



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Farklı Kaynak Tozları Kullanılarak Tozaltı  
Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen S235JR ve  
S355J+N Yapı Çeliklerinin ITAB Bölgesindeki  
Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerinin İncelenmesi**

**Gökhan BAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Eylül-2024  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Gökhan BAL tarafından hazırlanan “Farklı Kaynak Tozları Kullanılarak Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen S235JR ve S355J+N Yapı Çeliklerinin ITAB Bölgesindeki Mikroyapı ve Sertlik 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 olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

.....

#### Üye

Doç. Dr. İlker ÖRS

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../... 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.

İmza

Gökhan BAL

Tarih: 27.09.2024

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# FARKLI KAYNAK TOZLARI KULLANILARAK TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN S235JR VE S355J+N YAPI ÇELİKLERİNİN ITAB BÖLGELERİNDEKİ MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gökhan BAL

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

2024, 46 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL  
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE  
Doç. Dr. İlker ÖRS

S235JR ve S355J+N yapısal çeliklerinin S2 kaynak teli ve farklı kaynak tozları (BAR, BFB, BFF) kullanılarak kaynaklanmasının mekanik özellikleri ve mikroyapısal değişiklikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, Vickers sertlik testi, çekme testleri ve çentik darbe testleri ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ISO 6507, ISO 6892-1 ve ISO 148-1 standartlarına göre değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, BAR kaynak tozunun yüksek çekme dayanımı, homojen sertlik dağılımı ve uygun mikroyapısal özellikleri ile en iyi performansı sergilediğini göstermektedir. BFB tozu, yüksek sertlik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalar için uygun bir alternatif olarak değerlendirilirken, BFF tozunun heterojen mikroyapı ve değişken sertlik profili nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma, uygun kaynak tozu seçiminin malzemenin nihai mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisini vurgulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çekme dayanımı, çentik darbe testi, ISO standartları, kaynak tozu, mekanik özellikler, mikroyapı, sertlik testi, yapısal çelikler

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND HARDNESS PROPERTIES IN  
THE HAZ REGIONS OF S235JR AND S355J+N STRUCTURAL STEELS JOINED  
BY SUBMERGED ARC WELDING USING DIFFERENT FLUXES**

**Gökhan BAL**

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

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL**

**2024, 46 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL**

**Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE**

**Assoc. Prof. Dr. İlker ÖRS**

The mechanical properties and microstructural changes of S235JR and S355J+N structural steels welded with S2 welding wire and different welding powders (BAR, BFB, BFF) were investigated. Experimental studies were conducted using Vickers hardness tests, tensile tests, and Charpy impact tests, and the obtained results were evaluated according to ISO 6507, ISO 6892-1, and ISO 148-1 standards.

The results indicate that the BAR welding powder demonstrated the best overall performance, with high tensile strength, homogeneous hardness distribution, and suitable microstructural properties. BFB powder was considered a suitable alternative for applications requiring high hardness and wear resistance, while BFF powder was found to have limited use due to its heterogeneous microstructure and variable hardness profile. The study highlights the impact of selecting the appropriate welding powder on the final mechanical and microstructural properties of the material.

**Keywords:** Charpy impact test, hardness test, ISO standards, mechanical properties, microstructure, structural steels, tensile strength, welding powder

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, S235JR ve S355J+N yapısal çeliklerinin farklı kaynak tozları ve S2 kaynak teli kullanılarak kaynaklanması sonucunda elde edilen mekanik ve mikroyapısal özelliklerin incelenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmanın her aşamasında, literatürdeki güncel gelişmeleri takip ederek, farklı kaynak tozlarının malzemelerin performans özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymayı hedefledim. Bu çalışmanın sonuçlarının, mühendislik uygulamalarında kullanılacak verimli ve güvenilir kaynak yöntemlerinin belirlenmesine katkı sağlayacağına inanıyorum.

Tez sürecinde değerli bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tezin hazırlanmasında ve deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Wamac Crane çalışanlarına; kaynak numunelerinin kontrolü ve yol göstermeleri konusundaki destekleri için Alfanorm firmasının çalışanlarına da teşekkür ederim. Bu süreçte bana her zaman destek olan aileme de en içten teşekkürlerimi sunarım; sizlerin sevgisi ve teşvikleri, bu çalışmayı tamamlamamda büyük bir motivasyon kaynağı oldu.

Bu tez çalışmasının, kaynak teknolojilerinin gelişimine ve mühendislik literatürüne değerli katkılar sunmasını temenni ederim.

Saygılarımla,

Gökhan BAL  
KONYA-2024

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>4</b>
<b>3. KAYNAKLI İMALAT YÖNTEMİ.....</b>	<b>9</b>
3.1. Malzeme Türüne Göre Kaynak .....	9
3.2. Amacına Göre Kaynak .....	9
3.3. Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	9
3.3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri .....	10
3.3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	11
<b>4. TOZALTI KAYNAĞI .....</b>	<b>12</b>
4.1. Tozaltı Kaynağı Çalışma Prensibi .....	12
4.2. Tozaltı Kaynağı Başlıca Kullanım Alanları .....	13
4.3. Tozaltı Kaynağı Avantaj ve Dezavantajları .....	13
4.3.1. Tozaltı Kaynağı Avantajları .....	13
4.3.2. Tozaltı Kaynağı Dezavantajları.....	14
4.4. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri .....	14
4.5. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları .....	15
4.5.1. Eliflux BAR Kaynak Tozu .....	15
4.5.2. Eliflux BFF Kaynak Tozu .....	15
4.5.3. Eliflux BFB Kaynak Tozu.....	16
4.6. Kaynak Tozlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellik ve Etkileri .....	16
4.7. Tozaltı Kaynağında Bölgesi .....	17
4.7.1. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisini Etkileyen Faktörler.....	17
<b>5. YAPI ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>18</b>
5.1. S235JR (St37) Yapı Çeliği Genel Özellikleri .....	18
5.2. S355J+N (St52) Yapı Çeliği Genel Özellikleri.....	18
<b>6. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>20</b>

6.1. Malzeme .....	20
6.2. Yöntem .....	21
6.2.1. Metalografik Çalışmalar .....	23
6.2.2. Mikroyapı İncelemeleri .....	24
6.2.3. Sertlik Ölçümleri .....	25
6.2.4. Çekme Deneyi .....	26
6.2.5. Çentik Darbe Testi .....	27
<b>7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>29</b>
7.1. Mikroyapı Sonuçları .....	29
7.1.1. Eliflux BAR Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi .....	29
7.1.2. Eliflux BFB Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi .....	30
7.1.3. Eliflux BFF Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi .....	31
7.2. Sertlik Sonuçları .....	31
7.3. Çekme Testi Sonuçları .....	35
7.4. Çentik Darbe Testi Sonuçları .....	40
<b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>42</b>
8.1. Sonuçlar .....	42
8.2. Öneriler .....	43
<b>9. KAYNAKLAR .....</b>	<b>44</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

%	: Yüzde
°	: Derece
°C	: Santigrat Derece
A	: Amper
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
He	: Helyum
Hz	: Hertz
HV	: Vickers Sertlik
kg/mm <sup>2</sup>	: kilogram/ milimetrekaire
cm/ dk	: santimetre/ dakika
mm	: milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Azot
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
V	: Voltaj

## Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute
AWS	: American Welding Society
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EN	: European Norm
ISO	: International Organization for Standardization
ITAB	: Isının tesiri altındaki bölge
MAG	: Metal Active Gas
TS	: Türk Standardı



## 1. GİRİŞ

Teknoloji ve endüstrinin paralel olarak gelişmesi, malzeme türlerinde önemli ilerlemelere yol açmıştır. Ancak malzemelerin yüksek maliyetleri ve ulaşılabilirlikteki zorluklar, mühendisleri ve endüstriyel tasarımcıları malzemeleri birbirleriyle birleştirerek mekanik özelliklerini iyileştirme arayışına yönlendirmiştir. Bu ihtiyaç doğrultusunda, çeşitli bağlantı elemanları ve yöntemleri geliştirilmiş, bu yöntemler arasında ise kaynaklı bağlantılar ön plana çıkmıştır.

Kaynaklı bağlantılar, malzemeleri kalıcı olarak birleştiren bir yöntem olarak bilinir ve çeşitli malzeme türlerinin dayanımını, sertliğini ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Endüstride, demiryolu sistemlerinden otomotiv sektörüne, damper imalatından ağır sanayi ekipmanlarına kadar birçok uygulamada kaynaklı bağlantılar kullanılmaktadır. Özellikle ağır sanayide ihtiyaç duyulan yüksek mukavemetli yapıların sağlanabilmesi için, genellikle yüksek mukavemetli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin yüksek maliyetleri ve temin zorlukları, farklı malzeme çiftlerinin birlikte kullanılmasını gerektirmiştir. Bu bağlamda, kaynak yöntemleri farklı malzeme türlerini bir arada kullanarak çeşitli şekillerde birleştirme olanağı sunar.

Günümüzde, metallerin birleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntem kaynak yöntemidir. Kaynak teknikleri, üretime sağladığı birçok avantaj nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca, teknolojik gelişmelerle birlikte kaynak teknikleri de sürekli olarak ilerlemekte ve yeni bilgi birikimleri ortaya çıkmaktadır.

Bu teknikler arasında özellikle tozaltı kaynak yöntemi hem teknik olarak gelişmiş hem de geniş bir uygulama alanı bulan yöntemlerden biridir. Tozaltı kaynak yöntemi, sunduğu çok sayıda avantaj nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda, Türkiye'de tozaltı kaynak makineleri ve tel elektrot üretimindeki hızlı artış, bu yöntemin ülkemizde de giderek daha fazla benimsendiğini ve yayıldığını göstermektedir. Tozaltı kaynak yöntemi, özellikle yüksek kalite ve verimlilik gerektiren projelerde, düşük maliyetle yüksek mukavemetli ve güvenilir bağlantılar sağlama kapasitesiyle öne çıkmaktadır.

Bu yöntem, kaynak sırasında yüksek miktarda ısı enerjisi kullanarak, kaynak bölgesinde erimeyi ve malzemelerin birbirine kaynaşmasını sağlar. Böylece, kaynak yapılacak malzemelerin türüne ve kullanım amacına bağlı olarak, en uygun mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkün hale gelir. Ayrıca, tozaltı kaynak yöntemi, büyük ölçekli projelerde otomasyona ve hızlı üretime olanak tanıdığı için, modern endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. (Aydin SIK, 2007)

Günümüzde metal yapıların inşasında en çok kullanılan malzemeler, düşük ve orta dayanımlı, az alaşımlı çeliklerdir. Bu çelikler genellikle konstrüksiyonlarda kaynaklı bağlantılarla birleştirilir. Ancak, bu tip yapıların en hassas ve risk taşıyan noktası kaynak dikişleridir. Bunun nedeni, kaynak sırasında küçük bir bölgenin çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasıdır.

Kaynak işlemi sırasında, küçük bir hacme sahip kaynak banyosu hızla soğur ve bu soğuma sırasında metalin iç yapısında dengesizlikler oluşabilir. Bu durum, metalin şekil değiştirme kapasitesini düşürürken dayanımını artırabilir. Ancak, metal banyosunun kristal yapısının oluşumu sırasında çeşitli iç ve dış kusurların meydana gelme riski de artar. Bu mikro ve makro düzeyde hatalar, malzemenin sertleşmesine ve dış yüklerin etkisiyle kaynak dikişlerinin kırılmasına yol açabilir.

Bu durumun temel nedenlerinden biri, kaynak dikişi metalinin dayanım, süneklik ve şekil değiştirme kapasitesinin malzemenin akma sınırına doğrudan etkisidir. Yapısal tasarımlar genellikle kaynak dikişinin akma sınırına göre hesaplanır. Öte yandan, birçok yapısal çelik türü hacim merkezli kübik yapıya sahip olup, bu çelikler düşük sıcaklıklarda gevrek kırılmalara karşı daha hassastır. Özellikle gerilimlerin eksenler arasında değişkenlik gösterdiği ve dinamik yüklemelerin olduğu durumlarda, sünek ve yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip dikiş metali, akma sınırının etkilenmesiyle gevrek hale gelebilir.(Güler & Özcan, 2014)

Genel yapı çelikleri, oldukça geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bu çelikler; ofis binaları, iş merkezleri, alışveriş merkezleri, terminal binaları, okullar, konutlar, otoparklar, spor ve sergi salonları, stadyumlar gibi yapılar ile köprüler, çelik konstrüksiyonlar, çimento fabrikaları, termik ve beton santralleri gibi çeşitli inşaat projelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür yapıların dayanıklılığı, iş güvenliğinin sağlanması ve maddi kayıpların önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kaynak dikişlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, uygun kaynak tekniklerinin seçilmesi ve doğru parametrelerle uygulanması kritik bir rol oynamaktadır. Kaynak sırasında kullanılan malzemelerin özellikleri, kaynak yöntemi ve işlemin koşulları gibi faktörlerin hepsi, dikişin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Örneğin, uygun ön ısıtma ve soğutma hızlarının kontrol edilmesi, kaynak bölgesinde istenmeyen iç gerilmelerin ve çatlak oluşumlarının önlenmesine yardımcı olabilir. Böylece, yapıların genel dayanıklılığı ve güvenilirliği sağlanabilir.

Bu çalışmada, S235JR-S355J+N yapısal çeliklerinin, bir ergitme kaynağı yöntemi olan tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilebilirliği incelenmiştir. Araştırma, her iki malzemenin de mikro yapısal özelliklerini, mekanik dayanımlarını ve kaynak sonrası

performanslarını değerlendirerek malzeme bilimi, karakterizasyonu ve kaynak teknolojisi alanlarına literatüre önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında, tozaltı kaynak işlemi sırasında kullanılan kaynak tozu türlerinin (örneğin Eliflux BFB, Eliflux BFF, Eliflux BAR) malzemelerin kaynak bölgesindeki mikroyapı ve sertlik özellikleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Ayrıca kalıntı gerilmeler ve bu gerilmelerin malzemenin performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, sanayide uygulanan kaynak süreçlerinin iyileştirilmesi ve malzeme seçiminde kritik kararların verilmesine rehberlik edecek niteliktedir.(Tufanoğlu, 2017)



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Soncu, kaynak işleminin endüstrideki önemine ve diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla sunduğu avantajlara vurgu yapılmıştır. Çalışmada, kaynak sonrası ortaya çıkan artık gerilmeler ve distorsiyonların doğru şekilde belirlenmesi ve kontrol edilmesinin, kaynaklı birleştirmelerin güvenilirliğini artırmada kritik rol oynadığı belirtilmiştir. Bu doğrultuda, dik pozisyonda (saat 3 yönünde) gerçekleştirilen tozaltı kaynak işleminin termomekanik analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İlk aşamada, iki boyutlu termal analizle, kaynak sırasında parçadaki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak hesaplanmış ve bu veriler, kalıntı gerilmeleri ve distorsiyonların belirlenmesiyle mekanik analizde kullanılmıştır. SEM, deneysel verilerle doğrulanarak, malzemenin kaynak sonrası davranışlarının öngörülmesine ve kaynak parametrelerinin optimizasyonuna olanak tanımıştır. Dik pozisyonda gerçekleştirilen kaynak yöntemi, yatay pozisyona kıyasla iş süresinde %50'ye varan bir zaman tasarrufu ve maliyet avantajı sağlarken, daha ergonomik bir çalışma ortamı sunmuştur. Kaynak sonrası en yüksek sıcaklık değişiminin kaynaktan 11 mm mesafeye kadar olan bölgelerde gözlemlendiği ve bu bölgelerin ısının etkisi altında kaldığı tespit edilmiştir. (Ramadan Soncu, 2009)

Celasun, kimyasal bileşimi % 0.14 karbon (C), %1.54 mangan (Mn), %0.36 silisyum (Si), %0.02 fosfor (P) ve %0.022 kükürt (S) olan, 389 N/mm<sup>2</sup> akma dayanımı ve 597 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip S355J2 kalite çelik kullanılmıştır. Bu çeliğin yarısına, 780°C'de gerçekleştirilen bir ısıl işlem uygulanarak çift fazlı bir mikro yapı elde edilmiştir. Hem ısıl işlem görmüş (780 S) hem de ısıl işlem görmemiş S355J2 çelikler, S1 ve S2Mo tozaltı kaynak telleriyle birleştirilmiştir. Bu numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır.

Tahribatlı muayeneler kapsamında darbe çentik, çekme, sertlik ve eğme testleri yapılmıştır. Tahribatsız muayeneler ise gözle kontrol, ultrasonik muayene, manyetik parçacık muayenesi, mikroyapı, makro yapı ve sonlu elemanlar analizlerini içermiştir. Gözle kontrol, manyetik parçacık ve ultrasonik muayenelerinde herhangi bir kaynak hatası tespit edilmemiştir. Çekme testleri sonucunda, tüm kaynatılmış numunelerin ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) koptuğu ve eğme testlerinde çatlama gözlenmediği belirlenmiştir. Çentik darbe testi sonuçlarına göre, S2Mo kaynak teli kullanılarak kaynatılmış numunelerin tokluk değerlerinin, S1 kaynak teli kullanılarak kaynatılan numunelere göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Isıl işlem sonrasında çift fazlı yapı kazanan S355J2 çeliğinin çekme dayanımı 715 N/mm<sup>2</sup>'ye yükselmiş ve bu ısıl işlem görmüş numunelerin, S2Mo tozaltı kaynak teliyle kaynatıldığında S1 teli ile kaynatılan numuneye göre yüksek mukavemet sergilediği gözlenmiştir. Sertlik testlerinde ise, kaynak metalinin sertliğinin ITAB ve S355J2

malzemelerine göre yüksek olduğu ve S2Mo ile kaynatılmış olan numunelerin daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, çentik darbe testlerinde, numunelerin 20°C'de sünek ve -40°C'de gevrek kırıldıkları SEM analizleri ile doğrulanmıştır.(Celasun, 2012)

Tufanoğlu, St52 (S355J2G3) ve P460 çelikleri, tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak çeşitli hızlar (17-20 cm/dk) ve amper değerlerinde (450-600 A) kaynaklanmıştır. Kaynaklı bağlantılar üzerinde çentik darbe testi, Vickers mikrosertlik ölçümleri, optik mikroskop ve EDS analizleri ile mikroyapı incelemeleri ve radyografik muayene gerçekleştirilmiştir. Bulgular, kaynak dikişi ve ITAB bölgelerinde homojen bir yapı gözlemlendiğini ve çatlak veya gözenek oluşmadığını ortaya koymuştur. Mikrosertlik ölçümlerinde, ITAB ve kaynak dikişi bölgelerindeki sertlik değerlerinin artan amper ile yükseldiği, sonra ana malzemenin ortalama sertlik değerine düştüğü belirlenmiştir; bu, intermetalik fazlar ve ısıl dönüşümlerle açıklanabilir. Kırılma yüzeylerinde sünek kırılma mekanizması tespit edilmiş ve intermetalik fazların oluşmaması bu durumu desteklemiştir. Çentik darbe testlerinde, ana malzemenin darbe enerjisinin kaynaklı numunelere göre daha düşük olduğu bulunmuş, St52 numunelerinde en yüksek darbe değerleri 20°C'de ve belirli amper aralıklarında (450-500, 475-525, 550-600 A) gözlemlenmiştir. P460 numunelerinde ise benzer koşullarda yüksek darbe test sonuçları elde edilmiştir. EDS ve XRD analizleri, P460 çeliğinde Fe<sub>3</sub>Si, FeSi ve Cu<sub>3</sub>P fazlarının, St52 çeliğinde ise FeC ve FeMn fazlarının tespit edildiği görülmüştür. Radyografik muayene sonuçları, artan amper değerinin birleşme mukavemetini artırdığını, ancak artan kaynak hızının bunu azalttığını göstermiştir; ayrıca kaynaklı bağlantılarda çatlak ve gözenek oluşumu tespit edilmemiştir. Bu çalışma, P460 ve St52 çeliklerinin tozaltı kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilebildiğini ve kaynak parametrelerinin malzeme özelliklerine etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.(Ebru Tufanoglu, 2017)

Kaya, 3 mm kalınlığındaki S235JR ve S355JR yapı çeliklerinin özlü tel kullanılarak MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmesi incelenmiştir. Araştırmada, üç farklı kombinasyon (S235JR-S235JR, S355JR-S355JR, S235JR-S355JR) kullanılarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu numunelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çekme testlerinin sonuçları, kopmaların ana malzemelerde gerçekleştiğini ve en yüksek çekme dayanımının S355JR-S355JR birleşiminde elde edildiğini ortaya koymuştur. Yapılan 180° çift yönlü eğme testlerinde tüm numunelerde gözle görülür bir kaynak hatası bulunmamış, mikrosertlik ölçümlerinde ise en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, ana malzemedan kaynak metaline doğru ilerlerken tane irileşmesinin meydana geldiği ve özellikle S235JR-S355JR birleşiminde

S355JR tarafında daha belirgin bir tane irileşmesi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaynak metalinin yapısında eriyip katılmış, eş eksenli dendritik tanelerin bulunduğu belirlenmiştir.(Kaya, 2018)

Varol ve arkadaşları, 20 mm kalınlığındaki S355J2 yapı çeliği üzerinde, EN ISO 14171-A standardına uygun olarak üretilmiş GeKa S1, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri kullanılarak toz altı ark kaynağı yöntemiyle alın kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. X kaynak ağzı geometrisi ve 60° kaynak ağzı açısı kullanılarak yapılan kaynak işlemleri sonrasında çeşitli mekanik testler ve mikroyapı analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, S1 dolgu metali ile yapılan kaynaklarda kopmaların kaynak bölgesinde gerçekleştiği, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri kullanıldığında ise kopmaların ana malzemede meydana geldiği tespit edilmiştir. Çekme ve akma dayanımı açısından dolgu metallerinin benzer performans sergilediği, ancak S3Mo dolgu metalinin çentik darbe dayanımı ve mikrosertlik açısından S1'e göre belirgin bir artış sağladığı görülmüştür. Özellikle S3Mo dolgu metalinin düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gerektiren denizcilik uygulamalarında üstün performans gösterdiği, S2Si dolgu telinin ise maliyet/performans dengesi açısından daha uygun bir seçenek olduğu ortaya konmuştur. Tüm dolgu metalleri, 2,4 kJ/mm ısı girdisiyle gerçekleştirilen kaynak işlemleri için yeterli mekanik özellikler sunmuş ve TS EN ISO 5817 standardının B sınıfına göre kusursuz olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, S2Si ve S3Mo dolgu metalleri, denizcilik sektöründeki yapı çelikleri için mikroyapı ve mekanik performans açısından uygun seçenekler olarak öne çıkmış; maliyet etkinliği ve darbe dayanımı gereksinimleri dikkate alındığında, bu iki dolgu metalinin farklı uygulama alanlarında kullanılması önerilmiştir.(Varol et al., 2024)

Ólafsson ve arkadaşları, gemi ve deniz yapılarında kullanılan tozaltı ark kaynağı (SAW) örneklerinin kalınlıklarına göre yorgunluk dayanımları değerlendirilmiştir. Çalışmada, 25 mm'den kalın kaynaklı eklerin yorgunluk dayanımının daha ince örneklerle benzer seviyede olduğu, 20 mm kalınlığındaki örneklerin ise en yüksek yorgunluk direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. 40 mm kalınlığındaki örnekler, 30 mm kalınlıktakilere kıyasla daha üstün bir yorgunluk dayanımı göstermiştir. Sonuç olarak, kalınlık etkisinin beklenenden daha düşük seviyede olduğu saptanmıştır.(Ólafsson, 2016)

Anandavijayan ve arkadaşları, S355 yapısal çeliğin ön gerilmenin yorgunluk ömrü ve çatlak büyüme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tek eksenli yorgunluk ve yorgunluk çatlak büyüme testleri, çeşitli ön gerilme seviyelerinde uygulanmış ve sonuçlar gerilme uygulanmamış malzeme ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, yorgunluk ömrünün artan ön gerilme seviyesiyle azaldığını, ancak çatlak ilerleme hızının büyük ölçüde sabit kaldığını göstermiştir. S-N eğrilerinde, %0 ve %5 ön gerilme seviyelerinde çift eğim gözlemlenmiş ve bu eğim

değişikliği yaklaşık 600.000 döngüde meydana gelmiştir. %10 ön gerilmiş malzeme için, daha düşük gerilim seviyelerinde ikincil bir eğim tanımlanmalıdır. Testler, çekme geriliminin akma geriliminin altında kaldığı durumlarda, yorgunluk hasarının mekanik davranış üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Sonuçlar, malzemenin ön gerilmesinin yorgunluk çatlakları ilerleme davranışını etkilemediğini, ancak ön sıkıştırma etkilerinin daha fazla araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır.(Anandavijayan, 2021)

Erden ve arkadaşları, tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak S235JR yapı çeliği ve Hardox HiTuf çeliği ile üç farklı kaynaklı bağlantı oluşturulmuştur. Tüm bağlantılar için aynı kaynak parametreleri (325 A, 30-32 V) kullanılmıştır. Sertlik testlerinin sonuçlarına göre, Hardox HiTuf çeliği ile yapılan bağlantıların daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Makro ve mikroyapı analizleri, Hardox çeliğinde ITAB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) bölgesinin S235JR çeliğine kıyasla daha dar olduğunu ortaya koymuştur; bu durum, Hardox çeliğinde Mo, Nb, V ve B gibi tane büyümesini engelleyen elementlerin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Hardox HiTuf çeliğinde molibdenin sertleşme kabiliyetini artırması ve V, Nb, Ti gibi elementlerin karbonitrürlerinin dislokasyon hareketini sınırlaması, daha yüksek sertlik değerlerine katkıda bulunmuştur.(Akif Erden et al., 2018)

Konat ve arkadaşları, S355 çeliğine uygulanan kaynak işlemi ve sonrasındaki ısı işlemlerin malzemenin mikroyapısı ve aşınma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu araştırmada, kaynak işlemi sırasında çeliğin aşınma direncini azaltabilen çeşitli mikroyapıların oluştuğu belirlenmiştir. Ancak, kullanılan önerilen kaynak tekniği ve ısı işlem ile malzemenin hem yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu hem de artan aşınma direnci gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Isıl işlem sonrasında, kaynaklı bağlantının mikroyapısında temperlenmiş martensit ve troosit fazlarının oluştuğu ve bu işlemlerin malzemenin aşınma direncini %20 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu işlemlerin yüzey kalitesini iyileştirerek daha düzgün bir aşınma modeli oluşturduğu ve etkin bakım planlamasına olanak tanıdığı sonucuna varılmıştır.(Konat, 2022)

Başığit ve arkadaşları, S235 yapı çeliği plakalarının tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde kullanılan iki farklı kaynak tozunun (bazik ve rutil-bazik karakterde) mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, 15 mm kalınlığındaki S235 çeliği plakaları, TS EN ISO 14174 standardına göre belirlenmiş olan bazik karakterde SA AB 1 68 AC H5 (baziklik indeksi 1.4) ve rutil-bazik karakterde SA AR 1 77 AC (baziklik indeksi 0.7) tozları ile kaynaklanmıştır. Deneysel analizler kapsamında, mikro-vickers sertlik taramaları, enine çekme testleri ve mikroyapı incelemeleri yapılmış ve her iki tozun da sertlik ve çekme testlerinde başarılı performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, rutil-bazik

tozun, ferritik-perlitik yapıyı iğnemsî bir görünüme dönüştürdüğü, bazik tozun ise daha küresel bir mikroyapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, tokluk gereksinimi duyulan endüstriyel uygulamalarda bazik tozun kullanımının daha uygun olduğunu önermektedir.(Başyigit & Solak, 2020)

Bu çalışmanın amacı, S235JR ve S355J+N yapısal çeliklerinin SG2 kaynak teli kullanılarak, farklı kaynak tozları (BAR, BFB, BFF) ile birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan mekanik özellikler ve mikroyapısal değişiklikleri incelemektir. Çalışmada, çeşitli kaynak tozlarının çeliklerin çekme dayanımı, sertlik dağılımı ve mikroyapısal uyum üzerindeki etkilerini değerlendirmek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, deneysel çalışmalar Vickers sertlik testi, çekme testleri ve çentik darbe testleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar uluslararası standartlar (ISO 6507, ISO 6892-1 ve ISO 148-1) çerçevesinde analiz edilmiştir. Araştırma, farklı kaynak tozlarının çeliklerin performansını nasıl etkilediğini belirleyerek, belirli uygulamalar için en uygun kaynak tozunu seçmenin önemini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

### 3. KAYNAKLI İMALAT YÖNTEMİ

Kaynak (veya kaynaklama), metallerin ve bazı plastiklerin ısı, basınç veya her ikisinin kombinasyonu kullanılarak birleştirilmesi sürecidir. Antik dönemlerde basit metal işleme teknikleriyle temelleri atılan bu süreç, sanayi devrimi ve sonrasındaki teknolojik gelişmelerle birlikte giderek daha karmaşık ve sofistike hale gelmiştir. 21. yüzyılda robotik ve otomasyon sistemlerinin devreye girmesiyle kaynak teknikleri, güvenlik, hız ve verimlilik açısından büyük ilerleme kaydetmiştir. Günümüzde kullanılan kaynak yöntemleri, farklı malzemeler ve uygulama alanlarına göre çeşitlenmiş olup, enerji tasarrufu ve kalite kontrol gibi modern gereksinimlere uyum sağlayacak şekilde sürekli yenilenmekte ve geliştirilmektedir.(Salim Aslanlar, 2009)

#### 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, iki veya daha fazla malzeme parçasının kalıcı bir şekilde tek bir yapı oluşturacak şekilde birleştirilmesini sağlayan bir yöntemdir.(Salim Aslanlar, 2009)

Dolgu kaynağı, bir iş parçasındaki hacim eksikliklerini gidermek, hacmi artırmak veya yüzeyi korozyona ve aşınmaya karşı korumak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem; kaplama, zırlama ve tampon tabaka oluşturma gibi işlemlerle gerçekleştirilebilir. (ANIK, 1991)

#### 3.3. Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Kaynak yöntemleri, genel olarak iki ana kategoriye ayrılır:

- Ergitme Kaynak Yöntemleri
- Katı Hal Kaynak Yöntemleri.(Gencdogan D., 2020)

### 3.3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

Kaynak yöntemleri, temel olarak kaynak bölgesinin ısı etkisiyle eritilmesini ve gerektiğinde dolgu malzemesi eklenerek birleştirmenin dayanıklılığını artırmayı hedefler. İşte bu yöntemlerden bazıları:

**Oksi-Gaz Kaynağı:** Oksi-gaz kaynağında, oksijen ve asetilen gibi yanıcı gazların karışımı yakılarak elde edilen alev ile metal parçalar eritilir ve birleştirilir. Bu yöntem genellikle küçük çaplı tamiratlarda ve ince malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilir.(ANIK, 1991)

**Elektrik Ark Kaynağı:** Elektrik ark kaynağında, bir elektrot ile ana metal arasında oluşturulan elektrik arkı kullanılarak yüksek ısı üretilir. Bu yöntem, genellikle basınç uygulanarak ve dolgu metali eklenerek gerçekleştirilir. Elektrik ark kaynağı, dört farklı çeşidiyle geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.(ANIK, 1991)

**Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı (GTAK/TIG):** Bu teknikte, argon ve helyum gibi inert gazlar koruyucu gaz olarak, tungsten ise elektrot olarak kullanılır. GTAK, yüksek hassasiyet ve kaliteli kaynak dikişleri sunması nedeniyle özellikle ince ve hassas malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilir.(Gencdogan D., 2020)

**Gaz Altı Metal Ark Kaynağı (GMAK/MIG-MAG):** MIG kaynakta argon ve helyum gibi inert gazlar, MAG kaynakta ise oksijen ve karbondioksit gibi aktif gazlar koruyucu olarak kullanılır. GMAK, hızlı ve verimli bir kaynak süreci sağladığı için geniş bir metal yelpazesinde uygulanabilir ve seri üretim işlemleri için idealdir.(Gencdogan D., 2020)

**Toz Altı Ark Kaynağı (TAK):** Bu yöntem, kaynak işlemi sırasında eriyen tozun cüruf oluşturarak kaynak yüzeyini koruduğu bir tekniktir. Koruyucu cüruf, işlem sırasında yüzeyi çevresel etkilere karşı izole eder ve işlem tamamlandığında temizlenir. Çelik kaynak işlemlerinde aktif gazlar da kullanılarak oksitlenme kontrol edilir. TAK, büyük yapısal kaynak işlemlerinde ve uzun, kesintisiz dikişlerin gerektiği projelerde oldukça etkilidir.(Kahraman, 2016)

**Plazma Ark Kaynağı (PAK):** Argon ve helyum gibi inert gazların koruyucu gaz olarak kullanıldığı bu yöntem, yüksek hızda gönderilen gazların plazma oluşturması için 17,000°C'ye kadar ısındığı bir prosestir. PAK, düşük enerji tüketimiyle yüksek enerji sağlaması ve yüksek kaynak hızı sunması nedeniyle, yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin birleştirilmesinde kullanılır.(Kahraman, 2016)

**Elektrik Direnç Kaynağı:** Elektrik direnç kaynağında, metal parçalar belirli bir basınç altında tutulur ve içlerinden elektrik akımı geçirilir. Akımın geçişi sırasında oluşan direnç, parçaların birleşmesi için gerekli ısıyı üretir. Bu yöntem, hızlı ve sağlam birleşmeler sağlayarak çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır.(Kahraman, 2016)

Bu yöntemlerin her biri, belirli malzemeler ve uygulama gereksinimlerine uygun çözümler sunar, böylece kaynak işlemleri daha verimli ve güvenilir hale gelir.(Kahraman, 2016)

### 3.3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Bu yöntemlerde basınç ve/veya ısı kullanılır, ancak bu ısı malzemeleri eritme derecesine ulaşmaz. Bunun yerine, malzemelerin yumuşatılarak atomlar arası difüzyonu kolaylaştırması amaçlanır.(Pereira & Silva, 2021)

**Difüzyon Kaynağı:** Isı ve basınç kullanılarak malzemeler arasındaki atomların daha kolay hareket etmesi ve birbirine nüfuz etmesi sağlanır, böylece kaynak işlemi gerçekleştirilir.(Pereira & Silva, 2021)

**Sürtünme Kaynağı:** Bu teknikte, iki parçanın birbirine göre hareket ettirilmesiyle ortaya çıkan sürtünme kuvveti ısı üretir. Üretilen bu ısı, basınç altında tutulan parçaların birleşmesini sağlar.(Pereira & Silva, 2021)

**Ultrasonik Kaynak:** Yüksek frekansta titreşimler kullanılarak malzeme yüzeyleri ısıtılır ve basınç altında birbirine kaynatılır. Bu yöntem, genellikle plastikler ve ince metal parçalar için tercih edilir.(Pereira & Silva, 2021)

**Dövme Kaynağı:** En eski kaynak tekniklerinden biri olan dövme kaynağında, ısıtılan parçalar, çekiçleme veya presleme gibi yöntemlerle birbirine bastırılarak atomlar arası difüzyon artırılır.(Pereira & Silva, 2021)

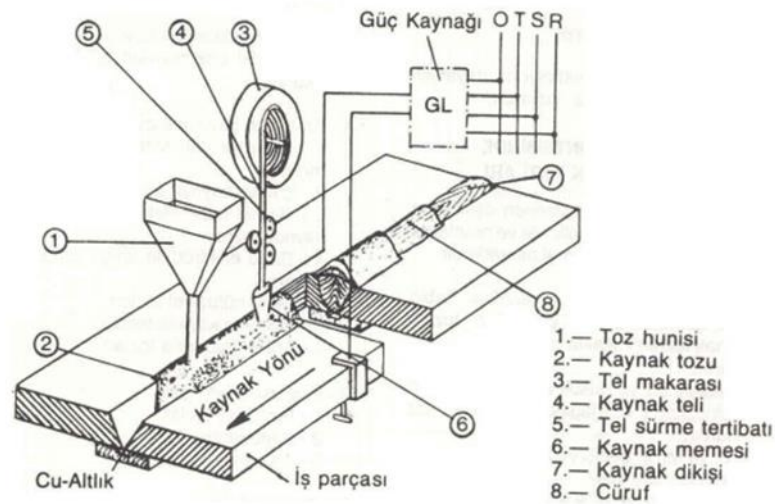
Her iki ana kaynak yöntemi grubu, farklı malzeme türleri ve uygulama alanlarına göre tercih edilir. Ergitme kaynak yöntemleri, yüksek sıcaklık ve genellikle dolgu malzemesi gerektiren işlemler için uygundur. Katı hal kaynak yöntemleri ise malzemeleri eritmeden, daha düşük sıcaklık ve yüksek basınç kullanarak birleştirir. Bu yöntemlerin her biri, spesifik malzeme ve uygulama gereksinimlerine göre dikkatlice seçilmelidir. Endüstriyel uygulamalarda doğru kaynak yönteminin belirlenmesi, birleşen malzemelerin performansını ve dayanıklılığını doğrudan etkiler.(Pereira & Silva, 2021)

## 4. TOZALTI KAYNAĞI

Tozaltı Kaynağı (Submerged Arc Welding - SAW), özellikle büyük ve kalın metal parçaların birleştirilmesinde kullanılan bir ergitme kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, kaynak işlemi esnasında elektrot ile metal arasında oluşan ark, granül haldeki bir toz tabakası altında gerçekleşir. Toz, kaynak sırasında arkı çevresel etkilerden korur ve eriyerek cüruf tabakası oluşturur, bu da temiz ve kaliteli kaynak dikişleri elde edilmesini sağlar. Yüksek verimlilik, derin penetrasyon ve düşük ışık yayılımı gibi avantajları sayesinde tozaltı ark kaynağı, gemi inşası, boru hatları, köprüler ve ağır çelik yapılar gibi büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir.(Hakan ADA, 2006)

### 4.1. Tozaltı Kaynağı Çalışma Prensibi

Tozaltı Kaynağı (SAW), çalışma prensibi olarak, bir kaynak teli (elektrot) ve kaynak yapılacak malzeme arasında oluşturulan elektrik arkının, bir granül toz tabakası altında tutulmasıyla gerçekleşir. Arkın ürettiği ısı, hem elektrotu hem de malzeme yüzeyini eriterek birleştirme işlemini sağlar. Bu sırada granül toz, eriyerek koruyucu bir cüruf tabakası oluşturur ve ark bölgesini dış etkenlerden izole eder, oksitlenmeyi engeller. Dolgu metali sağlayan elektrot sürekli olarak beslenirken, cüruf soğuma sırasında katılarak kaynak dikişini korur ve sonrasında temizlenir. Bu yöntem, yüksek verimli, derin penetrasyonlu ve kaliteli kaynak dikişleri oluşturmayı hedefler. (Pereira & Silva, 2021)



Şekil 4.1. Tozaltı Ark Kaynağı Şematik Diyagramı (Emin Kulahlı, 1988)

## 4.2. Tozaltı Kaynağı Başlıca Kullanım Alanları

Tozaltı Kaynağı (SAW), geniş bir uygulama alanına sahip olan ve özellikle büyük ve dayanıklı yapıların üretiminde kullanılan bir kaynak yöntemidir. Bu teknik, gemi yapımı, basınçlı kaplar, depolama tankları, çelik konstrüksiyonlar, demiryolu vagonları, otomotiv sanayisindeki çeşitli bileşenler, boru üretimi, çelik yapılar ve köprülerdeki kolon ve kirişler ile inşaat makineleri gibi birçok sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu yöntem, özellikle karbon çelikleri, düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, bakır ve bakır alaşımlarının birleştirilmesinde oldukça etkilidir. Alüminyum ve titanyum gibi malzemeler için özel tozlar geliştirilmiş olmasına rağmen, bu metallerin tozaltı kaynağı ticari ölçekte yaygınlaşmamıştır. Ayrıca, dökme demirin soğuk kaynağı için bu yöntem uygun değildir. Yüksek ve orta karbonlu çelikler ile bazı alaşımlı çelikler de tozaltı ark kaynağı yöntemiyle birleştirilebilir, ancak pratik uygulamalarda bu malzemelerin kullanımı sınırlı kalmaktadır. Deneysel çalışmalarda ise, bakır, nikel alaşımları ve uranyumun kaynağında bu yöntemin potansiyel olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.(Celasun, 2012)

## 4.3. Tozaltı Kaynağı Avantaj ve Dezavantajları

### 4.3.1. Tozaltı Kaynağı Avantajları

- Yüksek kaynak hızı sunarak üretim süreçlerini hızlandırır.
- Kaynak sırasında elde edilen derin nüfuziyet, birleşimlerin güçlü ve dayanıklı olmasına katkı sağlar.
- Kaynak dikişlerinin kalitesi yüksektir ve düzgün, estetik dikişler elde edilir.
- Kaynak bölgesini koruyan toz tabakası sayesinde daha az temizlik yapılması gerekir ve işlem sonrasında daha az cüruf oluşur.
- Arkın toz altında olması, kaynak sırasında duman ve sıçramayı minimuma indirir, böylece daha temiz bir çalışma ortamı sağlar.
- Hem yarı otomatik hem de tam otomatik kaynak sistemlerinde kullanılabilir, verimliliği artırır.
- Elektrik enerjisinin büyük bir kısmı (%68'e kadar) doğrudan kaynak işlemine yönlendirilir, bu da yöntemin verimliliğini artırır.
- Düşük karbonlu çelikler, alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, bakır ve bakır alaşımları gibi çeşitli metallerin kaynağında etkili bir şekilde kullanılabilir.(ANIK Selahattin, 2020)

### 4.3.2. Tozaltı Kaynağı Dezavantajları

- Genellikle yatay pozisyonlar için uygun olup, dikey veya tavan pozisyonlarında kullanımı zordur.
- Fluxun uygulanması ve geri kazanımı işlemleri ek karmaşıklık yaratabilir, bu süreçler iyi yönetilmezse verimlilik azalabilir.
- Tozaltı ark kaynağı ekipmanlarının başlangıç maliyeti yüksek olabilir.
- Çok ince malzemelerin kaynağına uygun değildir; yüksek akım gereksinimi, ince malzemelere zarar verebilir.
- Yüksek akım ve voltaj ihtiyacı nedeniyle, diğer kaynak yöntemlerine göre enerji tüketimi daha yüksektir.
- Büyük ve sabit makine gereksinimi, hareket kabiliyetini kısıtlar.
- Karmaşık ve erişilmesi zor bölgelerde esneklik daha azdır.
- Dökme demir gibi bazı metallerin kaynağında sınırlamalar bulunur ve alüminyum ile titanyum gibi metaller için ticari uygulamalar yaygın değildir.(Tufanoğlu, 2017)

### 4.4. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri

Tozaltı kaynağında (SAW) kullanılan kaynak telleri, kaynağın kalitesini, verimliliğini ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli unsurlardan biridir. Bu teller, genellikle düşük karbonlu çeliklerden, alaşımlı çeliklerden veya paslanmaz çeliklerden yapılır ve farklı çaplarda ve kompozisyonlarda üretilir. Kaynak telinin seçimi, kullanılan malzeme, kaynak yapılacak pozisyon ve hedeflenen mekanik özelliklere göre belirlenir. Ayrıca, kaynak teli ile birlikte kullanılan flux (toz) da kaynağın nihai kalitesini belirleyen kritik bir faktördür. Doğru tel ve flux kombinasyonu, kaynak işleminin stabilitesini artırarak dikiş kalitesini iyileştirir ve süreçteki hataları en aza indirir.(Bhaduri, 2006)

S2 kaynak teli, özellikle tozaltı ark kaynağı uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir tel türüdür. Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerden üretilen bu tel, yüksek mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahip olup, düşük hidrojen emisyonlarıyla dikkat çeker. S2 telinin kimyasal bileşimi, %0.07- 0.12 karbon, %0.9 - 1.4 mangan, ve %0.025 - 0.045 silisyum gibi elementlerden oluşur, bu da telin kaynak dikişlerinde yüksek mekanik dayanım ve darbe direnci sağlamasına olanak tanır. Genellikle otomotiv endüstrisi, gemi inşaatı, çelik konstrüksiyonlar ve basınçlı kap imalatı gibi alanlarda kullanılır. S2 teli, düşük sıçrama oranı ve düzgün bir ark karakteristiği sunarak, yüksek kaliteli kaynak dikişleri elde edilmesine olanak sağlar. Bu

özellikler, kaynak sürecini daha verimli ve güvenilir kılar, aynı zamanda maliyetleri düşürür ve işçilik gereksinimlerini azaltır.(Gedik Kaynak S2, 2024)

#### **4.5. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları**

Tozaltı kaynağında (SAW) kullanılan kaynak tozları, kaynak işlemi sırasında elektrot örtüsü gibi davranarak, kaynak banyosunun korunmasını, dikişin form almasını ve soğuma sürecinin kontrol edilmesini sağlar. Bu tozlar, kaynak sırasında eriyerek kaynak dikişinin üzerini kaplayarak, hava ile teması keser ve oksidasyonu engeller. Ayrıca, kaynak dikişine istenen şekli verir ve soğuma hızını kontrol ederek olası çatlakların oluşumunu önler. Metalurjik açıdan ise kaynak banyosuna katılan elementler sayesinde, yanma sırasında kaybedilen bileşenlerin telafisi sağlanır, böylece metalin kimyasal bütünlüğü korunur ve kaynak dikişinin mekanik özellikleri iyileştirilir.(Mitsuo Oyama, 1993)

##### **4.5.1. Eliflux BAR Kaynak Tozu**

Eliflux BAR, tozaltı kaynak işlemlerinde kullanılan ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren karbonlu ve alaşımlı çeliklerin kaynağı için ideal bir kaynak tozudur. Bu flux, yüksek akım yoğunluklarında bile stabil bir ark sağlayarak, derinlemesine nüfuziyetli ve sağlam bir kaynak dikişi elde edilmesine yardımcı olur. Eliflux BAR, düşük cüruf oluşumu ve kolay cüruf kaldırma özellikleriyle temiz ve düzgün bir kaynak yüzeyi sağlar. İçeriğindeki özel bileşenler, kaynak sırasında oksitlenme, azotlanma ve benzeri istenmeyen kimyasal reaksiyonları en aza indirir, böylece kaynak metalinin mekanik özelliklerini optimize eder. Geniş bir akım aralığında ve farklı kaynak pozisyonlarında kullanılabilmesi, Eliflux BAR'ı çeşitli endüstriyel uygulamalar için güvenilir ve dayanıklı bir flux haline getirir. Özellikle, yüksek dayanıklılık, çatlama direnci ve düşük sıcaklık tokluğu gerektiren uygulamalarda, kaynak kalitesini artırır ve performansı iyileştirir. Eliflux BAR'ın baziklik oranının 0.7 olması, kimyasal reaksiyonların kontrol edilmesine ve kaynak metalinin özelliklerinin korunmasına önemli ölçüde katkı sağlar.(Gedik Kaynak BAR, 2024)

##### **4.5.2. Eliflux BFF Kaynak Tozu**

Eliflux BFF, özellikle karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynak işlemlerinde tercih edilen ve tozaltı kaynak yönteminde yüksek performans gösteren bir flux türüdür. Düşük cüruf oluşumu sağlayarak kaynak dikişinin temiz ve düzgün olmasını destekler. Eliflux BFF, stabil bir ark oluşturarak kaynak sırasında derinlemesine nüfuziyet ve homojen bir dikiş sağlar. Yüksek ergime sıcaklığına sahip bileşenleri sayesinde, kaynak sırasında istenmeyen oksidasyon ve azotlanma gibi kimyasal reaksiyonların oluşumunu minimuma indirir. Ayrıca, geniş bir akım aralığında ve farklı kaynak pozisyonlarında kullanılabilir, bu da onu yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir. Eliflux BFF'nin

baziklik oranının 3.0 olması, bu fluxın kimyasal dengesi ve kaynak sırasında sağladığı koruyucu özellikler açısından da önemli bir avantaj sunar. Bu nitelikleri, Eliflux BFF'nin endüstriyel uygulamalarda güvenilir ve uzun ömürlü bağlantılar için tercih edilmesine katkıda bulunur.(Gedik Kaynak BFF, 2024)

#### **4.5.3. Eliflux BFB Kaynak Tozu**

Eliflux BFB, tozaltı kaynak yönteminde kullanılan ve karbonlu ile düşük alaşımli çeliklerin kaynağında yüksek performans gösteren bir kaynak tozudur. Kaynak işlemi sırasında düşük cüruf viskozitesi sağlayarak, kaynak dikişinin kolay temizlenmesine ve düzgün bir yüzey elde edilmesine katkıda bulunur. Eliflux BFB, yüksek ark stabilitesi ve güçlü nüfuziyet özellikleri sunarak, kaynak dikişinin homojenliğini ve dayanıklılığını artırır. Özel bileşenleri sayesinde, kaynak sırasında meydana gelebilecek oksitlenme ve diğer istenmeyen kimyasal reaksiyonları en aza indirerek kaynak kalitesini yükseltir. Geniş akım aralığında ve çeşitli kaynak pozisyonlarında kullanılabilirliği, Eliflux BFB'yi çok yönlü ve farklı endüstriyel uygulamalar için uygun hale getirir. Özellikle, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren kaynak uygulamalarında uzun ömürlü ve güvenilir bağlantılar sağlar. Eliflux BFB'nin baziklik oranının 1.4 olması, kaynak sırasında kimyasal reaksiyonların kontrol altına alınmasına ve kaynak kalitesinin artırılmasına yardımcı olan önemli bir özelliktir.(Gedik Kaynak BFB, 2024)

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

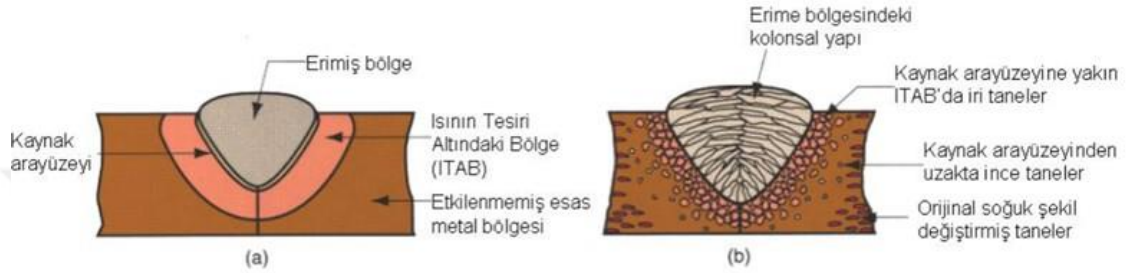
Kaynak tozlarının kimyasal ve fiziksel özellikleri, kaynak işlemi ve nihai ürün üzerindeki etkileri açısından büyük önem taşır. Eliflux BAR, BFB ve BFF tozları, farklı bileşenleri ve yapılarıyla, kaynak işlemi sırasında çeşitli avantajlar sunar.

Eliflux BAR tozu, mangan ve silisyum gibi elementlerin yüksek oranlarıyla öne çıkar ve kaynak dikişinin mukavemetini artırırken, yüzey kalitesini iyileştirir. Ayrıca, bu toz düşük hidrojene sahip olduğu için çatlama riskini minimize eder. Eliflux BFB tozu ise orta seviyede mangan içeriğiyle dengeli bir mekanik performans sunar ve genel amaçlı uygulamalar için uygundur. Soğuma sürecini yavaşlatarak çatlakların oluşumunu önler ve kaynak dikişinin düzgün bir form almasını sağlar. Eliflux BFF tozu, ince taneli yapısı ve düşük karbon içeriği ile dikkat çeker; bu özellikleri sayesinde, yüksek tokluk ve çatlama direnci sağlar. Aynı zamanda, homojen bir kaynak dikişi oluşmasına katkıda bulunur ve dikişin metalurjik bütünlüğünü korur.(Gedik Kaynak BAR, 2024; Gedik Kaynak BFB, 2024; Gedik Kaynak BFF, 2024)

Bu tozların kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri, kullanım alanına ve istenen kaynak dikişi özelliklerine göre seçilerek, kaynak kalitesini ve performansını optimize eder.

#### 4.7. Tozaltı Kaynağında Bölgesi

Tozaltı kaynak yönteminde dikiş geometrisi; dikiş genişliği, yüksekliği ve nüfuziyet derinliği gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. Hem iç hem de dış dikiş formları, nüfuziyet derinliği, ergime genişliği ve dikiş yüksekliği ile karakterize edilir. Dikiş formu, kaynak parametrelerinin doğru seçimiyle geniş bir aralıkta değişebilir ve istenen kaynak kalitesine uygun olarak optimize edilebilir.(Celasun, 2012)



Şekil 4.2. Kaynak Bölgesinin şematik gösterimi (Celasun, 2012)

##### 4.7.1. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisini Etkileyen Faktörler

Tozaltı kaynak yönteminde, dikiş formu ve kalitesini belirleyen birçok faktör bulunmaktadır. Akım şiddeti, nüfuziyetin derinliği üzerinde en etkili unsurlardan biridir; bu nedenle, parçanın kalınlığına uygun bir akım seçilmelidir. Ark gerilimi, ark boyunu ve dolayısıyla dikiş genişliğini doğrudan etkilerken, doğru gerilim ayarı kullanılacak toz türüne göre yapılmalıdır. Kaynak hızı, ergimiş banyonun büyüklüğünü ve dolayısıyla dikişin görünümünü etkiler; düşük hızlar daha geniş bir banyo ve kaba bir dikişe yol açarken, yüksek hızlar nüfuziyeti azaltabilir ve kaynak kusurları oluşturabilir. Kaynak ağzının açısı, nüfuziyet ve dikiş yüksekliğini değiştirirken, parçanın eğimi ise genellikle 6°'yi geçmemelidir, aksi takdirde nüfuziyet azalabilir. Akım yoğunluğu ve kaynak telinin serbest uzunluğu gibi diğer parametreler de kaynak dikişinin şekli ve kalitesi üzerinde önemli rol oynar. Tüm bu faktörlerin doğru şekilde ayarlanması, istenen kaynak kalitesine ulaşmak için gereklidir. (Nuri Akkaş, 2006)

## 5. YAPI ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Yapı çelikleri, inşaat ve mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılan, mukavemeti yüksek ve dayanıklı malzemelerdir. Bu çelikler, genellikle karbon ve düşük alaşım elementlerinden oluşur ve mekanik özellikleri ile kolay işlenebilirliği sayesinde geniş bir kullanım alanı bulur. Yapı çelikleri, çekme ve basınç dayanımlarıyla öne çıkar, bu da onları ağır yük taşıyan yapı elemanları için ideal kılar. Ayrıca, bu çeliklerin kaynaklanabilirliği yüksektir; bu özellik, yapısal bağlantıların güvenli ve sağlam bir şekilde birleştirilmesine olanak tanır. Yapı çelikleri, farklı çevresel koşullara karşı da oldukça dirençlidir ve bu sayede, uzun ömürlü ve güvenilir yapılar inşa etmek için tercih edilir. Malzemenin homojen yapısı ve stabilitesi, deprem ve diğer dinamik yükler altında güvenli performans sergilemesini sağlar. Yapı çelikleri, esneklikleri ve dayanıklılıkları sayesinde modern inşaat teknolojilerinde vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.(Yildirim, n.d.)

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

S235JR yapı çeliği, düşük karbon içeriği ve iyi kaynaklanabilirliği ile öne çıkan, genel amaçlı bir yapısal çelik türüdür. Özellikle inşaat ve mühendislik uygulamalarında tercih edilir; köprüler, binalar, destek yapıları ve çeşitli çelik konstrüksiyonlarda yaygın olarak kullanılır. S235JR, minimum 235 MPa akma mukavemetine sahip olup, orta düzeyde çekme dayanımı sunar ve bu da onu çeşitli yük taşıma kapasiteleri gerektiren yapılar için uygun kılar. Aynı zamanda, bu çelik türü darbeye karşı iyi bir dayanım gösterir ve JR sınıflandırması ile -20°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda darbe dayanımını koruduğunu belirtir. Düşük karbon içeriği sayesinde, S235JR yapı çeliği kolayca şekillendirilebilir ve çeşitli bağlantı yöntemleriyle birleştirilebilir, bu da onu çok yönlü ve işlevsel bir malzeme haline getirir. (Akduman, 2021)

### 5.2. S355J+N (St52) Yapı Çeliği Genel Özellikleri

ST52 veya S355J2+N yapı çeliği, yüksek mukavemet ve iyi süneklik özellikleri ile bilinen bir düşük alaşım yapısal çelik türüdür. "S" harfi, "Structural" (yapısal) anlamına gelirken, "355" minimum 355 MPa akma mukavemetini ifade eder. "J2" sınıflandırması, bu çeliğin -20°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda darbe dayanımına sahip olduğunu gösterir. "N" işareti ise normalleştirme veya kontrollü haddeleme işlemi ile güçlendirilmiş olduğunu belirtir.(Kaya, 2018)

S355J2+N (St52) çeliği, yüksek dayanıklılığı ve iyi kaynaklanabilirliği nedeniyle köprüler, çelik yapı çerçeveleri, vinçler, makineler ve yük taşıyan diğer yapılar gibi çeşitli mühendislik ve inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Yüksek mukavemeti sayesinde, daha ince kesitlerle ağır yükler taşıyabilir ve bu da yapısal elemanların ağırlığını ve maliyetini düşürür. Aynı zamanda, iyi bir süneklik ve darbe dayanımı sunar, bu da dinamik

yükler altında güvenli performans sağlar. Yüksek mukavemet, darbe dayanımı ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde, S355J2+N (St52) yapı çeliği, zorlu çevre koşullarında bile uzun ömürlü ve güvenilir yapılar için ideal bir malzemedir.(Kaya, 2018)



## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

### 6.1. Malzeme

Bu çalışmada, sanayide en çok kullanılan yapı çeliklerinden S235JR (St37-2) ve S355J+N (St52) malzemeleri tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında S235JR ve S355J+N çelikleri hem mekanik özellikleri hem de maliyet ve erişilebilirlik gibi faktörler göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

**Çizelge 6.1.** S235JR çeliğin kimyasal bileşimi (Erdemir S235JR, 2023)

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
S355J+N	0.2	0.03	0.03	0.55	1-1.7	<0.05	<0.025	<0.025	Kalanı

Bu çalışmada S2 kaynak teli kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi çizelge 6.2’te, mekanik özellikleri çizelge 6.3’te verilmiştir.

**Çizelge 6.2.** Deneyde kullanılan kaynak teli ve kimyasal bileşimi(Gedik Kaynak S2, 2024)

	C	Si	Mn
S2 Kaynak Teli	0.12	0.1	1
Eliflux BAR Tozu	0.07	0.6	1.35
Eliflux BFB Tozu	0.07	0.35	1.5
Eliflux BFF Tozu	0.05	0.2	1

**Çizelge 6.2.** 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

Bu çalışmada Eliflux BAR, BFB, BFF kaynak tozu kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 6.3’te verilmiştir.

**Çizelge 6.3.** Deneyde kullanılan kaynak tozlarının özellikleri

Kaynak Tozu	C	Mn	Si	Bazisite
BAR	0.07	0.6	1.35	0.7
BFB	0.05	0.2	1	1.4
BFF	0.07	0.35	1.35	3

## 6.2. Yöntem

Plazma kesim yöntemiyle boyutları 150x200 mm ve kalınlığı 8 mm olan S235JR ve S355J+N çelik levhaların birleştirilmesi için, EN ISO 14174 standardına uygun tozaltı kaynak yöntemi kullanılmıştır. Kaynak işlemi sırasında, levhaların hareket etmesini önlemek amacıyla, plakaların başlangıç ve bitiş noktalarına hurda malzeme puntalanmıştır. Ayrıca, kök kaynağı sırasında EN ISO 17635 standardına göre olası yapışmaları engellemek için altlık malzeme olarak bakır kullanılmıştır.

Kaynak süreci şu adımlarla gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, plazma kesim yöntemi ile hazırlanan malzemelere, EN ISO 9692-1 standardına uygun olarak 45 derece kaynak ağzı açılmıştır. Levhalar, ISO 4063 standardına uygun gaz altı kaynak yöntemi kullanılarak, hurda malzemelerle sabitlenmiştir. Sabitleme işleminin ardından, EN ISO 5817 standardının gerekliliklerini karşılamak üzere, parçaların altına bakır altlıklar yerleştirilmiş ve tozaltı kaynak robotu kullanılarak kaynak işlemine başlanmıştır. Malzemenin arka yüzeyi, EN ISO 8501-1 standardına göre temizlenmiş ve kaynak dikişi görünene kadar taşlanmış, ardından arka yüze de uygun bir kaynak ağzı açılmıştır. Bu bölgeye, EN ISO 3580 standardına uygun tek pasoda tozaltı kaynak işlemi uygulanmıştır. Arka taraftaki kaynak işlemi tamamlanmıştır. Sonuç olarak, malzeme EN ISO 9013 standardına uygun bir şekilde kesim işlemine hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan malzemeler, şeritler halinde kesilmek üzere fleks ve testere kullanılarak şekillendirilmiştir. Bu şeritlerden iki adet çekme numunesi ve altı adet çentik darbe numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, ilgili standartların gerektirdiği boyutlara uygun olarak işlenmek üzere freze tezgahına bağlanmıştır.

Çekme test numuneleri, EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmış olup, her bir numunenin genişliği 10 mm, ölçüm uzunluğu 50 mm ve toplam uzunluğu 200 mm olarak belirlenmiştir. Çentik darbe testi numuneleri ise, EN ISO 148-1 standardına uygun olarak şekillendirilmiştir. Bu numuneler, 8 mm kalınlığında, 10 mm genişliğinde ve 55 mm uzunluğunda olacak şekilde işlenmiş; ortasında V tipi bir çentik açılmıştır. Çentik açısı 45 derece, çentik derinliği 2 mm ve çentik köşe yarıçapı 0,25 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanması sırasında, standartlara uygun ölçümler ve toleranslar dikkate alınmış, testlerin doğru ve güvenilir sonuçlar vermesi için gerekli hassasiyet sağlanmıştır. Standartlara göre, numunelerin ölçüleri 10 mm genişlik, 10 mm kalınlık ve 55 mm uzunluk olarak belirlenmiştir. Ancak, çalışmada kullanılan malzemenin kalınlığının 8 mm olması nedeniyle, kalınlık ölçüsü 8 mm olarak değiştirilmiştir.

**Çizelge 6.5.** Deneysel çalışmada uygulanan kaynak parametreleri (Erden vd., 2018)

Kaynak No	Birleştirilen Çelik Malzemeler	Amper (A)	Gerilim (Volt)	Kaynak Hızı (cm/dakika)
K1	S235JR-S355J+N	377	28.3	20
K2	S235JR-S355J+N			
K3	S235JR-S355J+N			



**Şekil 6.1.** Kamesh Welding tozaltı kaynak robotu kontrol paneli



**Şekil 6.2.** a-BFB tozu ile kayatılan numune b-BFF tozu ile kaynatılan numune c-BAR tozu ile kaynatılan numune

### 6.2.1. Metalografik Çalışmalar

Çekme, mikroyapı ve sertlik testleri için hazırlanan numuneler, ilk olarak flex ile kesilmiş ve ardından Metkon marka Metacut 251 model makine kullanılarak uygun boyutlara getirilmiştir. Flex ile kesim sırasında oluşabilecek ısı girdisinin malzemenin yapısal özelliklerini değiştirme olasılığı dikkate alınarak, numuneler kesim bölgesinin zıt tarafından alınmıştır. Hazırlanan küçük boyutlu numuneler, malzemenin ana metalini, Isı Tesiri Altındaki Bölgeyi (ITAB) ve kaynak bölgesini kapsayacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 6.3. Metkon Metacut 251 Model Kesme Makinesi ile Numune Hazırlama



Şekil 6.4. Eliflux Kaynak Tozları ile Yapılmış Kaynak Dikişi Deney Numuneleri

Mikroyapı incelemelerinin doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmesi için, numune yüzeyinin çiziklerden ve deformasyonlardan tamamen arındırılarak pürüzsüz bir hale

getirilmesi gerekmektedir. Yüzeyin düzgün olmaması durumunda, mikroskop altında malzemenin iç yapısının net bir şekilde gözlemlenmesi mümkün olmaz. Bu amaçla, ilk aşamada Metkon Forcipol-Forcimat zımparalama cihazı kullanılarak, numunenin yüzeyi düşük hızda ve su desteği altında zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi, yüzey tam anlamıyla pürüzsüz hale gelene kadar, sırasıyla 600, 1200 ve 2000 grit zımparalarla aşamalı olarak devam ettirilmiştir. Her bir zımparalama aşamasının ardından, numunenin yüzeyi su ile durulanmış ve ardından alkol ile özenle temizlenmiştir. Son aşamada, aynı makinede zımpara keçesi değiştirilmiş ve yüzey kuru bir şekilde parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra, numuneler sabunla yıkanmış, ardından alkol ile tekrar temizlenerek kurutulmuştur.

Parlatma işlemini takiben, numunelerin mikroyapı incelemesine uygun hale getirilmesi için dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi, malzemenin iç yapısının daha belirgin hale gelmesini sağlamak ve yüzeydeki parlatma izlerini ve deformasyonları gidermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, %98 saf su ve %2 nitrik asit çözeltisi kullanılarak numuneler 1 saniye süreyle dağlanmış, ardından hemen su ile durularak yüzeydeki kimyasal kalıntılar temizlenmiştir. Son olarak, numuneler alkol ile temizlenip kurutulmuştur.

Bu dikkatli ve kontrollü hazırlık adımları, numunelerin mikroskop altında net bir şekilde incelenebilmesi için gerekli koşulları sağlamış ve mikroyapı analizinin doğruluğu ve güvenilirliği açısından kritik önem taşımıştır.



Şekil 6.5. Metkon Forcipol – Forcimat

### 6.2.2. Mikroyapı İncelemeleri

Kaynak işlemi sonrasında gerçekleştirilen metalografik çalışmaların ardından, deney numunelerinin mikroyapı özelliklerini değerlendirmek amacıyla optik mikroskop kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler, numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu çerçevesinde faz yapıları, bu yapıların dağılımları, tane boyutları ve tane sınırlarının yanı sıra,

kaynak işleminin Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ile ana malzeme üzerindeki etkilerini içermektedir. Mikroyapı görüntülerinin elde edilmesinde Olympus GX41 model optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 6.6). Kaynaklı numunelerin ve ana malzemenin mikroyapıları, farklı büyütme oranları kullanılarak ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 6.6. Olympus GX41 Optik Mikroskop

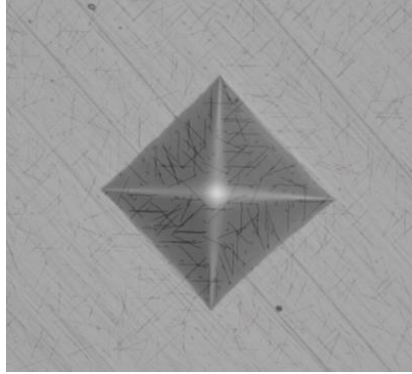
### 6.2.3. Sertlik Ölçümleri

Deney numunelerinde uygulanan tozaltı kaynak yönteminin ardından, ITAB ve kaynak metalinin sertlik değerlerini kaynak parametrelerindeki değişikliklere göre değerlendirmek için mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla, her bir numunede ana metalden kaynak bölgesine doğru sertlik ölçümleri alınmış ve bu parametrelerin sertlik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sertlik ölçümleri, Emco-Test DuraScan G5 cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Emco-Test DuraScan G5

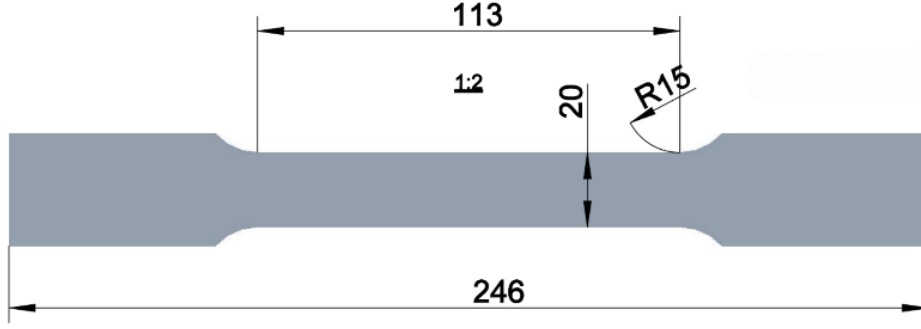
Sertlik ölçümleri, HV 0,5 yük altında mikro sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir ölçümde elmas piramit ucu yaklaşık 10 saniye süreyle numune yüzeyine uygulanmıştır. Bu süre sonunda oluşan iz üzerinden sertlik değerleri otomatik olarak alınmıştır.



Şekil 6.8. Sertlik Ölçümü görünümü.

#### 6.2.4. Çekme Deneyi

Çekme deneyi için numuneler, ISO 5178:2019 standardına ve çekme cihazının çene boyutlarına uygun şekilde, Şekil 6.9'de gösterildiği gibi bir katı modelleme programında tasarlanmıştır.



Şekil 6.9. Çekme çubuklarının ölçülerinin gösterimi

ISO 6892-1 "Metalik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Yöntemi" standardına uygun olarak, ALŞA KTM çekme cihazıyla 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 ayarlanmıştır. Ardından, test cihazı bu ayarlara göre çalıştırılmıştır. Her bir numune için çekme deneyleri, belirtilen parametrelerle üç kez tekrarlanmış ve sonuçlar ortalama değerler olarak rapor edilmiştir.

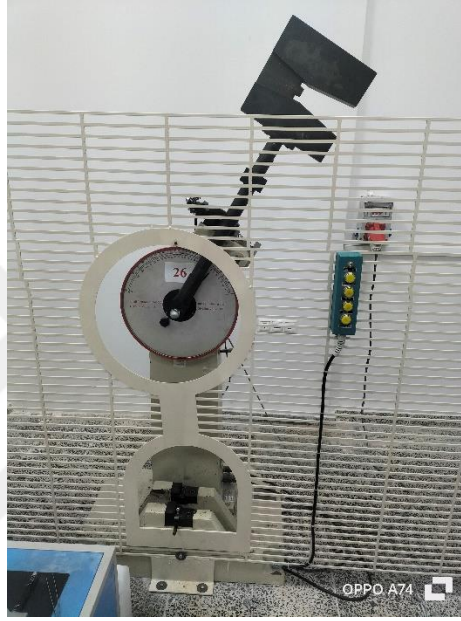


Şekil 6.10. ALŞA KTM Çekme Cihazı

### 6.2.5. Çentik Darbe Testi

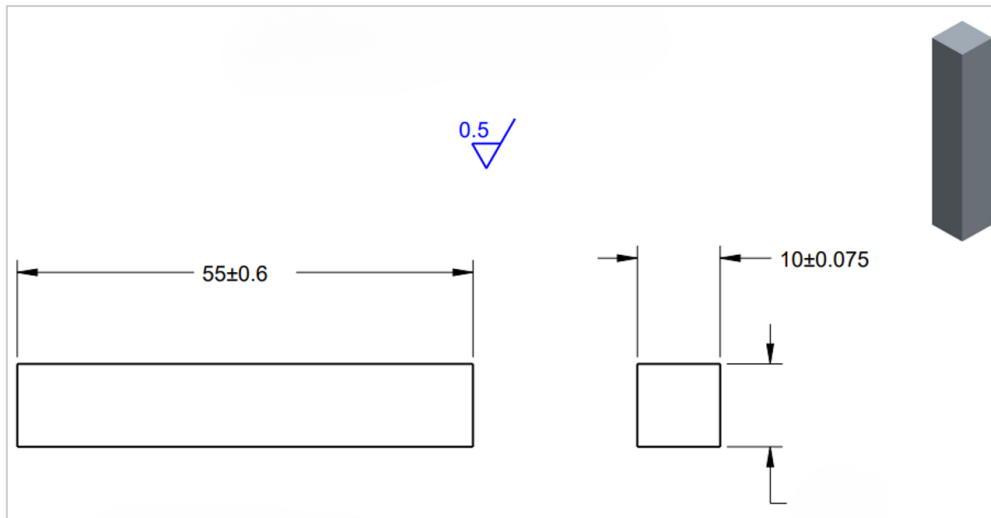
Çentik Darbe Testi (Charpy V-Çentik Testi), metalik malzemelerin darbe dayanımını ve kırılmaya karşı direncini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir ve genellikle ISO 148-1 standardına uygun olarak uygulanır. Bu standart, Charpy V çentik yöntemine göre darbe

testinin nasıl yapılacağını, test cihazının özelliklerini, numune hazırlama işlemlerini, test prosedürlerini ve sonuçların raporlanmasını tanımlar. Testler, sarkaç tipi bir darbe cihazı olan Tescon Charpy Impact JB-W300 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11). Cihaz, ISO 148-1'e göre, numuneyi kırabilecek potansiyel enerji kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmış olup, belirli bir yükseklikten serbest bırakılan sarkaç ile kırılma sırasında emilen enerjiyi ölçer. Demir ve çelik gibi yüksek dayanımlı malzemelerin gevrekliğini test etmek için ideal olan bu cihazlar, bilgisayar kontrollü olup ISO 148-2-1998, ASTM-E23-98 ve GB/T 3808-22-002 standartlarına uygundur.



Şekil 6.11. Tescon Charpy Impact JB-W300 (JB-W300 Charpy Impact Test Cihazı (Bilgisayar Kontrollü))

Test için 10 mm x 8 mm x 55 mm boyutlarında 9 adet numune kesilmiştir.



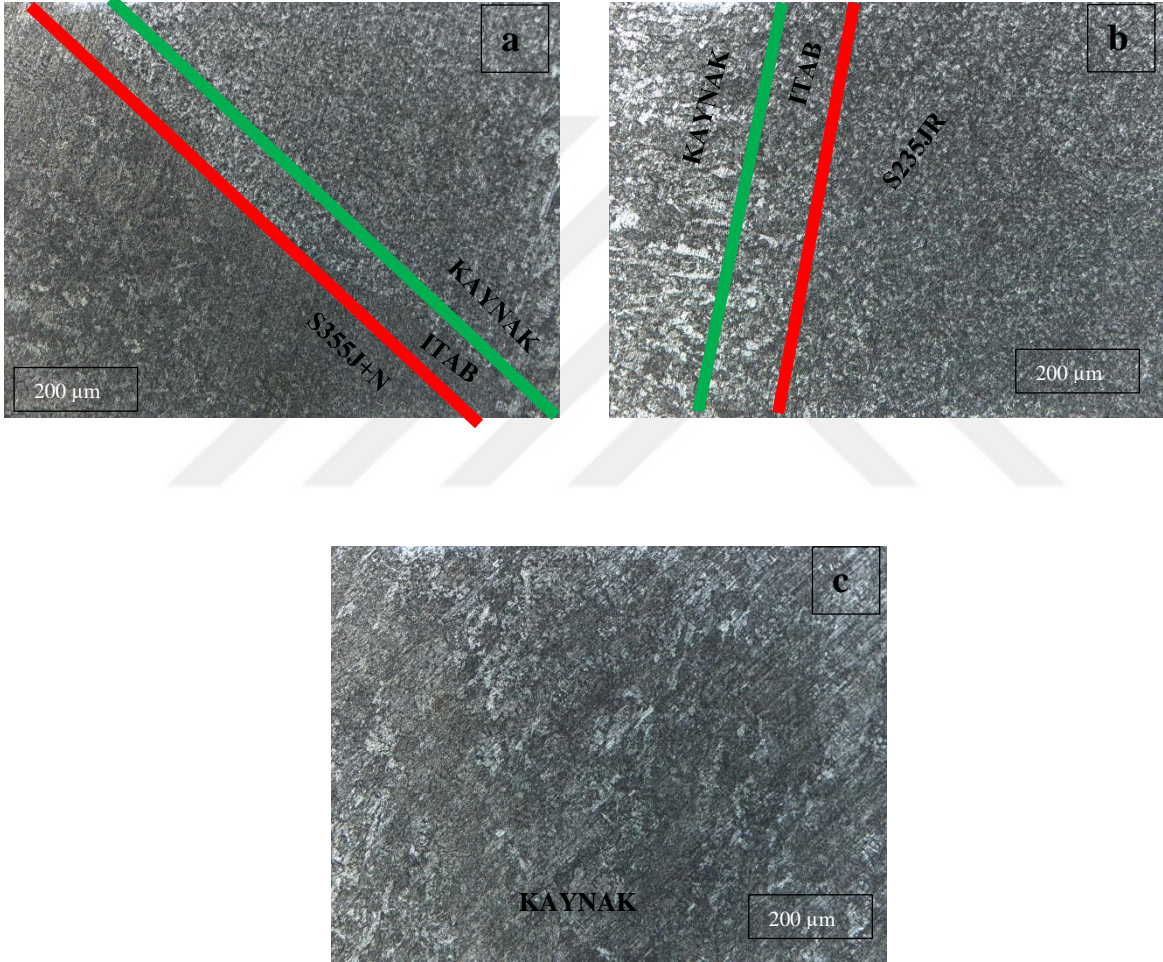
Şekil 6.12. Test Numunesinin Ölçüleri

## 7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 7.1. Mikroyapı Sonuçları

MAG kaynak yöntemi ile alın kaynağı yapılmış S235JR ve S355J+N çeliklerinin optik mikroyapı inceleme sonuçları, Şekil 7.1-7.3'te verilmiştir. Bu görsellerde, ana metal, Isıdan Etkilenmiş Bölge (ITAB) ve kaynak metalinin yer aldığı mikroyapısal farklılıklar detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

#### 7.1.1. Eliflux BAR Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi

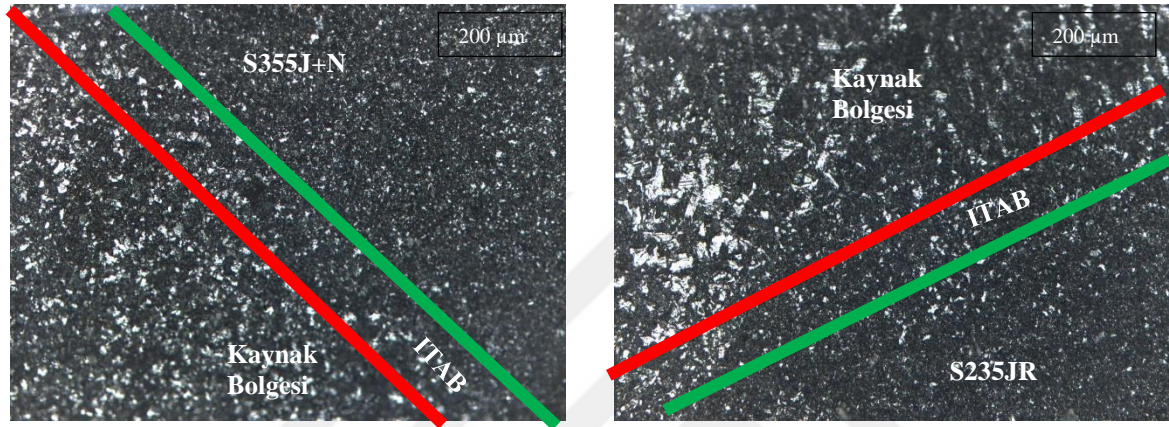


**Şekil 7.1.** a)S355J+N çeliği + ITAB + Kaynak Dikişi Mikro Yapı Görüntüsü  
b)Kaynak Dikişi + ITAB + S235JR çeliği Mikro Yapı Görüntüsü  
c)Kaynak Dikişi Mikro Yapı Görüntüsü

Bar tozu ve S2 kaynak teli kullanılarak S235JR ve S355J+N malzemelerinin birleştirilmesiyle elde edilen kaynaklı yapıda, mikroyapısal inceleme, kaynak bölgesinin farklı özelliklerini ortaya koymaktadır. Sıcaklık etkisi altında kalan ısıdan etkilenen bölgede (ITAB), tane yapısının büyümesi ve dönüşümü gözlemlenmiştir. Bu durum, kaynak sonrası hızlı soğuma

sonucu sert ve gevrek yapıların oluşabileceğini göstermektedir. Ayrıca, kaynak metalinin mikro yapısındaki homojen olmayan dağılım, iç gerilmelerin ve olası çatlak oluşumunun göstergesidir. Bar tozu ve S2 kaynak teli kombinasyonu, genel olarak yeterli mekanik özellikler sağlasa da ince taneli bir yapının korunması için daha kontrollü soğutma süreçlerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.(Başyigit & Solak, 2020)

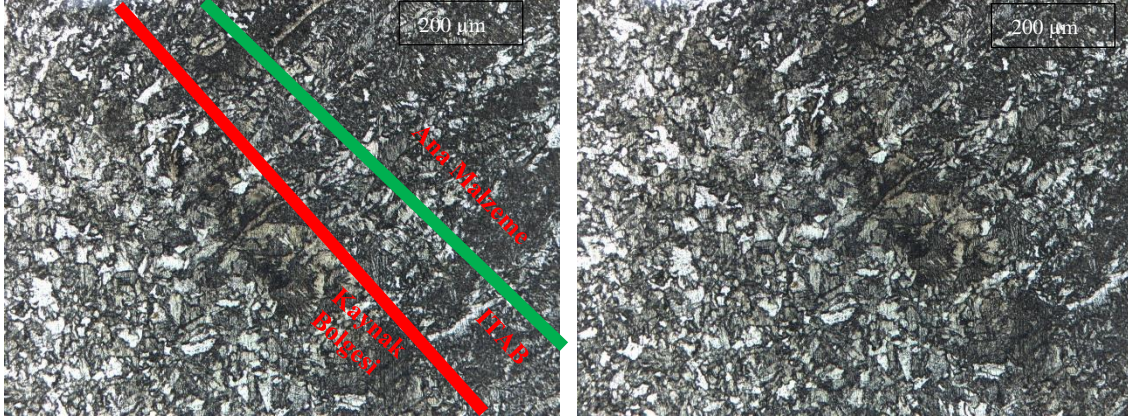
### 7.1.2. Eliflux BFB Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi



**Şekil 7.2** BFB Kaynak Tozu Kullanılarak Hazırlanmış Numunenin Mikroyapısı

BFB tozu kullanılarak kaynak yapılan malzemede mikroyapı incelemesi, kaynak bölgesinde belirgin bir tane yapısı ve faz dönüşümlerinin varlığını göstermektedir. Görsellerde, kaynak metalinde ve ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) dendritik yapıların ve bazı bölgelerde tane büyümesi dikkat çekmektedir. Bu yapı, yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma süreçlerinin etkisiyle gelişen sert ve kırılgan mikro yapıların göstergesidir. Özellikle BFB tozunun kullanımı, kaynak metalinde homojen olmayan bir alaşım elementi dağılımına neden olmuş olabilir, bu da iç gerilmeleri artırarak çatlak oluşum riskini yükseltmektedir. Bu sonuçlar, kaynak sonrası termal işlemlerle tane yapısının rafine edilmesinin ve uygun mekanik özelliklerin elde edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.(Salim Aslanlar, 2009)

### 7.1.3. Eliflux BFF Tozu ile Kaynatılan Numunenin Mikro Yapı İncelemesi



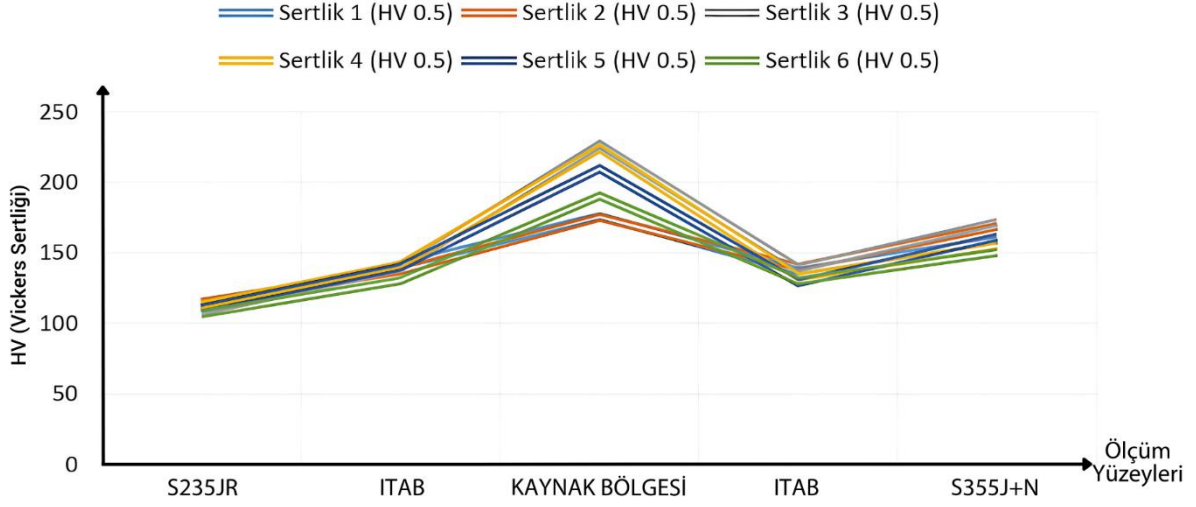
**Şekil 7.3.** BFF Kaynak Tozu Kullanılarak Hazırlanmış Numunenin Mikroyapısı

BFF tozu ve S2 kaynak teli kullanılarak kaynatılan S235JR ve S355J+N malzemelerinin mikroyapı incelemesinde, kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) homojen bir ferritik-perlitik yapı gösterdiği gözlemlenmiştir. Görsellerde, koyu renkli fazlar perlit, açık renkli fazlar ise ferrit olarak tanımlanmıştır. BFF tozu, kaynak metalinde daha düzensiz ve karmaşık bir mikroyapı oluşturmuş olup, bu yapı, kaynak sırasında hızlı soğuma koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bu tür bir yapı, kaynak sonrası malzemenin mekanik özelliklerini etkileyerek, sertlik ve dayanıklılık değerlerinde artışa neden olabilir. Ancak, bu mikroyapıda martenzit veya bainit gibi daha sert fazların oluşmadığı, dolayısıyla kaynak sonrası malzemenin tokluk özelliklerinin korunduğu anlaşılmaktadır.(Başyigit & Solak, 2020)

### 7.2. Sertlik Sonuçları

TS EN ISO 9015-1 standardına göre, esas metal, ITAB (ısıdan etkilenen bölge) ve kaynak bölgesinin beş farklı noktasında Vickers sertlik (HV 0,5) ölçümleri yapılmıştır. Her bir bölgeden altı ölçüm alınarak, bu ölçümlerin ortalamaları hesaplanmış ve sonuçlar Vickers sertlik değerleri olarak sunulmuştur.

## S235JR-BFF-S355J+N



Şekil 7.4. K3 numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri grafiği

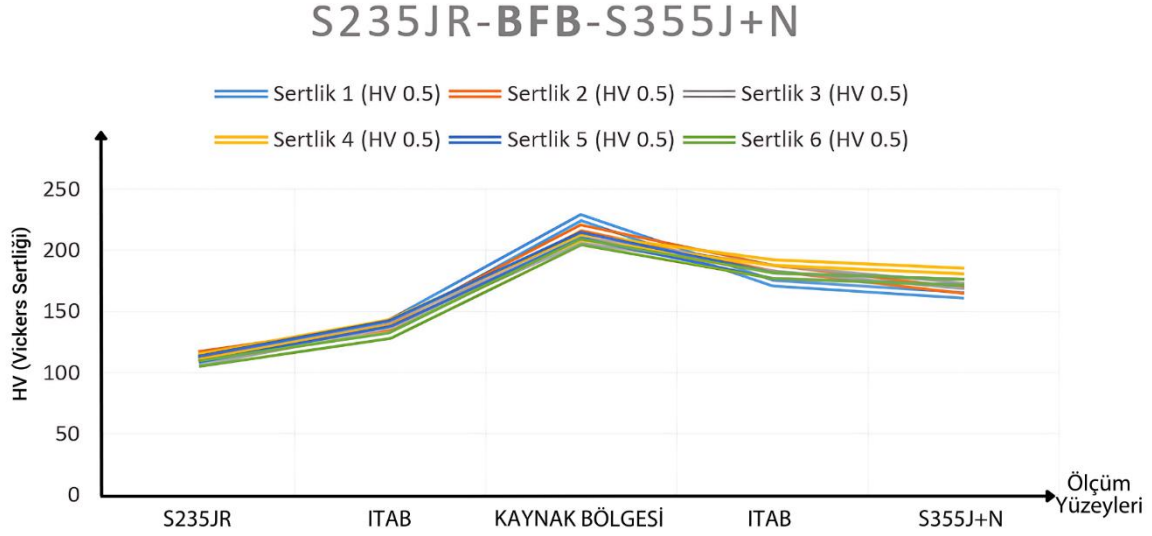
BFF tozu kullanılarak yapılan kaynak işlemi sonrasında elde edilen sertlik dağılımları ve mikro yapı analizlerine odaklandığımızda, sertlik değişimlerinin malzemenin mikro yapısıyla yakından ilişkili olduğu görülmektedir.

Kaynak bölgesindeki sertlik değerlerinin yaklaşık 210 HV'ye ulaşması, bu bölgedeki hızlı soğuma hızlarının etkisini gösterir. Hızlı soğuma, Tane büyümesine yol açar. Bu büyümenin oluşumu, kaynak bölgesinde yüksek sertlik değerlerinin gözlenmesine neden olur. Bu sert yapılar, aynı zamanda malzemenin kırılgenliğini artırabilir, bu da mekanik özelliklerde sertlik artışı ile darbe dayanımı arasında bir ters ilişkiye işaret eder.

ITAB (Isıdan Etkilenen Bölge) bölgesinde sertlik değerlerinin 130-150 HV aralığına düşmesi, bu bölgedeki daha düşük soğuma hızlarının ve buna bağlı olarak tane büyümesinin etkilerini yansıtır. ITAB bölgesi, kaynak bölgesinin hemen yanındaki bölge olduğundan, kaynak sırasında maruz kaldığı ısı etkisiyle taneler büyür ve temperlenmiş yapılar oluşur. Bu yapıların oluşumu, daha düşük sertlik değerleriyle sonuçlanır çünkü büyüyen taneler ve temperlenmiş yapı, malzemenin kırılgenliğini azaltarak daha yumuşak bir yapı oluşturur. Sonuç olarak, ITAB bölgesinde sertlik düşüşü, kaynak sonrası termal çevrimlerin ve soğuma hızlarının farklılığından kaynaklanır.

Bu değerlendirme, kaynak bölgesinde hızlı soğuma nedeniyle oluşan tane büyümesi ITAB bölgesinde daha yavaş soğuma sonucunda oluşan yumuşak ve temperlenmiş yapıların farklı mekanik özellikler sunduğunu gösterir. Yani, BFF tozu kullanılarak yapılan kaynak

işlemi sonrası sertlik değişimleri, mikro yapıdaki faz dönüşümleri ve tane büyüme mekanizmalarıyla doğrudan ilişkilidir.



Şekil 7.5. BFB numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri grafiği

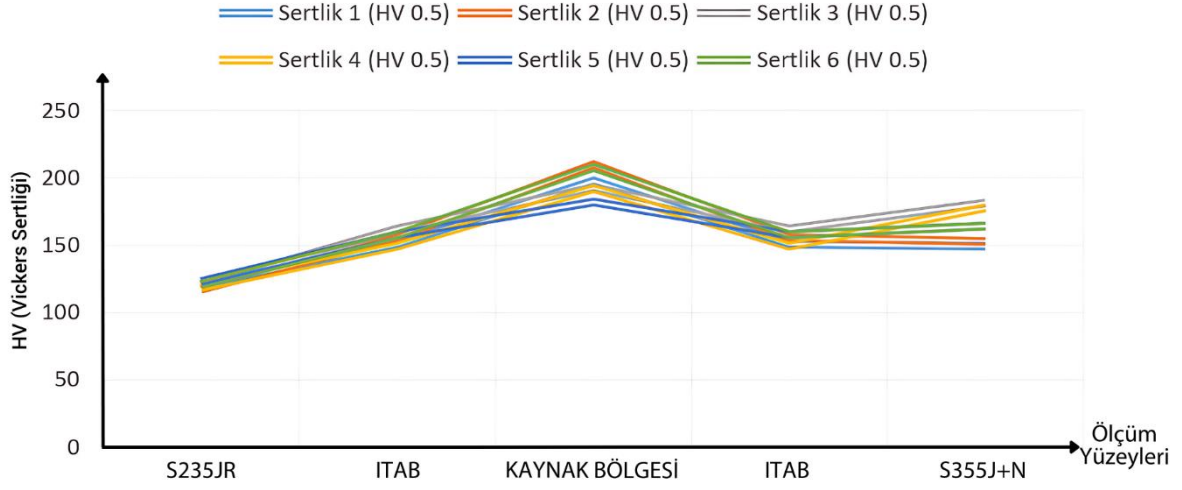
BFB tozu kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrasında elde edilen sertlik profili ve mikro yapısal değişiklikler, malzemenin mekanik özelliklerinin anlaşılmasına dair önemli veriler sunmaktadır. Kaynak bölgesine dik eksen ve çapraz olarak altı farklı noktadan alınan sertlik ölçümleri, kaynak metalinde sertlik değerlerinin 200 HV'nin üzerinde olduğunu, ısıdan etkilenmiş bölgelerde (ITAB) ise 130-150 HV aralığına düştüğünü göstermektedir.

Bu sertlik dağılımı, kaynak bölgesinde daha ince ve yoğun taneli bir mikro yapı oluşumuna işaret etmektedir. Bu bölgede elde edilen yüksek sertlik değerleri, hızlı soğuma sonucu tane büyümesine bağlanabilir. Malzemenin sertliğini artırmakla birlikte, kırılma dayanımını da yükseltmektedir.

ITAB'da sertlik değerlerinin 130-150 HV aralığına düşmesi ise daha yavaş soğuma hızları nedeniyle oluşan tane büyümesiyle ilişkilidir. Bu bölgede meydana gelen tane büyümesi, malzemenin daha yumuşak ve temperlenmiş bir yapı kazanmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, ITAB'da gözlemlenen bu yapı değişiklikleri, malzemenin sertliğini azaltan ancak darbe tokluğunu artıran bir etki yaratmaktadır.

Bu bulgular, BFB tozu ile gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrasında malzemenin sertlik ve mikro yapısal özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri açıklamakta, kaynak sonrası istenen mekanik özellikleri elde edebilmek için termal işlem parametrelerinin optimize edilmesine yönelik değerli bilgiler sunmaktadır.

## S235JR-BAR-S355J+N



Şekil 7.6. K1 numunesinin 5 farklı bölge için Vickers sertlik değerleri

BAR tozu kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemi, malzemenin sertlik ve mekanik özellikleri üzerinde belirgin etkiler yaratmıştır. ISO 6507-1 standardına uygun olarak yapılan sertlik testlerinde, kaynak bölgesine dik eksende ve çapraz biçimde altı farklı noktadan ölçülen sertlik değerleri, kaynak metalinde ortalama 200 HV'ye ulaşmış, ITAB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) ise 130-150 HV arasında değişmiştir. Bu sonuçlar, BAR tozunun kaynak bölgesinde daha sert ve ince taneli perlit ve ferrit yapıların oluşumunu desteklediğini, ITAB'da ise daha düşük soğuma hızları nedeniyle oluşan tane büyümesi ve temperlenmiş yapılarla sertlikte bir azalma olduğunu göstermektedir. (Varol et al., 2024) çalışmasında irileşmesi meydana geldiğini oluşturduğunu gözlemlemiştir.

BAR tozu, kimyasal bileşimi ve ergime davranışı ile diğer tozlara göre farklı özellikler sergilemiştir. Özellikle gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde, malzemenin akma dayanımının 405.2 MPa, maksimum gerilmesinin ise 527.8 MPa olduğu ve %23,14 kopma uzaması sağladığı görülmektedir. Bu, BAR tozunun kaynak sonrası yapıda dengeli bir mekanik performans sağladığını göstermektedir. Ayrıca, darbe tokluğu testlerine göre BAR tozu kullanılarak yapılan kaynakların, 125.9 J/cm<sup>2</sup> ile 182.4 J/cm<sup>2</sup> arasında değişen enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu yüksek tokluk değerleri, BAR tozunun kaynak sırasında daha homojen ve sert bir yapı oluştururken, aynı zamanda enerji emme kabiliyetini de koruduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, BAR tozu kullanımı, malzemenin hem sertlik hem de mekanik dayanım özelliklerini iyileştirebilmek için etkili bir seçim olarak öne çıkmaktadır. Kaynak işlemi sırasında oluşan mikro yapı değişiklikleri, malzeme performansının optimize edilmesi açısından BAR tozunun doğru kullanım parametrelerinin belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

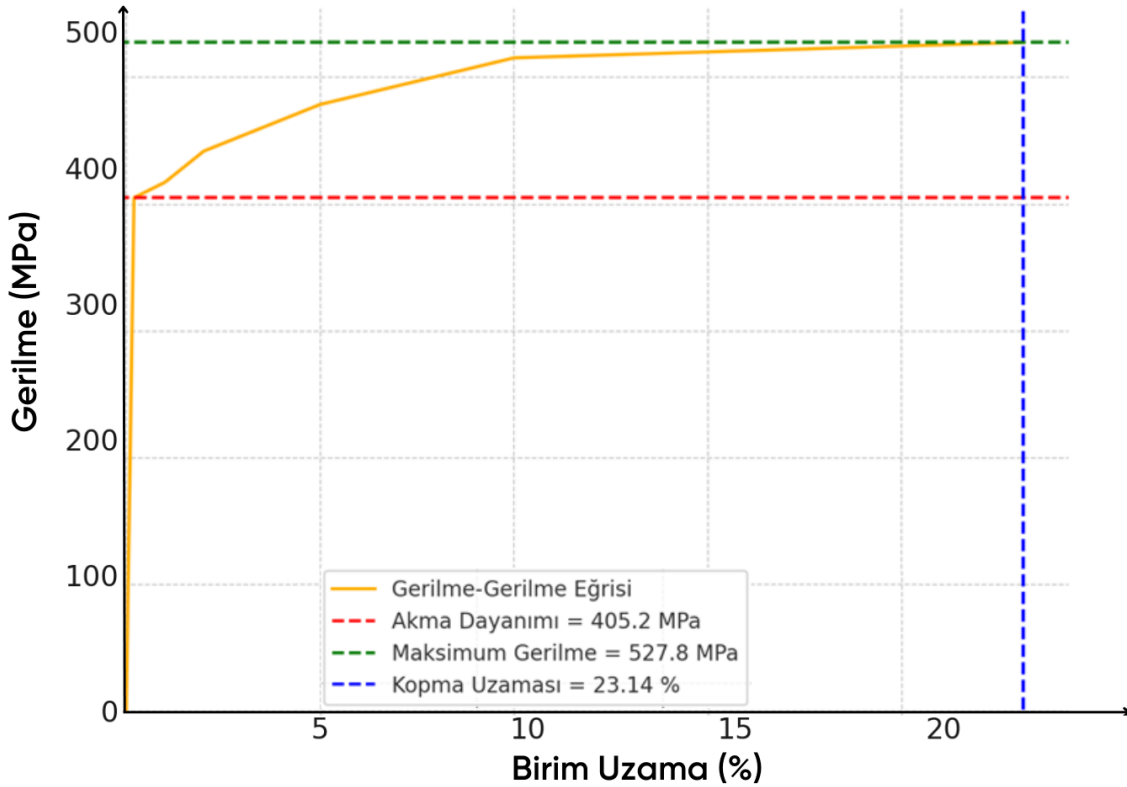
Üç grafikteki sertlik dağılımları, kullanılan tozların baziklik oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek baziklik oranına sahip BFB tozu, kaynak bölgesinde daha yüksek sertlik değerleri oluştururken, ITAB'da daha belirgin bir sertlik düşüşü görülmektedir. Bu durum, BFB tozunun baziklik oranına bağlı olarak sertliği artırdığını, ancak aynı zamanda kırılabilirliği de yükselttiğini gösterir. Diğer tozlar (BAR ve BFF) ise daha düşük baziklik oranlarıyla, kaynak bölgesinde daha dengeli sertlik ve tokluk özellikleri sunarak, mikro yapıda daha fazla ferritik/perlitik fazların oluşmasına neden olur.

### 7.3. Çekme Testi Sonuçları

Çekme test numunelerinde kopmanın, S235JR çeliğin ısı etki altında kalan bölgesi (ITAB) tarafında meydana geldiği belirlenmiştir. Birleştirme kırılma makro resimleri Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Birleştirme kırılma makrografisi



Şekil 7.8. BAR Tozu ile Kaynatılan Numunenin Gerilme-Gerinim Eğrisi

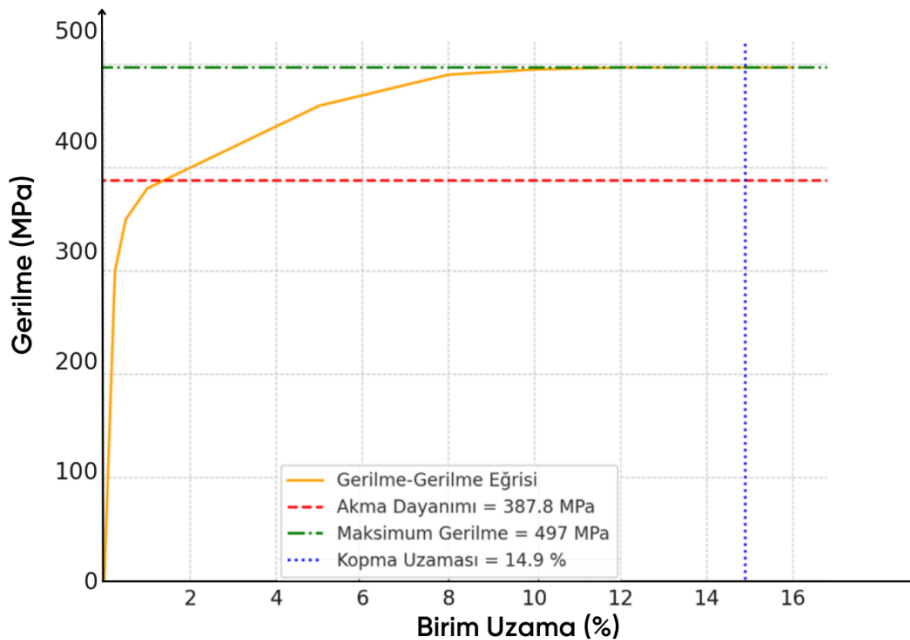
Şekil 7.8. incelendiğinde kaynak işlemi sonrası elde edilen çekme testi grafiği, malzemenin mekanik performansını ve kırılma davranışını anlamak için önemli veriler sunmaktadır. Çekme testi grafiğinde, malzemenin akma dayanımı 405.2 MPa, maksimum gerilme dayanımı 527.8 MPa ve kopma uzaması % 23,14 olarak belirlenmiştir. Elde edilen test verileri EN 10204 standardında belirtilen akma dayanımı (347 Mpa) ve kopma uzama (Max. %32) değerini karşılamaktadır.

Grafik, başlangıçta lineer elastik bir bölgeye sahip olup, yaklaşık 405.2 MPa'lık bir akma dayanımına ulaştıktan sonra plastik deformasyon bölgesine geçmektedir. Malzeme, maksimum gerilme dayanımına (527.8 MPa) ulaşana kadar süneklik gösterir ve bu noktadan sonra deformasyon daha belirgin hale gelir, sonunda kopma gerçekleşir. %23.14 kopma uzaması, malzemenin önemli bir sünekliğe sahip olduğunu ve enerji absorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir. Bu sonuçlar, kaynak işlemi sırasında BAR tozunun homojen bir ergime ve karışım sağlayarak, malzemenin kırılma direncini artırdığını ve dayanıklılığını koruduğunu düşündürmektedir. Bu dayanım artışının sebebi, kaynak metalinin kimyasal bileşiminin, katkı metali ile temel malzeme veya malzemelerin kimyasal bileşimleri arasındaki seyrelme oranına bağlı olarak değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Küçüköner et al., 2020). Bu etkileşim, sertlik değerlerinde gözlenen artışa katkıda bulunur ve elde edilen

sonuçların malzemelerin bileşimleri arasındaki uyumun bir yansıması olarak değerlendirilmesini sağlar.

Mikroyapı görselleri, malzeme içindeki tane yapısını ve kırılma mekanizmasını destekler niteliktedir. Kaynak bölgesi ve ITAB'da gözlemlenen ince taneli yapı, sert ve sünek bir kırılmaya işaret etmektedir. Görseldeki numunenin kırılma yüzeyine bakıldığında, mikroskobik düzeyde hem gevrek hem de sünek kırılma izleri görülmektedir. Numune üzerindeki kırılma yüzeyi, plastik deformasyon bölgelerinin varlığına ve enerji absorpsiyonunun yüksek olduğuna işaret eden belirgin kopma çizgileri mevcuttur.

Standartlar çerçevesinde değerlendirdiğimizde, ISO 6892-1 standardına göre yapılan çekme testleri, malzemenin mekanik özelliklerinin uluslararası kabul görmüş kriterlere uygun olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Malzemenin yüksek kopma uzaması ve gerilme dayanımı değerleri, BAR tozunun kaynak sırasında homojen bir mikro yapı oluşturarak, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, çekme testi sonrasında numunenin sergilediği kırılma tipi, sünek bir kırılma davranışı sergileyen malzemelerin, uygulamada uzun ömürlü performans göstereceğini düşündürmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında, BAR tozunun kaynak sonrası mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki olumlu etkileri, kaynak parametrelerinin doğru seçilmesi ve malzeme performansının optimize edilmesi açısından önemli ipuçları sunmaktadır.

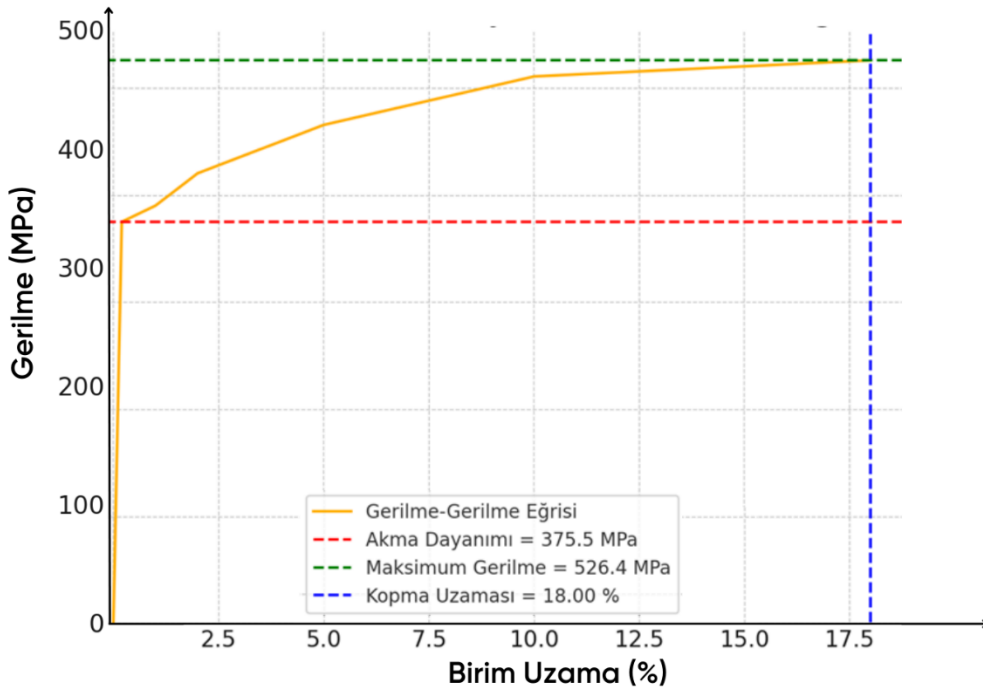


Şekil 7.9. BFB Tozu ile Kaynatılan Numunenin Gerilme-Gerilim Eğrisi

Şekil 7.9 incelendiğinde, malzemenin akma dayanımını 387.8 MPa, maksimum gerilme dayanımını 497 MPa ve kopma uzamasını %14,9 olarak belirlemiştir. Bu değerler, BFB

tozunun kaynak bölgesindeki mikro yapı değişiklikleri üzerinde doğrudan etkisi olduğunu ve malzemenin dayanım ve süneklik özelliklerini belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir.(Kaya, 2018)

Gerilme-gerinim grafiği, malzemenin elastik davranışını başlangıçta lineer bir artışla göstermekte ve 387.8 MPa'lık akma dayanımına ulaştıktan sonra plastik deformasyon bölgesine geçmektedir. Maksimum gerilme noktası olan 497 MPa'ya kadar uzanan eğri, malzemenin yük altında bir miktar süneklik gösterdiğini, ardından kırılma noktasına doğru bir stabilizasyon sürecine girdiğini ortaya koymaktadır. %14,9'lik kopma uzaması değeri, malzemenin sünek kırılma karakteristiğini işaret eder; bu da, enerji absorpsiyon kapasitesinin orta seviyede olduğu anlamına gelir. Mikro yapının doğruluğu, BFB tozu kullanılarak yapılan kaynaklarda, kaynak bölgesinde daha ince taneli ve homojen bir yapının varlığıyla teyit edilmiştir. Mikroyapı analizlerine göre, kırılma yüzeyinde sünek kırılmaya işaret eden belirgin deformasyon çizgileri ve oyuklar gözlemlenmiştir. Bu kırılma yüzeyi, malzemenin plastik deformasyon kapasitesini ve enerji sönümlenme kabiliyetini göstermektedir. Kırılma yüzeyinin sünek karakteri, BFB tozunun malzemenin kaynak bölgesinde daha yoğun bir karışım ve homojen bir mikro yapı oluşturmasını destekler niteliktedir.



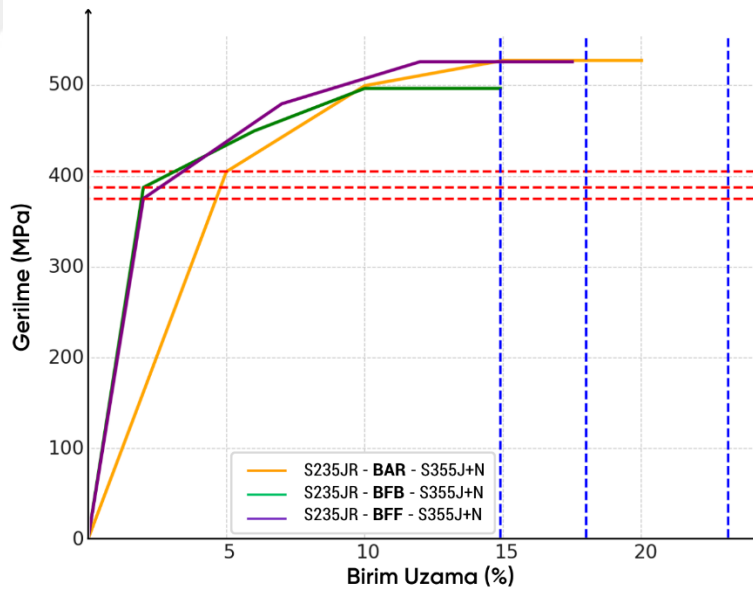
Şekil 7.10. BFF Tozu ile Kaynatılan Numunenin Gerilme-Gerinim Eğrisi

Şekil 7.10.' da malzemenin akma dayanımı 375.5 MPa, maksimum gerilme dayanımı 526.4 MPa ve kopma uzaması %18 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.4). Bu bulgular, BFB tozunun kaynak bölgesinde oluşturduğu mikro yapının dayanım ve süneklik özelliklerini doğrudan

etkilediğini göstermektedir. Grafikte, malzemenin elastik deformasyon bölgesinde 375.5 MPa'lık bir akma dayanımına ulaştığı ve ardından plastik deformasyon bölgesine geçtiği görülmektedir. Maksimum gerilme dayanımının 526.4 MPa'ya ulaştığı noktada malzeme, yük altında önemli bir süneklik sergileyerek deformasyon göstermeye devam etmektedir. Kopma uzamasının %18 olarak belirlenmesi, malzemenin yüksek süneklik kapasitesine sahip olduğunu ve enerji absorpsiyon kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu işaret etmektedir.

Mikroyapı analizleri, BFF tozunun etkisiyle oluşan yapısal değişikliklerin kırılma mekanizması üzerindeki etkilerini doğrulamaktadır. Mikroyapı görüntüleri, BFF tozu kullanılarak yapılan kaynaklarda, kaynak bölgesinde daha yoğun ve heterojen bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Bu yapının karakteristiği, oksit cürufu ve metal oksitlerin varlığı nedeniyle kaynak bölgesinde belirgin bir şekilde gözlemlenen mikro çatlakların ve ince taneli yapıların oluşumudur. Bu durum, çekme testi sırasında gözlemlenen yüksek süneklik ve kopma uzaması ile tutarlıdır; çünkü ince taneli yapı, malzemenin yük altındaki dayanıklılığını ve deformasyon kapasitesini artırmaktadır.

Kaynak işlemi sırasında oluşan mikroyapısal değişiklikler ve çekme testi sonuçları, BFF tozunun doğru kullanım parametreleriyle malzemenin mukavemet ve süneklik özelliklerini dengeleyebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7.11. BAR, BFB ve BFF Tozları ile Kaynatılan Numunenin Gerilme-Gerinim Eğrisi

Grafikteki sonuçlar, kaynak tozunun uzama üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Uzama üzerinde en belirleyici faktör, kaynağa doğrudan dahil olan malzeme olan kaynak telidir. Yapılan değerlendirmelere göre, kaynak telinin kaynakta yaklaşık %80 oranında etkili olduğu, kaynak tozunun ise %20 civarında bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

Bu sebeple, çekme dayanımı, akma sınırı ve uzama değerlerinin birbirine yakın olması, bu oranlardan kaynaklanmaktadır. Düşük baziklik oranına sahip BAR tozu ile yapılan deneylerde en yüksek uzama değerleri elde edilmiştir, ancak kaynak sürecinde asıl belirleyici faktörün kaynak teli olduğu açıkça görülmektedir.

Bu deneyler ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve fiyat-performans açısından BAR tozu en uygun özellikleri sunmuştur. Ancak bu deneylerin  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$  ve  $-60^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda tekrarlanması halinde, kaynak tozlarının etkileri daha belirgin hale gelebilir. Düşük sıcaklıklar, malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler yaratabilir ve özellikle düşük sıcaklık dayanımı ve süneklik gibi parametreler bu koşullar altında daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir. Bu tür çalışmalar, kaynak tozlarının performansını farklı çevresel koşullarda daha net bir şekilde ortaya koyacaktır.

#### 7.4. Çentik Darbe Testi Sonuçları

Çizelge 7.1'deki Çentik Darbe Deneyi Sonuçları incelendiğinde, S235JR ve S355J+N malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen çentik darbe test sonuçları değerlendirilmiştir. Testler, farklı baziklik oranlarına sahip kaynak tozları (BAR, BFB, BFF) kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Malzemeler üzerinde yapılan testlerin sonuçları, darbe tokluğu, absorbe edilen enerji ve kullanılan toz tipine göre ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çizelge 7.1.: Çentik Darbe Deyney Sonuclari

Seri numarası	2024-181404	Kaynak Teli	S2	
Malzeme	S235JR+S355J+N	Sıcaklık	Oda sıcaklığı	
Ölçü	10x8x55	Standart	ISO9001	
Seri No	Darbe Tokluğu J/cm <sup>2</sup>	Absorbe Edilen Enerji Ak(J)	Kesit cm <sup>2</sup>	Toz Tipi
1	172.4	137.9	0.8	BFF
2	167.1	133.7	0.8	BFF
3	162.7	130.1	0.8	BFF
4	79.5	63.6	0.8	BAR
5	75.8	60.6	0.8	BAR
6	112.8	90.3	0.8	BAR
7	182.4	145.9	0.8	BFB
8	125.9	100.7	0.8	BFB
9	139.1	111.3	0.8	BFB

İlk olarak, BAR tozu ile yapılan testler (Seri 4, 5, 6) incelendiğinde, bu tozun baziklik oranının 0,7 olduğu ve bu oranın düşük bir baziklik derecesine işaret ettiği görülmektedir. Test sonuçları, BAR tozunun kullanıldığı malzemelerde darbe tokluğunun ve absorbe edilen enerjinin diğer toz tiplerine göre belirgin bir şekilde düşük olduğunu göstermektedir. Özellikle, 4. seride darbe tokluğu  $79,5 \text{ J/cm}^2$  ve absorbe edilen enerji  $63,6 \text{ J}$  olarak kaydedilmiştir. Bu durum, BAR tozunun malzeme dayanımını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

BFB tozu ile yapılan testler (Seri 7, 8, 9), baziklik oranının 1,4 olduğu ve orta düzeyde bazik bir toz olduğunu ortaya koymaktadır. Test sonuçlarına göre, BFB tozu kullanılan malzemelerde darbe tokluğu ve absorbe edilen enerji değerlerinin, BAR tozuna kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin, 7. seride darbe tokluğu  $182,4 \text{ J/cm}^2$  ve absorbe edilen enerji  $145,9 \text{ J}$  olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, BFB tozunun malzemenin mekanik performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Son olarak, BFF tozu ile yapılan testler (Seri 1, 2, 3) incelendiğinde, baziklik oranının 3 olduğu ve bu oranın yüksek bazik bir toz tipine işaret ettiği görülmektedir. BFF tozunun kullanıldığı malzemelerde, en yüksek darbe tokluğu ve absorbe edilen enerji değerleri elde edilmiştir. Örneğin, 1. seride darbe tokluğu  $172,4 \text{ J/cm}^2$  ve absorbe edilen enerji  $137,9 \text{ J}$  olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, BFF tozunun malzemenin mekanik dayanımını en üst düzeye çıkardığını göstermektedir.

Genel olarak, malzemeler üzerinde yapılan bu testler, baziklik oranının malzeme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Daha yüksek baziklik oranına sahip olan BFF tozu, en iyi mekanik performansı sağlarken, düşük baziklik oranına sahip BAR tozu malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular, kaynak proseslerinde uygun toz tipi seçiminde baziklik oranının kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı kaynak tozları (BAR, BFB ve BFF) kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucunda, S235JR ve S355J+N çeliklerinin mekanik ve mikro yapısal özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan kaynak tozlarının malzemenin sertlik, dayanım, süneklik ve kırılma davranışları üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermiştir.

**BAR Tozu:** Kaynak sonrası yapılan sertlik testleri, BAR tozunun kaynak bölgesinde daha yüksek sertlik (yaklaşık 200 HV) ve daha homojen bir mikro yapı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Bu, malzemenin mukavemet özelliklerinin artırılmasına katkı sağlamıştır. Çekme testi sonuçlarına göre, BAR tozu ile yapılan kaynakların akma dayanımı 405.2 MPa, maksimum gerilme dayanımı 527.8 MPa ve kopma uzaması %23,14 olarak belirlenmiştir. Bu veriler, BAR tozunun kaynak sonrası hem yüksek dayanım hem de süneklik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, darbe tokluğu değerlerinin 60.6 J/cm<sup>2</sup> ile 90.3 J/cm<sup>2</sup> arasında değiştiği belirlenmiştir, bu da enerjiyi absorbe edebilme kapasitesinin diğer tozlara kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir.

**BFB Tozu:** BFB tozu kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde, çekme testi sonuçları, malzemenin akma dayanımını 387.8 MPa, maksimum gerilme dayanımını 497 MPa ve kopma uzamasını %14,9 olarak göstermiştir. Bu değerler, BFB tozunun malzeme üzerinde olumlu bir etki yarattığını ve sünek bir kırılma davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır. Mikro yapı analizleri, BFB tozunun oksit cürufu ve metal oksitler içeren bileşimi sayesinde daha ince taneli ve homojen bir yapı oluşturduğunu göstermiştir. Darbe tokluğu değerleri, BFB tozu kullanılan numunelerde 100.7 J/cm<sup>2</sup> ile 145.9 J/cm<sup>2</sup> arasında değişmekte olup, bu da yapısal değişikliklerin enerjiyi absorbe etme kapasitesini artırdığını göstermektedir.

**BFF Tozu:** BFF tozu kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde, çekme testine göre akma dayanımı 375.5 MPa, maksimum gerilme dayanımı 526.4 MPa ve kopma uzaması %18 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, BFF tozunun kaynak bölgesinde daha heterojen bir mikro yapı oluşumuna yol açtığını ve bu yapının malzemenin dayanım ve süneklik özelliklerini optimize ettiğini göstermektedir. Mikroyapı analizleri, BFF tozunun metal oksit içeriği ve oksit cürufu etkisiyle kaynak bölgesinde ince taneli ve dirençli bir yapı oluşumunu desteklediğini ortaya koymaktadır. Darbe tokluğu değerleri ise 130.1 J/cm<sup>2</sup> ile 172.4 J/cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir, bu da BFF tozunun malzemenin darbe dayanımını en üst düzeye çıkardığını göstermektedir.

Genel olarak, kullanılan kaynak tozlarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri, malzemenin mekanik performansını ve mikro yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Her bir tozun kendine özgü bileşimi ve özellikleri, kaynak sonrası malzemenin farklı mekanik özellikler göstermesine neden olmuştur

## 8.2.Öneriler

**Kaynak Tozu Seçimi:** Kaynak işlemleri sırasında kullanılan tozun seçimi, hedeflenen mekanik özelliklere göre dikkatlice yapılmalıdır. Örneğin, yüksek mukavemet ve süneklik gerektiren uygulamalar için BAR tozu uygun bir seçenek olabilirken, enerji absorpsiyonu ve sünek davranışın ön planda olduğu durumlar için BFB veya BFF tozları tercih edilebilir.

**Mikro Yapı Optimizasyonu:** Kaynak işlemleri sırasında mikro yapının homojenliği ve istenen sertlik profili, uygun kaynak parametreleri ve toz seçimleri ile optimize edilmelidir. Özellikle, BAR tozu kullanıldığında daha yüksek soğuma hızları ve daha ince taneli yapıların oluşumunu sağlamak için kaynak sonrası uygun soğutma stratejileri uygulanmalıdır.

**Isıl İşlem Uygulamaları:** Kaynak sonrası ısıl işlem uygulamaları, mikro yapıdaki heterojenlikleri gidermek ve malzemenin istenen mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılabilir. BFB ve BFF tozları kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde, uygun bir temperleme işlemi ile malzemenin süneklik ve mukavemet özellikleri iyileştirilebilir.

**Darbe Tokluğu ve Dayanım İlişkisi:** Darbe tokluğu ve dayanım arasındaki ilişki göz önünde bulundurularak, belirli uygulamalar için toz bileşimlerinin optimize edilmesi önerilir. Örneğin, BFF tozu kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde, daha yüksek darbe tokluğu değerleri elde etmek için tozun bileşimindeki metal oksit oranları üzerinde çalışmalar yapılabilir.

**Standartlara Uyum ve Güvenlik:** Kaynak işlemlerinde kullanılan malzeme ve toz bileşimlerinin ISO 6892-1 ve ISO 148-1 gibi uluslararası standartlara uygunluğunun sürekli kontrol edilmesi önerilmektedir. Bu, ürün kalitesinin ve güvenliğinin sağlanması açısından önemlidir.

**İleri Analiz ve Testler:** Gelecekteki çalışmalarda, kaynak tozlarının farklı bileşimleri ve bu bileşimlerin farklı malzemeler üzerindeki etkileri üzerine daha fazla deneysel çalışma yapılması önerilir. Bu çalışmalar, kaynak proseslerinin daha da optimize edilmesine ve endüstriyel uygulamalarda daha yüksek performanslı malzemelerin kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

## 9. KAYNAKLAR

- Akduman. (2021). *Düşük karbonlu ST37 yapı çeliğinin ısıtma işlem sonrası yapısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Doctoral dissertation).
- Akif Erden, M., Gündüz, S., Çalgül, U., Boz, M., Üniversitesi, K., Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, T., Fakültesi, T., & Mühendisliği Bölümü, İ. (2018). Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımsız ve hardoks çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması. *Dergipark.Org.Tr*, 33, 221–226. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406794>
- Anandavijayan, S. (2021). Material pre-straining effects on fatigue behaviour of S355 structural steel. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X21001899>
- ANIK. (1991). *Anık, S. (1991). Kaynak tekniği el kitabı: Yöntemler ve donanımlar. Gedik Holding*.
- ANIK Selahattin. (2020). *Tozaltı kaynak tekniği*.
- Aydın SIK. (2007). MIG/MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen çelik malzemelerde ilave tel türleri ve koruyucu gaz karışımlarının eğmeli yorulma ömürlerine etkilerinin araştırılması. In *Cilt* (Vol. 22, Issue 4).
- Başığit, A. B., & Solak, B. (2020). The effects of flux type on mechanical and microstructural properties of s235 structural steel by submerged arc welding. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(2), 659–666. <https://doi.org/10.31202/ecjse.688582>
- Bhaduri. (2006). *Raj, B., Shankar, V., & Bhaduri, A. K. (2006). welding technology for engineers, alpha science international ltd*.
- Celasun, E. (2012). *S355J2 çeliğinin ısıtma işlem ve farklı tozaltı kaynak tellerinin kaynak kabiliyetine etkisinin incelenmesi*. <https://platform.almanhal.com/Details/Thesis/2000133771>
- Ebru Tufanoğlu. (2017). *P460-St52 malzeme çiftinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması*.
- Emin Kulahlı. (1988). *Tozaltı kaynak yöntemi*.
- Erdemir S235JR. (2023). 8X1500XR-s235 - Erdemir. 2023.
- Gedik Kaynak BAR. (2024). *Kaynak tozu-ELIFLUX BAR*.
- Gedik Kaynak BFB. (2024). *Kaynak tozu-ELIFLUX BFB*.
- Gedik Kaynak BFF. (2024). *Kaynak tozu-ELIFLUX BFF*.
- Gedik Kaynak SG2. (2024). *Kaynak teli SG2 mekanik ve kimyasal özellikleri*.

- Gencdogan D. (2020). *Gençdoğan, D. (2020). AISI 430/HARDOX 450 çeliğinin nikel ara tabaka kullanılarak TIG çift taraflı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi (Doctoral dissertation, Adıyaman Üniversitesi).*
- Güler, H., & Özcan, R. (2014). Yüksek karbonlu çeliklere su verme işleminin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Cilt, 19*.
- Hakan ADA. (2006). *Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerin incelenmesi.*
- Kahraman, N. (2016). *Modern kaynak teknolojisi.* <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/843b920b-4c14-4122-a1dc-3913e617f584/modern-kaynak-teknolojisi>
- Kaya, Y. (2018). S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması. *Journal of Polytechnic.* <https://doi.org/10.2339/politeknik.375183>
- Konat, Ł. (2022). Effect of welding technique and thermal heatment parameters on abrasive wear of steel S355. *Yadda.Icm.Edu.PlŁ Konat, B BiałobrzaskaTribologia, 2022•yadda.Icm.Edu.Pl.* <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1021>
- Küçüköner, H., Karakoç, H., & Kahraman, N. (2020). Investigation of microstructure and mechanical properties of AISI2205/DIN-P355GH steel joint by submerged arc welding. *Journal of Manufacturing Processes, 59, 566–586.* <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2020.10.023>
- Mitsuo Oyama. (1993). Welding, brazing, and soldering. *Cir.Nii.Ac.Jp.* <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950398867376384>
- Nuri Akkaş. (2006). *Tozaltı köşe kaynağında yapay zeka teknolojileri kullanılarak dikiş geometrisinin modellenmesi.*
- Ólafsson, Ó. (2016). Experimental investigation of the thickness effect for large as-welded SAW S355 steel specimens. *Orbit.Dtu.DkÓM Ólafsson, JJ Jensen, C Berggreen13th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating, 2016•orbit.Dtu.Dk.* <https://orbit.dtu.dk/en/publications/experimental-investigation-of-the-thickness-effect-for-large-as-w>
- Pereira, A., & Silva, F. (2021). *Handbook of Welding: Processes, Control and Simulation.* <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/18044>
- Ramadan Soncu. (2009). *Çelik platina malzemelere dik pozisyonda tozaltı kaynağı yönteminin uygulama parametrelerinin incelenmesi ve yöntemin modellenmesi.*
- Salim Aslanlar. (2009). *Gemi saclarının kaynak bağlantılarında kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi.*
- Tufanoğlu, E. (2017). *P460-St52 malzeme çiftinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması.* <https://platform.almanhal.com/Details/Thesis/2000038218?ID=4-2000038218>

- Varol, A., Bozan, M. S., Çoban, O., & Gürol, U. (2024). S355J2 yapı çeliklerinin tozaltı ark kaynağında dolgu metalinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 4(2), 426–438. <https://doi.org/10.61112/jiens.1415708>
- Yildirim, D. (n.d.). 2205 dubleks paslanmaz çelik ile S355J2 genel yapı çeliğinin birleştirilebilirliğinin incelenmesi. *Platform.Almanhal.Com*. Retrieved September 4, 2024, from <https://platform.almanhal.com/Details/Thesis/2000023730?ID=4-2000023730>

