla birlikte elektrot, kaynak tozu ve ana metal erir ve bu da kaynak bölgesini dolduran bir kaynak banyosu oluşturur. Kaynak tozu, koruyucu bir işlev görmenin yanı sıra, kaynak banyosu ile etkileşime girerek kaynak metalinin de oksidasyonunu sağlar. Özellikle alaşımlı çeliklerin kaynak işleminde kullanılan tozlar, kaynak metalinin kimyasal bileşimini düzenleyen alaşım elementlerini içerebilir. Tozaltı ark kaynağı, genellikle otomatik bir kaynak yöntemidir ve bazı durumlarda iki veya daha fazla elektrotun aynı anda kullanılması mümkündür. Elektrotlar yan yana veya arkaya arkaya sürülerek, kaynak banyolarının birbirinden bağımsız katılaşması sağlanır, bu da yüksek kaynak hızı ve yüksek metal yığıma hızı elde edilmesini mümkün kılar (Anık, 1991; Çetinkaya vd., 2022; Şahbaz, 2019).

Toz Altı Ark Kaynağı, metal parçaları birleştirmek için kullanılan etkili bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, kaynak bölgesine sürekli bir akışla toz şeklinde bir akı uygulanır. İşlem sırasında, bir elektrot ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı, yüksek sıcaklık üreterek hem metal parçaları hem de dolgu malzemesini eritir. Eriyik metal havuzu üzerinde

toz akı, bir cüruf tabakası oluşturur. Bu cüruf tabakası, kaynak bölgesini koruyarak oksidasyondan ve diğer atmosferik kirleticilerden izole eder. Kaynak işlemi tamamlandığında, cüruf katılaşır ve gevrek bir kabuk haline gelir, bu kabuk daha sonra mekanik olarak, genellikle bir fırça ile temizlenerek uzaklaştırılır (Winczek & Gawrońska, 2016) .

Tozaltı ark kaynağı, başlıca yatay pozisyonlarda (PA) kullanılan bir yöntemdir. Dikey pozisyonlarda (PC) kaynak yapabilme imkanları gelişmiş olsa da bu yöntemle tavan kaynakları gerçekleştirmek mümkün değildir. Bu kaynak metodu, yapısal çelikler, paslanmaz çelikler ve basınçlı kap çelikleri gibi malzemelerde yaygın olarak tercih edilir (Yavuz vd., 2005).

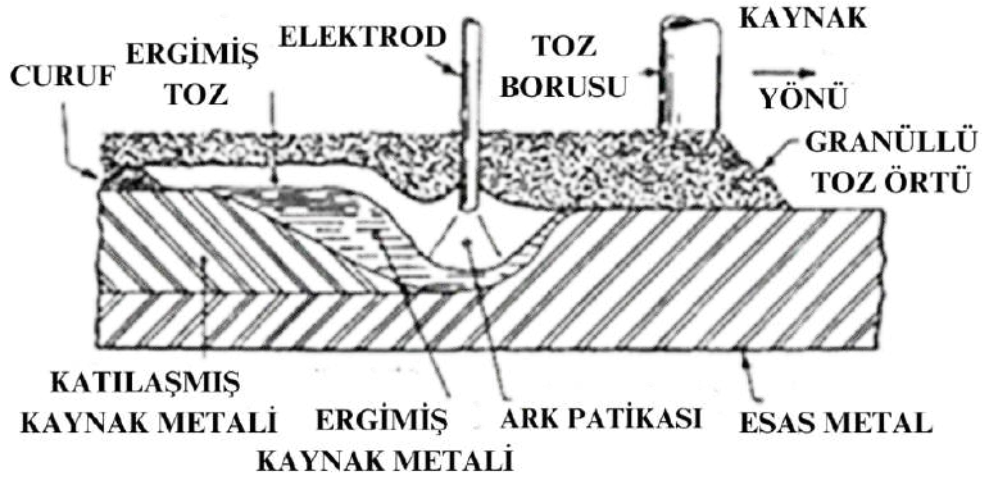
Tozaltı kaynağı, kaynak parametreleri doğru ayarlandığında, hata içermeyen ve estetik açıdan hoş dikişler sağlar. Örtülü elektrot ve gaz altı kaynak yöntemlerine kıyasla, bu yöntemde aynı çapta elektrot kullanılarak daha yüksek kaynak akımı uygulanabilir. Bu durum, daha geniş bir kaynak havuzu ve daha derin bir nüfuziyet elde edilmesini sağlar. Nüfuziyet sorunları, bu yöntemle nadiren karşılaşırlar. Tozaltı ark kaynağı, hem yarı otomatik hem de tam otomatik kaynak uygulamaları için uygun olup, bu nedenle günümüz sanayisinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu kaynak yönteminde, birleştirme yüzeylerinin iyi temizlenmesi, düzgün bir kaynak ağzı hazırlanması ve uygun bir kaynak teli seçilmesi halinde yüksek kaliteli kaynaklar elde edilir. Yüksek akım kullanımı sayesinde, tozaltı kaynak yönteminde genellikle ön ısıtma gerekmez (Şahbaz, 2019; Tekin, 2006; Tufanoğlu, 2017).

#### **4.1. Tozaltı Ark Kaynağı Çalışma Prensibi**

Bu kaynak yönteminde, kaynak teli bir bobinden çıkarılır ve bir motorun hareket ettirdiği makaralar ve bir temas ucu aracılığıyla kaynak bölgesine iletilir. Tel, gerekli akımı temas memesinden alarak iş parçası ile arasında bir ark oluşturur Silikat ve toprak alkali metalleri içeren özel bir toz, farklı bir kanaldan ark bölgesine yönlendirilerek havanın etkilerine karşı koruma sağlar.

Arkın ısısı, tel ve iş parçası arasındaki temasta, telin ve ana metalin bir kısmını eriterek gerekli birleşmeyi meydana getirir. Ark, toz örtüsünün altında kaldığı için çevreye ışıyım yaymaz ve bu da ark enerjisinin büyük bir bölümünün (%68) doğrudan kaynak işlemi için kullanılmasına olanak tanır. Bu oran, elektrik ark kaynağında yaklaşık %25'tir. (Weman, 2011).



Şekil 4.1. Tozaltı Ark Kaynağı Şematik Diyagramı (Weman, 2011)

## 4.2. Tozaltı Ark Kaynağı Başlıca Kullanım Alanları

Tozaltı kaynağının başlıca uygulama alanları arasında gemi inşa endüstrisi, depolama tankları ve basınçlı kaplar, çelik konstrüksiyonlar, demiryolu vagonları, otomotiv sanayisi, boru üretimi, çelik bina ve köprü kolonları ile kirişleri ve inşaat makineleri yapımı gibi pek çok alanda bu yöntemin çeşitli uygulamaları bulunmaktadır.

Tozaltı ark kaynağı yöntemi yapı çelikleri, paslanmaz çelikler, hafif alaşımlı çelikler, bakır ve bakır alaşımlarının kaynağında etkili bir şekilde kullanılabilir. Alüminyum için uygun bir kaynak tozu geliştirilmiş olmasına rağmen, bu henüz ticari olarak yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır. Benzer şekilde, titanyum için de uygun kaynak tozları geliştirilmiş, ancak ticari uygulamalara tam anlamıyla geçilmemiştir. Bu yöntemle dökme demirin soğuk olarak kaynaklanması mümkün değildir.

Yüksek ve orta karbonlu çelikler ile alaşımlı çeliklerin bu yöntemle kaynağı yapılabilir; ancak, pratikte genellikle tercih edilmez. Deneysel araştırmalar, bu yöntemin bakır ve nikel alaşımları ile uranyumun kaynağında da kullanılabileceğini göstermektedir (Celasun, 2012; Külahlı, 1998; Tufanoğlu, 2017).

## 4.3. Tozaltı Ark Kaynağı Avantaj ve Dezavantajları

### 4.3.1. Tozaltı ark kaynağı avantajları

- Yüksek Kaynak Hızı: Bu yöntem, yüksek hızda kaynak yapma imkânı sunar, bu da üretim süreçlerini hızlandırır.

- Derin Nüfuziyet: Kaynak işlemi sırasında derin nüfuziyet sağlanır, bu da daha güçlü ve dayanıklı birleşimlere olanak tanır.
- Yüksek Kalite: Kaynak dikişlerinin kalitesi genellikle çok yüksektir; düzgün ve estetik olarak çekici dikişler elde edilir.
- Daha Az Temizlik Gereksinimi: Toz örtüsü, kaynak bölgesini koruduğundan, daha az temizlik gerektirir ve kaynak sonrasında daha az cüruf oluşur.
- Düşük Duman ve Sıçrama: Ark toz tabakası altında olduğu için, kaynak işlemi sırasında duman ve sıçrama minimum düzeydedir, bu da daha temiz bir çalışma ortamı sağlar.
- Otomasyona Uygunluk: Yarı otomatik ve tam otomatik kaynak sistemlerinde kullanılabilme özelliği sayesinde verimliliği yükseltir.
- Yüksek Verimlilik: Elektrik enerjisinin büyük bir kısmı (%68'e kadar) doğrudan kaynak işlemi için kullanılır, bu da verimliliği artırır. (Atılğan vd., 2022; Tekin, 2006; "Tozaltı Kaynağı", 2011)

#### 4.3.2. Tozaltı ark kaynağı dezavantajları

- Sınırlı Pozisyon Uygulaması: Bu yöntem genellikle yatay pozisyonlar için uygundur ve dikey veya tavan pozisyonlarında kullanımı zordur.
- Toz Yönetimi: Fluxun uygulanması ve geri kazanımı işlemleri ek karmaşıklık yaratabilir ve bu süreçler iyi yönetilmezse verimlilik düşebilir.
- Ekipman Maliyeti: Tozaltı ark kaynağı ekipmanları, başlangıçta daha yüksek maliyetli olabilir.
- Kalınlık Sınırlamaları: Çok ince malzemelerin kaynağında uygun değildir, çünkü yüksek akım gereksinimleri ince malzemelere zarar verebilir.
- Yüksek Enerji Tüketimi: Yüksek akım ve voltaj gerektirdiği için enerji tüketimi diğer bazı kaynak yöntemlerine göre daha yüksek olabilir.
- Kısıtlı Hareket Kabiliyeti: Büyük ve sabit makine gereksinimleri nedeniyle, hareket kabiliyeti sınırlıdır.
- Daha Az Esneklik: Tozaltı ark kaynağı, özellikle karmaşık ve erişilmesi zor bölgeler için daha az esneklik sunar.
- Çeşitli Metaller İçin Uygunluk Sorunları: Dökme demir gibi bazı metallerin kaynağında sınırlamalar vardır ve alüminyum ile titanyum gibi metaller için ticari uygulamalar henüz yaygınlaşmamıştır (Damkaş, 2003; Tufanoğlu, 2017).

## 4.4. Tozaltı Ark Kaynağı Türleri

### 4.4.1. Tek telli kaynak cihazları

Tek telli kaynak cihazları, tozaltı ark kaynağının en temel ve en sade formunu temsil eder. Bu yöntemde, kaynak işlemi için genellikle bobin şeklinde sarılmış çıplak bir tel elektrot kullanılır. Tek telli kaynak cihazlarının ayırt edici bir özelliği, dikiş hacminde büyük ölçüde ana malzemenin bulunmasıdır. Standart koşullarda, kaynak metalindeki ana malzemenin dolgu telinden gelen malzemeye oranı yaklaşık olarak 2:1 iken, bazı istisnai durumlarda bu oran %80'e kadar ulaşabilir. Tek telli kaynak yöntemi, genellikle yüksek oranda ana malzeme katılımını gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu durum, özellikle kalın ve ağır yapı elemanlarının kaynağında avantaj sağlar, çünkü yüksek oranda ana malzeme katkısı, dikişin dayanıklılığını artırır. Bu yöntem, ayrıca kaynak işlemlerinde daha az dolgu teli kullanımı gerektirdiğinden maliyet açısından da avantajlıdır (Şahbaz, 2019).

### 4.4.2. Tandem tozaltı ark kaynak yöntemi

Tandem tozaltı ark kaynak yöntemi, iki ayrı kaynak başlığının, kumanda sisteminin, tel besleme düzeneklerinin ve tel elektrotların senkronize çalıştığı bir tekniktir. Bu yöntem, her iki arkın aynı veya farklı kaynak havuzlarında farklı parametrelerle yanmasını sağlayarak kaynak sürecini optimize eder. Özellikle kalın levhaların kaynaklanmasında ve kaynak hızını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılır (Canli, 2017).

Tek tel kullanılarak yapılan kaynaklarda yüksek güç nedeniyle oluşan uygun olmayan kristalizasyon cepheleri, segregasyonlar ve kaba kristalli yapı gibi sorunlar, tandem yöntemiyle minimize edilir. Bu yöntemde, ilk arkın oluşturduğu dikiş, ikinci tel elektrot ile tekrar eritilerek daha homojen ve uygun bir iç yapı elde edilir. İlk tel maksimum nüfuziyet sağlarken, ikinci tel daha düz ve geniş bir kaynak pasosu oluşturmak üzere ayarlanır. Bu işlem, daha kaliteli ve dayanıklı kaynak dikişleri elde edilmesine olanak tanır. Tandem Tozaltı Kaynağında, birinci tel doğru akım (DC) ile çalışırken, ikinci tel alternatif akım (AC) kullanır. Bu düzenleme, birinci telin oluşturduğu manyetik alanın ikinci telde ark üflemesine neden olmasını önler, böylece daha stabil bir kaynak süreci sağlanır (Canli, 2017; Şahbaz, 2019).

#### 4.4.3. Paralel tozaltı ark kaynak yöntemi

Bu kaynak yönteminde, iki tel  $90^\circ$  açı ile konumlandırılır ve aynı kaynak mekanizmasına bağlanır. Bu düzenleme, özellikle zorlu kaynak uygulamaları için bazı önemli avantajlar sunar. Kaynak banyosunun metal parçayı delmesi ve akma oluşturması riski bulunmaz. Bu, özellikle yüksek kalınlıktaki malzemelerin kaynağında kritik bir avantajdır. Kaynak işlemi sırasında nüfuziyet derinliği etkili bir şekilde kontrol edilebilir. Kaynak yapılırken, kapak yüksekliği ve nüfuziyet derinliği değiştirilebilir. Bu özellik, çeşitli uygulamalarda kaynak yapısını optimize etme imkânı tanır.

Bu özellikler, dolgu malzemesi gerektiren kaynak işlemleri için büyük önem taşır. İki telli kaynak yöntemi, bu tür durumlar için ideal bir çözüm sunar, çünkü kaynak işlemi sırasında daha fazla esneklik ve hassasiyet sağlar. Bu, özellikle yüksek mukavemetli yapısal bağlantılar gerektiren projelerde kaynak işleminin güvenilirliğini ve kalitesini artırır (Kilinçer, 1998; Şahbaz, 2019).

#### 4.4.4. Çift telli kaynak yöntemi

Çift telli kaynak yöntemi, iki tel elektrodun aynı akım memesinden ve ortak bir tel besleme makarasından paralel olarak iletiildiği bir tekniktir. Bu yöntemde, kaynak yönüne göre temas memesinin döndürülmesiyle çeşitli tel konumları elde edilerek farklı özellikler elde edilebilir. Çift telli kaynak yöntemi, tek telli kaynağa kıyasla daha yüksek toplam akım seviyelerine izin verir. Akım, iki tel elektrod arasında dağıldığı için akım yoğunluğu düşük kalır. Nüfuziyet, elektrod telleri arasındaki mesafe arttıkça azalır ve her iki tel ucunun aynı kaynak havuzunda birleşmesini sağlamak için elektrod telleri uygun şekilde yerleştirilir. Bu yöntemin özelliklerinden biri, yan yana konumlandırılmış paralel tellerin, yüksek eritme kapasitesi ve sığ nüfuziyet gerektiren kaplama kaynaklarında kullanılmasıdır. Bu teknik, iyi bağlayıcılık sağladığından, düzgün hazırlanmamış kaynak ağızlarının (örneğin, düzgün olmayan kesimler veya tam oturmayan parçalar) bulunduğu durumlarda da etkilidir. Ayrıca, levha kalınlığına ve banyo altlığına bağlı olarak, tek telli kaynakta akma riski bulunan 2 ile 6 mm aralığındaki boşluklar çift telle kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde bağlanabilir.

Kaynak tellerinin arka arkaya yerleştirilmesi, kaynak banyosunu uzatarak daha uygun bir kristalizasyon yapısının oluşmasını sağlar. Bu düzenleme, sıcak çatlama riskini de önemli ölçüde azaltır. Bu yöntemin sağladığı bu avantajlar, çift telli kaynağı, özellikle karmaşık ve hassas kaynak projelerinde tercih edilen bir seçenek haline getirir.

Çift telli kaynak yöntemi, yüksek kaliteli ve dayanıklı kaynak dikişleri oluşturma kapasitesine sahip olup, üretim süreçlerinde verimliliği artırır ve çeşitli uygulamalarda güvenilir çözümler sunar. Bu nedenle, bu yöntem, endüstriyel kaynak uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Şahbaz, 2019).

#### **4.4.5. Tozaltı sıcak tel kaynağı**

Tozaltı sıcak tel kaynağı, dolgu telinin direncinden dolayı erime sıcaklığının hemen altına ısıtılarak, ayrı bir akım üretici tarafından sağlanan akımla gerçekleştirilen bir tekniktir. Bu ısıtılmış dolgu teli, kaynak banyosuna en uç noktadan sürülerek hamursu bir formda yığılır ve gerçek bir paso oluşturmada kaynak işlemi gerçekleştirilir. Sadece %12 gibi önemsiz bir enerji artışı ile eritme gücü iki katına çıkar, bu da kaynak işlemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırır. Daha düşük nüfuziyet sağlarken, daha geniş aralıkları bağlama yeteneği sunar, bu da özellikle büyük boşlukların doldurulmasında avantaj sağlar. Alaşım elementlerinin yanma oranı daha düşüktür, bu da kaynak metalinin kimyasal bütünlüğünü korur. Tandem ve tek telli kaynak yöntemlerine kıyasla daha iyi mekanik kalite değerleri sunar, bu da kaynak dikişlerinin dayanıklılığını artırır (Şahbaz, 2019).

#### **4.4.6. Bant elektrotlu tozaltı ark kaynak yöntemi**

Bant elektrotlu tozaltı ark kaynak yöntemi, tel elektrotlar yerine dikdörtgen şeklinde bant elektrotların kullanıldığı bir tekniktir. Bu yöntemde, elektrotların tüm kesiti boyunca yaylar oluşur ve elektrotlar yatay veya dikey olmak üzere üç farklı yönde hareket edebilir. Bant elektrotların kullanımı, maliyet açısından tasarruf sağlar ve kaynak işlemlerinin ekonomik verimliliğini artırır. Bu yöntemde nüfuziyet nispeten düşüktür, bu da hassas iş parçaları için avantaj sağlar. Bant elektrotlar, yüksek ergime gücü sunarak etkili bir kaynak işlemi gerçekleştirir. Kaynak pasoları, gözenek açısından yüksek mukavemete sahip olup, kaynak dikişlerinin dayanıklılığını artırır (Dunder vd., 2005; Kiliçer, 1998).

### **4.5. Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri**

Tozaltı kaynak yönteminde, elektrotlar genellikle kaynak teli olarak isimlendirilir ve bu teller, elektrik ark ocaklarında üretilen, yüksek mangan içeren özel çeliklerden imal edilirler. Bu özellikleri, kaynak bölgesinin metalurjik güvenliğini sağlar.

Tozaltı kaynak telleri, genellikle dairesel kesitli ve 1,2 mm ile 12 mm çapları arasında üretilir. Kaplama kaynakları gibi bazı özel durumlarda ise dikdörtgen kesitli lama teller kullanılabilir. Dairesel kesitli teller genellikle bakır kaplanmış olarak kangal halinde piyasaya sunulmaktadır (Tufanoğlu, 2017). Kaynak tellerinin tamimiyle yuvarlak, iyi kalibre edilmiş ve belirlenen toleranslar içinde olması önemlidir. Yüzeylerinin pürüzsüz, yağdan, kirden ve pastan arındırılmış olması gereklidir. Bu, elektrik akımının sabit bir şekilde ark bölgesine iletilmesini sağlar, böylece kaynak yerine verilen ısı miktarı sabit kalır ve dikiş kalitesi korunur. Aksi takdirde, değişken ısı kaynak dikişinde hatalara neden olabilir (Celasun, 2012).

ISO standartlarına göre tozaltı kaynak telleri, 1,2 mm'den 8 mm'ye kadar çaplarda sınıflandırılmıştır. Günümüzde en çok tercih edilen çaplar ise 2,5 mm ile 6 mm arasındadır. Bu tellerin çap toleransları DIN 668 standardına göre belirlenmiştir (Şahbaz, 2019).

Tozaltı kaynak telleri, sadece yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında değil, aynı zamanda nikel ve nikel alaşımlarının, ısıya ve sürtünmeye dirençli çeliklerin, paslanmaz çeliklerin, yüksek sıcaklığa dirençli çeliklerin, kaynağında da kullanıma uygun olarak geliştirilmiştir. Bu özellikler, tozaltı kaynak tellerinin geniş bir yelpazede metalurjik güvenlik ve dayanıklılık sağlayarak endüstride yaygın kullanımını mümkün kılar. Çeşitli amaçlar için farklı kesitlerde ve çaplarda üretilen bu teller, kaynak işlemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynar (Küçüköner, 2019; Tufanoğlu, 2017).

**Çizelge 4.1.** Tozaltı ark kaynağında kullanılan tel elektrodlarının kimyasal bileşimi (Şahbaz, 2019)

Tel Türü	Tel Türü ve Alaşım Elementi Miktarı							
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
S1	0.05-0.15	0.15	0.35-0.60	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S2	0.07-0.15	0.15	0.80-1.30	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S3	0.07-0.15	0.15	1.30-1.75	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S4	0.07-0.15	0.15	1.75-2.25	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S1Si	0.07-0.15	0.15-0.40	0.35-0.60	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S2Si	0.07-0.15	0.15-0.40	0.80-1.30	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S2Si	0.07-0.15	0.15-0.60	0.80-1.30	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S3Si	0.07-0.15	0.15-0.40	1.30-1.85	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S4Si	0.07-0.15	0.15-0.40	1.75-2.25	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15
S1Mo	0.07-0.15	0.15-0.25	0.35-0.60	0.025	0.025	0.45-0.65	0.15	0.15
S2Mo	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.025	0.025	0.45-0.65	0.15	0.15
S3Mo	0.07-0.15	0.15-0.25	1.30-1.75	0.025	0.025	0.45-0.65	0.15	0.15
S4Mo	0.07-0.15	0.15-0.25	1.75-2.25	0.025	0.025	0.45-0.65	0.15	0.15
S2Ni1	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.025	0.025	0.15	0.80-1.20	0.15
S2Ni1.5	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.020	0.020	0.15	1.20-1.80	0.15
S2Ni2	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.020	0.020	0.15	2.80-3.70	0.15
S2Ni3	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.020	0.020	0.15	1.20-1.80	0.15
S2NiMo	0.07-0.15	0.15-0.25	0.80-1.30	0.020	0.020	0.45-0.65	1.20-1.80	0.20
S3Ni1.5	0.07-0.15	0.15-0.25	1.30-1.70	0.020	0.020	0.15	1.20-1.80	0.20
S3NiMo	0.07-0.15	0.15-0.25	1.30-1.80	0.020	0.020	0.45-0.65	1.20-1.80	0.20
S3Ni3Mo	0.07-0.15	0.15-0.25	1.20-1.80	0.020	0.020	0.45-0.65	1.20-1.80	0.20
S0	Üzerinde anlaşılan herhangi bir kimyasal bileşim							

#### 4.6. Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tozları, manuel ark kaynağında elektrot örtüsünün görevini üstlenir. Bu tozlar, çeşitli fiziksel ve metalürjik işlevler sağlar:

##### Fiziksel İşlevler

- Kaynak Banyosunu Koruma: Kaynak banyosunu hava ile temasın zararlı etkilerinden korur.
- Dikiş Formu Verme: Kaynak dikişine uygun bir şekil kazandırır.
- Soğuma Kontrolü: Kaynak dikişinin yavaş soğumasını sağlayarak çatlama önler (Kilinçer, 1998; Tekin, 2006).

##### Metalürjik İşlevler

- Yanma Kaybının Önlenmesi: Kaynak banyosuna ilave edilen elementlerle yanma kaybını dengeleyerek, metalürjik bütünlüğü korur (Kilinçer, 1998; Tekin, 2006).

#### 4.6.1. Kaynak tozlarının sınıflandırılması

##### 1. Kaynağın Amacına Göre:

- Aralık Doldurma Kabiliyetli Tozlar: Geniş boşlukları doldurmak için idealdir
- Hızlı Kaynak Tozları: Yüksek hızda kaynak işlemleri için uygundur.
- Derin Nüfuziyet Kaynak Tozları: Derin penetrasyon gerektiren kaynaklar için kullanılır.
- İnce Sac Kaynağı Tozları: İnce sacların kaynağında tercih edilir (Celasun, 2012; Tufanoğlu, 2017).

##### 2. İmalat Şekline Göre:

- Erimiş Kaynak Tozları: Silikat bazlı olup, kuvars, manganez cevheri, dolomit gibi malzemelerin karışımının eritilmesiyle elde edilir. Bu tozlar kristal yapıda ve amorf kütlelerdir.
- Sinterlenmiş Kaynak Tozları: Uygun bileşimdeki malzeme karışımının öğütülüp, belirli taneler halinde preslenmesi ve sinterlenmesiyle oluşturulur. Sinterleme sonrası istenen büyüklükteki taneler seçilir.
- Aglomere Kaynak Tozları: İnce öğütülmüş hammaddenin belirli büyüklükteki parçalarla ve bir yapıştırıcı ile aglomere edilmesiyle elde edilir. Daha sonra nemi

alınarak tavlanır. Aglomere tozlar, erimiş tozlara göre bazı üstünlükler sağlar; daha iyi alaşımlandırma ve daha düşük toz tüketimi gibi (Akay, 2012a; Celasun, 2012; Tufanoğlu, 2017).

### 3. Kimyasal Karakterine Göre:

- Bazik Karakterli Tozlar: Bazik özelliklere sahiptir.
- Asit Karakterli Tozlar: Asidik özellik gösterir.
- Nötr Karakterli Tozlar: Nötr karakterdedir(Akay, 2012b; Tufanoğlu, 2017) .

### 4. Manganez İçeriğine Göre:

- Yüksek Manganezli Tozlar: Yüksek miktarda manganez içerir.
- Orta Manganezli Tozlar: Orta seviyede manganez içerir.
- Manganez siz Tozlar: Manganez içermez (Akay, 2012a; Tufanoğlu, 2017).

#### 4.6.2. Kaynak tozlarının üretim süreci

- Sinterlenmiş Tozlar: Malzemeler öğütülür, taneler halinde preslenir ve alevli fırınlarda sinterlenir.
- Erimiş Tozlar: Kuvars, manganez cevheri, dolomit gibi maddeler uygun oranlarda karıştırılıp eritilir. Ark veya alevli fırınlarda bu işlem yapılır.
- Aglomere Tozlar: İnce öğütülmüş hammadde, belirli büyüklükteki malzemelerle ve yapıştırıcı ile karıştırılıp aglomere edilir, ardından nemi alınarak tavlanır.

Aglomere tozlar, son yıllarda yaygınlaşarak kullanım alanını genişletmiş olup, erimiş tozlara göre daha iyi alaşımlandırma imkânı sunar ve toz tüketimini azaltır. Tozaltı kaynak tozları, kaynak işlemlerinin kalitesini ve verimliliğini artırarak, çeşitli metalurjik ve fiziksel ihtiyaçlara cevap verir. Bu özellikler, tozaltı kaynağının endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmasını sağlar(Celasun, 2012; Kiliçer, 1998; Şahbaz, 2019) .

#### 4.6.3. Koruyucu kaynak tozlarında aranması gereken özellikler

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan koruyucu kaynak tozları, belirli kriterleri karşılamalıdır. Bu tozların kaynak işlemi sırasında çeşitli görevleri yerine getirebilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir:

- Uygun Yüzey Formu Sağlama: Kaynak pasosunun düzgün ve istenen yüzey formunda oluşmasına imkân tanınmalıdır.
- Mekanik ve Teknolojik Özellikleri İyileştirme: Kaynaklı birleşimlerin mekanik ve teknolojik özelliklerini olumlu yönde etkilemelidir.
- Gözenek Oluşumunu Önleme: Kaynak dikişinde gözeneklerin oluşmasını engellemelidir.
- Kararlı Ark Sağlama: Arkın stabilitesini koruyarak kaynak işleminin güvenli ve verimli olmasını sağlamalıdır.
- Yüksek Ergime Noktası: Yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalıdır, bu da kaynak sırasında dayanıklılığı artırır.
- Atmosferik Koruma: Kaynak metalini cüruf oluşturarak çevredeki atmosferik etkilerden korumalıdır.
- Nem Alma Özelliği Olmamalı: Nem çekmemeli, bu da kaynak tozunun etkinliğini ve raf ömrünü artırır.
- Ekonomik Olmalı: Maliyet açısından verimli ve uygun olmalıdır.
- Zararlı Buharlar Çıkarmamalı: Kaynak işlemi sırasında zararlı gaz veya buharlar yaymamalıdır.

Koruyucu kaynak tozlarının özellikleri, yalnızca kendi başlarına değil, ilgili kaynak süreci ile birlikte ele alınmalıdır. Bu değerlendirme, ana malzeme, dolgu malzemesi ve kaynak parametreleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Kaynak tozları ile ilgili gereken tüm parametreler, TS EN ISO 14174 standardında ayrıntılı olarak belirtilmiştir.(Kilinçer, 1998; Tekin, 2006). Koruyucu tozların bu özellikleri, kaynak işlemlerinin güvenliğini, verimliliğini ve kalitesini doğrudan etkiler. Dolayısıyla, kaynak tozu seçimi yapılırken bu kriterlerin dikkatlice gözden geçirilmesi önemlidir. Kaynak tozları, sadece kaynak dikişinin kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda kaynak sürecinin genel performansını ve maliyet etkinliğini de iyileştirir. Bu nedenle, doğru kaynak tozu seçimi, başarılı bir kaynak işlemi için kritik bir faktördür (Canlı, 2017; Şahbaz, 2019).

#### **4.7. Kaynak Tozlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellik ve Etkileri**

##### **4.7.1. Kimyasal bileşim ve etkileri**

Kaynak tozlarının önemli bir bileşeni olan  $\text{SiO}_2$ , tozların yüksek akım şiddetine dayanmasını sağlar ve iyi bir de oksidandır, ayrıca cürufu daha akışkan hale getirir.  $\text{MnO}$  ise

tozların içinde miktar olarak ikinci büyük bileşendir ve dikiş güvenliği açısından önemlidir. Ancak, MnO miktarı arttıkça tozların yüksek akım şiddetiyle yüklenme kabiliyeti azalır, bu yüzden yüksek akımla çalışan tozlarda MnO bulunmaz. Manganez içermeyen ve yüksek silisyum içeriğine sahip tozlar, kir ve pasa karşı oldukça hassastır, bu nedenle kaynak yapılacak yüzeylerin çok iyi temizlenmesi gereklidir.

Kaynak işlemi sırasında SiO<sub>2</sub>, redüklenerek kaynak dikişine silisyum ekler. SiO<sub>2</sub> miktarının yükselmesi, dikişe geçen silisyum miktarını da artırır. Silisyum, kaynak banyosunun deoksidasyonuna katkıda bulunarak dikişin gözeneksiz olmasını sağlar ve kükürt ile fosfor segregasyonunu azaltır. Kaynak bölgesindeki manganez ve silisyum oranları, dikişin mekanik özellikleri açısından kritik öneme sahiptir; manganez oranı, silisyum oranına göre en az 2/1, tercihen 3/1 olmalıdır. Bu oran, seçilen kaynak teli, toz ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Akım şiddetinin artması, manganez ve silisyumun yanma oranını artırarak, dikişe geçen miktarlarını azaltır. Kaynak hızının yükselmesi ve ark geriliminin düşmesi, dikişteki manganez ve silisyum oranlarını düşürür. Ayrıca, kaynak ağzı açısının ve kaynak teli çapının artması, dikişteki manganez ve silisyum miktarını artırır (Küçüköner, 2019; Tufanoğlu, 2017).

#### 4.7.2. Fiziksel etkiler

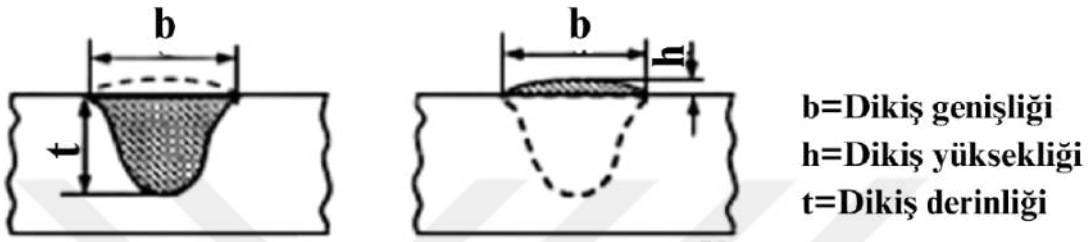
Kaynak tozunun özgül ağırlığı, erime aralığı, akıcılığı, tane büyüklüğü ve yığılma yüksekliği, kaynak dikişi üzerinde çeşitli fiziksel etkiler gösterir:

- Atmosfer Koruması: Ark bölgesini atmosferin zararlı etkilerinden koruma işlevi görür.
- Yavaş Soğuma: Katılaştıran cüruf, dikişin yavaş soğumasına olanak tanır.
- Dikiş Şekli: Kaynak dikişinin dış şeklini belirler.
- Geçiş Bölgesi: Esas metal ve kaynak metali arasındaki geçiş bölgesinde çentik oluşumunu önler.

Bu kimyasal ve fiziksel özellikler, kaynak tozlarının etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar ve kaynak dikişlerinin kalitesini artırır. Kaynak işleminin başarılı olması için, tozların bu özellikleri göz önünde bulundurularak uygun seçimler yapılmalıdır. Standartlara uygun olarak belirlenen bu parametreler, tozaltı kaynak işlemlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırarak endüstriyel uygulamalarda güvenilir sonuçlar sağlar (Küçüköner, 2019; Tufanoğlu, 2017).

#### 4.8. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisi

Tozaltı kaynak yönteminde dikiş geometrisi, dikiş genişliği, yüksekliği ve nüfuziyet derinliği gibi faktörlerle belirlenir. İç ve dış dikiş formları, her biri nüfuziyet derinliği, ergime genişliği ve dikiş yüksekliğiyle karakterize edilir. Dikiş formu, çeşitli kaynak parametrelerinin doğru seçilmesiyle geniş bir aralıkta değişiklik gösterebilir (Anık & Tülbentçi, 1982; Winczek & Gawrońska, 2016).



Şekil 4.2. Dikiş formunun şematik gösterimi (Celasun, 2012)

##### 4.8.1. Tozaltı kaynağında dikiş geometrisini etkileyen faktörler

- Akım Şiddeti: Dikiş formunu en fazla etkileyen faktörlerden biridir. Akım şiddeti arttıkça nüfuziyet artar. Bu nedenle, kaynak edilen parçanın kalınlığına uygun akım şiddeti seçilmelidir. Aksi takdirde, fazla nüfuziyet parçanın delinmesine, düşük nüfuziyet ise yetersiz bir birleşmeye neden olabilir.
- Ark Gerilimi: Gerilim değişikliği, ark boyunu ve dolayısıyla dikiş genişliğini etkiler. Yüksek gerilim daha uzun bir ark ve daha fazla tozun cürufa dönüşmesine neden olurken, düşük gerilim dikişte bazı hatalara yol açabilir. Bu nedenle, kullanılan toz türüne göre uygun gerilim ayarlanmalıdır.
- Kaynak Hızı: Düşük hızda yapılan kaynak, daha büyük bir ergimiş banyo oluşturur, bu da kaba bir dikiş görünümüne ve cüruf katmanı problemlerine yol açabilir. Yüksek hız ise nüfuziyet ve dikiş genişliğini azaltır, ancak fazla hız ark üflemesini, gözenek ve çatlak oluşumunu artırabilir.
- Kaynak Ağız Açısı: Parçalara uygun bir kaynak ağızı açmak, dikişin iç formunu etkiler. Ağız açısı büyüdükçe nüfuziyet artar ve dikiş yüksekliği azalır.
- Parçanın Eğimi: Genellikle yatay pozisyonda yapılan tozaltı kaynağında, parçanın eğimi 6°'yi geçmemelidir. Daha büyük eğimler, nüfuziyetin azalmasına ve dikiş genişliğinin artmasına yol açar.

- Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu, tel kesitine oranla akım şiddetini ifade eder. Yoğunluk arttıkça nüfuziyet ve ergime gücü artar, dikiş yüksekliği de artar.
- Kaynak Kablosunun Bağlantı Yeri: Kablonun bağlantı yeri, ark üflemesini etkileyerek dikişin iç formunu değiştirir. Kablonun uygun yerden bağlanması, daha iyi bir birleşme sağlar.
- Serbest Tel Boyu: Kaynak telinin serbest kısmı, meme ile parça arasındaki mesafe ile belirlenir. Bu mesafe büyüdükçe nüfuziyet azalır ve dikiş yüksekliği artar. Daha kısa bir mesafe, daha kararlı ve sabit bir ark oluşturur (Adar, 2019; Akay, 2012b; Canli, 2017; Celasun, 2012; Tekin, 2006).



## 5. YAPI ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Genel yapı çelikleri, temel olarak demir ve karbonun birleşiminden oluşan, az miktarda mangan, silisyum, oksijen, azot ve kükürt gibi çelik üretim süreçlerinden gelen elementleri içeren demir-karbon alaşımlarıdır. Bu çelik türleri, düşük maliyetli ve şekillendirmesi kolay olduğu için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Mekanik özellikleri, içerdiği karbon miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Günümüzde üretilen çeliklerin büyük bir kısmı alaşımsız çeliklerdir. Genel yapı çeliklerinin sertleşme kapasitesi sınırlıdır ve sertleştirme işlemleri sonrasında parçalarda çatlama ve deformasyon görülebilir. Ayrıca, kalın kesitli parçalar istenen seviyede sertleştirilemez. Bu çeliklerin korozyona karşı direnci düşüktür, ancak alevle veya indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri uygulanabilir. İçerdikleri karbon miktarına göre alaşımsız çelikler üç gruba ayrılır:

Düşük karbonlu çelikler: %0,05 - %0,3 karbon içeriğine sahiptir. Bu çelikler sertleştirilemez, ancak yüzey sertleştirme yöntemleriyle sertlik kazandırılabilir.

Orta karbonlu çelikler: %0,3 - %0,8 karbon içeriğine sahiptir. Isıl işlemlere yatkındırlar ve düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek dayanım sunarlar.

Yüksek karbonlu çelikler: %0,8 - %1,7 karbon içeriğine sahiptir. Bu çelikler düşük sünekliğe sahiptir, işlenmeleri zordur ve talaş kaldırma işlemleri için yumuşatma tavlama gerektirir (Celasun, 2012; Tekin, 2006).

Genel yapı çelikleri, eski terminoloji ile St70, St60, St52, St50, St46, St42, St37, St34 gibi isimlerle bilinir. Bu isimlendirme, çeliklerin çekme dayanımı özelliklerine göre yapılır. Ancak, genel yapı çelikleri yeni isimlendirme sistemi, çeliklerin kimyasal ve mekanik özelliklerini, tedarik şartlarını ve diğer özelliklerini içeren TS EN 10025-2 standardı ile yeniden düzenlenmiştir. Örneğin, eski S235JR çeliği yeni sistemde S235 olarak adlandırılır. Bu yeni adlandırma sistemi, malzemelerin akma dayanımlarına göre yapılmaktadır ve böylece çeliklerin mekanik ve kimyasal özellikleri daha açık bir şekilde ifade edilmektedir (Kilinçer, 1998).

Genel yapı çeliklerinin özellikleri, temel olarak içerdiği karbon miktarı ile belirlenir. Karbon, bu çeliklerde mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Karbon oranındaki artış, çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını, sertleşme kapasitelerini artırırken, süneklik ve tokluk özelliklerini azaltır. Düşük karbon içeriğine sahip yapı çelikleri, yüksek karbon içeriğine sahip çeliklere kıyasla daha fazla deformasyon gösterir. Bu nedenle, düşük karbonlu yapı çelikleri, daha yüksek deformasyon kapasitesi sunar, bu da onları belirli uygulamalar için daha uygun hale getirir (Tufanoğlu, 2017; Yildirim, 2018).

## 5.2. S235JR (St37) Yapı Çeliği Genel Özellikleri

S235JR (St37) çelikleri, DIN 17100 standardına göre değerlendirilmiş olup, çekme dayanımı değeri 37 kg/mm<sup>2</sup> olarak saptanmıştır. "St" terimi, çeliğin yaklaşık %0.2 oranında karbon içerdiğini belirtirken, "37" ifadesi ise malzemenin en az 37 kg/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip olduğunu ifade eder.

Düşük karbon içeriği nedeniyle, bu çelik türü düşük karbonlu çelikler kategorisinde yer alır ve bileşiminde en fazla %1.65 mangan (Mn) ve %0.60 silisyum (Si) bulunur. S235JR çeliği, genellikle yapı ve endüstri sektörlerinde kutu profil, çubuk üretimi ve sıcak haddelenmiş sanayi profili gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilir. Dayanıklılığı ve kolay işlenebilirliği nedeniyle, özellikle ekonomik ve yapısal gereksinimlerin önemli olduğu projelerde yaygın olarak kullanılır. (Atabey, 2024; Çağlar, t.y.).

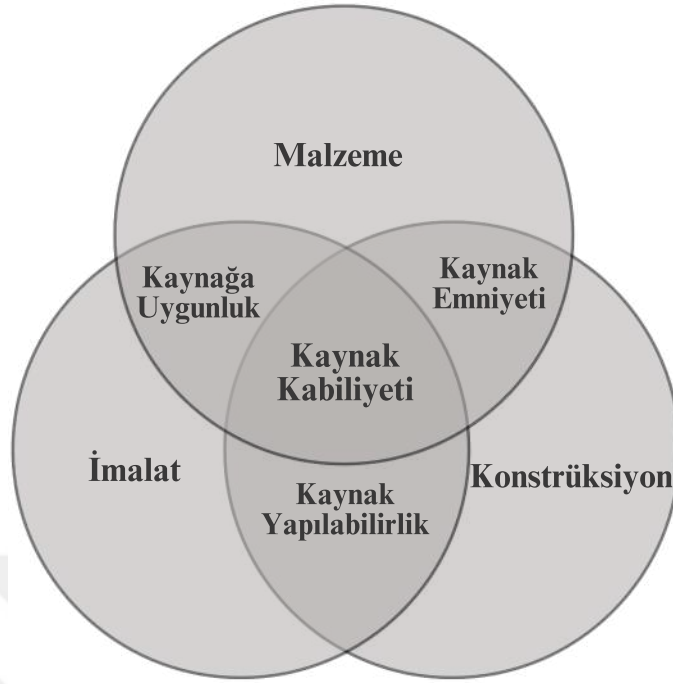
Bu malzemenin dünya ve Türkiye'deki üretim alanlarında en çok tercih edilenlerden biri olmasının başlıca nedenleri, kolay işlenebilmesi, kaynaklanabilirliği ve sorunsuz kesimidir. S235JR yapı çeliğinin geniş kullanım alanları vardır:

- Otomotiv sektörü: Araçların çeşitli parçalarında kullanılır.
- Beyaz eşya: Dayanıklı ev aletlerinin üretiminde tercih edilir.
- Kablo sektörü: Kablo üretiminde yaygın bir malzemedir.
- Tekstil dokuma tarakları: Dokuma makinelerinde kullanılır.
- Pencere kilit aksamı: Pencere ve kapı aksesuarlarında yer alır.
- Giyim sektörü: Kemer tokaları, çanta ve valiz aksesuarlarında kullanılır.

S235JR çeliğinin çok yönlü kullanımı ve pratik özellikleri, onu birçok endüstri için vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Bu çeliğin işlenmesi ve kaynaklanması kolaydır, bu nedenle geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Akduman, 2021; Benli, 2023).

## 5.3. Yapı Çeliklerinin Kaynak Edilebilirliği

Kaynaklı yapı elemanlarının üretiminde amaç, en düşük maliyetle imalat yaparak, elemanın işlevini eksiksiz yerine getirmesi ve uzun süreli kullanım sağlamasıdır. Metalik malzemelerden yapılan yapı elemanlarının kaynak işlemlerinde, belirli bir kaynak yöntemi kullanılarak malzemelerin uygun bir üretim sürecinde birleştirilmesi sağlanır. Bu süreçte, kaynak bölgesinin yerel özellikleri ve birleştirilen parçaların tüm yapıya etkileri, önceden belirlenmiş şartlara uygun olmalıdır. Kaynak kabiliyeti, malzeme özellikleri, yapısal tasarım ve imalat süreci olmak üzere üç ana faktöre eşit ölçüde bağlıdır (Celasun, 2012).



Şekil 5.1.Kaynak Kabiliyetinin Ana Faktörler ve Özelliklerle Bağlantısı(Celasun, 2012)

Kaynak kabiliyeti, aşağıdaki üç temel özellik ile ilişkilidir:

- Malzemelerin Kaynağa Uygunluğu
- Konstrüksiyonun Kaynak Güvenliği
- İmalatın Kaynak Yapılabilirliği

Bu özellikler, malzeme, konstrüksiyon ve imalat süreçlerine bağlıdır, ancak her birinin ağırlığı farklıdır. Bir malzeme, belirli bir konstrüksiyon ve imalat sürecinde, beklenen tüm talepleri karşılayarak uygun bir kaynak kalitesine ulaşabiliyorsa, kaynağa uygun kabul edilir. Bir konstrüksiyon, belirli malzeme ve imalat yöntemleri kullanılarak oluşturulduğunda ve belirlenmiş işletme koşulları altında beklenen işlevlerini yerine getirebiliyorsa, kaynak güvenliğine sahip demektir.

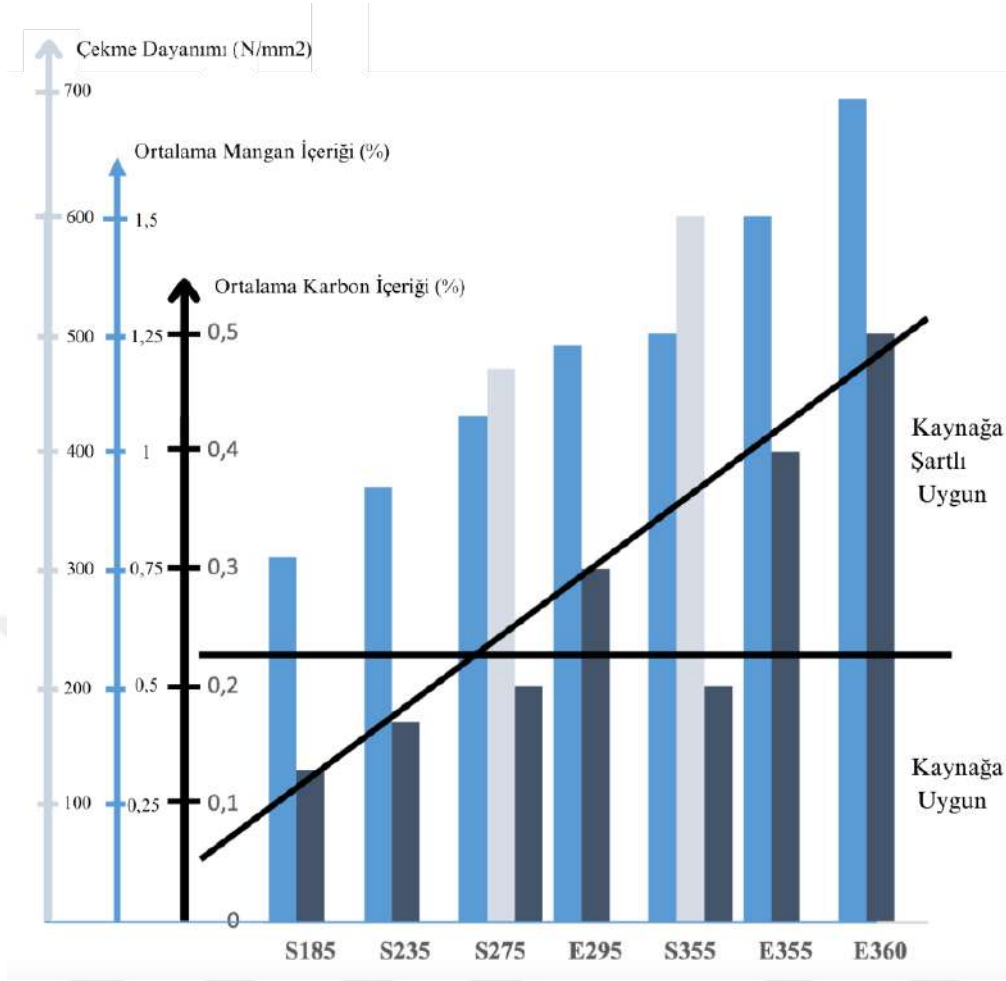
Kaynaklı bir imalat, belirli malzemeler kullanılarak ve belirlenmiş imalat şartları altında kolayca üretilebiliyorsa, kaynak yapılabilirliğine sahip olarak değerlendirilir. Çizelge 5.1.'de bu faktörler bir arada gösterilmiştir (Celasun, 2012; Kiliçer, 1998).

**Çizelge 5.1.**Kaynak Kabiliyetini Belirleyen Unsurlar (Celasun, 2012)

<b>Malzeme</b> (Kaynağa Uygunluk)	Kimyasal Bileşim	Sertleşme eğilimi Yaşlanma Gevrek kırılma Sıcak çatlama Kaynak metali karışım oranı
	Metallerjik Özellikler	Segregasyon Kalıbkılar Tane büyüklüğü İç yapı Anizotropi
	Fiziksel Özellikler	Genişleme özelliğı Isıl İletkenlik Erime sıcaklığı Mukavemet Tokluk
<b>Konstrüksiyon</b> (Kaynak Emniyeti)	Konstrüktif Şekillendirme	Kuvvet hatlarının akışı Dikişlerin konumu Parça Kalınlığı Çentik Etkisi Rijitlik farklılıkları
	Gerilme Durumu	Gerilmelerin tür ve şiddeti Gerilmelerin eksen sayısı Zorlanma hızı Sıcaklık Korozyon
<b>İmalat</b> (Kaynak Yapılabilirlik)	Kaynağa Hazırlık	Kaynak yöntemi İlave malzemenin türü Birleştirme türü Ağız biçimi Ön Tavlama İklim koşulları
	Kaynağın Uygulanması	Isı Girdisi Isının uygulanışı Kaynağın sırası
	Kaynak Sonrası İşlemler	Isıl İşlem Taşlama Dekapaj, temizleme

Genel olarak, yapı çelikleri 25 mm'den daha ince kesitlerde ve aşırı bağlantı zorlaması gerektirmeyen durumlarda, ön ve son tavlama gerektirmeden kolaylıkla kaynak yapılabilir. EN 10025 standardında belirtilen S185, E295, E335 ve E360 çeliklerinin kimyasal bileşimleri tanımlanmadığından, bu çelikler kaynaklı imalat için genellikle tercih edilmez.

Buna karşılık, S235, S275, S355 ve S450J0 gibi genel yapı çelikleri, %0,2'den az karbon içeriğı nedeniyle kolayca kaynaklanabilir. Ancak, çelikteki karbon oranı %0,2'yi aştığında, kaynak öncesi ön tavlama ve kaynak sonrası tavlama gibi önlemlerin alınması gereklidir (Daniş, 2014).



Şekil 5.2. Genel alaşımsız yapı çeliklerinin kaynak işlemlerine uygunluğu. (Daniş, 2014)

Yapı çeliklerinin kaynak işlemlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör, karbon eşdeğeridir. Alaşımsız çeliklerin sertleşme özellikleri üzerinde en fazla etkisi olan elementler genellikle mangan (Mn) ve karbondur (C). Düşük alaşımlı çeliklerde ise molibden (Mo), vanadyum (V), mangan (Mn) ve krom (Cr) gibi alaşım elementleri, düşük karbon oranlarına rağmen, Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB) sertliğini artırabilir.

Çeliğin kaynak sırasındaki sertleşme eğilimini belirlemek için bir formül geliştirilmiş ve alaşım elementlerinin neden olduğu sertlik artışını belirleyecek karbon oranı tespit edilmiştir. Bu yöntemde belirlenen ve çeliğin içindeki alaşım elementlerinin sertlik üzerindeki etkisini gösteren karbon miktarına karbon eşdeğeri ( $C_{eş}$ ) adı verilir. Karbon Eşdeğeri Formülü Eşitlik 5.1 'de gösterilmiştir. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından geliştirilen ve dünya genelinde yaygın olarak kullanılan karbon eşdeğeri formülü, kaynak sırasında çeliklerdeki hızlı soğuma derecesini belirlemekte rehber olarak kullanılır.

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Eşitlik 5.1

(Eleman, 2022; Kiliçer, 1998)

$C_{eş} < 0,45$  olan çeliklerde ön tavlama gerekli değildir. Karbon eşdeğeri 0,45 ile 0,60 arasında olan çelikler için 100-200 °C arası ön tavlama yapılması önerilir.  $C_{eş} > 0,60$  olan çeliklerdeyse 200-300 °C arasında bir ön tavlama gereklidir (Celasun, 2012; Daniş, 2014; Eleman, 2022).



## 6. HARDOKS ÇELİKLERİ

Hardoks çelikleri, aşınma direnci açısından en yüksek beklentilere yanıt verebilecek niteliklere sahip üstün bir malzeme grubudur. Düzgün dağılımlı sertlik, yüksek mukavemet ve mükemmel tokluğun birleşimini sunan bu çelikler, endüstrinin çeşitli alanlarında yaygın olarak tercih edilir. İlk kez 1970 yılında piyasaya sürülen Hardoks çelikleri, o zamandan bu yana sürekli olarak geliştirilmiş ve farklı ihtiyaçları karşılamak amacıyla optimize edilmiştir.

Hardoks'un benzersiz performansı, modern su verme hattında gerçekleştirilen kontrollü su verme işlemiyle elde edilir. Yüksek miktarda su püskürtülerek yapılan bu işlem, çeliğin hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlar. Bu etkin su verme süreci sayesinde, alaşım elementleri minimum seviyede tutulur, bu da hem ürün kalitesini artırır hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunar. Alaşım elementlerinin düşük seviyede tutulması, çeliğin kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir, bu da Hardoks çeliklerini kullanım açısından oldukça avantajlı kılar (Balos & Sidjanin, 2011; Brooks & Lippold, 1993; Frydman & Pękalski, 2008; Metlioğlu vd., 2012; Noble, 1993).

Endüstriyel piyasada aşınma, en sık karşılaşılan ve büyük maliyetlere yol açan sorunlardan biridir. Almanya'da yapılan bir araştırma, aşınmanın endüstriye yıllık olarak iki milyar Euro'nun üzerinde zarar verdiğini ortaya koymaktadır (Ayyıldız, 2022). Hardoks çelikleri, aşınma problemlerine karşı sunduğu çözümlerle, bu tür maliyetlerin azaltılmasında kritik bir rol oynar. Yüksek aşınma dayanımı sayesinde, Hardoks çelikleri, damper kasaları, ekskavatör kepçeleri, kırıcılar ve benzeri ekipmanların kullanım ömrünü uzatır. Hardoks'un üstün aşınma direnci, onu diğer yüksek dayanımlı çeliklere kıyasla en az 4-5 kat daha sert ve dayanıklı hale getirir, bu da endüstride yaygın olarak kullanılmasının temel nedenlerinden biridir (Uluocak, 2008; R. Yılmaz vd., t.y.).

Aşınmaya karşı dayanıklı olmanın ötesinde, Hardoks çelikleri aynı zamanda korozyon, darbe, iç gerilmeler ve yorulma gibi hasarlara karşı da üstün direnç gösterir. Bu özellikler, özellikle taş ocakları ve madencilik gibi zorlu sektörlerde, ağır yük taşıyan kamyonların dorseleri, kırıcı ve delici iş makineleri gibi ekipmanların çalışma ömrünü uzatmak ve darbe, iç gerilme, yorulma, sürtünme ve korozyon kaynaklı malzeme kayıplarını minimuma indirmek için önemlidir. Hardoks'un çatlama eğiliminin düşük olması, özellikle ağır ve dinamik yüklerin altında çalışması gereken ekipmanlar için büyük bir avantaj sunar (Committee, 1990; Tülbentçi & Kaluç, 1991).

## 6.1. Hardoks Çeliklerinin Uygulama Alanları ve Avantajları

Hardoks çelikleri, kum, kaya, kömür, hurda metal ve benzeri aşındırıcı maddelerle sürekli temas halinde çalışan ekipmanlar için idealdir. Bu çelikler, ağır endüstriyel ekipmanlar üzerinde kalıcı bir etki bırakır ve diğer yüksek dayanımlı çeliklere göre en az 5 kat daha dayanıklıdır. Hardoks 400, 400 Brinell sertliği ile serinin en yumuşak türü olmasına rağmen, yine de zorlu koşullara dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Her biri farklı sertlik seviyelerine sahip Hardoks 400, 450, 500, 550 ve 600 türleri, çeşitli uygulama ihtiyaçlarını karşılamak üzere özel olarak geliştirilmiştir (Emre, 2019).

Bu çelik türleri, sadece yüksek sertlikleriyle değil, aynı zamanda mükemmel tokluklarıyla da öne çıkar. Hardoks çelikleri, düşük sıcaklıklarda bile aşırı zorlanmalara dayanabilir ve bu özellik, onları diğer aşınma levhalarından ayıran en belirgin avantajlardan biridir. Bu dayanıklılık, çeliğin optimize edilmiş bileşimi ve üretim sürecinin bir sonucudur. Çeliğin alaşimsız su verme işlemiyle yüksek sertliğe ulaşması, çatlama eğilimini azaltır ve böylece darbelere karşı üstün bir direnç sunar. Bu özellikler, Hardoks'u madencilik, inşaat, geri dönüşüm, taş ocakçılığı, metal işleme ve diğer ağır sanayi alanlarında geniş bir kullanım yelpazesi sunar.

Hardoks çeliklerinin yüksek performans sunması, yalnızca aşınmaya karşı direncinden kaynaklanmaz. Mükemmel işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özellikleri, bu çeliklerin montaj ve bakım süreçlerinde kolaylık sağlar. Özellikle ağır hizmet makinelerinin parçalarının sıkça değiştirilmesi gereken durumlarda, Hardoks'un bu özellikleri büyük zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, bu çelikler çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sunar; daha az alaşım elementi kullanılarak üretilmeleri, çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimize eder (Emre, 2019; Uluocak, 2008; Yılmaz vd.)

## 6.2. Hardoks Çelik Türleri ve Özellikleri

Hardoks 400 Serisi: Hardoks 400, 400 HB sertlik seviyesine sahip olup, iyi kaynaklanabilirlik ve bükülebilirlik özellikleri sunar. Orta derecede aşınmaya maruz kalan yapılarda kullanımı idealdir ve yüksek tokluk değeri sayesinde çeşitli uygulamalarda tercih edilir (T. Yılmaz, 2010).

Hardoks 450 Serisi: Hardoks 450, yaklaşık 450 brinell sertliğe sahip bir hardoks çeliğidir. Bu özelliğiyle aşınmaya karşı üstün direnç gösterir, ancak yüksek sıcaklıklara maruz kalacağı yerlerde kullanımı genellikle tercih edilmez. Hardoks 450'nin, diğer hardoks

eliklerinden farkı, soğuk bükölme ve kaynaklanabilirlik açısından daha kolay işlenebilmesidir. Bu özellikleri sayesinde, aşınma direncinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılması idealdir.

Hardoks 400 ve 450'nin sertliklerinin birbirine yakın olması, bu iki elik türünün benzer kullanım alanlarına sahip olmasına yol açar. Her iki elik türü de özellikle makine parçaları üretiminde ve maden sektöründe yaygın olarak tercih edilir.

Örneğın, öp kamyonlarının kasaları, konteyner tabanları ve yan yüzeyleri gibi yoğun aşınmaya maruz kalan yerlerde kullanılabilirler. Bunun yanı sıra, deniz ve okyanuslardaki petrol platformlarında da bu çelikler tercih edilir, çünkü bu ortamlarda hem yüksek ısıya maruz kalmazlar hem de korozyona karşı direnç gösterirler. Bir diğeri önemli kullanım alanı ise maden araştırma ve çıkarma süreçleridir. Hardoks 450, tünel açma makinelerinin kırıcı uçlarında kullanılarak, dayanıklılığı sayesinde tünellerin açılmasını sağlar. Ayrıca, ıkarılan madenlerin taşınmasında kullanılan araçlarda da Hardoks 450 tercih edilir, bu da araçların dayanıklılığını artırır ve operasyonel verimliliği yükseltir. Kısacası, Hardoks 450'nin aşınma direnci, soğuk bükölme ve kaynaklanabilirlik gibi özellikleri, onu çok çeşitli ve zorlu endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Bu eliğın yüksek performansı, özellikle ağır hizmet koşullarında güvenilir bir çözüm sunar (Emre, 2019; Teker & Gençdoğın, 2020; Toprak, 2019).

#### Hardoks 500 Serisi:

Hardoks 500, bükülebilir ve kaynaklanabilir özelliklere sahip olup, aynı zamanda yüksek taşıma direncine sahiptir. Daha yüksek dış yapı direnci gerektiren uygulamalarda kullanımı uygundur (Ayyıldız, 2022).

#### Hardoks 600 Serisi:

Hardoks 600, çok yüksek aşınma direnci sunan saf ve dayanıklı bir plakadır. Kesilebilme ve kaynaklanabilme özellikleri sayesinde, özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Sert ve tok yapısıyla dikkat çeker (Ayyıldız, 2022).

#### HARDOKS HiTuf Serisi:

350 HB sertliğe sahip olan Hardoks HiTuf, aşırı ısınma sonucu çatlamalara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Özellikle bıçak, yıkım makinesi elemanları ve parçalayıcı makine elemanlarının imalatında kullanılır (Gençdoğın, 2020).

## 6.2. Hardoks Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti

Hardoks çelik türleri, düşük karbon ve alaşım eşdeğerlikleri sayesinde ergitmeli kaynak yöntemleriyle hem kendi türleriyle hem de farklı özellikteki çeliklerle etkin bir şekilde birleştirilebilir. Bu çeliklerin yüksek mukavemet ve aşınma direnci, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanımını ideal hale getirmektedir. Ancak, kaynak işlemi sırasında çatlama gibi olumsuz durumların önüne geçmek için bazı özel önlemlerin alınması gereklidir (Emre, 2019; Gençdoğan, 2020).

Kaynak işlemi esnasında Hardoks çeliklerinde çatlama riskini minimize etmek amacıyla aşağıdaki uygulamalara özen gösterilmelidir:

- Kaynak öncesi ön ısıtma (ön tavlama): Çeliklerin kaynağa başlamadan önce uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılması, özellikle kalın levhalarda iç gerilimleri azaltır ve çatlama olasılığını düşürür. Bu işlem, Hardoks çeliklerinin özelliklerini korumak için kritik bir adımdır.
- Temiz ve düzgün bir kaynak yüzeyi: Kaynak yapılacak bölgenin yağ, pas ve kirden tamamen arındırılmış olması, kaynak sürecinin stabilitesini artırır ve kaynak metalinin taban metaliyle tam birleşimini sağlar. Hardoks çeliklerinde, kaynak yüzeyinin temizliği kaynak metalinin kalitesini ve dayanıklılığını doğrudan etkiler.
- Kontrollü dikiş çekimi: Soğuma sırasında meydana gelebilecek büzülme ve gerilmeleri en aza indirmek için, dikişlerin dikkatli ve kontrollü bir şekilde çekilmesi önemlidir. Bu, malzemenin bütünlüğünü korur ve kaynak işlemi sonrasında istenmeyen deformasyonları engeller.

Bu tedbirler, Hardoks çeliklerinin kaynak işlemleri sırasında maksimum performans ve güvenlik sağlamak adına önemlidir. Aynı zamanda, kaynak işleminin verimliliğini artırarak, uzun ömürlü ve dayanıklı birleşimler elde edilmesine katkıda bulunur (Gençdoğan, 2020; Uluocak, 2008).

## 7. MATERYAL VE YÖNTEM

### 7.1. Malzeme

Deneyde kullanılan S235JR ve Hardoks 450 çeliklerinin kimyasal bileşenleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir ve bu bileşimler, çeliğin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Bu çeliğin mekanik özellikleri ise Çizelge 7.2'de detaylandırılmış olup, çeliğin çekme dayanımı, akma sınırı ve uzama gibi parametrelerini içermektedir. Çizelge 7.3'te ise deneyde kullanılan kaynak teli ve kaynak tozunun kimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. S235JR ve Hardoks 450 çeliğin kimyasal bileşimi

Malzeme	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
S235JR	0,19	0,01	0,02	0,16	0,92	0,01	<0,02	<0,03	Kalanı
Hardoks 450	0,30	1,12	0,22	0,78	1,62	0,26	0,020	0,01	Kalanı

Çizelge 7.2. S235JR ve Hardoks 450 çeliğinin mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı En az (Mpa)	Akma Dayanımı En az (Mpa)	Uzama En az (%)
S235JR	350,0-480,0	235,0	25,0
Hardoks 450	1400 ± 50	1200 ± 50	10 ± 4

Çizelge 7.3. Deneyde kullanılan kaynak teli ve kaynak tozunun kimyasal bileşimi (Gedik Kaynak)

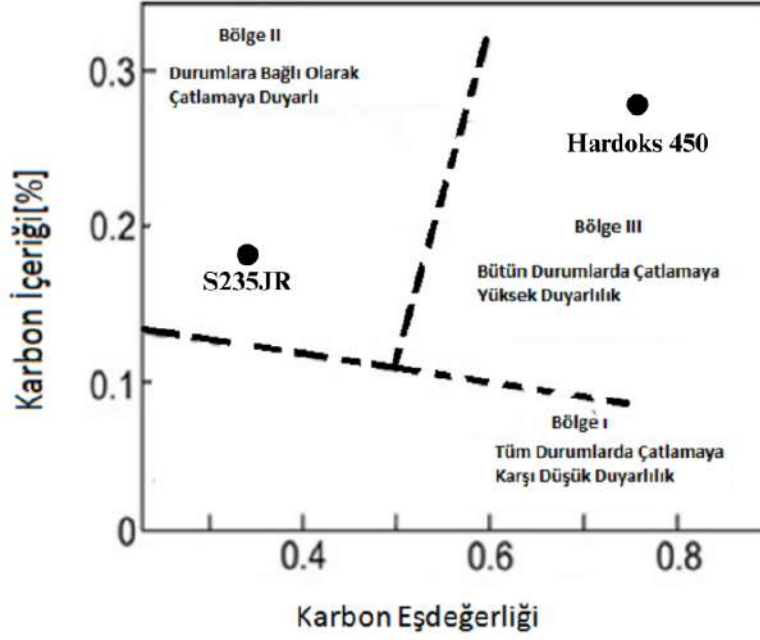
	C	Mn	Si
Kaynak teli	0,08	1,45	0,85
Kaynak tozu	0,07	1,35	0,50

Çizelge 7.4. Deneyde kullanılan kaynak teli ve kaynak tozunun mekanik özellikleri (Gedik Kaynak)

	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (Lo=5do) (%)	Çentik Dayanımı(ISO-V (J))
Kaynak teli	Min 420	500-640	Min 22	Min 47
Kaynak tozu	400	500	30	60

Literatürde, "Graville" diyagramı, çeliklerin kaynaklanabilirliğini değerlendirmek için karbon eşdeğeri ( $C_{es}$ ) ve karbon içeriği gibi faktörlerden yararlanan önemli bir araçtır (Lampman, 1997; Okay vd., 2015). Şekil 7.1.'de, Hardoks 450 ve S235JR çeliklerinin kimyasal bileşimlerine dayanarak hesaplanan karbon eşdeğeri ( $C_{es}$ ) değerleri, bu çeliklerin kaynaklanabilirlik bölgelerini tanımlamak için kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, S235JR çeliğinin Graville diyagramında kaynaklanabilirlik açısından II. bölgede yer aldığı, Hardoks 450 çeliğinin ise daha yüksek bir karbon eşdeğerine sahip olması nedeniyle III. bölgede bulunduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Hardoks 450 gibi yüksek mukavemetli çeliklerin, kaynak esnasında daha özel teknik ve önlemler gerektirdiğini, buna karşın S235JR'nin daha kolay kaynak yapılabilir özellikte olduğunu göstermektedir.



**Şekil 7.1.** Hardoks 450 ve S235JR çeliklerinin kimyasal bileşimlerine dayanarak hesaplanan karbon eşdeğeri ( $C_{es}$ ) değerleri (Frydman & Pękalski, 2008; Lampman, 1997; Okay vd., 2015)

## 7.2. Yöntem

Bu çalışmada, plazma kesim yöntemiyle kesilmiş, 150x200 mm boyutlarında ve 8 mm kalınlığında olan S235JR ve Hardoks 450 çelik levhaların birleştirilmesi amacıyla, EN ISO 14174 standardına uygun tozaltı kaynak yöntemi kullanılmıştır. Kaynak işlemleri, Eliflux BAR kaynak tozu ve SG2 kaynak teli kullanılarak, 2018 model Kamesh Welding tozaltı kaynak robotu yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2. SG2 kaynak tozu ile kaynatılan numune

İlk aşamada, kaynak yapılacak malzemelere, EN ISO 9692-1 standardına göre 45 derece açıyla kaynak ağzı açılmıştır. Levhaların sabitlenmesi için, ISO 4063 standardına uygun gaz altı kaynak yöntemi kullanılarak hurda malzemelerle geçici bağlantılar yapılmıştır. Sabitlenme işleminin ardından, kaynak bölgesinin temiz ve uygun koşullarda kalmasını sağlamak amacıyla, EN ISO 5817 standardının gerekliliklerine uygun olarak bakır altlıklar yerleştirilmiştir. Kaynak işlemi, tozaltı kaynak robotu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kontrol paneli üzerinden gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Otomatik kontrol modu seçilerek, kaynak sırasında gereken akım, voltaj ve hız değerleri dikkatlice belirlenmiş ve böylece yüksek kalitede bir kaynak dikişi elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, 377 amper akım ve 28.3 volt voltaj değerleri kullanılarak, kaynak işleminin optimum koşullarda gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu parametreler, malzemelerin homojen bir birleşim göstermesi ve istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla dikkatle seçilmiştir. Deney numunelerinin uygun şekilde hazırlanması ve tüm kalite kriterlerini karşılaması sağlanmıştır.

Çizelge 7.5. Deneysel çalışmada uygulanan kaynak parametreleri

Kaynak No	Birleştirilen Çelik Malzemeler	Amper (A)	Gerilim (Volt)	Kaynak Hızı (cm/dakika)
K1	S235JR-S235JR	377	28.3	20
K2	S235JR-Hardoks 450			
K3	Hardoks 450-Hardoks 450			



Şekil 7.3. Kamesh Welding tozaltı kaynak robotu kontrol paneli

### 7.2.1. Numune hazırlama

Kaynak yapılan malzemeler, şeritler halinde kesilmek üzere fleks ve testere kullanılarak şekillendirilmiştir. Bu şeritlerden, mekanik testler için üç adet çekme numunesi ve dokuz adet çentik darbe numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, ilgili standartlara uygun boyutlarda işlenmek üzere freze tezgahına monte edilmiştir.

Çekme testi numuneleri, EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanmış olup, her bir numunenin genişliği 20 mm, ölçüm uzunluğu 113 mm ve toplam uzunluğu 246 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Çentik darbe testi numuneleri ise, EN ISO 148-1 standardına uygun olarak şekillendirilmiş; 10 mm kalınlığında, 10 mm genişliğinde ve 55 mm uzunluğunda işlenmiş, ortasında V tipi bir çentik açılmıştır. Bu çentiğin açısı 45 derece, derinliği 2 mm ve köşe yarıçapı 0,25 mm olacak şekilde düzenlenmiştir.

Numunelerin hazırlanması sırasında, standartlara uygun ölçüm ve toleranslara dikkat edilmiş, testlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için gerekli hassasiyet gösterilmiştir. Bu kapsamlı çalışma süresince, malzemelerin uygun kaynak parametreleriyle birleştirilmesi ve sonuçta elde edilen test numunelerinin mekanik performanslarının optimize edilmesi hedeflenmiştir. Böylece, kaynak işlemlerinin her aşamasında kalite ve güvenlik standartlarına tam uyum sağlanmıştır.



Şekil 7.4. Hazırlanan numuneler

### 7.2.1. Metalografik çalışmalar

Çekme, mikroyapı ve sertlik testleri için, önce flexle kesilen numuneler, Metkon Metacut 251 kesme makinesi ile deneye uygun boyuta getirilmiştir. Flexle yapılan kesim sırasında oluşan ısı girdisi, malzemenin yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olabileceğinden, numune alma işlemi, bu kesim bölgesinin tam ters tarafındaki alandan gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan küçük boyutlu numuneler, malzemenin ana metalini, ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) ve kaynak bölgesini kapsayacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 7.5. Metkon Metacut 251 Aşındırıcı Kesme Makinesi

Mikroyapı incelemelerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, numune yüzeyinin çizik ve deformasyonlardan tamamen arındırılarak pürüzsüz hale getirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, mikroskop altında malzemenin iç yapısının net bir görüntüsü elde edilemez. Bu nedenle, ilk aşamada Metkon Forcipol-Forcimat zımparalama makinesi kullanılarak, numune yüzeyi düşük hızda ve su altında zımparalanarak işlem yapılmıştır. Zımparalama işlemi, yüzey tamamen pürüzsüz olana kadar sırasıyla 600, 1200 ve 2000 grit zımparalarla devam ettirilmiştir Her bir zımparalama aşamasından önce, numunenin yüzeyi yıkanmış ve alkolle dikkatlice temizlenmiştir. Son aşamada ise aynı makinede zımpara keçesi değiştirilerek numunenin yüzeyi kuru bir şekilde parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında, numuneler sabunla yıkanmış, ardından alkolle temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 7.6. Metkon Forcipol – Forcimat Zımparalama Makinesi

### 7.2.2. Mikroyapı incelemeleri

Kaynak işlemi sonrasında gerçekleştirilen metalografik çalışmaların ardından, deney numunelerinin mikroyapı özelliklerini değerlendirmek için optik mikroskopla incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler, numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu kapsamında, faz yapıları ve bunların dağılımları, tane boyutları ve tane sınırlarının yanı sıra kaynak sürecinin ITAB ile ana malzeme üzerindeki farklılıklarını kapsamaktadır. Mikroyapı görüntüleri elde etmek için Olympus GX41 model optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 7.5). Kaynaklı

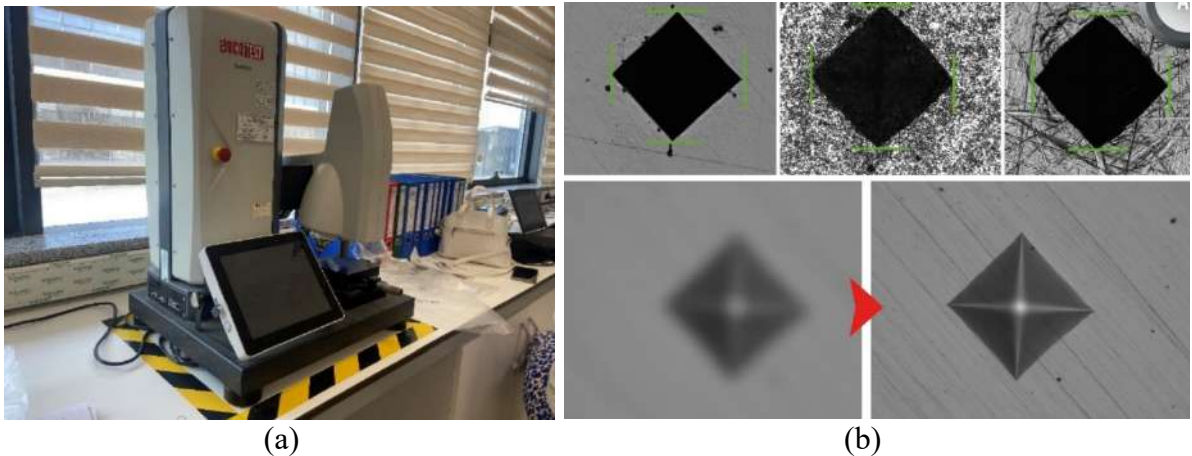
numunelerin ve ana malzemelerin mikroyapıları, farklı büyütme kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 7.7. Olympus GX41 Optik Mikroskop

### 7.2.3. Sertlik ölçümleri

Deney numunelerinin uygulanan toz altı kaynak yönteminin sonucunda, ITAB ve kaynak metalinin sertlik değerlerini kaynak parametrelerindeki farklılıklara göre değerlendirmek amacıyla mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu kapsamda, her bir kaynak numunesinde ana metalden kaynak bölgesine doğru sertlik ölçümleri alınarak, bu parametrelerin sertlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ölçümler, Emco-Test DuraScan G5 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.6.).

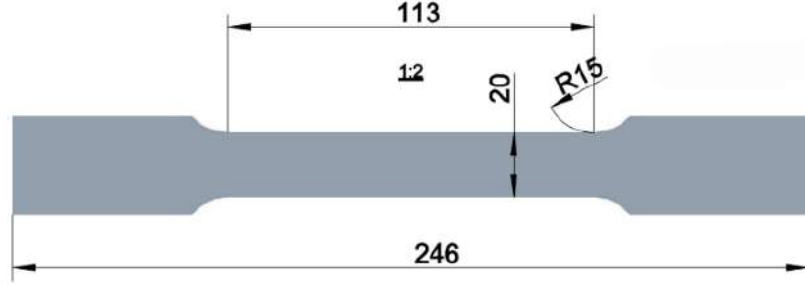


Şekil 7.8. (a) Emco-Test DuraScan , (b) G5 Sertlik Ölçümü görünümü (EMCO-Test, t.y.)

Sertlik ölçümleri, HV 0,5 yük altında mikro sertlik cihazıyla yapılmış ve her bir ölçümde yaklaşık 10 saniye boyunca elmas piramit ucun numune yüzeyine uygulanmasıyla ortaya çıkan iz üzerinden otomatik olarak alınmıştır.

#### 7.2.4. Çekme deneyi

Çekme deneyinin gerçekleştirilmesi amacıyla, numuneler ISO 5178:2019 standardına ve çekme cihazının çene ölçülerine uygun olarak, Şekil 7.7'de gösterildiği gibi katı modelleme programında tasarlanmıştır.



Şekil 7.9. Çekme çubuklarının ölçülerinin gösterimi

ISO 6892-1 "Metalik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Yöntemi" standardına uygun olarak, ALŞA KTM çekme cihazı ile uyumlu bilgisayar kontrol programına gerekli deney parametreleri girilmiştir.

Bu parametreler, yer değiştirme hızının 5 mm/sn ve yükleme hızının 0,2 kN/sn olacak şekilde ayarlanmasının ardından test cihazı çalıştırılmıştır. Belirtilen parametrelerle her bir numune için üç kez tekrarlanan çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, ortalama değerler olarak raporlanmıştır.



Şekil 7.10. ALŞA KTM Çekme Cihazı

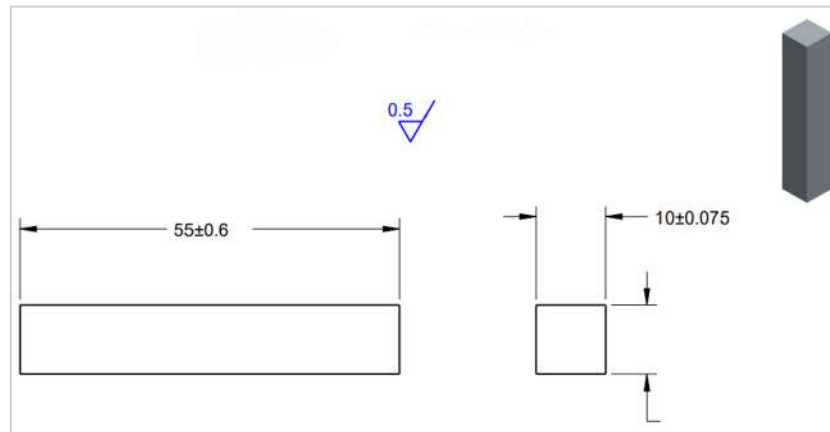
### 7.2.5. Çentik darbe testi

Test Tescon Charpy Impact JB-W300 Test Cihazı ile yapılmıştır (Şekil 7.8). Test cihazı, ISO 148-1'e göre sarkaç tipi bir darbe cihazıdır. Metal malzemelerin, özellikle demir ve çelik gibi yüksek dayanımlı malzemelerin gevrekliğini test etmek için kullanılır bu cihazlar, bilgisayar kontrollüdür ve ISO 148-2-1998, ASTM-E23-98 ve GB/T 3808-22-002 standartlarına uygundur.



Şekil 7.11. Tescon Charpy Impact JB-W300 (JB-W300 Charpy Impact Test Cihazı (Bilgisayar Kontrollü))

Test için 10 mm x 10 mm x 55 mm boyutlarında 9 adet numune kesilmiştir.

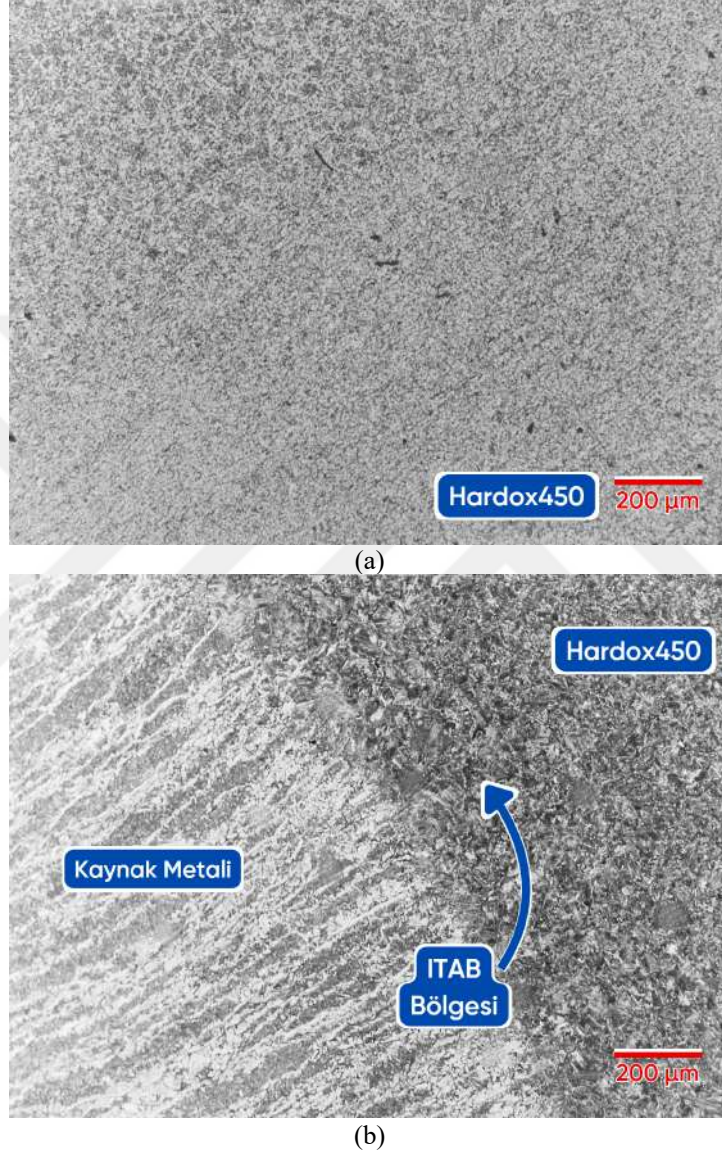


Şekil 7.12. Test Numunesinin Ölçüleri

## 8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 8.1. Mikroyapı Sonuçları

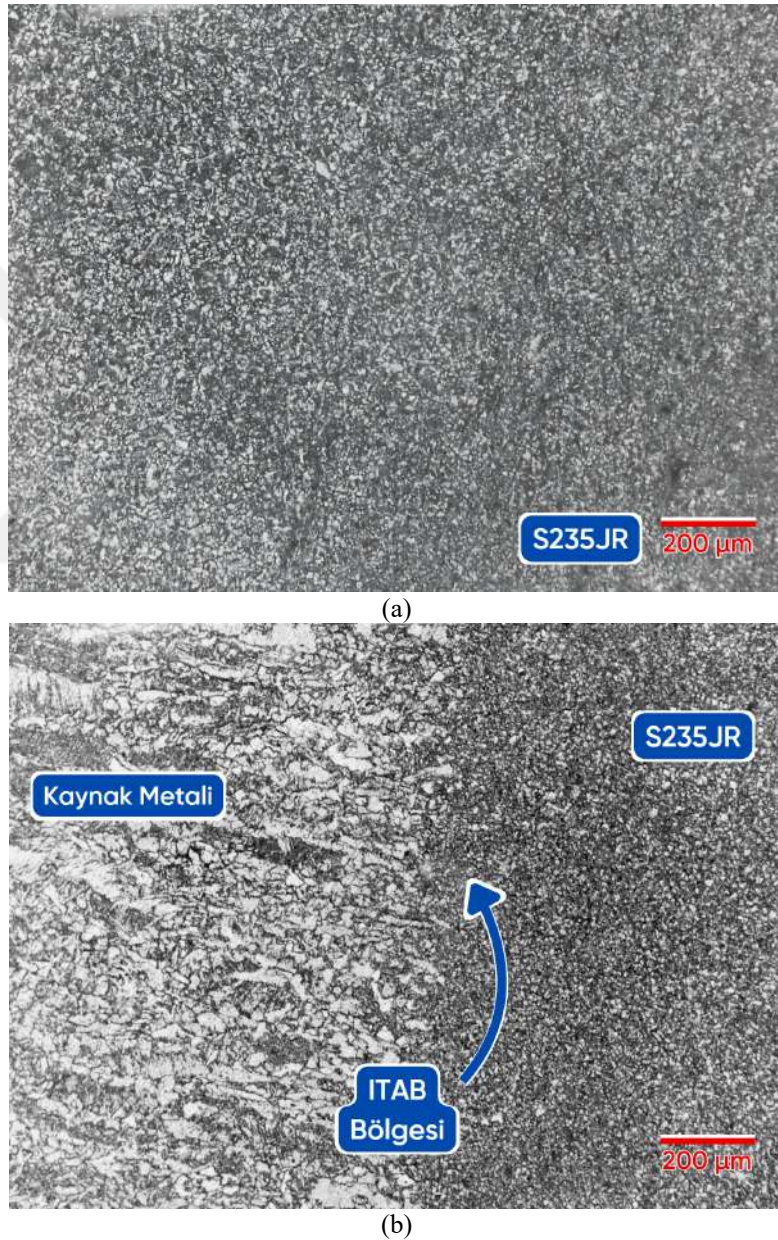
Tozaltı kaynak yöntemi ile alın kaynağı uygulanmış S235JR ve Hardoks 450 çelik malzemelerinin optik mikroyapı inceleme sonuçları, Şekil 8.1-8.3'te sunulmuştur.



Şekil 8.1. (a) Hardoks 450 mikroyapısı (b) H-H numunesinin mikroyapıları

İlk görsel, Hardox 450 çeliğinin mikroyapısını göstermektedir. Görüntüde, çeliğin tipik martensitik veya bainitik yapısına dair ince bir yapı görülmektedir. Hardox 450 çeliği, yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlamak amacıyla tasarlanmış bir aşınmaya dayanıklı çeliktir, bu nedenle mikroyapıda ince, iğnemsiz veya plakamsı martensit ve muhtemelen bainit fazları gözlemlenebilir. Yapının homojenliği ve ince taneli görünümü, malzemenin sertlik ve mukavemet özelliklerini desteklemektedir. İkinci görselde ise Hardox 450 çeliğinin, Kaynak

Metali ve Isıdan Etkilenmiş Bölge (ITAB) arasındaki geçiş bölgesi gösterilmektedir. ITAB bölgesi, kaynak işlemi sırasında oluşan termal etkiler nedeniyle mikroyapısal değişimlere uğramıştır. ITAB'de, tane büyümesi ve dendritik yapılaşma gibi özellikler belirgin hale gelmiştir. Kaynak Metali, ITAB'ye göre daha homojen ve ince taneli bir yapı gösterirken, ITAB'de termal etkilerden dolayı düzensiz tane yapısı ve büyümesi gözlemlenmektedir. Bu bölgedeki mikroyapı değişiklikleri, malzemenin sertliğinde ve mekanik özelliklerinde farklılıklara yol açabilir.



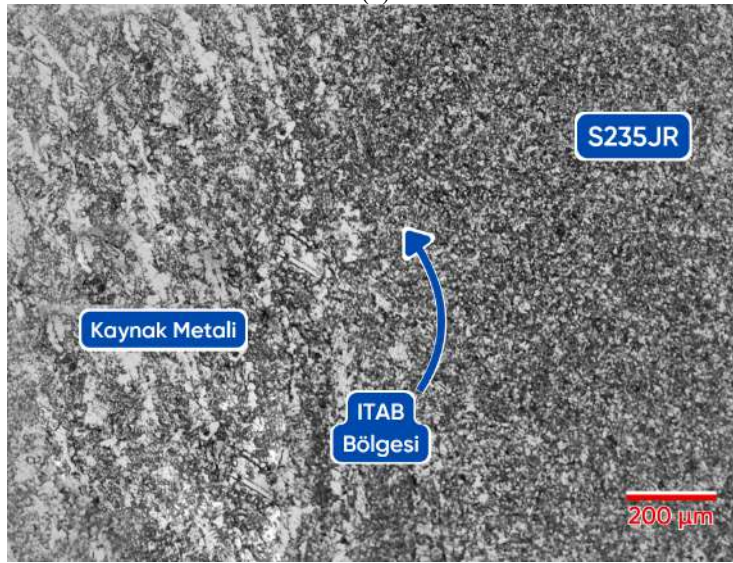
Şekil 8.2. (a) S235JR mikroyapısı (b) S-H numunesinin mikroyapıları

S235JR ve Hardoks 450 çeliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulan kaynakta, birleşim bölgesinde tipik büyük taneli kaynak yapısı gözlemlenmiştir. Kaynak ısısının etkisiyle, ana

malzemeden ısıdan etkilenen bölgeye (ITAB) doğru bir tane büyümesi meydana gelmiştir. Hardoks 450 çeliğinin ana metal olarak kullanıldığı kaynaklı birleştirme bölgesi incelenmektedir. Ana metal kısmında, Hardoks 450'nin karakteristik ferrit-perlit yapısının korunduğu, martensit veya bainit gibi sert fazların oluşmadığı ve ince taneli bir yapı sergilendiği gözlemlenmiştir. Isıdan etkilenen bölge (ITAB) ise kaynak ısısının etkisiyle tane irileşmesi göstermekte, ancak kontrollü bir soğuma sağlandığı için sert faz oluşumu görülmemektedir; bu durum Hardoks 450'nin darbe dayanıklılığı ve sünekliğini bir miktar etkilese de aşırı bir sertleşme riski yaratmamaktadır. Kaynak metalinde ise, tipik dendritik yapılar gözlenmiş olup, bu da dolgu malzemesinin katılma sürecini yansıtmaktadır. Genel olarak, kaynak işleminin kontrollü bir şekilde yürütüldüğü ve Hardoks 450'nin mekanik özelliklerini koruduğu sonucuna varılmaktadır.



(a)



(b)

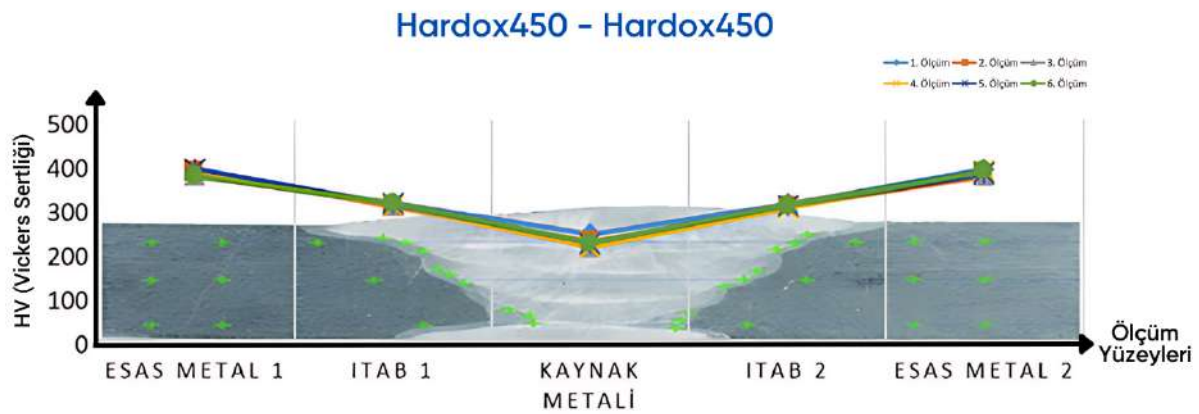
**Şekil 8.3.** (a) S235JR mikroyapısı (b) S-S numunesinin mikroyapıları

Görselin sağ tarafında bulunan S235JR çeliği, düşük karbon içeriği nedeniyle tipik olarak ferrit ve perlit fazlarından oluşan ince taneli bir yapı sergilemektedir. Bu yapı, malzemenin sünekliğini ve kaynaklanabilirliğini artırır (Çetinkaya vd., 2022).

Isıdan etkilenen bölge (ITAB), kaynak işlemi sırasında ana metale etki eden ısının neden olduğu yapısal değişiklikleri yansıtır. ITAB bölgesinde, tane büyümesi ve yapısal değişiklikler gözlemlenmiştir; bu durum, kaynak ısısının etkisiyle oluşan yeniden kristalleşme ve tane irileşmesinin bir sonucudur. Ancak, düşük karbon ve alaşım içeriği sayesinde ITAB'da martensit veya bainit gibi sert fazların oluşmadığı görülmektedir, bu da malzemenin sertleşme eğiliminin düşük olduğunu gösterir. Kaynak metalinde, dolgu metalinin katılaşma sürecine bağlı olarak daha büyük ve dendritik yapılar oluşmuştur (Erden vd., 2018).

## 8.2. Sertlik Sonuçları

TS EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak, esas metal, ITAB ve kaynak bölgelerinin beş farklı noktasından Vickers sertlik (HV 0,5) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bölgeden altışar ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalamaları hesaplanarak sonuçlar, Vickers sertlik değerleri açısından sunulmuştur.

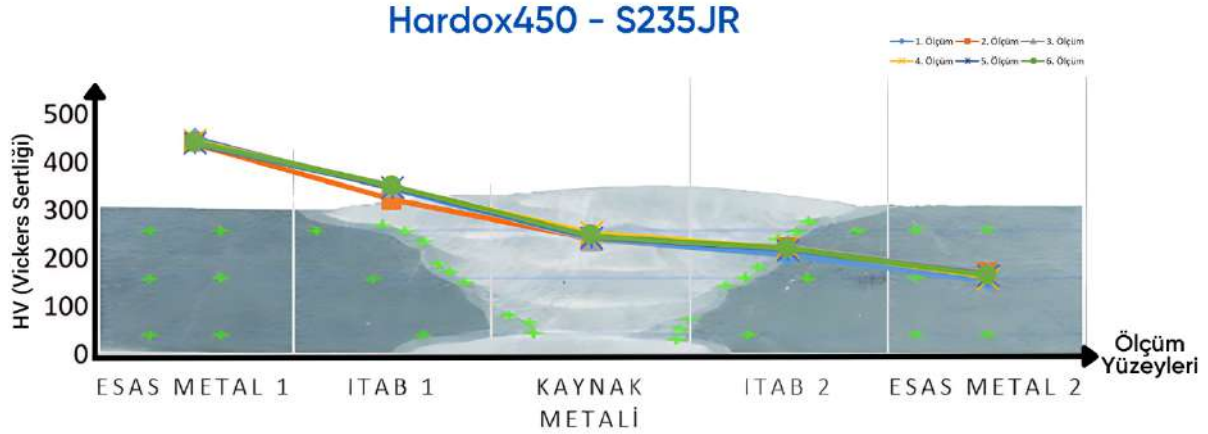


Şekil 8.4. K3 numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri grafiği

Hardoks 450 malzemesi üzerinde yapılan Vickers sertlik ölçümlerine göre, esas metal bölgelerinde sertlik değerleri 371-388 HV aralığında yüksek kalırken, bölgelerinde bu değerler 307-311 HV arasında düşüş göstermektedir; bu durum, kaynak işlemi sırasında bu bölgelerin yüksek sıcaklığa maruz kalmasıyla açıklanabilir.

Kaynak metalinde ise sertlik en düşük seviyeye inerek 212-239 HV aralığında ölçülmüş, bu da kaynak metalinin esas metale göre daha yumuşak olduğunu ve kaynak işlemi sırasında

malzeme yapısının değiştiğini göstermektedir. Genel olarak, esas metalden ITAB ve kaynak metaline doğru belirgin bir sertlik düşüşü görülmekte, ardından ITAB'dan esas metale geçişte sertlik yeniden artmaktadır; bu da kaynak işleminin malzemenin sertlik profilini nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.



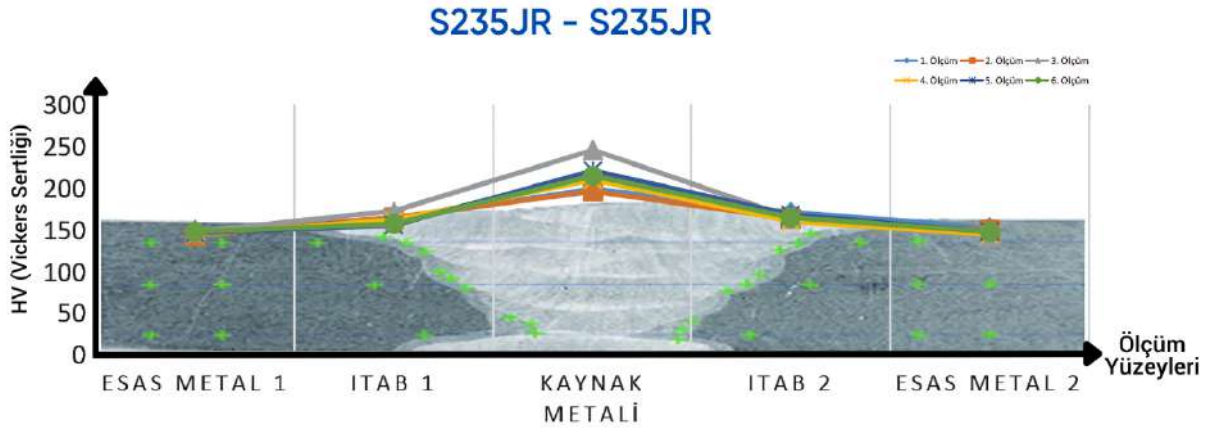
Şekil 8.5. K2 numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri grafiği

Hardoks 450-S235 malzemesi üzerinde yapılan Vickers sertlik ölçümlerine göre, esas metalin sertlik değerleri 378-388 HV aralığında yüksek seviyedeysen, ITAB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) bölgelerinde bu değerler 297-306 HV arasında düşüş göstermektedir; bu durum, kaynak işlemi sırasında bu bölgelerin ısıdan etkilenmesiyle açıklanabilir.

Kaynak metalinde sertlik daha da düşük olup 206-217 HV aralığında ölçülmüş, bu da kaynak metalinin iki esas malzeme arasında daha yumuşak olduğunu ve kaynak işlemi sırasında malzeme yapısının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

ITAB ve esas metal 2'de (S235JR) ise sertlik değerleri daha da düşerek sırasıyla 178-189 HV ve 131-141 HV arasında seyretmekte, bu da S235JR malzemesinin Hardoks 450'ye kıyasla daha düşük sertliğe sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak, esas metalden (Hardoks 450) ITAB, kaynak metal ve esas metal 2'ye (S235JR) doğru ilerledikçe belirgin bir sertlik düşüşü gözlemlenmekte, bu da farklı malzemelerin birleşim yerlerindeki sertlik değişikliklerini ve kaynak işleminin malzeme sertliği üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 8.6. K1 numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri.

S235JR-S235JR malzemesi üzerinde yapılan Vickers sertlik (HV 0,5) ölçümlerine göre, esas metal bölgelerinde sertlik değerleri 141-155 HV aralığında düşük seviyelerde sabit kalırken, ITAB bölgelerinde bu değerler 153-194 HV arasında ölçülmüş ve esas metalden biraz daha yüksek bir sertlik göstermektedir; bu durum, ITAB bölgelerinin ısıdan etkilense de sertliklerinin esas metalden çok farklı olmadığını göstermektedir.

En yüksek sertlik değeri Hardox 450 esas metalde ölçülmüştür ve  $380 \pm 8$  HV'dir. S235JR esas metalin sertliği yaklaşık  $141 \pm 10$  HV iken kaynak metalinin sertliği yaklaşık  $217 \pm 22$  HV olarak ölçülmüştür. Bu sertlik değerleri (Başyigit & Solak, 2020) ve (Erden vd., 2018) çalışmaları ile uyumludur. Hardoks 450 ana malzemeden kaynak bölgesine doğru belirli aralıklarla alınan sertlik ölçümlerinde, sertlik değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu düşüş, kaynak işlemi sırasında malzemeye uygulanan ısının etkisiyle ve sıcaklığın belirli bir hızda kaynak bölgesinden uzaklaşması sonucu ortaya çıkmıştır; bu nedenle, kaynak metalinin sertlik değeri, ana malzemenin sertlik değerinden daha düşük kalmaktadır.

Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak metali genellikle ana malzemelerle kullanılan kaynak ilave malzemesinin karışımından oluşur ve bu bileşim, kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bu çalışmada da kaynak metalinin sertlik değerinin, Hardoks 450 ve S235 gibi iki farklı ana malzemenin sertlik değerlerinin ortalamasına yakın olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, kaynak metalinin sertlik değerinin S235JR'in sertlik değerinden yüksek, ancak Hardoks 450 çeliğinin sertlik değerinden düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle kaynaklı birleştirmelerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin, malzeme seçimi ve kaynak yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak nasıl değişiklik gösterebileceğini ve kaynak bölgesinin özelliklerinin malzemelerin birleşim yerlerindeki davranışını nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

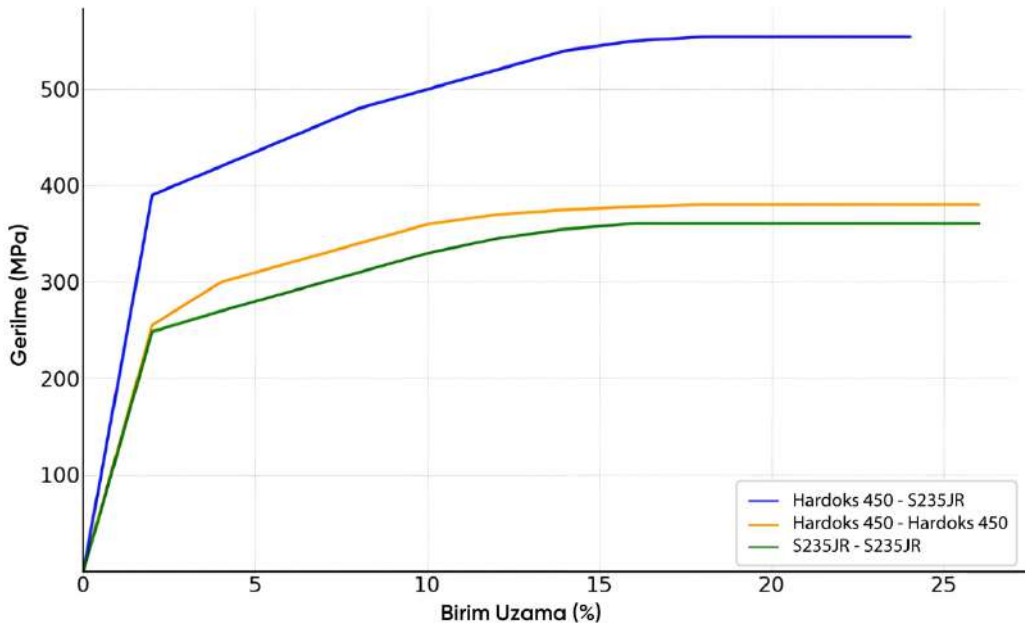
Hardoks 450 çeliğinin S235JR çeliğe kıyasla daha yüksek sertlik değerine sahip olmasının temel sebepleri, malzemenin ince taneli mikro yapısı, yüksek karbon ve alaşım elementi içeriğidir (Özturan, 2022). Bu nedenle, aşınmanın yoğun olduğu parçalarda Hardoks 450 tercih edilirken, daha az gerilime maruz kalan bağlantı bölgelerinde S235JR çeliği kullanılabilir.

### 8.3. Çekme Testi Sonuçları

Çekme test numunelerinde kopmanın, S235JR çeliğin ısıl etki altında kalan bölgesi (ITAB) tarafında meydana geldiği belirlenmiştir. Birleştirme kırılma makro resimleri Şekil 8.7’de gösterilmiştir.



Şekil 8.7. Birleştirme kırılma makrografı



Şekil 8.9. Farklı Çelikler İçin Gerilme-Gerilim Eğrileri

Bu çalışmada, S235JR ve Hardoks 450 çelik malzemelerinin farklı kombinasyonlarından elde edilen üç farklı numune üzerinde çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. S235JR - S235JR, Hardoks 450 - S235JR ve Hardoks 450 - Hardoks 450 numuneleri için yapılan test sonuçları, bu malzemelerin mekanik davranışlarını anlamak açısından önemli bilgiler sağlamıştır.

S235JR- S235JR numunesi, 360.7 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımı, 248.5 N/mm<sup>2</sup> akma dayanımı ve %25,77 kopma uzaması ile yüksek süneklik göstermiştir. Bu sonuçlar, S235JR çeliğinin yeterli bir mekanik dayanım sağlarken aynı zamanda sünek bir yapıya sahip olduğunu ve şekil değişimine karşı dirençli olduğunu ortaya koymaktadır. Hardoks 450- S235JR numunesi, 380.2 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımı ve 255.4 N/mm<sup>2</sup> akma dayanımı değerleri ile S235JR çeliğine göre daha yüksek mekanik dayanım sergilemiştir. Ancak, %23,57 kopma uzaması ile daha düşük bir süneklik göstermiştir.

Bu sonuçlar, malzemenin iyi bir elastik ve plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu, orta seviyede bir mukavemet sergilediğini ve kırılmadan önce makul bir uzama gösterdiğini belirtir (Okay vd., 2015). Hardoks 450- Hardoks 450 numunesi ise en yüksek mekanik dayanımı sunmuş; 554.2 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımı ve 390.4 N/mm<sup>2</sup> akma dayanımı değerleri ile diğer numunelerden üstün performans göstermiştir. Ancak, bu numune en düşük kopma uzaması (%23.0) ile daha az sünek bir yapıya sahiptir. Hardoks 450'nin yüksek mukavemetli ancak düşük süneklik değerleri, bu malzemenin aşınmaya dayanıklı ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, S235JR ve Hardoxks450 çelik malzemelerinin birleşimlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. S235JR, sünekliği ve deformasyon kapasitesi ile ön plana çıkarken, Hardoks 450, yüksek dayanımı ve aşınma direnci ile öne çıkmaktadır. Bu bulgular, her iki malzemenin de farklı endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyeline sahip olduğunu ve malzeme seçiminin uygulamanın gereksinimlerine göre dikkatlice yapılması gerektiğini göstermektedir.

### 8.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları

Üç farklı numunenin çentik darbe testi sonuçlarına göre, Hardoks 450-S235JR numunesi, ortalama 188 J/cm<sup>2</sup> darbe tokluğu ve 150,4 kJ absorbe edilen enerji ile en yüksek darbe dayanımını göstermektedir. Bu, Hardoks 450 ve S235JR malzemelerinin birleşiminde yüksek bir enerji emme kapasitesinin elde edildiğini ifade eder.

**Çizelge 8.1** Her numuneden 3 adet hazırlanarak yapılan ölçümler

Numuneler	Ortalama Darbe Tokluğu (J/cm <sup>2</sup> )	Ortalama Soğurulan Enerji (kJ)
H-H	99,47	79,57
S-H	188,0	150,4
S-S	26,8	21,47

Hardoks 450-Hardoks 450 numunesi, ortalama 99,47 J/cm<sup>2</sup> darbe tokluğu ve 79,57 kJ absorbe edilen enerji değerleri ile orta seviyede bir darbe dayanımı sergilemektedir ve bu da malzemenin darbe enerjisini oldukça iyi absorbe edebildiğini gösterir.

Buna karşılık, S235JR-S235JR numunesi ise ortalama 26,8 J/cm<sup>2</sup> darbe tokluğu ve 21,47 kJ absorbe edilen enerji ile en düşük değerlere sahip olup, darbe enerjisini absorbe etme kapasitesinin düşük olduğunu ve daha kırılabilir bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. Sonuçlar

Toz altı kaynak yöntemi ile birleştirilen S235JR ve Hardoks 450 çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelemesi için yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

Mikroyapı incelemelerine göre;

- S235JR çeliğinde, ısı etki altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak bölgesinde tane boyutlarının büyüdüğü ve eş eksenli tane yapısının dendritik kollara dönüştüğü gözlemlenmiştir.
- Aynı şekilde, kaynak bölgesinde tane büyümesi ve kaynak işlemi sırasında uygulanan ısı girdisi nedeniyle S235JR çeliğinde dendritik bir yapının oluştuğu tespit edilmiştir. İki farklı metalin birleşme bölgesinde ise, tane boyutlarının düzensiz bir şekilde irili ufaklı dendritik bir yapı oluşturduğu fark edilmiştir.

Mikro Vickers sertlik deneyi sonuçlarına göre;

- Hardoks 450-Hardoks 450, Hardoks 450-S235JR ve S235JR-S235JR numunelerinin Vickers sertlik ölçümleri karşılaştırıldığında, Hardoks 450 içeren numunelerin, özellikle esas metal bölgelerinde, yüksek sertlik ve mekanik dayanım sergilediği görülmektedir; ancak S235JR malzemesi ile birleştiğinde, ITAB ve kaynak bölgelerinde sertlikte belirgin düşüşler meydana gelmektedir.
- Hardoks 450 çeliğinin S235JR çeliğe kıyasla daha yüksek sertlik değerine sahip olmasının temel sebepleri, malzemenin ince taneli mikro yapısı, yüksek karbon ve alaşım elementi içeriğidir (Özturan, 2022). Bu nedenle, aşınmanın yoğun olduğu parçalarda Hardoks 450 tercih edilirken, daha az gerilime maruz kalan bağlantı bölgelerinde S235JR çeliği kullanılabilir.

Çekme testi sonuçlarına göre;

- Hardoks 450-Hardoks 450 hem akma mukavemeti hem de maksimum gerilme açısından en güçlü olanıdır ve yüksek mukavemet ve aşınma direncinin gerekli olduğu uygulamalar için uygundur. S235JR-S235JR ise en zayıf olan ancak en sünek olanıdır.
- S235JR-Hardoks 450 bileşiği, S235JR'in sünekliğini Hardoks 450'nin bazı mukavemet özellikleriyle birleştirir. Bu da onu süneklik ve mukavemet arasında bir dengeye ihtiyaç duyulan uygulamalar için uygun kılar.

Darbe çentik testi sonuçlarına göre;

- S235JR-Hardoks 450 kombinasyonu, en yüksek darbe tokluğu ve soğurulan enerji ile en iyi performansı sergilemektedir. Bu sonuç, farklı mukavemet özelliklerine sahip iki malzemenin toz altı kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin sinerjik bir etki yaratabileceğini göstermektedir.

## 9.2. Öneriler

1. Kaynak bölgesinde, özellikle kaynak metali ile esas metaller arasındaki geçiş bölgelerinin kimyasal bileşimlerinin, EDX gibi yöntemlerle analiz edilmesi,

2. Bu tür kaynaklı bileşenlerin korozif ortamlarda nasıl performans gösterdiklerinin araştırılması,

3. Hardoks 450 ve S235JR plakalarının kaynağında gerçekleştirilen mekanik test sonuçlarına dayanarak, farklı kaynak hızlarının bu kaynak türü üzerindeki etkilerinin incelenmesi,

4. Kaynak kalitesine etki eden diğer parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin kalite karşılaştırmaları için kullanılması,

5. Farklı kalınlıklarda ve türde plakaların kaynağı için benzer uygulamaların yapılması, bu alanlarda ileri çalışmalar için önemli katkılar sağlayacaktır.

## 10. KAYNAKLAR

- Adar, M. (2019). Hardox-500 ile st-52 çeliğinin kaynak edilebilirliğinin mekanik testler ve istatistiksel yöntemlerle araştırılması [Master's Thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/99528>
- Akay, A. A. (2012a). Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/99143>
- Akay, A. A. (2012b). Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/99143>
- Akduman, M. (2021). Düşük karbonlu ST37 yapı çeliğinin ısı işlem sonrası yapısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi [PhD Thesis]. Yüksek Lisans Tezi.
- Anandavijayan, S., Mehmanparast, A., Braithwaite, J., Brennan, F., & Chahardehi, A. (2021). Material pre-straining effects on fatigue behaviour of S355 structural steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 183, 106707.
- Anık, S. (1991). Kaynak Tekniği El Kitabı.
- Anık, S., & Tülbentçi, K. (1982). Kaynak Tekniği. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, 960. [https://www.netakaynak.com/FileUpload/ks188403/File/gazalti\\_kaynak\\_tekniği.pdf](https://www.netakaynak.com/FileUpload/ks188403/File/gazalti_kaynak_tekniği.pdf)
- Aslanlar, S. (2009). KAYNAK TEKNOLOJİSİ ve UYGULAMALARI.
- Atabey, C. (2024). TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN İÇME SUYU İSALE HATLARINDAKİ ST37 ÇELİK BORULARDA ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ. Batman Üniversitesi.
- Atılğan, Y., Yıldırım, M. S., & Kaya, Y. (2022). Depolama tankı imalatında tozaltı ark kaynağı uygulaması ve kaynak bölgesinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- Ayyıldız, E. A. (2022). AŞINMAYA DİRENÇLİ HBW450 HARDOX ÇELİĞİ VE S355J2 YAPI ÇELİĞİNİN ROBOTİK GAZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE METALURJİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. GAZİ ÜNİVERSİTESİ.
- B. Raj, V. S., A. K. Bhaduri. (2006). *Welding Technology for Engineers*. Alpha Science International Limited. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xtr&AN=2144490&lang=tr&site=ehost-live>
- Balos, S., & Sidjanin, L. (2011). Metallographic study of non-homogenous armour impacted by armour-piercing incendiary ammunition. *Materials & Design*, 32(7), 4022-4029.

- BaşığiT, A. B., & Solak, B. (2020). S235 Yapı Çeliğinin Tozaltı Kaynağında Toz Türünün Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklere Etkileri. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.688582>
- Benli, B. (2023). St37 ÇELİĞİNİN FARKLI KAPLAMA YÖNTEMLERİYLE YÜZEY MODİFİKASYONU VE ANALİZİ. Samsun Üniversitesi.
- Brooks, J. A., & Lippold, J. C. (1993). Selection of wrought austenitic stainless steels. *Welding, Brazing, and Soldering*, 456-470.
- Canli, A. (2017). Tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen basınçlı kap çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi [Master's Thesis]. Karabük Üniversitesi.
- Celasun, E. (2012). S355J2 çeliğinin ısıl işlem ve farklı tozaltı kaynak tellerinin kaynak kabiliyetine etkisinin incelenmesi [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/99093>
- Committee, A. I. H. (1990). *ASM Handbook: Welding, brazing, and soldering (C. 6)*. ASM international.
- Czuprynski, A., Musztyfaga-Staszuk, M., Szymura, M., & Monica, Z. (2020). Mechanical properties of dissimilar metal butt joint. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, XII, 1, 2067-3604.
- Çağlar, H. (t.y.). ST 37 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TERMAL YÜZEY İŞLEMLERİ UYGULAMALARI İLE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.
- Çetinkaya, C., Akay, A., Arabacı, U., & Fındık, T. (2022). S235JR Malzemeye Uygulanan Astar Kaplamanın Tozaltı Ark Kaynak Kabiliyetine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 25(3), Article 3. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1119093>
- Damkaş, R. (2003). Tozaltı kaynağında kaynak ağzı açmadan ve kaynak ağzı açarak ulaşılabilecek nüfuziyet derinliğinin tespit edilmesi [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Daniş, A. (2014). GAZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN S355J2 YAPI ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. FIRAT ÜNİVERSİTESİ.
- Dunder, M., Samardzic, I., & Klaric, ř. (2005). Monitoring Of Main Welding Parameters At STT Welding Process. 219-222. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:262:450234>
- Eleman, B. (2022). Yeni nesil (invertör) ve geleneksel MİG/MAG kaynak makinaları ile kaynaklanan S355 kalite çeliğin kaynak dikişlerinin makro yapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- EMCO-Test. (t.y.). DuraScan G5 hardness tester. EMCO-Test. Geliş tarihi 04 Eylül 2024, gönderen <https://www.emcotest.com/en/products/durascan>

- Emre, İ. E. (2019). Kıırma ve öğütme sistemlerinde hardox 450 ve 20mncr5 çeliklerinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu [Master's Thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi].  
<https://acikerisim.subu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.14002/828>
- Erden, M. A., Gündüz, S., Çalgülü, U., & Boz, M. (2018). TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN ALAŞIMSIZ VE HARDOKS ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1).  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/36184/406794>
- Francisco José Gomes da Silva. (2021). Handbook of Welding: Processes, Control and Simulation. Nova.  
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xtr&AN=2939802&lang=tr&site=ehost-live>
- Frydman, S., & Pękalski, G. (2008). Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels. Archives of civil and mechanical engineering, 8(4), 15-27.
- Gedik Kaynak. (t.y.-a). Kaynak Teli SG2. Geliş tarihi 03 Eylül 2024, gönderen <https://gedik.com.tr/kaynak/kaynak-elektrotlari-telleri-ve-tozlari/gazalti-kaynak-telleri-ve-cubuklari/alasimsiz-gazalti-kaynak-telleri-ve-cubuklari/sg-2>
- Gedik Kaynak. (t.y.-b). Kaynak Tozu—ELIFLUX BAR. Geliş tarihi 03 Eylül 2024, gönderen <https://gedik.com.tr/kaynak/kaynak-elektrotlari-telleri-ve-tozlari/tozalti-kaynak-telleri-ve-tozlari/tozalti-kaynak-tozlari/kaynak-tozu-eliflux-bar>
- Gençdoğan, D. (2020). AISI 430/HARDOX 450 çeliğinin nikel ara tabaka kullanılarak TIG çift taraflı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü].  
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/708951>
- JB-W300 Charpy Impact Test Cihazı (Bilgisayar Kontrollü). (t.y.). Geliş tarihi 03 Eylül 2024, gönderen <http://www.teskon.com/impact-test-charpy-urun566.html>
- Kahraman, N., & Gülenç, B. (2016). Modern kaynak teknolojisi. <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/843b920b-4c14-4122-a1dc-3913e617f584/modern-kaynak-teknolojisi>
- Kapcinska-Popowska, D. (2011). Porównawcze badania jakościowe i trwałościowe połączeń spawanych stali HARDOX 500 i stali S355. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 56(1), 59-65.
- Khosrovaninezhad, H., Shamanian, M., Rezaeian, A., Kangazian, J., Nezakat, M., & Szpunar, J. A. (2021). Insight into the effect of weld pitch on the microstructure-properties relationships of St 37/AISI 316 steels dissimilar welds processed by friction stir welding. Materials Characterization, 177, 111188. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111188>
- Kilinçer, S. (1998). Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Konat, L., & Bialobrzeska, B. (2022). Effect of Welding Technique and Thermal Heatment Parameters on Abrasive Wear of Steel S355. *Tribologia*. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-ce333d24-8d6b-4219-b23f-8f6281019894>
- Korkmaz, Ş., Çetin, M. H., Adar, M., & Orak, A. (2020). Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500–St52 Specimen Joined by GMAW Method. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/2023>
- Küçüköner, H. (2019). Dupleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin mekanik/mikro yapı özelliklerinin araştırılması [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Külahlı, E. (1998). TOZ ALTI KAYNAK YÖNTEMİ. *Oerlikon*, 2.
- Lampman, S. (1997). A Source Book Adapted from ASM International Handbooks.
- Lazić, V., Arsić, D., Nikolić, R. R., Djordjević, D., Prokić-Cvetković, R., & Popović, O. (2017). Application of the high strength steel HARDOX 450 for manufacturing of assemblies in the military industry. *Key Engineering Materials*, 755, 96-105.
- Metlioğlu, M. R., Uzun, M., Gökkaya, H., & Boca, G. D. (2012). The effect of machining parameters on surface roughness in the drilling of Hardox 400, XXVI. *MicroCAD International Scientific Conference*, Hungary, 10, 29-30.
- Mindivan, H. (2013). Effects of combined diffusion treatments on the wear behaviour of hardox 400 steel. *Procedia Engineering*, 68, 710-715.
- Multani, R. S., Sharma, V., Gupta, A., & Singh, J. (2020). Effect of Welding Processes on the Mechanical Properties of Hardox 400 Steel Welded Joints. İçinde V. S. Sharma, U. S. Dixit, K. Sørby, A. Bhardwaj, & R. Trehan (Ed.), *Manufacturing Engineering* (ss. 301-313). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4619-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4619-8_23)
- Noble, D. N. (1993). Selection of wrought duplex stainless steels. <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/61/chapter/713179/Selection-of-Wrought-Duplex-Stainless-Steels>
- Okay, T., Najafiharehtapeh, A., ertek emre, H., & KAÇAR, R. (2015). INVESTIGATION OF THE WELDABILITY OF S235JR - HARDOKS400 STEEL (S235JR – HARDOKS400 ÇELİK ÇİFTİNİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI).
- Olafsson, O. M., Jensen, J. J., & Berggreen, C. (2016). Experimental investigation of the thickness effect for large as-welded SAW S355 steel specimens. *13th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS'2016)*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/experimental-investigation-of-the-thickness-effect-for-large-as-w>
- Özturan, A. B. (2022). Hardox 450 ve S355J2C+ N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi [Master's Thesis, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://dspace.trakya.edu.tr/xmlui/handle/trakya/7980>

- Sahhal, A., & Gunay, M. (2020). Effects of severe plastic deformation on the mechanical properties of welded ST 37-2 steel. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res*, 10, 5382-5386.
- Şahbaz, Ö. (2019). Sepiyolitin tozaltı ark kaynağında koruyucu toz olarak kullanılabilirliğinin araştırılması [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/294308>
- Teker, T., & Gençdoğan, D. (2020). Phase and chemical structure characterization in double sided TIG arc welding of HARDOX 450 and AISI 430 steel. *Cumhuriyet Science Journal*, 41(4), 987-994.
- Tekin, N. (2006). Paslanmaz Çelik Malzeme İle Düşük Karbonlu Alaşımsız Çelik Malzemelerin Tozaltı Kaynak Metodu İle Birleştirilmesi [PhD Thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)]. <https://search.proquest.com/openview/08da8b6fd7ad44ca6b4ae8885ca2332f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Toprak, M. (2019). Katı borlamanın Hardox 450 ve Hardox HiTuf çeliklerin yüzey özelliklerine etkisi/The effect of solid boronizing on the surface properties of Hardox 450 and Hardox HiTuf steels [PhD Thesis]. <http://acikerisim.harran.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11513/2074/540713.pdf?sequence=1>
- Tozaltı Kaynağı. (2011). İçinde Makine Teknolojisi. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.
- Tufanoğlu, E. (2017). P460-St52 malzeme çiftinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/409633>
- Tülbentçi, K., & Kaluç, E. (1991). Kazı Makinelerinde Aşınan Parçaların Kaynakla Tamirinin Teknolojik ve Ekonomik Önemi. *Kaynak Dünyası*, 91(2), 3-6.
- Uluocak, M. E. (2008). Hardox 450 çeliklerinin Mag Kaynak bölgesi mikroyapı Ve Mekanik özelliklerinin İncelenmesi [M.Ed.]. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2570402655/abstract/B6571426AB8F4FE0PQ/17>
- Uzunali, U. Y., & Cuvalci, H. (2015). The effects of post weld heat treatment on the mechanical properties of tempered martensite and high strength steel welded joints. *Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*, Incheon, Korea, 25, 29. [http://www.i-asem.org/publication\\_conf/asem15/2.ICSCS15/2t/T2C.1.SC157\\_2096F1.pdf](http://www.i-asem.org/publication_conf/asem15/2.ICSCS15/2t/T2C.1.SC157_2096F1.pdf)
- Weman, K. (2011). *Welding processes handbook*. Elsevier. [https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=oaNgAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&q=Welding+Processes+Handbook&ots=xcOO1NsI6\\_&sig=rX2SDeAlO77TOnXb1N207tf0qvo](https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=oaNgAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&q=Welding+Processes+Handbook&ots=xcOO1NsI6_&sig=rX2SDeAlO77TOnXb1N207tf0qvo)
- Winczek, J., & Gawrońska, E. (2016). The modeling of heat affected zone (HAZ) in submerged arc welding (SAW) surfacing steel element. *Metalurgija*, 55(2), 225-228.

Yavuz, N., Özcan, R., & Polat, F. G. (2005). Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/handle/11452/11850>

Yılmaz, R., Türkmen, M., & Fıçıcı, F. (t.y.). 'Hardox 500 Çeliğinin Abrasif Aşınma Davranışının İncelenmesi. International Iron & Steel Symposium, Karabük, Türkiye, 522-530.

Yılmaz, T. (2010). Masif ve Özlü Kaynak Telleri İle Birleştirilen Hardox 400 Çeliklerinin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri [Master's]. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2700373307/abstract/B6571426AB8F4FE0PQ/40>

Yildirim, D. (2018). 2205 dubleks paslanmaz çelik ile S355J2 genel yapı çeliğinin birleştirilebilirliğinin incelenmesi [Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/476742>

